

c o l e c c i ó n

INGENIERÍA DEL MEDIO AMBIENTE

TRATADO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Problemas, tratamiento y gestión

MARIANO SEOÁNEZ CALVO
Dr. Ingeniero de Montes



EDICIONES
MUNDI-PRENSA

TRATADO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Problemas, tratamiento y gestión

TRATADO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Problemas, tratamiento y gestión

Mariano Seoáñez Calvo

Dr. Ingeniero de Montes

En la Parte correspondiente a Legislación
y en lo tratado sobre Responsabilidades,
han colaborado:

Elena Bellas Velasco
Bióloga

Pilar Seoáñez Oliet
Licenciada en Derecho



Ediciones Mundi-Prensa

Madrid • Barcelona • México

2002

Grupo Mundi-Prensa

- **Mundi-Prensa Libros, s. a.**

Castelló, 37 - 28001 Madrid
Tel. 914 36 37 00 - Fax 915 75 39 98
E-mail: libreria@mundiprensa.es
• Internet: www.mundiprensa.com

- **Mundi-Prensa Barcelona**

- **Editorial Aedos, s. a.**

Consell de Cent, 391 - 08009 Barcelona
Tel. 934 88 34 92 - Fax 934 87 76 59
E-mail: barcelona@mundiprensa.es

- **Mundi-Prensa México, s. a. de C. V.**

Río Pánuco, 141 - Col. Cuauhtémoc
06500 México, D. F.
Tel. (+52)-5-533 56 58 - Fax (+52)-5-514 67 99
E-mail: resavbp@data.net.mx

© 2002, Mariano Seoáñez Calvo

© 2002, Ediciones Mundi-Prensa

No se permite la reproducción total o parcial de este libro ni el almacenamiento en un sistema informático, ni la transmisión de cualquier forma o cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopia, registro u otros medios sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright..

ISBN: 84-8476-035-9

Depósito Legal: M. 7.811-2002

Impreso en España

Imprime: A. G. Cuesta, S. A. - Seseña, 13 - 28024 Madrid

ÍNDICE

	<u>Págs.</u>
INTRODUCCIÓN	41
 PRIMERA PARTE BASES DE PARTIDA 	
Capítulo 1. Historia de la contaminación atmosférica	47
1.1. Los tiempos remotos	47
1.2. La protohistoria	48
1.3. La historia	48
1.4. Desde 1960 hasta la actualidad	53
1.5. Ejemplos puntuales de contaminación atmosférica	57
 Capítulo 2. La Unión Europea y otros Organismos ante la contaminación atmosférica	 59
2.1. Líneas generales	59
2.2. El enfoque planetario	60
2.3. La Conferencia de Río y el Programa 21	60
2.4. Europa y el medio ambiente planetario	60
2.5. Balance provisional	61
2.6. Alerta ambiental	62
2.7. Transporte	63
2.8. La energía	65
2.9. El CO ₂ provoca problemas	65
2.10. La agricultura y la silvicultura víctimas del medio ambiente .	65
2.11. La sociedad de consumo	66
2.12. Europa ante el cambio climático	67
2.13. Cinco programas para ahorrar energía	67
2.14. Europa y la capa de ozono	67
2.15. Europa y los depósitos ácidos	68

	Págs.
2.16. La calidad del aire en la Unión Europea	69
2.17. Residuos	70
2.18. La salud y la contaminación atmosférica en la Unión Europea ..	71
Capítulo 3. Análisis conceptual	73
3.1. Bases de partida	73
3.2. Los conceptos	74
3.3. La contaminación atmosférica	76
3.4. Los indicadores	76
Capítulo 4. Las actividades humanas, los factores ambientales y la contami- nación atmosférica	77
4.1. Las actividades humanas	77
4.2. Los factores ambientales	78
4.2.1. Bases y acciones generales	78
4.2.2. Factores intrínsecos	79
4.2.3. Factores extrínsecos	79
Capítulo 5. Unidades	81
5.1. Unidades del Sistema Internacional (SI)	81
5.2. Constantes básicas	82
5.3. Generales	82

SEGUNDA PARTE LOS AGENTES CONTAMINANTES

Capítulo 6. Clasificación general	87
6.1. Clasificación básica	87
6.2. Clasificación de los agentes contaminantes atmosféricos según su composición	88
6.3. Principales contaminantes atmosféricos de origen industrial y urbano	89
Capítulo 7. Las partículas sólidas	91
7.1. Generalidades y clasificación	91
7.2. Composición	93
7.3. Forma	94
7.4. Propiedades físicas relacionadas con la contaminación del medio .	94
7.5. Origen	95

	Págs.
Capítulo 8. Derivados del azufre	97
8.1. SH ₂	97
8.2. SO ₂ y derivados	97
Capítulo 9. Derivados del carbono	99
9.1. CO ₂	99
9.2. CO	100
9.3. Hidrocarburos	102
9.4. Aldehídos	104
Capítulo 10. Derivados del flúor	105
Capítulo 11. Ozono	107
Capítulo 12. Derivados del nitrógeno	109
12.1. Los óxidos y su formación	109
12.2. PAN, PPN y PBN	111
Capítulo 13. Metales y derivados	113
13.1. Bases generales	113
13.2. Origen básico y usos	113
Capítulo 14. Derivados del cloro, del bromo y del yodo. Residuos nucleares ..	117
Capítulo 15. Amoníaco, sulfato amónico y otros contaminantes menores ...	121
15.1. Amoníaco y sulfato amónico	121
15.2. Etileno	122
15.3. Formaldehído	122
15.4. Arsénico	124
15.5. Benceno	124
15.6. Tricloroetileno	124
15.7. Tolueno	125
15.8. Benzopireno	125
Capítulo 16. Humo de tabaco	127
16.1. Bases del problema	127
16.2. Composición del humo del tabaco	128
Capítulo 17. Los aerosoles	131
17.1. Bases generales	131
17.2. Clasificación y dimensiones	132

	Págs.
17.3. Condensación y visibilidad	133
17.4. Actividad química	134
17.5. Valoración de aerosoles	134
Capítulo 18. El smog y la contaminación fotoquímica	137
18.1. Generalidades sobre el smog	137
18.2. Smog ácido	137
18.3. Smog fotoquímico: formación	138
18.4. Modelización de la formación del smog	139
18.5. Generalidades sobre la contaminación fotoquímica	139
18.6. El problema en la Unión Europea	140
Capítulo 19. Los olores en el medio ambiente	143
19.1. Definiciones y detección de los olores	143
19.2. Origen y clasificación de los olores	143
19.3. Relaciones entre la concentración y la intensidad del olor ..	146
19.4. Dispersión de los olores	146
19.5. Los olores en función de la distancia a la fuente	146
Capítulo 20. Sinergias entre contaminantes atmosféricos	149
20.1. Explicación básica	149
20.2. Sinergias fundamentales	149

TERCERA PARTE

LAS FUENTES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Capítulo 21. Bases generales y actividades contaminantes del aire	153
21.1. Bases generales	153
21.2. Origen directo de los contaminantes atmosféricos	154
21.3. Origen indirecto de los contaminantes atmosféricos	156
21.4. Actividades industriales potencialmente contaminantes del aire .	156
21.5. La combustión	161
Capítulo 22. Fuentes naturales de contaminación atmosférica	163
22.1. Fuentes en general	163
22.2. El vulcanismo	163
22.2.1. Bases generales	163
22.2.2. Tipos básicos de erupciones	164
22.2.3. Efectos medioambientales de los volcanes	165
22.2.4. Erupciones históricas con marcada contaminación atmosférica	166

	Págs.
22.3. Lluvias sucias	168
22.4. Brumas y nieblas marinas	168
22.5. Polvo extraterrestre	169
22.6. Contaminación de origen animal	169
22.7. Contaminación de origen vegetal	170
Capítulo 23. Fuentes fijas de contaminación atmosférica	173
23.1. Fuentes naturales fijas	173
23.2. Combustiones en instalaciones fijas	173
23.3. Industrias agrarias	174
23.4. Industrias no agrarias	174
Capítulo 24. Fuentes móviles de contaminación atmosférica	175
24.1. Bases generales	175
24.2. Vehículos automóviles	176
24.2.1. Vehículos con motor de explosión	176
24.2.2. Vehículos con motor Diesel	177
24.2.3. Vehículos con turbinas de gas, con motores Wankel o motores rotativos, o con motores de dos tiempos ...	177
24.3. Ferrocarriles y navegación	178
24.4. Aviación	178
24.5. Vehículos y actividades militares	179
24.6. Actividades astronáuticas	180
Capítulo 25. Tratamiento de residuos industriales	181
25.1. Bases generales	181
25.2. Incineración	182
25.2.1. Bases de la incineración	182
25.2.2. Sistemas de incineración	182
25.2.3. Calderas de recuperación de calor	183
25.2.4. Plasma térmico	184
25.3. Gasificación	185
Capítulo 26. Transformación de residuos urbanos	187
26.1. Bases generales	187
26.2. Producción de biogás	187
26.3. Incineración	189
26.4. Pirólisis	191
Capítulo 27. Emisiones del uso del carbón	193
27.1. El carbón. Bases generales	193

	Págs.
27.2. Ciclo de vida del carbón	194
27.2.1. Extracción	194
27.2.2. Tratamiento	195
27.2.3. Transporte	195
27.2.4. Almacenamiento	195
27.2.5. Combustión	195
27.3. Características del carbón en relación con la contaminación atmosférica	196
27.4. Influencia de los sistemas de combustión y de gestión	197
27.5. Las centrales termoeléctricas	197
 Capítulo 28. Emisiones del tratamiento del petróleo	 199
28.1. Bases generales	199
28.1.1. Origen	199
28.1.2. Composición	199
28.1.3. Historia resumida	199
28.2. Ciclo de vida del petróleo	200
28.2.1. Extracción	200
28.2.2. Transporte	200
28.2.3. Tratamiento	200
28.2.4. Uso energético	202
 Capítulo 29. Emisiones del uso de la energía geotérmica	 205
 Capítulo 30. Emisiones del uso del gas natural	 207
30.1. Formación y composición	207
30.2. Almacenamiento y transporte	208
30.3. Emisiones	208
 Capítulo 31. Emisiones del uso de los biocombustibles	 211
31.1. Bases generales	211
31.2. Tipos de biocombustible	211
31.3. Producción y consumo globales	212
31.4. Procesos	213
 CUARTA PARTE LA ATMÓSFERA Y EL CLIMA EN RELACIÓN CON LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA 	
Capítulo 32. El clima y la contaminación atmosférica	219
32.1. Alteraciones generales	219

	Págs.
32.2. Efectos de la contaminación atmosférica sobre el clima	220
32.3. Efectos del clima sobre la contaminación atmosférica	220
32.4. Fenómenos climáticos y contaminación atmosférica	221
Capítulo 33. La atmósfera	223
33.1. Composición de la atmósfera	223
33.1.1. Ubicación	223
33.1.2. Zonas	223
33.1.3. Composición	223
33.1.4. Gases básicos	224
33.1.5. Dióxido de carbono	224
33.1.6. Ozono	225
33.1.7. Agua	226
33.2. Características de la atmósfera: estructura térmica vertical . .	226
33.2.1. Bases generales	226
33.2.2. Troposfera	228
33.2.3. Estratosfera	228
33.2.4. Mesosfera	229
33.2.5. Termosfera	229
33.2.6. Estabilidad atmosférica	229
33.2.7. La temperatura y la superficie terrestre	230
33.2.8. Evolución de la temperatura	231
33.3. Las capas bajas de la atmósfera	231
33.4. Física y termodinámica atmosférica	233
33.4.1. Bases generales	233
33.4.2. Energía y trabajo. Casos específicos	233
33.4.3. Balances de energía	235
33.4.4. Ecuación de estado de los gases (perfectos). Ley de Dalton	236
33.4.5. El vapor de agua en la atmósfera: vaporización y saturación. Ecuación de Clapeyron-Clausius	237
33.4.6. Primer Principio de la Termodinámica	239
33.4.7. Ley de Joule e igualdad de Mayer	239
33.4.8. Evolución de la temperatura de las partículas atmosféricas	240
33.4.9. El aire atmosférico	240
33.4.10. La condensación	242
Capítulo 34. Los factores meteorológicos y la contaminación atmosférica . .	245
34.1. Bases generales	245
34.2. Radiación solar	246
34.2.1. Bases y principios de la radiación solar	246

	Págs.
34.2.2. El espectro electromagnético	247
34.2.3. Radiaciones naturales de onda corta y onda larga ..	247
34.2.4. Radiación solar: factores y circunstancias	247
34.2.5. Radiaciones provenientes de la atmósfera	248
34.2.6. Radiaciones provenientes de la Tierra	249
34.2.7. Radiación neta	249
34.3. Humedad atmosférica	250
34.4. Las nubes	250
34.4.1. Bases generales	250
34.4.2. Disipación de las nubes	252
34.4.3. Formación de las nubes	252
34.4.4. Tipos de nubes según su formación	253
34.4.5. Naturaleza de las nubes	258
34.5. Precipitaciones verticales	258
34.5.1. El proceso general. Células tormentosas	258
34.5.2. Procesos productores de precipitación	259
34.5.3. Las tormentas	261
34.5.4. Variabilidad y distribución de la precipitación	262
34.5.5. Medición de la precipitación	262
34.5.6. Tipos de precipitaciones de nubes convectivas	263
34.5.7. Tipos de precipitaciones	263
34.5.8. Clasificación y descripción de las precipitaciones verticales	265
34.5.9. Lluvia	266
34.5.10. Llovizna	267
34.5.11. Nieve	267
34.5.12. Granizo	268
34.6. Arrastre de contaminantes por las precipitaciones verticales ..	269
Capítulo 35. Las islas de calor	271
35.1. Bases, procesos y efectos	271
35.2. Reparto de las temperaturas	272
35.3. Cadencia de las islas de calor	272
35.4. Condicionantes de las islas de calor	273
Capítulo 36. Contaminación atmosférica y visibilidad	275
36.1. Transmisión, absorción y dispersión de la luz en la atmósfera ..	275
36.2. Contaminación y visibilidad	277

QUINTA PARTE
EL VIENTO Y LA DIFUSIÓN ATMOSFÉRICA

Capítulo 37. Los vientos	281
37.1. Circulación general de la atmósfera	281
37.1.1. Bases generales	281
37.1.2. Circulación de la atmósfera y flujos energéticos ...	283
37.2. El viento	283
37.2.1. Definición	283
37.2.2. Fuerzas incidentes	284
37.2.3. Vientos teóricos. Fuerzas y capa de rozamiento ...	285
37.2.4. Vientos locales	288
37.3. Vientos y turbulencias	292
37.4. Convección y turbulencias atmosféricas	293
37.4.1. Convección en los fluidos: Situación en la atmósfera	
37.4.2. Desplazamiento de los fluidos según su régimen. Viscosidad	293
37.4.3. Transición de régimen: El número de Reynolds ...	295
37.5. Viento y temperatura. Los flujos convectivos	295
37.5.1. Flujos verticales	295
37.5.2. Perfiles verticales en la atmósfera	296
37.5.3. Estabilidad atmosférica y perfiles de velocidad. El número de Richardson	297
37.5.4. Determinación de los flujos verticales	298
37.6. Perfil vertical del viento cerca del suelo	299
37.6.1. Bases de partida. La Ley de Prandtl	299
37.6.2. Perfil vertical de la velocidad del viento y parámetros de rugosidad	300
37.6.3. El perfil vertical del viento y la cubierta vegetal ...	300
 Capítulo 38. Estabilidad atmosférica y ecuaciones barométricas	 303
38.1. Modelos atmosféricos	303
38.2. Estabilidad atmosférica	305
 Capítulo 39. El relieve, el clima y la contaminación atmosférica	 307
39.1. Influencia del relieve sobre el clima y sobre la contaminación atmosférica	307
39.2. Influencia del clima sobre el relieve	309
39.3. Los pequeños obstáculos: Efectos	309
39.4. El relieve y la difusión atmosférica	311

	Págs.
Capítulo 40. Circulación, transporte, difusión y dispersión de contaminantes . .	313
40.1. Incorporación de los contaminantes a la circulación general de la atmósfera	313
40.2. Turbulencias y difusión de contaminantes	314
40.3. Transporte y dispersión de contaminantes	315
40.3.1. Bases generales y mecanismos	315
40.3.2. Modelos de dispersión	316
40.4. Difusión de contaminantes	317
40.4.1. Velocidad media del viento	317
40.4.2. Aplicación práctica de las fórmulas de difusión	318
40.2.3. Difusión de contaminantes en zonas industriales y urbanas	318
40.2.4. Fuentes emisoras y difusión	320

SEXTA PARTE
EL CAMBIO CLIMÁTICO. INDICADORES. LA CAPA DE OZONO

Capítulo 41. El clima y su variabilidad natural	325
41.1. Bases generales	325
41.2. Conceptos históricos	325
41.3. El Sol y la Tierra en relación con la variabilidad del clima . .	327
41.3.1. El Sol como factor condicionante	327
41.3.2. Parámetros orbitales incidentes	327
41.3.3. Procesos planetarios internos	329
41.3.4. Incidencias sobre la contaminación atmosférica	329
41.4. Evidencias actuales de cambio climático. Los informes del IPCC	331
41.4.1. Los cambios significativos básicos	331
41.4.2. Cambios en la concentración de gases	332
41.4.3. Otras alteraciones	333
41.4.4. El cambio climático y la incidencia de la contamina- ción atmosférica	334
41.4.5. Las evidencias del IPCC	334
Capítulo 42. El efecto invernadero y el calentamiento global	337
42.1. El efecto invernadero natural como regulador térmico del pla- neta. El papel del vapor de agua y del CO ₂	337
42.1.1. Efecto invernadero	337
42.1.2. Los responsables del efecto invernadero	337
42.1.3. Regulación de la concentración de CO ₂	339

	Págs.
42.2. Aumento del efecto invernadero por la acción humana	340
42.2.1. Bases generales	340
42.2.2. El Potencial de Calentamiento Global	341
42.2.3. Importancia de cada gas	342
42.3. Influencia del hombre en el aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera y su relación con el calentamiento global	344
42.3.1. Evolución histórica	344
42.3.2. Efectos y origen de las emisiones de dióxido de carbono	346
42.3.3. Absorción y consumo del dióxido de carbono	347
42.3.4. El equilibrio	349
42.3.5. El CO ₂ y la temperatura	350
42.4. Efectos climáticos, ecológicos y socioeconómicos del calentamiento global	353
42.4.1. Efectos generales y modelos. Balances	353
42.4.2. Efectos básicos en sectores concretos: Impactos	355
Capítulo 43. Políticas ante el cambio climático	359
43.1. Política internacional ante el cambio climático	359
43.2. Actuaciones de la Unión Europea y de España contra el cambio climático	364
Capítulo 44. Sistemas de indicadores para el cambio climático	369
44.1. Necesidades	369
44.2. Indicadores ambientales de EUROSTAT para el cambio climático	370
44.3. Indicadores ambientales de la AEMA para el cambio climático	371
44.4. Sistema Español de Indicadores Ambientales para el cambio climático	372
Capítulo 45. El ozono en la Naturaleza. La capa de ozono	375
45.1. El ozono en la Naturaleza	375
45.1.1. Variaciones del ozono en el tiempo y en el espacio	375
45.1.2. Localización	376
45.2. Historia de la capa de ozono	376
45.3. Importancia de la capa de ozono	377
45.4. El agujero de ozono	378
45.5. Mediciones realizadas en la capa de ozono y previsiones	378
45.6. Indicadores ambientales sobre la destrucción de la capa de ozono	380

	Págs.
45.7. Consecuencias de la reducción de la capa de ozono para los seres humanos	382
45.8. Consecuencias de la reducción de la capa de ozono para los organismos marinos	382
45.9. Consecuencias de la reducción de la capa de ozono sobre la vegetación	383

SÉPTIMA PARTE
LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y LOS MATERIALES

Capítulo 46. Efectos de la contaminación atmosférica sobre las construcciones .	387
46.1. Líneas generales	387
46.2. Acción mecánica	387
46.3. Acciones fisicoquímicas y químicas	388
46.4. Acciones bacterianas y de algas, hongos, líquenes y musgos ..	390
Capítulo 47. La contaminación atmosférica y los materiales	391
47.1. Bases generales	391
47.2. Metales	391
47.3. Elastómeros	393
47.4. Textiles	394
47.5. Papel	394
47.6. Cuero	394
47.7. Pinturas	395

OCTAVA PARTE
LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y LOS ECOSISTEMAS.
ASPECTOS ECOLÓGICOS

Capítulo 48. La biosfera y la contaminación atmosférica. Los problemas de contaminación atmosférica de los ecosistemas	399
48.1. La biosfera y la contaminación atmosférica	399
48.2. La contaminación de los ecosistemas por la industria	400
48.2.1. Ecosistemas naturales y ecosistemas industriales ...	400
48.2.2. Ecosistemas e industria	402
48.3. Efectos e impactos potenciales de la contaminación atmosférica sobre los ecosistemas	403

	Págs.
Capítulo 49. Ecotoxicología	405
49.1. Ecotoxicología y contaminación. Toxicidad	405
49.2. Dosis-respuesta ecotoxicológica	405
49.3. Factores de toxicidad y de ecotoxicidad	407
49.4. Impactos de la contaminación atmosférica según la ecotoxicidad	407
Capítulo 50. Los ciclos biogeoquímicos y la contaminación atmosférica	409
50.1. Dinámica general de los ciclos biogeoquímicos en la Naturaleza	409
50.2. Ciclos de la materia y flujos de energía	410
50.2.1. Transferencias de energía	410
50.2.2. Transferencia de energía a través de los diferentes niveles tróficos	412
50.3. Ciclo del agua	413
50.4. Ciclo del carbono	414
50.5. Ciclo del oxígeno	417
50.6. Ciclo del nitrógeno	418
50.7. Ciclo del fósforo	420
50.8. Ciclo del azufre	421
50.9. Ciclo del calcio	422
Capítulo 51. Interacciones químicas entre los organismos y el medio y su relación con la contaminación atmosférica	425
51.1. Los precursores y las interacciones en el medio	425
51.2. Las interacciones desde el punto de vista de la ecología química	425
Capítulo 52. El reciclado mar-aire del CO₂, el CO₂ en el mar y el secuestro del carbono	429
52.1. El reciclado en el mar	429
52.2. El secuestro de carbono	430
Capítulo 53. Acidificación de la atmósfera y del medio	433
53.1. Acidificación ambiental	433
53.1.1. Ácidos y precipitaciones	433
53.1.2. Los depósitos ácidos: Formación	434
53.1.3. Origen de las sustancias que generan los depósitos ácidos	434
53.1.4. Las emisiones y el proceso de acidificación ..	435
53.1.5. Efectos de los depósitos ácidos	435

	Págs.
53.2. Factores meteorológicos incidentes sobre los depósitos ácidos . .	436
53.3. Indicadores ambientales de EUROSTAT sobre la acidificación de la atmósfera y del medio	436
53.4. Indicadores ambientales de la AEMA sobre la acidificación de la atmósfera y del medio	437
53.5. Sistema español de indicadores ambientales de la acidificación de la atmósfera y del medio	438
53.6. Acidificación y contaminación del suelo	440
53.6.1. Bases generales	440
53.6.2. Cambios en la actividad del suelo debidos a las inmisiones de derivados del azufre y de derivados del nitrógeno	440
53.6.3. Efectos de la acidificación del suelo en los procesos biológicos	441
53.6.4. Efectos directos de la acidificación del suelo	441
53.6.5. El suelo como sistema tampón: Procesos y acidificación	441
53.6.6. Intercambio iónico	442
53.6.7. Disolución de hidróxidos de aluminio, hierro y manganeso en el suelo	442
53.6.8. Actividad meteorológica	442
53.6.9. Efectos ecológicos del aporte de nitrógeno	443
53.6.10. Contaminación del suelo por productos tóxicos . . .	444
Capítulo 54. Cálculos y valoraciones sobre riesgos, daños y efectos de la contaminación atmosférica en el medio natural	445
54.1. Evaluación de los riesgos de degradación que puede provocar la contaminación atmosférica sobre una masa forestal	445
54.2. Evaluación de daños en la vegetación debidos a la contaminación atmosférica	448
54.3. Cálculos sobre los efectos de la difusión y de la rugosidad en casos de contaminación atmosférica de una masa forestal . .	449
54.4. Definiciones e ingeniería ambiental del cálculo de los depósitos atmosféricos	451
54.4.1. Definiciones y bases generales	451
54.4.2. Cálculo de los depósitos atmosféricos	452
54.4.3. Ejemplo	454
54.4.4. Cálculo de depósitos metálicos (Pb)	455

	Págs.
Capítulo 55. El papel de la atmósfera y de su contaminación en la dinámica de las transferencias y transformaciones de las emisiones y de los residuos en la Naturaleza	457
55.1. Transferencias y transformaciones	457
55.2. Trayectoria de las emisiones y de los residuos en el medio natural	459
Capítulo 56. La atmósfera del suelo. Procesos y relación con la contaminación atmosférica	463
56.1. Bases generales	463
56.2. Propiedades y características	463
56.3. Composición de la atmósfera del suelo	465
56.3.1. Composición general de la atmósfera del suelo	465
56.3.2. Importancia del oxígeno y del anhídrido carbónico .	466
56.3.3. El vapor de agua	467
56.4. Intercambio gaseoso	467
56.4.1. Relaciones con la atmósfera externa	467
56.4.2. Procesos de convección	468
56.4.3. Procesos de difusión	469

NOVENA PARTE

LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y LA VEGETACIÓN

Capítulo 57. Fisiología, organografía y bioquímica vegetal ante la contaminación atmosférica	473
57.1. Bioquímica y contaminación atmosférica	473
57.1.1. Las enzimas	473
57.1.2. Las proteínas	475
57.1.3. Los aminoácidos	476
57.1.4. Ácidos nucleicos	476
57.2. Fisiología, organografía y contaminación atmosférica	476
57.2.1. Orientación general	476
57.2.2. La célula y la contaminación atmosférica	477
57.2.3. Los estomas y la contaminación atmosférica	478
57.3. Metabolismo y nutrición	485
Capítulo 58. Las partículas sólidas del aire y los vegetales	491
58.1. Bases y factores incidentes	491
58.1.1. Bases generales	491
58.1.2. Factores incidentes	492
58.2. Partículas inertes	493

	Págs.
58.3. Acción beneficiosa de las partículas sólidas no tóxicas sobre ciertos vegetales	493
58.4. Partículas tóxicas de origen industrial	493
58.5. Partículas tóxicas no industriales e industriales no tóxicas . .	494
58.6. Partículas procedentes de los hidrocarburos y de su combustión	494
58.7. Estudios prácticos sobre la incidencia de las partículas sólidas del aire en el medio natural	494
58.7.1. Partículas gruesas	495
58.7.2. Partículas finas	496
58.8. Ejemplo práctico de estudio. Caso de una fuente puntual: Fábrica de cemento	496
Capítulo 59. Los derivados del azufre y los vegetales	501
59.1. Bases generales	501
59.2. Síntomas generales en los vegetales	502
59.3. Ejemplo de control y seguimiento de una especie	503
59.4. Efectos y evaluaciones en el medio agrario	504
59.4.1. Cultivos agrícolas	504
59.4.2. Pastizales	506
59.4.3. Masas forestales	506
59.5. Acción anatómo-patológica y metabólica	508
59.6. Desprendimiento de gases. Sinergismos	510
59.7. Selección de especies resistentes	510
Capítulo 60. Los derivados del flúor y los vegetales	515
60.1. Generalidades	515
60.2. Síntomas generales en los vegetales	516
60.3. Acción anatómo-patológica y metabólica	516
60.4. Efectos sobre el medio natural (vegetales)	518
60.4.1. Advertencias previas	518
60.4.2. Medio agrícola	518
60.4.3. Medio forestal	519
60.5. Evaluación de riesgos	520
60.6. Tablas de sensibilidad para la selección de especies resistentes . .	520
60.7. Metodología del muestreo y análisis químico	523
60.7.1. Muestreo	523
60.7.2. Análisis	524
60.8. Caso práctico: Investigación en el entorno de una industria cerámica	525
60.8.1. Generalidades	525

	Págs.
60.8.2. Origen de la contaminación	526
60.8.3. Efectos sobre los vegetales	526
60.8.4. Soluciones prácticas y técnicas de estudio	526
60.8.5. Recomendaciones	527
Capítulo 61. Los derivados del carbono y los vegetales	529
61.1. El CO ₂ y los vegetales	529
61.2. El CO y los vegetales	530
61.2.1. Generalidades	530
61.2.2. Efectos sobre la respiración	531
61.2.3. Efectos sobre la fotosíntesis	532
61.2.4. Fijación fotosintética del CO	533
Capítulo 62. Los derivados del nitrógeno y los vegetales	535
62.1. Bases generales	535
62.2. Efectos sobre la vegetación	536
62.3. Acción de los vegetales sobre los NO _x	537
62.4. Actividad sinérgica	537
62.5. Efectos de los NO _x sobre los ecosistemas	538
Capítulo 63. Contaminantes secundarios de la vegetación	539
63.1. Ozono	539
63.1.1. Efectos fisiológicos y anatómicos	539
63.1.2. Sensibilidad	539
63.1.3. Enmascaramientos y sinergismos	540
63.2. PAN, PPN y PBN	540
63.2.1. Efectos fisiológicos y anatómicos	540
63.2.2. Sensibilidad	541
63.2.3. Enmascaramientos	542
63.3. Metales en general	542
63.3.1. Emisiones y líneas generales	542
63.3.2. Plomo	543
63.3.3. Cinc	544
63.3.4. Mercurio	544
63.4. Etileno	545
63.4.1. Efectos fisiológicos y anatómicos	545
63.4.2. Sensibilidad	545
63.5. Hidrocarburos no metánicos	545
63.6. Hidrocarburos halogenados C ₁ – C ₄	546
63.7. Cloro y derivados	546
63.8. Otros agentes	547

	Págs.
Capítulo 64. El medio forestal y la contaminación atmosférica	549
64.1. Bases generales	549
64.2. Análisis de un ecosistema forestal contaminado por fuentes emisoras atmosféricas fijas	549
64.2.1. Bases generales	549
64.2.2. El foco emisor	550
64.2.3. Descripción del ecosistema	550
64.2.4. Definición del ecosistema forestal en función de modelos ecológicos	551
64.2.5. Dinámica del subsistema vegetal	551
64.2.6. Respuestas del subsistema forestal a la agresión ..	552
64.2.7. Control del subsistema arbóreo en crecimiento ...	552
64.2.8. Control del subsistema humedad y microclima ...	552
64.2.9. Control de insectos básicos (subsistema) y de mortalidad de árboles	552
64.2.10. Dinámica del subsistema del epipedon (raíces y patógenos)	552
64.2.11. Control de semilleros	553
64.2.12. Control de la reproducción	553
64.2.13. Degradación foliar	553
64.2.14. Degradación de la madera	553
64.2.15. Dinámica de poblaciones de micromamíferos ...	553
64.2.16. Planificación general y control	553
64.3. Efectos de las masas forestales sobre el movimiento, dispersión y sedimentación de los contaminantes atmosféricos ...	554
64.3.1. Bases del problema	554
64.3.2. Regulación del CO ₂ atmosférico	556
64.3.3. Efecto filtro	557
64.3.4. Efecto aerodinámico	558
64.3.5. Captación	560
64.4. Contaminantes absorbidos y transformados	560
64.5. Contaminantes absorbidos y acumulados	561
64.6. Efecto antimicrobiano	562
64.7. Técnicas de ingeniería ambiental aplicada a la minimización de los efectos de la contaminación atmosférica sobre masas forestales	563
64.7.1. Bases generales	563
64.7.2. Cultivo e implantación de especies y variedades resistentes	563
64.7.3. Fertilización y labores culturales y selvícolas	565

	Págs.
64.8. Pantallas, cortinas vegetales y sedimentación	567
64.8.1. Características físicas	567
64.8.2. Aplicaciones prácticas	569
64.9. Degradación de los componentes de los ecosistemas forestales por contaminación atmosférica	570
64.9.1. Introducción	570
64.9.2. Causas de la degradación de los ecosistemas forestales ..	571
64.9.3. Degradaciones de los ecosistemas forestales debidas a fenómenos de estrés	572
Capítulo 65. Acción de los factores externos e internos de crecimiento sobre los efectos de los contaminantes atmosféricos	577
65.1. Bases generales	577
65.2. Influencia de los factores climáticos	577
65.2.1. Acción general	577
65.2.2. Influencia de la temperatura	578
65.2.3. Influencia de la radiación solar y acciones de los estomas	579
65.2.4. Influencia de la humedad del aire	582
65.3. Influencia de los factores edáficos	582
65.3.1. Influencia de los nutrientes	582
65.3.2. Influencia de la humedad del suelo	582
65.4. Influencia del estadio de desarrollo y de la edad de la hoja ..	583
65.4.1. Influencia del estadio del desarrollo	583
65.4.2. Influencia de la edad de la hoja	583
65.5. Influencia de la especie, de la variedad y del individuo en la resistencia a la contaminación atmosférica	584

DÉCIMA PARTE

LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y LA FAUNA

Capítulo 66. Efectos generales de la contaminación atmosférica sobre la fauna ..	589
66.1. La fauna y la contaminación atmosférica	589
66.2. Efectos generales de la contaminación atmosférica sobre la fauna	591
66.2.1. Fauna salvaje	591
66.2.2. Fauna doméstica	593
66.2.2.1. Abejas	593
66.2.2.1. Gusanos de seda	596

	Págs.
66.2.3. Efectos generales de algunos contaminantes específicos	596
66.3. Emisiones contaminantes de la fauna	599
Capítulo 67. Los mamíferos y la contaminación atmosférica	601
67.1. Efectos de las partículas sólidas	601
67.2. Efectos del ozono y de los óxidos de nitrógeno	601
67.3. Efectos del monóxido de carbono	602
67.4. Efectos del SO ₂ en los mamíferos	603
67.5. La fluorosis en los mamíferos	603
67.6. Efectos del tabaquismo pasivo en los mamíferos	609
Capítulo 68. Contaminación atmosférica de la fauna por metales y arsénico ..	611
68.1. Contaminación por molibdeno	611
68.2. Contaminación por arsénico y derivados	611
68.2.1. Productos derivados y toxicidad	612
68.2.2. Efectos del arsénico	613
68.3. Contaminación por plomo	613
68.4. Contaminación por cadmio	614
68.5. Contaminación por otros metales pesados	614
68.6. Contaminación por aluminio	615

UNDÉCIMA PARTE
LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y LA SALUD HUMANA

Capítulo 69. La contaminación atmosférica y la salud pública	619
69.1. Líneas generales del problema en la salud pública	619
69.2. Consecuencias de la contaminación atmosférica para la salud humana	620
69.3. La cuestión a nivel de la salud pública	620
69.3.1. Elementos básicos	620
69.3.2. Acciones internacionales (OMS, PNUMA, OCDE, Consejo de Europa, UE, EPA)	621
69.4. Contaminación atmosférica y salud humana: sistemas de estudio y control a nivel general	621
Capítulo 70. Formas de acción de la contaminación atmosférica sobre el organismo	623
70.1. Formas de conexión o entrada de los contaminantes atmosféricos en el organismo	623

	Págs.
70.1.1. Inhalación	623
70.1.2. Absorción-ingestión	623
70.1.3. Contacto	623
70.1.4. Por efecto indirecto	624
70.1.5. Por efectos alérgicos	624
70.2. Formas de acción de la contaminación atmosférica sobre el organismo a nivel interno	624
70.3. Patologías básicas	627
Capítulo 71. Toxicología e higiene industrial en relación con la contaminación atmosférica	629
71.1. Medio ambiente, industria y salud	629
71.2. Toxicología industrial: Vigilancia y prevención	630
71.3. Sensibilización e información a nivel general	632
71.4. Higiene industrial en relación con la contaminación atmosférica	633
71.4.1. Bases generales	633
71.4.2. Contaminación ambiental intrafábrica	635
71.5. Enfermedades profesionales. Prevención	638
71.5.1. Las enfermedades profesionales	638
71.5.2. Prevención	639
71.6. Calidad del aire industrial	640
71.6.1. Problemas básicos	640
71.6.2. Ventilación	641
Capítulo 72. Efectos de las partículas atmosféricas	643
72.1. Bases generales	643
72.2. Silicosis	643
72.3. Carcinoma pulmonar	644
72.4. Asbestosis	644
Capítulo 73. Efectos de los derivados del azufre	645
Capítulo 74. Efectos del monóxido de carbono	647
Capítulo 75. Efectos de los derivados del nitrógeno	649
Capítulo 76. Efectos del ozono	651
Capítulo 77. Efectos del mercurio, del plomo, del cadmio y del amianto	653

	Págs.
77.1. Mercurio	653
77.2. Plomo	655
77.3. Cadmio	656
77.4. Amianto	657
Capítulo 78. Efectos de los plaguicidas	659
78.1. Definiciones y formas de aplicación	659
78.2. Formas de absorción	659
78.3. Factores incidentes en la toxicidad de los plaguicidas	660
78.4. Síntomas	661
78.5. Clasificación básica e intoxicación	661
Capítulo 79. Efectos del humo del tabaco	665
79.1. Consecuencias patológicas	665
79.2. Acciones sobre el sistema cardiovascular	665
79.3. Acciones sobre el aparato respiratorio	666
79.4. Efectos carcinógenos	666
79.5. Efectos sobre el feto	666
79.6. El tabaquismo pasivo	667
Capítulo 80. Efectos de otros contaminantes	669
80.1. Flúor	669
80.2. Cromo	669
80.3. Aluminio	669
80.4. Silicio	669
80.5. Níquel	670
80.6. Vanadio	670
80.7. Berilio	670
80.8. Manganeso y derivados	670
80.9. Arsénico	670
80.10. Radón	670
80.11. Fósforo y derivados	671
80.12. Talco	671
80.13. Benceno	671
80.14. Percloroetileno	671
80.15. Mercaptanos	671
80.16. Aldehídos	671
80.17. Tolueno, xileno, tricloroetileno y tetracloroetileno	672
80.18. PVC	672
80.19. Dioxinas y furanos	673
80.20. Olores	673

DUODÉCIMA PARTE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA URBANA

Capítulo 81. El clima urbano y la contaminación atmosférica	677
81.1. Medio urbano y contaminación atmosférica	677
81.2. Efecto de isla térmica	678
81.3. Micrometeorología urbana y contaminación atmosférica ...	678
81.4. Ventilación urbana y contaminación atmosférica	679
81.5. Factores incidentes en el clima y la contaminación atmosférica urbana	680
 Capítulo 82. Factores que influyen sobre la contaminación atmosférica urbana	 683
82.1. Influencia de la ciudad sobre el clima y la contaminación atmosférica	683
82.2. Factores climáticos incidentes	687
 Capítulo 83. Influencia de la contaminación atmosférica sobre el clima urbano	 689
83.1. Factores urbanos de emisión	689
83.2. Efectos de la contaminación atmosférica sobre el clima urbano	689
83.2.1. Disminución de la radiación solar	689
83.2.2. Disminución de la visibilidad	690
83.2.3. Influencia sobre la humedad y sobre las precipitaciones .	690
83.2.4. Influencia sobre la temperatura	690
 Capítulo 84. Salud en el medio urbano	 691
84.1. Parámetros ambientales urbanos	691
84.2. Enfermedades medioambientales urbanas básicas	693
84.2.1. Enfermedades básicas	693
84.2.2. Identificación de daños a la salud	694

DECIMOTERCERA PARTE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN INTERIORES

Capítulo 85. Contaminación atmosférica en locales y viviendas	697
85.1. Bases generales	697
85.2. Contaminantes básicos en interiores	698

	Págs.
85.3. Calidad del aire en interiores	699
85.4. Concentración e interacciones de contaminantes en interiores ..	700
Capítulo 86. Materiales de construcción, edificios y control en relación con la contaminación atmosférica en interiores	703
86.1. Edificios climatizados	703
86.2. Disolventes utilizados en interiores	704
86.3. Criterios para los materiales de construcción	708
86.4. Modelos	709
86.5. Situaciones de contaminación atmosférica	709
 DECIMOCUARTA PARTE CONTROL DE EMISIONES 	
Capítulo 87. Criterios y procedimientos de tratamiento	715
87.1. La prevención, el control y los estándares de emisión	715
87.2. Factores básicos incidentes	715
87.3. Bases y sistemas de control	717
87.4. Procedimientos de tratamiento de los contaminantes atmosféricos	717
87.5. Eficacia de los sistemas de tratamiento de contaminantes atmosféricos: Eficiencia, penetración y factor de descontaminación	719
Capítulo 88. Tratamiento de las partículas contaminantes	721
88.1. Bases generales. Captación	721
88.2. Separación mecánica	722
88.3. Separación hidráulica	725
88.4. Separación por filtración	727
88.5. Separadores eléctricos y electrostáticos (electrofiltros)	728
88.6. Separación por ultrasonidos	730
Capítulo 89. Tratamiento de los gases contaminantes	733
89.1. Bases generales. Sistemas de tratamiento	733
89.2. Procesos generales y específicos	734
89.3. Absorción	734
89.3.1. Bases generales y proceso	734
89.3.2. Sistemas de lavado	735
89.3.3. Relleno	735

	Págs.
89.3.4. Eficacia de absorción	735
89.3.5. Resistencia	736
89.3.6. Pérdidas de carga	736
89.3.7. Factores incidentes	737
89.3.8. Limpieza	737
89.4. Adsorción	738
89.4.1. Bases y proceso general	738
89.4.2. Factores de absorción	738
89.4.3. Tipos de adsorbentes	739
89.4.4. Pérdidas de carga	739
89.4.5. Procesos y bases de diseño	740
89.4.6. Regeneración y ciclo de vida de los adsorbentes ...	741
89.5. Incineración	742
89.5.1. Bases generales	742
89.5.2. Control de los NO _x	742
89.5.3. Antorchas	743
89.5.4. Incineradores y quemadores de postcombustión ...	744
89.5.5. Combustión catalítica	745
89.6. Condensación	747
89.7. Biofiltración	748
Capítulo 90. Control de los componentes volátiles orgánicos	751
90.1. Bases generales	751
90.2. Control de los COV	751
Capítulo 91. Control de los derivados del azufre	753
91.1. Bases generales	753
91.2. Procesos	753
Capítulo 92. Control de los derivados del nitrógeno	757
92.1. Bases generales	757
92.2. Tratamientos	757
Capítulo 93. Control de los derivados del carbono	759
93.1. Fuentes controlables	759
93.2. Tratamientos	759
Capítulo 94. Control de las emisiones de plomo	761
Capítulo 95. Tratamiento y control de los olores	763

	Págs.
95.1. Reducción de la perturbación	763
95.2. Control	764
95.2.1. Bases del control	764
95.2.2. Incineración	765
95.2.3. Oxidación catalítica	766
95.2.4. Condensación previa	767
95.2.5. Lavado por vía húmeda	768
95.2.6. Absorción	768
95.2.7. Ozonización	769
95.2.8. Adsorción	769
95.3. Casos prácticos	771
Capítulo 96. Reducción de las emisiones	773
96.1. Plan general de reducción de las emisiones	773
96.2. Clasificación de las fuentes	773
96.3. Reglas y costos básicos	774
96.4. Métodos de tratamiento	775
96.5. Acciones urbanísticas	775
Capítulo 97. Técnicas y métodos de reducción del efecto invernadero	777
97.1. Acción política internacional	777
97.2. Actuaciones de la Unión Europea y de España contra el cambio climático	777
97.3. Medidas técnicas	777
97.3.1. Sector energético	777
97.3.2. Sector industrial	778
97.3.3. Sector de los transportes	778
97.3.4. Sector agrario	779
97.3.5. Sector urbano	779
97.3.6. Sectores y medidas político-legales	779
Capítulo 98. Técnicas y métodos de reducción de los gases que afectan a la capa de ozono	781
98.1. Protección internacional de la capa de ozono: Reducción y control de emisiones	781
98.2. Sustitución de productos. Alternativas	784
Capítulo 99. Control de las emisiones de los vehículos automóviles	787
99.1. Bases generales	787
99.2. Sistemas de reducción y depuración de gases de escape	788

DECIMOQUINTA PARTE
MEDIDA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Capítulo 100. Análisis, evaluación y cálculo de las emisiones	791
100.1. Medidas generales de la emisión y controles ambientales al aire libre. Bases de los estudios	791
100.2. Etapas	792
100.3. Medidas y análisis en la emisión	793
100.3.1. Partículas	793
100.3.2. Gases	795
100.4. Medidas y análisis al aire libre y en la inmisión	797
100.4.1. Partículas	797
100.4.2. Gases	802
Capítulo 101. Medida de los componentes climáticos en relación con la con- taminación atmosférica	805
101.1. Líneas generales	805
101.2. Características de los instrumentos de medida	805
101.2.1. Funcionamiento	805
101.2.2. Características básicas	806
101.3. Medida de la temperatura	807
101.3.1. Sistemas por dilatación de líquidos	807
101.3.2. Sistemas por dilatación de sólidos	807
101.3.3. Sistemas basados en cambios de estado	807
101.3.4. Sistemas basados en las variaciones de resisten- cias eléctricas	807
101.3.5. Pares térmicos (termopares)	808
101.3.6. Radiotermómetros	808
101.3.7. Termómetros de cuarzo piezoeléctrico	808
101.4. Medida de la humedad	808
101.4.1. Definiciones	808
101.4.2. Higrómetros basados en los cambios de dimen- sión de sustancias higroscópicas	809
101.4.3. Higrómetros de condensación	809
101.4.4. Higrómetros electrolíticos	810
101.4.5. Higrómetros de absorción de radiación	810
101.4.6. Psicrómetros	810
101.5. Medida del viento	811
101.5.1. Velocidad del viento	811
101.5.2. Dirección del viento	813

	Págs.
101.6. Medida de la insolación y de la radiación	814
101.7. Medida de las precipitaciones	815
101.7.1. Pluviómetros	815
101.7.2. Pluviógrafos	815
101.7.3. Nivómetros	816
101.8. Medida de la presión atmosférica	816
101.8.1. Barómetros de mercurio	816
101.8.2. Barómetro aneroide	817
101.8.3. Barógrafos mecánicos	817
101.8.4. Barógrafos eléctricos y barógrafos electrónicos ..	817
Capítulo 102. Redes de medida, control y previsión de la contaminación at- mosférica	819
102.1. Redes meteorológicas	819
102.1.1. Bases generales	819
102.1.2. Estaciones meteorológicas	819
102.1.3. Establecimiento de una red meteorológica local ..	820
102.1.4. Estaciones meteorológicas automáticas	824
102.1.5. Captación y gestión de datos	826
102.2. Modelo de predicción meteorológica para el control de emi- siones	828
102.3. Diseño de redes de vigilancia de la contaminación atmo- sférica	830
102.4. Controles europeos	832
102.5. Controles generales en España	832
102.6. Diseño de redes de inmisión para establecimientos indus- triales	833
102.7. Sistemas integrados de control y predicción de la contami- nación atmosférica	834
102.8. Sistemas integrales regionales de medida y control de la calidad del aire	837
102.9. Ejemplo de diseño de un sistema integral de predicción ..	838
102.9.1. Bases generales	838
102.9.2. Composición de un sistema integral de predicción ..	838
Capítulo 103. Metodología de análisis climatológicos para el estudio de la contaminación atmosférica	841
103.1. Factores de análisis	841
103.2. Situaciones atmosféricas	842
103.3. Controles y medidas	842

	Págs.
Capítulo 104. Índices e indicadores de contaminación atmosférica	845
104.1. Bases generales	845
104.2. Índices de contaminación atmosférica	845
104.3. Indicadores e índices químicos, biológicos y bioquímicos de la contaminación atmosférica	847
104.3.1. Bases de partida	847
104.3.2. Indicadores	848
104.3.3. Bioensayos	851
104.3.4. Índice de pureza atmosférica (IPA)	851
104.4. Teledetección	853
104.4.1. Teledetección pura	853
104.4.2. Fotografía	854
104.5. Indicadores de impacto	856

DECIMOSÉXTA PARTE
PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA
EN EL MEDIO URBANO, EN EL MEDIO INDUSTRIAL
Y EN EL MEDIO RURAL

Capítulo 105. Mejoras y tratamientos de los combustibles	859
105.1. Combustibles básicos. Datos y bases generales	859
105.2. Combustibles sólidos	859
105.3. Combustibles líquidos	861
105.4. Combustibles gaseosos	861
Capítulo 106. Gestión industrial y urbanística	863
106.1. Gestión y desarrollo de zonas urbanas o industriales. Bases generales	863
106.2. Los planes urbanísticos	864
106.3. Programa y modelo de desarrollo de unidades habitaciona- les en función del Medio Ambiente	865
106.3.1. Bases de partida y objetivos	865
106.3.2. Planteamientos básicos	866
106.3.3. Áreas de actuación y desarrollo inicial	866
106.3.4. Programa de actuación y modelo de desarrollo	867
106.4. Implantación industrial	870
106.5. Condicionantes de planeamiento en zonas industriales	871
106.5.1. Condicionantes básicos	871
106.5.2. Condicionantes específicos	872

	Págs.
106.5.3. Condicionantes complementarios	872
106.6. El paisaje industrial como elemento integrador	872
106.7. Localización de áreas industriales	874
Capítulo 107. Casos prácticos y ejemplos	875
107.1. Caso práctico de balance de materia y energía en la combustión. Emisiones en chimenea	875
107.2. Casos prácticos de planificación y control de la contaminación atmosférica	877
107.2.1. Información y datos de partida para estudios globales y de planificación del control de la contaminación atmosférica en un territorio	877
107.2.2. Establecimiento de redes de control de contaminación atmosférica	879
107.2.3. Plan de evaluación para casos de contaminación atmosférica. Análisis en emisiones e inmisiones	881
107.3. Casos prácticos de control de la contaminación atmosférica en zonas rurales	882
107.3.1. Estudio de la contaminación atmosférica de un área industrial sobre su entorno agrario	882
107.3.2. Ejemplo de estudio de contaminación atmosférica de origen industrial sobre una plantación agrícola	888
107.3.3. Plan de análisis ambiental de las posibles alteraciones sobre viñedos provocadas por emisiones de SO ₂ de una industria papelera	891
107.3.4. Programa correspondiente al estudio sobre la contaminación agraria provocada por las emisiones de flúor de dos industrias del norte de España realizado por nosotros a finales de los años 70	892

DECIMOSÉPTIMA PARTE

GESTIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA EMPRESA

Capítulo 108. Estrategias y responsabilidades medioambientales en la empresa	897
108.1. Estrategias medioambientales básicas de la empresa	897
108.1.1. Crisis medioambiental y conciencia ecológica	897
108.1.2. Responsabilidad	898
108.1.3. Ayudas y fondos	898

	Págs.
108.1.4. Seguros	899
108.1.5. Auditorías	900
108.1.6. Información	900
108.1.7. Control y vigilancia	900
108.1.8. Ecoetiquetas y ecoproductos	901
108.2. Responsabilidades y gestión medioambiental de la empresa .	903
108.3. Responsabilidad de la empresa y autorregulación	904
108.4. Responsabilidad civil, contaminación y aseguramiento ..	907
108.5. Responsabilidad de la empresa en materia de medio ambiente	908
108.5.1. Generalidades	908
108.5.2. Responsabilidad civil	908
108.5.3. Responsabilidad penal	909
108.5.4. Responsabilidad industrial	909
108.5.5. Responsabilidad por actividades	909
108.5.6. Objetivación de la responsabilidad	909
108.5.7. Relación de causalidad	910
108.5.8. Vías procesales y responsabilidad	910
108.5.9. Responsabilidad y canon por contaminación ..	910
108.5.10. Prescripción	911
108.5.11. Responsabilidad en Servicios Públicos	911
108.5.12. Responsabilidad penal de los funcionarios públicos	912
108.5.13. Responsabilidad Civil Objetiva en la Unión Europea	912
108.5.14. El libro verde sobre la reparación del daño ecológico	912
108.5.15. Responsabilidad Civil Objetiva en España ...	913
108.5.16. Responsabilidad Civil derivada de la penal ...	914
Capítulo 109. Los instrumentos de acción	917
109.1. Análisis ambiental y planificación	917
109.1.1. Los grandes temas de ecología y desarrollo ...	917
109.1.2. Planificación, desarrollo sostenible y economía ..	918
109.1.3. Desarrollo y uso integral de los recursos en función del Medio Ambiente	918
109.2. La Legislación	919
109.3. Instrumentos para la gestión medioambiental en la empresa .	919
109.3.1. Ecobalance o análisis del ciclo de vida	919
109.3.2. Declaración o informe anual	919
109.3.3. Auditorias y diagnósticos medioambientales ...	919

	Págs.
109.3.4. Sistemas de ecoetiquetado	921
109.3.5. Sistemas de gestión ambiental	921
109.3.6. Evaluaciones de impacto ambiental	923

DECIMOCTAVA PARTE
ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Capítulo 110. Economía, desarrollo y Medio Ambiente	929
110.1. Desarrollo económico y Medio Ambiente	929
110.2. Protección del Medio Ambiente y desarrollo económico .	930
110.3. Prioridades entre la economía y el Medio Ambiente	931
110.4. Instrumentos económicos	932
Capítulo 111. Costos de la contaminación atmosférica	935
111.1. Bases generales	935
111.2. Niveles óptimos de control de la contaminación atmosférica .	935
111.3. Los costos del control de la contaminación atmosférica . .	938
111.4. Los costos básicos y definidos de la contaminación atmosférica en función de las limitaciones legales	938
111.5. Costos de la gestión medioambiental en la empresa (orientada a la contaminación atmosférica)	939
111.6. Costos medioambientales de la empresa	941
Capítulo 112. Consecuencias económicas de la contaminación atmosférica . .	943
Capítulo 113. Modelo y plan de estudio económico de la contaminación atmosférica en un territorio	945
113.1. Bases generales del plan	945
113.2. Programa del estudio	945

DECIMONOVENA PARTE
LEGISLACIÓN Y NORMATIVA VIGENTE

Capítulo 114. Líneas generales de la legislación medioambiental	949
114.1. El Derecho Constitucional	949
114.1.1. El Problema general	949
114.1.2. La Constitución Europea	950
114.1.3. Concepto constitucional de Medio Ambiente . . .	950
114.1.4. Tareas y funciones del Estado	952

	Págs.
114.1.5. Competencias	952
114.2. El Derecho basado en el Derecho Romano	953
114.3. El Derecho Internacional	954
114.4. La costumbre	955
114.5. El Derecho Penal	956
114.6. La responsabilidad civil	957
Capítulo 115. Legislación sobre contaminación atmosférica en la Unión Europea	959
115.1. Bases generales	959
115.2. Directiva 96/61/CE del Consejo de 24 de septiembre de 1996, en España, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación. DOCE nº L 257 de 10-10-1996	961
115.3. Anexo I: Categorías de actividades industriales contempladas en el artículo 1	963
115.4. Anexo II: Lista indicativa de las principales sustancias contaminantes que se tomarán obligatoriamente en consideración si son pertinentes para fijar valores límite de emisiones	967
115.5. Normativa vigente	967
Capítulo 116. Legislación sobre la contaminación atmosférica en el Estado Español	979
116.1. Explicación general	979
116.2. Concentraciones máximas de contaminantes permitidas en explotaciones industriales	980
116.3. Legislación básica	983
116.4. Ley de Protección del Ambiente Atmosférico	988
116.5. Normativa estatal: Listado cronológico de la legislación ..	1042
Capítulo 117. Legislación Autonómica sobre la contaminación atmosférica ..	1049
Capítulo 118. Legislación Local sobre la contaminación atmosférica	1055
118.1. Bases generales	1055
118.2. Niveles de inmisión de referencia para la declaración de situación de alerta atmosférica	1056
118.3. Medidas para situaciones de alerta atmosférica	1057
Bibliografía	1059
Índice alfabético	1099

INTRODUCCIÓN

EXPLICACIONES Y JUSTIFICACIÓN DEL AUTOR

A finales de los años 60 y principios de los 70 del pasado siglo, durante los últimos años de mi carrera de Ingeniero de Montes, y a la vista de lo que se hablaba de la contaminación ambiental, comencé a interesarme por este problema al caer en mis manos algunos documentos de la OCDE y algunos libros que, casualmente, trataban sobre la contaminación atmosférica, que, en principio, era el problema más grave de contaminación por lo que afectaba directamente a los ciudadanos.

Después de leer esos libros y finalizados los estudios, mi orientación profesional se dirigió al mismo tema, pero volcada en gran parte a la contaminación del medio natural, al tener como base una carrera como la citada, que sienta unos muy sólidos conocimientos sobre el medio natural y de ingeniería que sirvieron muy bien para completar más la formación en esta especialidad.

La siguiente fase fue mi entrada en el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias como becario provisional, y después obtuve una beca de la OCDE que me permitió trabajar en diversos la-

boratorios del Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) de Francia y en los del Eidgenossische Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV) de Suiza, fundamentalmente en temas de contaminación atmosférica.

En esa situación, aproveché para realizar a la vez en esos laboratorios mi tesis doctoral sobre la contaminación atmosférica de la vegetación, dirigida por el gran Ingeniero de Montes y Rector de la Universidad Politécnica de Madrid que fue don José Luis Ramos Figueras, y presentada como modelo de tesis doctorales en el Congreso Mundial de Rectores de Universidad celebrado en Mainau (Alemania) en 1972.

A mi vuelta al INIA, mi destino fue el Departamento Nacional de Análisis Ambiental, del que tuve el gusto y el honor de diseñar su organización y donde me encargué de todos los temas de contaminación atmosférica durante varios años.

Otra beca en 1977, esta vez Eisenhower, me permitió seguir estudiando y trabajando más sobre el tema en Estados Unidos.

Mientras tanto, realicé algunas publicaciones sobre la contaminación ambiental (*La Contaminación Agraria reci-*

bió el Premio Nacional al mejor libro técnico de 1978), que incluían algunos capítulos de contaminación atmosférica.

Bastantes años después, y orientado profesionalmente a la Ingeniería Medioambiental Aplicada, me comprometí a desarrollar en una colección la abundante información recopilada a lo largo de todos esos años de trabajo en libros, en documentos y en más de 400 estudios y proyectos realizados sobre ese tema en 10 países.

¿Y qué pasó con la contaminación atmosférica? Pues simplemente, que en alguno de los 17 libros anteriores de la colección la seguíamos tratando en algunos capítulos hasta que a finales del año 2000 me di cuenta que estábamos dejando una laguna que empezaba a tomar, en nuestro concepto, visos de imperdonable, a causa de la importancia del tema y de la abundantísima información de que disponíamos.

Esta es la explicación de la salida a la luz de esta obra, en la que particularmente y por todo lo expuesto, creo que es natural que el autor tenga un interés especial en ella.

ANÁLISIS DE PROBLEMA

La protección del Medio Ambiente es uno de los mayores desafíos del desarrollo económico actual y futuro.

El desarrollo sostenible es una necesidad que ha de asociar el avance de una industria competitiva que cree empleo y recursos, una buena calidad de vida ur-

baña y rural y la protección del patrimonio natural, lo que supone la toma de responsabilidades por parte de todos los que estamos implicados en un avance positivo de la sociedad.

El Medio Ambiente en el que vivimos y que citamos es un crisol en el que se desarrollan infinidad de fenómenos más o menos complejos, temporales y de escala.

En este contexto, los procesos a nivel local tendrán una consideración política específica adaptada al problema, mientras que los procesos a escala planetaria como el recalentamiento de la Tierra, el agujero de ozono, etc., se consideran desde un punto de vista global, a través de instituciones internacionales y con una sensibilización de la población muy superior a la que tienen los procesos localizados. Sin embargo, estos últimos constituyen posiblemente una amenaza de más envergadura, pues son más inmediatos y de más proximidad: *La contaminación atmosférica está entre la población* y las basuras urbanas o las aguas residuales son alteraciones medioambientales de contacto.

El sistema de vida de la sociedad moderna contamina el aire, pues la circulación urbana e interurbana, la industria que fabrica todo lo que necesitamos y un gran exceso de productos completamente superfluos, el tráfico aéreo, las calefacciones domésticas o la energía son el origen de una contaminación atmosférica que afecta radicalmente a la sociedad y que es el motivo de este libro.

¿Pero es que hay que abandonar esto que llamamos avances de la humanidad?

La medicina, el transporte rápido y seguro, el bienestar a nivel doméstico, las comodidades de la sociedad, el vestido o la luz son logros de los que no se puede prescindir, pero que tienen efectos secundarios indeseables: se genera contaminación del aire, del agua y del suelo, se producen residuos, se pone en riesgo la salud por el peligro potencial de la energía nuclear, etc.

Pero en esta situación y hagamos lo que hagamos, el hombre sigue dependiendo del Medio Ambiente: respira el aire que hay, limpio o contaminado, come los alimentos a los que tiene acceso, naturales o artificiales y contaminados o no, y bebe el agua de que dispone, potable o contaminada.

Esto es lo que hay, y *lo tomamos o nos hundimos*: no hay alternativa, o mejor dicho, sí la hay, y esta se basa en el desarrollo sostenible, o sea, en la razón.

Podemos avanzar como sociedad, pero podemos reducir la contaminación con la tecnología, con la ley y con la investigación, y ahí debemos encaminarnos.

Centrándonos en nuestro tema, y así de claro está, el primer acto del hombre al nacer es respirar. Pero no circunstancialmente, sino que necesita 12.000 litros diarios de aire durante toda su vida.

El medio atmosférico representa, solo por este hecho, una de las bases de la vida, y no sólo humana, sino de todas las especies terrestres vivas.

El hombre tiene en su aparato respiratorio una superficie alveolar de cerca

de 100 m², y este sistema filtra, depura y defiende la salud, y detecta información inmunitaria.

Los animales terrestres tienen sus sistemas respiratorios, y las plantas lo mismo. Todos necesitan aire, y aire aceptable.

Si ese aire sufre una modificación cualitativa o cuantitativa en su composición normal, se puede decir que está contaminado.

¿Y desde cuando esto es así? Pues desde que los volcanes entran en erupción si se considera la contaminación de origen natural, o desde que el hombre descubrió el fuego, hace medio millón de años, si se tiene en cuenta la contaminación de origen antrópico, habiéndose agravado con la revolución industrial en el siglo XIX y mucho más en los últimos 50 años, coincidentes con la sociedad de consumo.

La contaminación atmosférica siempre se ha referido al ambiente abierto, al aire libre, pero ahora debemos tener en cuenta que cerca del 90% de nuestro tiempo lo pasamos dentro de espacios cerrados como son las viviendas, los locales de ocio, las oficinas, las industrias o los sistemas de transporte, por lo que también debe analizarse esta situación.

Así como en los años 60 del siglo pasado la contaminación era sinónimo de contaminación atmosférica urbana, ahora debemos tener en cuenta también el aire de los interiores, pues en ellos se respira y por esto tiene más CO₂, y además en estos recintos existen múltiples materiales contaminantes, y frecuente-

mente un clima artificial en temperatura y humedad con el que buscamos mayor confort mediante calefacciones y con el aire acondicionado.

Por otra parte, en las oficinas, y sobre todo en el interior de ciertas industrias, el ambiente puede estar muy contaminado por los agentes propios de cada actividad.

RAZONAMIENTO Y PLAN DE LA OBRA

Hemos de decir además, e insistimos en ello, que si en los años 60 existía el criterio ya expuesto, en los años 30 y 40 del siglo pasado en los países más avanzados, y en España en los años 50 y 60, las ideas eran muy diferentes, ya que la existencia de chimeneas con humo era sinónimo de desarrollo y de actividad, pues las zonas que primero se industrializaron, como Bilbao o ciertos puntos de Asturias, eran las más prósperas del país en lo que se refiere a nivel de vida en general, aunque no a calidad de vida tal como entendemos este concepto actualmente.

La evolución del problema, tema que se desarrolla en el primer capítulo, fue al final un gran cambio, en el que la presión social, unida al reconocimiento oficial de la situación y a pesar de la postura totalmente negativa de muchas industrias, sobre todo de las energéticas (este enfoque totalmente desfasado se mantuvo con frecuencia en España hasta finales del siglo pasado), consiguió que se legislara al respecto y que la investigación de productos y tecnologías dieran

un gran avance, y como consecuencia, que los problemas de contaminación atmosférica locales se redujeran.

Pero, aún así, ahora surgen con fuerza problemas a gran escala, a nivel planetario, que ya hemos citado, como son el recalentamiento del planeta, la destrucción de la capa de ozono y la acidificación del medio en muchas zonas (este último problema es intermedio en escala, pues es más bien regional).

En esta obra se tratan, en 19 Partes, todos estos puntos.

Los aspectos históricos, los agentes contaminantes y sus fuentes, las relaciones entre el clima y la contaminación atmosférica, constituyen los primeros capítulos del libro.

El medio natural, y sobre todo sus biocenosis, como la vegetación o la fauna, siguen a continuación, tratándose especialmente todo lo referente a la salud humana.

Después se entra en el problema a nivel urbano y de los interiores.

Las Partes siguientes se refieren al control, al tratamiento y a la medida de la contaminación atmosférica.

Finalmente se orienta la gestión de la contaminación atmosférica a nivel empresarial y se presenta un análisis económico a escalas variables.

La publicación se completa con un compendio de la legislación vigente en la Unión Europea, en la propia del Estado Español, y con la correspondiente a las Comunidades Autónomas y a los entes locales.

PRIMERA PARTE

Bases de partida

CAPÍTULO 1

HISTORIA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

1.1. LOS TIEMPOS REMOTOS

A lo largo de los tiempos, las condiciones ambientales de nuestro planeta han ido cambiando como consecuencia de la acción de múltiples factores, tanto internos como externos.

Evidentemente, la acción del hombre no existió hasta finales de la Era Terciaria, pero en el período previo las fuentes naturales de contaminación atmosférica, unidas a los cambios climáticos y a las catástrofes ecológicas, condicionaron totalmente la vida en la Tierra.

En la Era Primaria, la vegetación se desarrolló intensamente en el Silúrico. La fauna era predominantemente marina, y al final de este período, al acabarse el Pérmico (hace unos 215 millones de años), y en plena transición a la Era Secundaria (concretamente al Triásico), la desaparición de múltiples especies marinas y terrestres fue una verdadera catástrofe. En estas épocas, y sobre todo en el Pérmico, las grandes erupciones volcá-

nicas marcaron en gran parte la pauta del proceso.

Debemos tener en cuenta por otra parte que la vegetación potentísima del Carbonífero tuvo una fuerte regresión en esa transición del Pérmico al Triásico que citamos. Las causas de esta regresión fueron la tendencia climática a la aridez en diversas zonas del planeta y las catástrofes geológicas, unidas posiblemente al efecto dominó a lo largo de las cadenas tróficas, al faltar el alimento en alguno de sus eslabones. Debemos hacer notar que en el Triásico continuaron las grandes erupciones volcánicas del Pérmico, y fueron así uno de los factores condicionantes de la evolución de la vida.

La transición entre la Era Secundaria y la Terciaria, y en concreto el paso del Cretácico al Eoceno, hace 70 millones de años, fue, si cabe, todavía más radical, pues en lo que se refiere a la fauna, desaparecieron 16 grandes grupos zoológicos. La Era Secundaria, o Era de los

reptiles, vio a su final la extinción de gran parte de estos vertebrados.

En la Era Terciaria se sucedieron períodos muy secos, con gran aumento de la salinidad de las aguas, con períodos de fuertes precipitaciones. En la segunda mitad de la Era Terciaria se realizaron los grandes plegamientos que generaron las cadenas montañosas más emblemáticas (Alpes, Himalaya, Andes, etc.).

La Era Cuaternaria se caracterizó fundamentalmente por la sucesión de períodos glaciales (glaciaciones) con períodos interglaciales. En los primeros la flora correspondiente a climas fríos se desarrollaba y avanzaba, y en los segundos ocurría lo mismo con la flora cálida. Con la fauna ocurrió lo mismo.

1.2. LA PROTOHISTORIA

¿Y el hombre? Parece ser que el género *Homo* apareció hace algo más de 2 millones de años, en la Era Terciaria, a finales del Plioceno.

La situación que se encontró fue básicamente de lucha por la supervivencia, y su primer impacto sobre el medio ocurrió poco después, precisamente con la principal fuente de contaminación atmosférica, como es la combustión, es decir, al descubrir el fuego.

A partir de este momento, en el Paleolítico, la quema de vegetación para cazar supuso una gravísima perturbación de los ecosistemas (sobre todo de las comunidades vegetales) en amplias regiones de África, Asia, Europa Central y América.

La quema masiva de vegetación fue así la primera agresión grave del hombre a la atmósfera, al generar partículas, gases y calor en múltiples puntos de las regiones que indicamos.

El hombre de las cavernas ya prestaba atención al problema de la contaminación atmosférica, pues a partir del momento en que comenzó a emplear el fuego, el individuo que utilizaba materiales húmedos o inadecuados para la combustión, era castigado por sus compañeros debido al humo u olores que provocaba en el interior de la vivienda. Es muy posible que en esas épocas ya se dieran casos de asfixia debida a las emanaciones.

Posteriormente, en el Neolítico, el hombre agricultor quemaba el bosque para practicar la agricultura, y así hizo retroceder a las grandes masas forestales del Pleistoceno de muchas zonas del mundo.

En Europa existen vestigios de esta práctica desde mediados del Mesolítico.

Desde el punto de vista de esta publicación, estas actividades humanas supusieron un aporte masivo de contaminantes a la atmósfera, unido al de origen natural como es el vulcanismo.

1.3. LA HISTORIA

Al concentrarse la población a causa del comienzo de la práctica de la agricultura sedentaria, la densidad de individuos en cada núcleo habitado creció hasta superar la de cualquier otra especie de ma-

míferos. Esto trajo consecuencias ambientales como la proliferación de enfermedades y la contaminación de las aguas, del suelo y, en menor medida, de las aguas.

Al irse desarrollando los *burgos* y los precursores de los grandes núcleos urbanos, fue creciendo la importancia de la contaminación atmosférica hasta la gran expansión del problema como consecuencia de la *revolución industrial*.

En los relatos bíblicos se señala que Sodoma y Gomorra fueron destruidas por una lluvia de fuego y azufre. Es probable que este castigo fuera de parecidas características a la erupción que asoló Herculano y Pompeya en el año 79.

En el siglo VI d. J.C. el *Corpus Juris Cicilis* del emperador *Justiniano* indica que *Aerem corrumpere non licet* (prohibido contaminar el aire).

En 1273 se prohibió quemar carbón en Londres.

En 1542 el núcleo de Los Ángeles era conocido bajo el nombre de *Bahía de los Humos*.

El opúsculo «*Fumifugium*», aparecido en Londres en el siglo XVII, cita en uno de sus párrafos: «*Mientras que el aire es puro y sereno en otros lugares, aquí es eclipsado por tales nubes de azufre que el Sol mismo, que ilumina por doquier, apenas es capaz de traspasarlas y dispersarlas, y el viajero fatigado nota en su olfato, mucho antes de verla, la ciudad hacia la cual se dirige.*»

Fumar es una actividad de ciertas sociedades humanas desde hace más de 1.000 años.

En Europa parece ser que el primer fumador fue el marinero *Rodrigo de Jerez*, que al volver en la carabela Niña con *Colón* el 14 de marzo de 1493, fue encarcelado por habersele visto fumando en una pipa.

A partir de este momento la costumbre de fumar se extendió prácticamente por todo el planeta.

El rey *Jaime I* de Inglaterra emprendió la primera campaña antitabaco que se conoce, en 1604, con la *Counterblast to Tobacco*, pero no fue suficiente, y se empezaron a proclamar supuestas virtudes del fumar: era eficaz contra la peste, contra los catarros y contra la fiebre.

Las modas y la adicción acabaron por extenderlo, y a esto contribuyó —y contribuye— enormemente la entrada de enormes sumas de dinero en las arcas de cada Estado por los impuestos sobre el tabaco.

En el siglo XVII (en 1661, exactamente) el rey *Carlos II* analizó un proyecto para controlar la «*hellish and dismal cloud*» que envolvía a Londres, redactado por *J. Evelyn*.

En 1810 *Napoleón* estableció un Decreto por el que para desarrollar actividades industriales que emitieran malos olores (asociados casi siempre a contaminaciones de otro tipo), era necesaria la correspondiente autorización administrativa.

A lo largo del siglo XIX, y sobre todo a partir de sus postrimerías, en plena revolución industrial, la contaminación atmosférica aumentó considerablemente

como consecuencia del cambio drástico de la forma de vida del hombre habitante de las ciudades. La minería, la metalurgia, las calefacciones, el ferrocarril y los barcos de vapor y otros muchos avances de la técnica provocaban emisiones crecientes y más y más contaminantes.

En el siglo xx la situación siguió agravándose, y así se llegó a casos históricos de situaciones extremas como las que se citan a continuación.

Caso del valle del río Mosela

El valle del río Mosela, en la zona ubicada entre Huy y Seraign, cerca del Lieja, tuvo un episodio importante de contaminación atmosférica en el primer tercio del siglo xx, que si no fue el único, pues existían antecedentes en la misma zona, sí fue el más grave.

A primeros de diciembre de 1930 una espesa capa de niebla cubrió Bélgica, coincidiendo con una inversión térmica en la zona que citamos. Esta zona es un valle flanqueado por colinas de unos 100 m de altitud, de 24 km de longitud, que en aquella época ya tenía una fuerte densidad industrial del ramo metalúrgico, del vidrio, fábricas de ácido sulfúrico y químicas de todo tipo, incluidas plantas de fertilizantes.

Después de tres días de no variar las condiciones ambientales citadas, la población empezó a tener problemas en las vías respiratorias. Los grupos sociales más sensibles (ancianos y niños) sufrieron más, como ocurre siempre, falleciendo alrededor de 60 personas por esas

causas, siendo la mayoría ancianos o individuos con enfermedades pulmonares o cardíacos crónicos.

Una parte importante de la población (de 3 a 5.000 personas) presentó cuadros de tos, de ahogo y de insuficiencia respiratoria.

Las causas de esta situación fueron:

- Situación meteorológica desfavorable: Niebla persistente e inversión térmica.
- Presencia de SO_2 (hasta 100 mg/m^3) y derivados.
- Presencia de otros gases irritantes.
- Formación de aerosoles.
- Situación normal de emisiones de las industrias de la zona

Caso de Donora

La ciudad de Donora, con unos 15.000 habitantes, situada en la zona noroeste de los Estados Unidos, sufrió varios episodios graves de contaminación atmosférica en 1943, en 1945 y a finales de octubre de 1948, siendo este último el más destacado.

Con condiciones meteorológicas similares a los del caso del valle del Mosela de 1930, de niebla espesa e inversión térmica, y con características ecotopográficas y de desarrollo industrial también muy parecidas, como son las de tratarse de un valle fluvial (río Monongahela) flanqueado por colinas de algo más de 100 m de altitud, en el

que se ubican industrias siderometalúrgicas y una fábrica de ácido sulfúrico, el problema fue casi igual.

Se presentaron cuadros de alteraciones respiratorias en el 43% de la población desde niveles benignos hasta casos graves, falleciendo 17 personas.

Las causas de esta situación fueron:

- Situación meteorológica desfavorable. Niebla persistente e inversión térmica.
- Presencia de varios gases contaminantes entre los que predominaba el SO_2 (en concentración hasta 6 mg/m^3).
- Situación normal de emisiones de las industrias de la zona.

Casos de Londres

El valle del río Támesis tiene fama, entre otras cosas, por sus espesas nieblas, y lo mismo ocurre prácticamente con casi todo el área metropolitana de Londres.

Por otra parte, también son frecuentes en esas zonas las situaciones anticiclónicas de estabilidad meteorológica y las inversiones térmicas.

A lo largo de los dos últimos siglos, coincidiendo con el comienzo del uso masivo del carbón para las cocinas y en la calefacción doméstica, se fueron presentando episodios que al principio fueron frecuentes en cada invierno, y que luego se limitaron a algunos días en los que había inversión térmica.

Se tienen noticias e información de los episodios de los siguientes años:

1873	1882	1891
1874	1883	1892
1875	1884	1948
1882	1885	1952
1877	1886	1956
1878	1887	1957
1879	1888	1962
1880	1889	
	1890	

Es muy posible que los casos de finales del siglo XIX fueran especialmente graves en lo que se refiere a los fallecimientos, pero el de principios de Diciembre de 1852 fue el más grave, ya que causó probablemente más de 4.000 defunciones y decenas de miles de casos de problemas en las vías respiratorias.

El gas presente fue básicamente SO_2 , a niveles que llegaron a alcanzar los 4 mg/m^3 .

El caso de Enero de 1956 causó 1.000 muertes en una situación similar, pero con concentraciones de SO_2 del orden de 1,6 mg/m^3 .

En 1957 el episodio de primeros de Enero aunque, con menos contaminación, causó cerca de 1.000 defunciones.

A primeros de Diciembre de 1962 se repitió el caso, con menos niebla pero con niveles de SO_2 del orden de los 4 mg/m^3 , y con 340 defunciones.

Casos de Los Ángeles

Ya hemos indicado en otros apartados de esta obra que el antiguo núcleo de Los Ángeles era denominado como un punto con problemas de concentración de humos por sus peculiares características topográficas.

Constituye un lugar casi cerrado al estar rodeado por montañas, lo que hace que los desplazamientos horizontales del aire sean lentos.

Desde principios del verano hasta casi mediado el otoño se ha observado desde hace más de 60 años un aumento de la contaminación atmosférica de la zona, que se traduce en molestias generalizadas en las vías respiratorias.

Aunque este tema se desarrolla en otros capítulos de esta obra, solamente indicamos que se trata del smog fotoquímico, diferente del de Londres, que se forma por la presencia de oxidantes fotoquímicos secundarios como el ozono, los aldehídos o los PAN, activados por la acción de la radiación solar y por la humedad del aire.

Aunque mucha de la contaminación se ha reducido, suelen ocurrir pequeños episodios de 10 a 20 días al año.

Caso de Poza Rica

En 1950 una planta de tratamiento de gas natural ubicada en esta ciudad mexicana sufrió un accidente que trajo como consecuencia la emisión de una fuerte cantidad de SH_2 , lo que causó la muerte a 22 personas y graves daños a otras 400.

La situación ambiental fue una muy frecuente en estos casos: Desplazamiento horizontal del aire lento o casi nulo, e inversión térmica.

Caso de Nueva Orleans

En 1958 un período de estabilidad atmosférica y una elevada concentración de contaminantes provocaron un aumento muy apreciable de los casos de asma en toda la ciudad, situación que volvió a la normalidad en cuanto las calmas meteorológicas desaparecieron.

Caso de Walsum

A primeros de Abril de 1952 ocurrió un accidente en una fábrica de cloro ubicada en esta ciudad del Valle del Rin cercana a Düsseldorf. Como consecuencia del accidente hubo una emisión de cloro que se desplazó lentamente por el aire, causando cinco muertos y cerca de 250 intoxicaciones.

Caso de Yokkaichi

La ciudad industrial de Yokkaichi, ubicada en la costa del Japón, cerca de Suzuka y a unos 30 km de Nagoya, posee una de las mayores refinerías del país.

Esta industria procesaba desde los años 60 del siglo pasado petróleo rico en azufre (con más del 3% del anfígeno), y no utilizaba en esa época ningún sistema de desulfuración.

En una serie de investigaciones médicas realizadas entre 1963 y 1983, se comprobó un fuerte incremento de la tasa de mortalidad debida a bronquitis crónica y al asma cuando aumentaban las emisiones del SO_2 , y una reducción de esas tasas al bajar la contaminación.

El efecto de este descenso de las tasas de mortalidad al decrecer las emisiones era inmediato en lo que se refiere al asma, y con un retraso de varios meses en las tasas con origen en la bronquitis crónica.

Casos de París

En esta ciudad la contaminación atmosférica se ha estudiado desde principios del siglo XX, y sobre todo a partir de los años 60.

Se puede indicar que cuando la concentración de SO_2 supera los 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{día}$, aumenta la tasa de mortalidad por neumopatía aguda en más de un 20%.

Caso de Montchanin

Esta pequeña aglomeración urbana francesa de Saône et Loire, situada a unos 30 km de Autun, instaló en los años 70 un depósito de residuos industriales, que entre 1978 y 1988 incluyó numerosos productos volátiles como tolueno, estireno y diversos hidrocarburos nitrogenados y halogenados.

Las autoridades sanitarias de la zona constataron problemas generales de salud poco después, con aumentos notables de cefaleas, irritación de las mucosas y otros.

A la vista de esta situación y una vez fue clausurado el depósito, se realizó una investigación de 1980 a 1990, comprobándose un claro aumento de la tasa de mortalidad debida a patologías respiratorias. Antes se habría observado un considerable aumento en el consumo de productos farmacéuticos destinados al tratamiento de patologías de las vías respiratorias.

Caso Bhopal

En esta ciudad de la India, una fábrica de plaguicidas, a causa de un accidente, emitió, al aire, a mediados de Diciembre de 1984, un fuerte volumen de isocianato de metilo, producto enormemente tóxico, causando 2.500 muertos y numerosísimos afectados.

Lluvias ácidas en Alemania

En Baden-Wurtemberg estaban afectadas en 1983 el 14% de las piceas. Del total de bosque, en 1985 estaba afectado el 66%.

En Baviera, los daños afectaban al 57% de las masas forestales del Estado.

1.4. DESDE 1960 HASTA LA ACTUALIDAD

En los primeros años del siglo XXI nos encontramos en un mundo en el que muchas condiciones ambientales han ido cambiando de forma más o menos rápida, y entre estas, las que más se hacen

notar son aquellas sobre las que el hombre ha influido de una manera o de otra.

En los años 60 y 70 del siglo pasado, cuando se hablaba de contaminación siempre se presuponía la referencia a la contaminación atmosférica urbana, puesto que una gran masa de la población de los países vivía en las ciudades, los parques de vehículos iban *in crescendo*, múltiples industrias estaban establecidas dentro del casco urbano, y las calefacciones consumían sobre todo carbón (antracita) y en menor proporción algunos derivados del petróleo. Y las emisiones las respiraba el habitante de la ciudad. ¿Y qué nos encontramos ahora? 40 años después el cambio ha sido radical.

Los parques de vehículos automóviles han crecido enormemente, pero al mismo tiempo se ha avanzado mucho en la mejora de la calidad de los combustibles, en la combustión en los motores, en el rendimiento de los motores y en la reglamentación de las emisiones.

Las industrias que emitían gases a la atmósfera avanzaron mucho en el control de sus emisiones y, de todas maneras, la mayoría se trasladaron a zonas industriales *ad hoc*. Por otra parte, la reglamentación se desarrolló enormemente y el control actualmente es infinitamente superior al de aquella época.

Las calefacciones (o más bien sus calderas) cambiaron de combustible en su inmensa mayoría, y hoy priman el gas natural, el fuel o la electricidad. Además, la reglamentación, a nivel municipal sobre todo, se ha desarrollado hasta cotas muy notables.

En los mismos años del pasado siglo se asumía que las zonas industriales tenían que tener contaminación atmosférica *porque era lógico, ya que había industrias*, y en esa época primaba el desarrollismo sobre todo lo demás.

El medio natural sufre asimismo desde hace años unas agresiones sobre la composición normal de su atmósfera que se pueden ilustrar con infinidad de casos:

- Plomo de origen atmosférico en los hielos de Groenlandia de 0,01 µg/kg en 800 a J.C. a 0,2 µg/kg en 1960.
- Emisiones de SO₂ en BRD de un nivel 0,1 en 1850 a un nivel 3,8 en 1973 y 1,5 en 1991.
- Lluvias ácidas sobre lagos y masas forestales del Centro y Norte de Europa a partir de los años 60.
- Depósitos ácidos en el entorno de las grandes instalaciones de combustión en España a partir de mediados del decenio de los 70.
- Contaminación de vegetación y fauna en el entorno de ciertas vías de comunicación de gran circulación.
- Emisión accidental de dioxina en Seveso en 1976, en una fábrica de triclorofenol, provocando miles de muertes en aves (80.000) y en ganado porcino. Aparecieron asimismo malformaciones congénitas.
- En la Guerra del Golfo en 1991, el ejército iraquí incendió 600 pozos de petróleo, provocando una gravísima contaminación atmosférica y daños en

las zonas agrícolas y sobre las reservas de agua de la zona, e incluso, en los valles de los ríos Tigris y Éufrates en el propio Irak.

- La misma contaminación atmosférica provocó lluvias «negras» y daños sobre zonas agrícolas de Irán, Pakistán, Afganistán y Bulgaria.

En esas circunstancias se mantuvo el mundo *desarrollado* bastantes años, dándose casos en España, vividos por nosotros, como aquel en que se nos comunicó que *tal central térmica no contamina hasta el año 2001*, tomando una empresa eléctrica una postura irracional –generalizada en aquella época en muchas grandes empresas– de la incineración de cientos de miles de toneladas al año de un lignito rico en azufre, visto el peso de la empresa en la economía del país y la importancia y la necesidad de la energía, considerando que podría mantenerse sin gastos suplementarios en instalaciones de limpieza de los gases simplemente negando la evidencia de los efectos de sus emisiones, hasta el punto de aportar a la atmósfera alguno de aquellos años más de 800.000 Tm de derivados del azufre. Solamente la presión social (de muy poca fuerza) y, sobre todo la legislación, hicieron que bastantes años después se tomaran medidas, de forma que esas gigantescas emisiones se evitaran, o por lo menos parte de ellas.

Lo mismo podemos decir de la industria siderúrgica, de la del aluminio o de multitud de industrias químicas. Y de los tratamientos fitosanitarios en las actividades agroforestales.

Y, estando así de mejorada la situación en estos momento, ¿Nos podemos seguir planteando el problema de la contaminación atmosférica tal como se manifestaba en los años 70 y 80?

Radicalmente no, pero maticemos, planteándose el tema así en estos momentos:

- En los países desarrollados EE.UU., Unión Europea, Japón, Canadá y un corto etc., la normativa y la tecnología han permitido reducir muy considerablemente las emisiones a la atmósfera, tanto en las ciudades como en la industria.
- Muchos países de economías emergentes se encuentran en pleno desarrollo, con poca o ninguna legislación al respecto, y, en todo caso, si la hay casi nunca se cumple, por lo que el conjunto de sus emisiones a nivel industrial crece considerablemente.
- En esos mismos países que citamos sus ciudades crecen, y al aumentar su nivel de vida los parques de vehículos automóviles también crecen, con ningún control de sus emisiones. Así se llega a situaciones extremas como las de las ciudades de México D.F. o de Bangkok, que se citarán varias veces en esta publicación.
- Las diferencias básicas con la situación anterior son que los países desarrollados contaminan menos a nivel unitario pero igual o más a nivel urbano o de conjuntos industriales, a causa del crecimiento.

- Los demás países, que carecían de industria y en los que los parques de vehículos automóviles eran pequeños, han entrado en liza y contribuyen al aumento de la contaminación.
- Los órganos supranacionales e internacionales han desarrollado normativas, convenios y protocolos a los que –mal que bien– se van adheriendo los diferentes países, aunque el de Kyoto siga siendo rechazado por algunos países importantes como EE.UU., Australia, Italia y otros, y otros muchos –y entre ellos España– no lo hayan firmado todavía por considerar que las limitaciones a las emisiones de CO₂ reducen la capacidad competitiva de su industria respecto a la de los países que carecen de control técnico o legislativo.
- Los grupos científicos y ecologistas, cuya opinión o no existía o no pesaba nada en los años 70, han pasado a tomar un notable protagonismo, y gracias a ellos la postura de la sociedad ante estos problemas es ahora enormemente sensible.

Las prácticas agroforestales, que hemos citado en otro párrafo de este mismo capítulo, como las que corresponden a lo que se llamó la *revolución verde* de los años 80, buscaban la productividad, el uso de una sola especie y la eliminación de todos los enemigos de ella, que se produjera mucho y grande, etc. El medio fue la aplicación de tecnologías muy sofisticadas en todos los sectores del área que tratamos, es decir: semillas mejoradas, técnicas de siembra y de riego muy avanzadas,

gestión científica de los suelos y, en lo que más nos afecta a nuestro campo, técnicas avanzadas de fertilización, con consumo masivo de fertilizantes, que se tienen que producir en fábricas que emiten grandes cantidades de productos contaminantes, y con un uso, también masivo, de productos fitosanitarios que eliminan plagas, enfermedades y competidores de las especies vegetales objeto de explotación. Estos últimos productos, sobre todo plaguicidas y herbicidas, muchos de los cuales tienen gran persistencia, aparecen lejos de los puntos de aplicación, como se verá en los capítulos correspondientes.

Debemos hacer notar que esas técnicas que citamos operan en contra de la naturaleza, pues promueven la existencia de ecosistemas artificializados enormemente frágiles, con *una* especie, lejos totalmente de la *diversidad*, que es lo que confiere estabilidad a los ecosistemas poco o nada antropizados.

Así, ahora surgen la *Agricultura Ecológica*, los productos biológicos y todo aquello que la sociedad piensa que nos puede devolver a situaciones de calidad de los alimentos agrarios anteriores a los años 60.

La opinión pública se moviliza, y es impensable una contaminación atmosférica grave en una ciudad europea sin que las autoridades tomen las medidas oportunas (y ya previstas) o sin que la población manifieste de forma inmediata su protesta. Y lo mismo ocurre con la industria.

Actualmente algunas ciudades, como Madrid, están instalando sistemas de previsión de la contaminación atmosférica en función de los condicio-

nantes meteorológicos, de manera que se pueden predecir las situaciones problemáticas con tres o más días de antelación.

1.5. EJEMPLOS PUNTUALES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Lugar	Problema
Valle del Maurienne (Francia)	Industria del aluminio. Emisiones de derivados del fluor.
Fos-sur-Mer (Francia)	Industria metalúrgica y petroquímica. Emisiones de derivados del azufre, partículas y otros.
Lacq (Francia)	Procesamiento de gas natural. Emisiones diversas (sobre todo de SH ₂).
Nueva York (EE.UU.)	En 1953 y en 1966 hubo problemas graves de contaminación atmosférica urbana debida al tráfico y a las calefacciones. Actualmente la legislación ha reducido considerablemente las concentraciones a nivel urbano.
Huelva (España)	El complejo de industrias químicas, aunque ha reducido muy apreciablemente las emisiones de contaminantes, sigue manteniendo un nivel elevado de contaminación atmosférica.
México D.F.	La mayor ciudad del mundo, por la altitud a que se encuentra, por el parque de vehículos que contiene, por el descontrol en lo que se refiere a sus emisiones y por las industrias ubicadas en su valle, es posiblemente, en algunos de sus puntos (El Zócalo, etc.) la ciudad más contaminada del mundo.
Bangkok (Thailandia)	Esta ciudad tiene problemas de gran contaminación atmosférica, posiblemente a nivel de los de la ciudad de México.
Bilbao (España)	Esta ciudad costera de alta concentración industrial tuvo graves problemas de contaminación atmosférica entre los años 20 y 70, habiendo mejorado considerablemente a causa de las medidas puestas en marcha por las autoridades competentes.
Santiago de Chile	Por su situación topográfica, por su parque de vehículos y por su industria, es una de las ciudades más contaminadas del mundo.
Puertollano, Avilés, Algeciras, Tarragona, Ponferrada, Langreo (España)	Son ciudades industriales, con gran número de establecimientos que emiten agentes contaminantes al aire, que está con un nivel relativamente elevado de concentración de gases y partículas.
Centrales térmicas que consumen carbón	En general, las que consumen lignitos (Andorra la Nueva, As Pontes, etc., en España) ricos en azufre, si no tienen sistemas de separación del anfígeno, emiten enormes cantidades de SO ₂ al aire (del orden de cientos de miles de toneladas al año).

CAPÍTULO 2

LA UNIÓN EUROPEA Y OTROS ORGANISMOS ANTE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

2.1. LÍNEAS GENERALES

Indicó en 2000 Margot Wallström, Comisaria Europea de Medio Ambiente, que los últimos treinta años la política de medio ambiente ha sido una prioridad de la Unión Europea. Recientemente ha pasado a primer plano gracias al Tratado de Amsterdam, que la ha convertido en un objetivo político fundamental de la Unión. En estrecha asociación con los Estados miembros, la Unión Europea ha asumido las siguientes tareas: garantizar un alto nivel de bienestar para todos, restablecer la calidad del medio ambiente donde se haya deteriorado, y actuar para mantener el equilibrio esencial necesario para una adecuada calidad de vida y un desarrollo sostenible.

Para alcanzar estos objetivos se requiere un enfoque multisectorial que integre los aspectos políticos, económicos y científicos del problema. Este enfoque se basa en una estrategia a largo plazo y en el comportamiento cotidiano de las empresas y los ciudadanos. En él se in-

cluye también una estrategia de información que garantiza el acceso al tipo de información que nos ayuda a actuar de manera efectiva.

Los problemas causados por el desarrollo económico mundial no han cesado de agravarse durante los últimos 20 años. Aunque se han hecho importantes progresos en algunos campos, las señales de alarma continúan sonando. Europa tiene un papel fundamental en el ámbito ecológico, dada su situación como zona muy avanzada e industrializada; por ello, la Unión Europea toma sus responsabilidades en este terreno muy en serio. La política medioambiental comunitaria ha tenido ya algunos resultados positivos, pero todavía queda mucho por hacer.

La principal característica de la primera serie de políticas que se aplicó (1970-1985) fue su concepción esencialmente sectorial del medio ambiente y de las actuaciones que debían emprenderse (atmósfera, agua, residuos y otros aspectos se tendían a tratar por separado). Se

destacaba especialmente la lucha contra la contaminación y se utilizaban recursos relativamente limitados.

2.2. EL ENFOQUE PLANETARIO

Desde finales de la década de los ochenta se ha producido un cambio sustancial. Las primeras actuaciones sobre el medio ambiente dieron un resultado poco visible y continuaron produciéndose daños en una serie de zonas. Es más, aparte de los problemas de ámbito local, empezaron a observarse daños al medio ambiente a escala planetaria, como el cambio climático y el deterioro de la capa de ozono. Se observó que algunos productos contaminaban zonas geográficas muy alejadas de la fuente de emisión. Ni siquiera los casquetes polares se libraban de la contaminación. Finalmente, se han descubierto efectos acumulativos a largo plazo.

2.3. LA CONFERENCIA DE RÍO Y EL PROGRAMA 21

La comunidad internacional, reunida en Río de Janeiro aceptó, aunque de manera muy general, el objetivo de un desarrollo sostenible para todo el planeta.

Se acordó desarrollar la Convención marco sobre el cambio climático, que fija como objetivo la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en un nivel que no constituya una amenaza para el clima del planeta.

La Convención establece también la estabilización de las emisiones de CO₂

(el principal gas de efecto invernadero) para el año 2000.

En junio de 1997, los 160 signatarios de los acuerdos de Río se reunieron en la segunda cumbre de la Tierra en Nueva York.

A pesar de algunos resultados alentadores obtenidos después de Río, hubo situaciones negativas que no mejoraron. Por ejemplo, lejos de disminuir, las emisiones de gases de invernadero habían continuado aumentando.

Por su parte, la Unión Europea ha propuesto que todos los países industrializados reduzcan sus emisiones de CO₂ al 85% de los niveles de 1990 para el año 2010. Japón y los Estados Unidos hicieron suyo este objetivo en 1999, cuando se celebró la última conferencia internacional sobre el clima.

El Programa 21 marca las líneas a seguir en el actual siglo XXI.

2.4. EUROPA Y EL MEDIO AMBIENTE PLANETARIO

Algunos de los problemas más acuciantes de hoy son de carácter planetario, como el cambio climático.

Resulta revelador de la importancia de las cuestiones internacionales para la Unión Europea, que durante 1997, aproximadamente el 35% de la legislación ambiental aprobada se refería a compromisos internacionales.

La política medioambiental europea se ha ido centrando cada vez más en los

aspectos mundiales (cambio climático y diversidad biológica).

La Unión Europea ha aprobado más de 200 Directivas desde 1970 destinadas a mejorar la calidad de la atmósfera y las aguas, controlar la eliminación de residuos, supervisar los riesgos industriales y proteger la naturaleza. Los objetivos fundamentales de esta legislación han sido restringir las emisiones de azufre (causa principal de la lluvias ácidas), y prohibir la utilización de productos que dañan la capa de ozono.

2.5. BALANCE PROVISIONAL

En el campo del transporte se ha logrado una mayor sensibilización respecto a los problemas, y se han hecho progresos en las emisiones de los vehículos, la calidad de los combustibles y la tecnología, pero el crecimiento global del número de vehículos anula estos avances. En el sector de la energía, aunque el medio ambiente se ve como parte del problema y de la solución, falta una internalización de los costes ambientales en el precio de la energía.

En una serie de sectores, el informe de la Agencia Europea del Medio Ambiente subraya la evolución de la calidad del medio ambiente hacia una mejora en algunos ámbitos: los clorofluorocarbonos (CFC), los halones, los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los metales pesados.

En algunos otros sectores, se esperan (y se consiguieron) posibles mejoras para el año 2000:

- Emisiones de dióxido de azufre (SO_2)
- Producción de sustancias que deterioran el ozono
- Vertidos de metales pesados al Mar del Norte a través de la atmósfera y las aguas continentales
- Emisiones de dióxido de carbono (CO_2), a pesar de que existe una incertidumbre considerable, las reducciones previstas para el año 2000 pueden considerarse un primer paso hacia futuras disminuciones.

La Unión Europea va por el buen camino en algunos campos, pero todavía está lejos de alcanzar sus objetivos en lo que se refiere a:

- Acidificación: continuarán superándose de manera generalizada los límites críticos.
- Compuestos orgánicos volátiles (COV): ha habido una clara disminución de las emisiones de COV, pero la lenta aplicación de las directivas hace poco probable que se alcancen los objetivos previstos para el año 2005.

En los últimos años se ha producido el cierre de muchas explotaciones agrícolas y la pérdida de dos millones de empleos en las zonas rurales. Este fenómeno ha alterado sustancialmente la distribución de la población. La superficie cultivada ha descendido constantemente en Europa desde principio de la década de los sesenta. A la inversa, la reforestación y el crecimiento natural de los bosques ha dado lugar a un aumento de las zonas forestales en un 10% durante el mismo período.

El creciente desequilibrio entre campo y ciudad ha dado lugar a un mayor consumo de energía y a un desarrollo del transporte.

Se ha calculado que el efecto combinado de la urbanización y la movilidad en los países europeos más densamente poblados, hace que las zonas construidas se expandan a un ritmo del 2% cada diez años.

También se ha calculado que la red de carreteras consume ya el 1,3% de la superficie total de la Unión Europea, mientras que el ferrocarril sólo ocupa el 0,03%.

Ahora, dos de cada tres ciudadanos europeos viven en ciudades.

2.6. ALERTA AMBIENTAL

Por definición, toda actividad industrial utiliza recursos naturales, consume energía, genera residuos y emite contaminación. Para evitar que el medio ambiente resulte irreparablemente dañado, es crucial que continuemos reduciendo estos daños a un ritmo rápido. Los actuales niveles son verdaderamente alarmantes y, además, las materias primas se están agotando.

CONTRIBUCIÓN DE LA INDUSTRIA A LOS PRINCIPALES PROBLEMAS DE MEDIO AMBIENTE (1995)

Problema ambiental	Participación de la industria
Emisiones que provocan el cambio climático.	27% de las emisiones de CO ₂ 24% de las emisiones de N ₂ O
Destrucción de la capa de ozono.	80% de las emisiones de CFC
Acidificación del medio ambiente.	29% de las emisiones de SO ₂ 13% de las emisiones de NO _x
Emisiones que contaminan la atmósfera.	30% de las emisiones de COV

A pesar de estos esfuerzos, la prevención de la contaminación y la conservación de los recursos naturales (especialmente el agua) todavía no están correctamente integradas, ni en las políticas ni en las prácticas industriales. Se han conseguido progresos considerables donde se dan las condiciones siguientes:

- El origen de la contaminación está bien definido.

- Se dispone de técnicas contra la contaminación en el inicio de la cadena.
- Las medidas aplicables sólo implican costes moderados (mejora de la eficiencia energética, por ejemplo, o disminución de residuos).

Sin embargo, en otros campos, los avances han sido modestos o inadecuados:

- Control de emisiones.
- Desarrollo de tecnologías limpias.
- Disminución de los residuos de envases.
- Prevención integrada de la contaminación.

2.7. TRANSPORTE

El transporte de mercancías y pasajeros ha conocido un auge impresionante en las últimas décadas a medida que la economía se desarrollaba y aumentaba la movilidad de las personas (viajes de negocios o de placer). El número de kilómetros viajados por pasajero aumentó en un 121% entre 1970 y 1996.

Para hacer frente a esta demanda, los poderes públicos han multiplicado las obras en las infraestructuras de la red viaria, han acelerado sus programas de construcción de carreteras (puesto que la carretera es el modo de transporte más popular) y han construido numerosos aeropuertos y líneas ferroviarias de alta velocidad.

Sin embargo, estas medidas se han tenido que tomar en un clima de competencia encarnizada, que ha podido hacer olvidar el equilibrio y la integración necesarias entre los diferentes sistemas de transporte. Desde el punto de vista del medio ambiente, el crecimiento del tráfico es muy preocupante. El transporte es responsable del 25% de las emisiones totales de CO₂ en Europa. Su expansión aumenta inevitablemente la carga que soporta el medio ambiente.

Desde la congestión y la amenaza de embotellamiento total, el mantenimiento de la red, los accidentes y los trastornos respiratorios, los costes sociales de nuestra tan apreciada movilidad son evidentes.

No es, pues, sorprendente que el aumento del tráfico casi haya anulado los efectos de los progresos tecnológicos, como la implantación de los convertidores catalíticos y otras mejoras, la contaminación acústica y la ocupación del espacio que conlleva el automóvil. Por otra parte, las nuevas normas europeas sobre calidad del aire obligan a las ciudades a revisar sus políticas de transporte, y a encontrar nuevas formas de proporcionar a los ciudadanos acceso a su trabajo y sus actividades culturales y de ocio, protegiendo, al mismo tiempo, la calidad de vida.

Las previsiones para Europa indican que será la red viaria la que tenga que absorber una gran parte del 40% de aumento en volumen del transporte de pasajeros previsto desde ahora hasta el año 2010. El transporte aéreo también está experimentando un enorme auge, tanto en lo que se refiere a los viajes de negocios como al turismo (se prevé un aumento del 182% hasta el año 2010), a pesar de los problemas creados a partir del 11 de septiembre de 2001.

Los Ministros europeos de Medio Ambiente y Transporte han llegado a la conclusión de que el actual ritmo de crecimiento del transporte por carretera es insostenible a largo plazo. Todos los poderes públicos, desde el nivel local al

européico, deben trabajar juntos para crear un sistema de transporte sostenible.

Aunque se cuenta con normas europeas sobre emisiones de vehículos desde principios de la década de los setenta, no fue hasta mediados de los años ochenta cuando la preocupación por las lluvias ácidas dio lugar a normas que disminuyeron las emisiones realmente. Desde entonces, la preocupación por los efectos sanitarios y ambientales de las emisiones de los vehículos ha llevado a imponer normas estrictas para los turismos, que sólo podían cumplirse mediante la implantación del catalizador de tres vías, y también de normas para camiones. De todas maneras, el aumento del tráfico ha contrarrestado los beneficios que han aportado estas normas y ha suscitado una mayor preocupación por las emisiones de CO₂ derivadas del transporte.

Para hacer frente a estos problemas, la Comunidad ha aplicado un planteamiento doble. Para los contaminantes atmosféricos como los óxidos de nitrógeno y las partículas, estableció objetivos claros de calidad del aire y, a continuación, estudió qué es lo que tenía que hacerse para alcanzar tales objetivos, teniendo en cuenta las previsiones de crecimiento del transporte y la relación coste/eficacia (programa Auto-Oil). De este modo se han implantado normas muy rigurosas aplicables tanto a los vehículos como a los combustibles.

Para el CO₂ (el principal gas responsable del calentamiento del planeta), la Comunidad preparó la estrategia CO₂/automóvil, cuyo objetivo es la reducción en un tercio de las emisiones de CO₂ de los

vehículos de turismo nuevos para el año 2005 (o, como muy tarde, el año 2010).

De cualquier modo, aunque mucho se ha hecho y se hará para disminuir la contaminación atmosférica derivada del aumento del tráfico, es un hecho que el crecimiento del número de automóviles continuará socavando nuestra calidad de vida, especialmente en las zonas urbanas. El ruido, los accidentes de tráfico, la congestión y la creciente contaminación por CO₂ son sólo algunos de los efectos nocivos observados. El paso siguiente para la Comunidad y los Estados miembros, es estudiar muy en serio la manera de poner coto al crecimiento del transporte. Para conseguirlo, se impone una gama de medidas que se centren en disminuir la demanda del transporte por carretera proporcionando, al mismo tiempo, alternativas aceptables para el transporte de pasajeros y mercancías.

La Unión Europea trabaja en colaboración con las autoridades locales, especialmente dentro de la red de ciudades sin automóviles, para intentar disminuir la demanda de transporte en automóvil en las zonas urbanas manteniendo, a la vez, el mismo grado de accesibilidad a los servicios necesarios.

En 2005 entrarán en vigor nuevas normas sobre vehículos de motor y combustibles. Estas normas, cuya finalidad es reducir las emisiones nocivas de los automóviles (gases de escape), son de las más estrictas del mundo. La Comunidad trabaja también en la evaluación estratégica medioambiental de la construcción de infraestructuras.

Para tratar de frenar el crecimiento de las emisiones de CO₂ a partir de los automóviles, la Comunidad adoptó la estrategia sobre el CO₂/automóvil. Dentro de esta estrategia, los fabricantes europeos de vehículos se han comprometido a reducir en un 25% las emisiones de CO₂ de los turismos. Además, para que los consumidores puedan desempeñar el papel que les corresponde, la Comunidad aprobará próximamente legislación a fin de garantizar que todos los consumidores europeos tengan información sobre el rendimiento de los vehículos nuevos, en cuanto al consumo de combustible.

2.8. LA ENERGÍA

Casi todos los aspectos de nuestra vida cotidiana dependen de la energía. Necesitamos energía para calentarnos, alimentar nuestros vehículos y hacer funcionar nuestras fábricas. Las dificultades de abastecimiento de energía o las fluctuaciones de los precios de los carburantes pueden tener inmensas repercusiones en la economía.

El consumo de energía, grande o pequeño, está siempre estrechamente relacionado con las fluctuaciones del equilibrio ecológico del planeta.

Actualmente disfrutamos de un nivel de vida jamás soñado anteriormente, que se manifiesta, tanto en la industria como en la vida cotidiana, en un consumo desbordado: un aumento inexorable en el número de automóviles, ordenadores, lavadoras y kilómetros viajados.

2.9. EL CO₂ PROVOCA PROBLEMAS

La verdad es que el ritmo al que crece la demanda de energía es incompatible con la supervivencia a largo plazo del planeta. El agujero en la capa de ozono y las lluvias ácidas son sólo las consecuencias más espectaculares de nuestro voraz consumo de energía. El culpable principal es el CO₂. Las chimeneas de nuestras fábricas y los tubos de escape de nuestros vehículos lanzan a la atmósfera cantidades masivas de este gas. Esta situación constituye uno de los principales motivos de preocupación de la Unión Europea.

Aunque las primeras medidas de lucha contra la contaminación atmosférica y las lluvias ácidas no llegaron a reducir el consumo total de energía en la Unión, al menos consiguieron frenar el ritmo de crecimiento de la demanda (consumo interior bruto por unidad de PIB).

2.10. LA AGRICULTURA Y LA SILVICULTURA VÍCTIMAS DEL MEDIO AMBIENTE

La contaminación atmosférica, la acumulación del ozono troposférico y los cambios climáticos, son factores que influyen en el rendimiento de los cultivos. La agricultura también resulta afectada al quedar cercada por la urbanización. La contaminación afecta además a los bosques. Un árbol de cada cuatro ha sido afectado directa o indirectamente por las lluvias ácidas, y decenas de miles

de hectáreas quedan asoladas por los incendios todos los años.

La ganadería intensiva produce metano y amoníaco y contamina la atmósfera, mientras que inmensas cantidades de purín producido por las granjas han creado un problema agudo.

Cada año arden en la Unión Europea superficies inmensas de bosques (1% anual). En relación con este problema, existe un reglamento comunitario sobre la protección de los bosques contra los incendios.

La acidificación es otro problema que ha afectado ya a miles de hectáreas de bosques. La Comunidad aborda las causas directas de este problema definiendo normas sobre la contaminación generada por las actividades industriales y la utilización de combustibles fósiles.

2.11. LA SOCIEDAD DE CONSUMO

Las familias europeas (se entiende aquí por familia un grupo de personas que comparten una misma vivienda) monopolizan del 5 al 30% del aprovisionamiento de agua, del 15 al 20% del consumo de electricidad y más del 70% de los bienes manufacturados. El consumo masivo a esta escala ha hecho de las familias protagonistas económicos de primer orden, pero también ha provocado un impacto considerable en el medio ambiente.

La demanda de los consumidores ejerce una fuerte presión sobre los recursos naturales, mientras que la fabrica-

ción, utilización y eliminación de los bienes consumidos contamina el aire, el agua y el suelo. Así, más del 65% de los hogares europeos, por ejemplo, tienen como mínimo un coche, cifra que ha aumentado en un 20% desde 1985. Los hogares europeos generan el 5% de las emisiones de SO₂ (tanto las derivadas de los vehículos como de otras fuentes) y el 10% de los compuestos orgánicos volátiles (calefacción y vehículos).

Lamentablemente, no es probable que esta situación mejore en los años próximos.

Aunque los consumidores han sido los destinatarios indirectos de las medidas de control de las emisiones de vehículos y del consumo de combustibles, así como de las destinadas a mejorar el rendimiento energético ya disminuir la producción de residuos, los programas europeos en este campo nunca han ido dirigidos a los particulares.

En este sentido fue muy significativo el período 1990-1995, ya que vio el desarrollo de tecnologías y productos capaces de aliviar la carga que soporta el medio ambiente (convertidores catalíticos, productos sin marca, productos sin CFC, etc.).

La Unión Europea apoya el ambicioso proyecto de gravar los productos contaminantes para incitar a los consumidores y fabricantes a adoptar alternativas menos nocivas. La experiencia en una serie de casos ha sido muy positiva, habiéndose constatado un cambio de comportamiento en el sentido deseado. Uno de estos casos es la gasolina sin plomo, que apareció por primera vez en 1986 y

actualmente representa más del 60% del mercado.

2.12. EUROPA ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

La batalla contra el cambio climático es uno de los principales retos ecológicos a los que la Unión Europea ha hecho frente fijando objetivos cuantificados para conseguir reducciones significativas de gases de invernadero.

El sector de la energía es el que más contribuye al calentamiento del planeta. Como productor del 80% de las emisiones de CO₂ y del 26% de las de metano, inevitablemente se ha convertido en el blanco principal de la legislación europea aprobada en este campo durante los últimos años.

En 1992: Europa firma la Declaración de Río.

En 1995: Más conferencias. Europa reafirma su postura.

En 1997: Kioto. Tercera conferencia de firmantes de la Convención internacional sobre el cambio climático, firmada en Río en 1992 por más de 150 Estados. Por su parte, Europa decidió en marzo de 1997 disminuir sus emisiones de gases de invernadero en un 15% sobre el nivel de 1990 para el año 2010.

2.13. CINCO PROGRAMAS PARA AHORRAR ENERGÍA

Desde principios de la década de los noventa, se han aprobado una serie de

programas para reducir el consumo de energía en Europa. Con miras a este objetivo general, los programas se proponen desarrollar y fomentar:

- El aislamiento térmico de los edificios y la inspección de las calderas de calefacción central.
- La utilización de energías renovables (eólica, maremotriz y de la biomasa); y
- Las etiquetas especiales para congeladores, frigoríficos, lavadoras y secadoras que consuman menos energía.

Tras la ratificación de la Convención marco sobre el cambio climático, cada Estado miembro de la Unión Europea estableció sus objetivos para la reducción de las emisiones de gases de invernadero, los métodos para conseguirla y un plan de actuación.

2.14. EUROPA Y LA CAPA DE OZONO

Desde 1985 se han llevado a cabo negociaciones internacionales para hacer frente a la amenaza que supone el deterioro de la capa de ozono. Europa ha estado en vanguardia de esta iniciativa, lo cual no deja de ser justo dada nuestra importante contribución al problema. La Comunidad Europea representaba el 21% del consumo mundial de CDC (y el 35% del consumo de los países desarrollados) en 1992.

Europa está también a la vanguardia en el esfuerzo internacional por aplicar controles más estrictos a los HCFC, y ha desempeñado un importante papel en el

acuerdo para la supresión gradual para el año 2005 del bromuro de metilo en los países desarrollados según dispone el Protocolo del Montreal.

Todavía quedan por contestar muchas preguntas sobre el deterioro y la recuperación de la capa de ozono y las repercusiones en los ecosistemas terrestres. El programa sobre medio ambiente y clima de la Comisión Europea aporta 16 millones de ecus al programa Theseo 1998-1999 (Third European Stratospheric Experiment on Ozone, tercer experimento estratosférico europeo sobre el ozono). THESEO es una ambiciosa campaña coordinada para estudiar la capa de ozono encima de Europa, y constituye el programa de investigación sobre el ozono más importante del mundo, en el que trabajan 400 científicos de 20 países.

2.15. EUROPA Y LOS DEPÓSITOS ÁCIDOS

Al principio parecía que las lluvias ácidas eran menos perjudiciales para los sistemas acuáticos que para los terrestres. Sin embargo, sólo ahora se nota el impacto de la acidificación en algunas regiones de Europa.

Infinidad de biotopos acuáticos han resultado gravemente dañados en Escandinavia, y miles de hectareas de bosques en Escandinavia y Europa Central han resultado también gravemente afectadas. En 1992 un árbol de cada cuatro en Europa perdía más del 24% de la densidad de su follaje, y el 10% de los árboles

mostraba señales de pérdida de color en las hojas.

Si tenemos en cuenta que un tercio de la superficie de Europa está cubierto de bosques y que la silvicultura da empleo a tanto gente como el automóvil o la industria química, queda claro rápidamente que los daños en nuestros bosques son también un problema económico.

La meta última de la Comunidad con respecto a la acidificación, como se manifiesta en el programa comunitario de política y actuación en materia de medio ambiente y desarrollo sostenible (el quinto programa de medio ambiente), es que no se rebasen las cargas y niveles críticos.

Durante 1997, la Comisión propuso una estrategia comunitaria para combatir la acidificación. El objetivo intermedio de esta estrategia es reducir en el año 2010 la zona de ecosistemas no protegidos contra la acidificación en la Comunidad en, como mínimo, el 50% con respecto a 1990.

Europa ha acumulado todo un arsenal de medidas legislativas, y ha firmado numerosos acuerdos internacionales en los últimos 20 años para intentar ganar la batalla contra la acidificación.

El Convenio de Ginebra de 1979 sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a larga distancia dio lugar a la imposición de objetivos para la disminución de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x). En 1985 se aprobó un primer protocolo para el dióxido de azufre (SO₂), y en 1994 un segundo protocolo.

La Directiva comunitaria sobre contaminación atmosférica a partir de instalaciones industriales, estableció una serie de medidas destinadas a los sectores de la energía, el metal, los productos químicos, las papeleras y el tratamiento de residuos. La versión más reciente es la Directiva sobre el control integrado de la contaminación, o Directiva CIC, como se conoce, que adopta un planteamiento integrado nuevo contra la contaminación, basado en el empleo de las mejores tecnologías disponibles.

La Directiva sobre contaminación atmosférica a partir de grandes instalaciones de combustión está destinada principalmente a las centrales eléctricas. La última versión revisada reforzará las normas de emisión para el SO₂ y los NO_x.

Varias Directivas sobre la incineración de residuos municipales y peligrosos han impuesto límites de emisión para este tipo de instalaciones.

La Directiva sobre el contenido en azufre de determinados combustibles fija límites máximos para el azufre del gasóleo. Están en vigor, o están previstas, medidas parecidas para todos los combustibles utilizados en el sector del transporte (por tierra, mar y aire), y en la producción de calor y energía.

El programa «Auto-Oil», presentado por la Comisión Europea en 1996, establece normas nuevas más estrictas para los vehículos privados (catalizadores e inspecciones más frecuentes) y para la calidad del combustible.

2.16. LA CALIDAD DEL AIRE EN LA UNIÓN EUROPEA

La contaminación atmosférica ha sido una de las principales preocupaciones políticas de Europa desde finales de los años setenta. Por eso, se han aprobado una serie de directivas destinadas a disminuir las emisiones de determinados contaminantes, y a controlar su concentración en el aire.

En proporción a su tamaño y población, Europa es uno de los principales responsables de la contaminación atmosférica y el cambio climático. La Comisión ha puesto en marcha ya una serie de iniciativas para corregir esta situación, centrándose especialmente en los siguientes objetivos:

- Proteger la capa de ozono (mediante la disminución de los CFC).
- Reducir las emisiones de sustancias acidificantes (SO₂ y NO_x).
- Luchar contra el cambio climático y disminuir las emisiones de gases de invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O).
- Rebajar la concentración de plomo, amianto, COV y ozono en la atmósfera.

En la lucha contra algunos contaminantes (SO₂, plomo y CFC) se han conseguido ya avances considerables.

La Comunidad ha decidido que sólo puede garantizar un nivel igual de protección para todos sus ciudadanos, si la supervisión y el control de la calidad del aire están armonizados en todo el territorio comunitario. Por eso, ha elaborado

una nueva Directiva marco, que establezca una estrategia común para salvaguardar la calidad del aire, dejando a los Estados miembros la libertad de elegir los medios concretos necesarios para su puesta en práctica.

Además de proteger la salud pública y salvaguardar los ecosistemas, la Directiva tiene tres objetivos principales.

1. Asegurar la evaluación uniforme de la calidad del aire.
2. Establecer límites y umbrales de alerta para trece sustancias peligrosas.
3. Indicar al público cuáles son las zonas de fuerte contaminación atmosférica e informarlo cuando se superen los límites de seguridad.

Las directivas aplicables a las instalaciones industriales han conseguido disminuir las emisiones de algunos contaminantes en los últimos años.

La Directiva 85/210/CEE establece que todos los automóviles construidos después de 1993 deben funcionar con gasolina sin plomo.

Las medidas introducidas en la mayor parte de las ciudades europeas en los últimos 20 o 30 años, han tenido por consecuencia una disminución de las emisiones de algunos contaminantes.

Los principales avances han sido:

- Disminución del contenido en azufre de los combustibles (carbón y gasóleo).
- Mayor uso del gas natural.
- Depuración de las emisiones industriales.

Por otra parte, a pesar de la instalación de los convertidores catalítico, hasta ahora ha resultado imposible rebajar las emisiones de NO_x debido al crecimiento constante del tráfico. Algunos países han tenido que recurrir a la prohibición completa de los vehículos de motor en las zonas urbanas cuando las condiciones climáticas favorecen la formación de nieblas contaminantes (smog).

2.17. RESIDUOS

La estrategia de la Unión Europea ha consistido en formentar una gestión sostenible y ecológicamente racional de los residuos, que no amenace ni la salud pública ni el medio ambiente. Con este fin se han definido cuatro orientaciones estratégicas:

1. Prevención (minimización).
2. Recuperación (reciclado y reutilización).
3. Mejora de las condiciones de eliminación.
4. Reglamentación del transporte de residuos.

Para poner en práctica esta estrategia, el quinto programa establecía una serie de objetivos concretos, muchos de los cuales constituyen obligaciones jurídicas recogidas en directivas comunitarias:

- Elaboración de planes de gestión de residuos en los Estados miembros.
- Reducción de las emisiones de dioxinas en un 90% entre 1985 y 2000.

Los expertos consideran que puede reducirse la cantidad de residuos peligrosos y emisiones tóxicas en un 70% y un 100%, respectivamente, utilizando mejores tecnologías y replanteando la concepción de los productos. Los compuestos tóxicos (CFC, cloro, algunos disolventes y metales pesados) pueden eliminarse de los productos sin alterar sus propiedades.

2.18. LA SALUD Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA UNIÓN EUROPEA

La contaminación atmosférica es nociva para la salud humana, problema que resulta especialmente agudo en los países de Europa Oriental. Se ha calculado que las normas definidas por la OMS para uno o varios contaminantes atmosféricos se superaban al menos una vez al

año en el 80% de las 105 ciudades de Europa de más de 500.000 habitantes. Millones de europeos son víctimas de la contaminación en Europa, especialmente los habitantes de las ciudades. Aproximadamente un 15% de los residentes en las ciudades sufren asma, y un 7%, problemas respiratorios. El índice de personas asmáticas se eleva al 23% de la población en las ciudades más contaminadas.

Desde 1972, la Comunidad ha actuado para reducir las emisiones contaminantes de los motores diesel. Posteriormente, se han aprobado otras Directivas para disminuir el contenido en azufre y la contaminación por el plomo. Estas Directivas se aplican a todos los tipos de motores y también a la industria y a las incineradoras. Sin embargo, el tráfico aumenta a tal ritmo, que el total de emisiones continúa creciendo en cifras absolutas, a pesar de todas estas medidas.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS CONCEPTUAL

3.1. BASES DE PARTIDA

La sociedad humana, en su avance a lo largo de la Historia, ha ido modificando sus comportamientos respecto al medio ambiente, pasando del estado de agrupaciones humanas insertas en un medio más o menos hostil, al de ser una masa *en efervescencia*, explotadora del medio, agresora al exterior y entre sí, y productora de infinidad de materiales, de tecnología, de energía y de ciencia.

Estos múltiples procesos, y nos referimos a las ciudades, a la tecnología, a la industria y a la energía, se desarrollan en lugares (ciudades, industrias) en los que entran materias primas, personas y energía, y salen bienes, servicios, personas, subproductos y residuos.

Estos residuos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos, según el caso de que se trate.

En el siglo XIX y hasta el último tercio del siglo XX, los objetivos a alcanzar

en esos *avances* de la sociedad eran, para la Administración y para los poderes públicos, apoyar el desarrollo, obtener beneficios por impuestos y tasas, y minimizar los pagos en divisas por importación de productos o de tecnología.

Para la empresa, los objetivos eran minimizar los costos de instalación y de los procesos, y la obtención de los máximos beneficios.

Para la sociedad, se trataba de obtener productos útiles y económicos y la máxima creación de empleo.

La prosperidad se medía por el número de chimeneas de una zona.

A partir de los años 70 del siglo pasado se presentó otro objetivo, barruntado, analizado e incluso tratado en algunos sectores puntuales mucho antes (desde los años 50), como fue el de minimizar los daños al medio ambiente en todo este acontecer.

Se vio el daño a la salud humana que provocaba la contaminación atmosféri-

ca, lo que suponía la contaminación de las aguas y de los alimentos, y, sobre todo, las limitaciones de los recursos del planeta.

A partir de esa época se han confeccionado infinidad de tablas poniendo fecha límite para el agotamiento de tal o cual recurso (metales, sobre todo), tablas que cambian cada 3 ó 4 años a causa del descubrimiento de nuevos recursos, por cambio o mejora de procesos o por cambio de materiales.

Ahora vemos que esa minimización de daños al medio ambiente pasa no solo por la conservación y la protección de los recursos en general, sino por el control real de algunos de ellos, y concretamente de algunos tan básicos como la energía primaria.

Debemos tener en cuenta que en ese contexto, una ciudad o una industria interactúan con el medio hacia arriba, en lo que se refiere al agotamiento de ciertos recursos naturales, y hacia abajo, en las emisiones de contaminantes atmosféricos, en los vertidos de aguas residuales y en la producción de residuos sólidos.

Así, y avanzando en estos conceptos básicos, llegamos a diversos puntos de vista del medio ambiente en lo que se refiere a su interacción con el hombre.

Asimismo se buscan *métodos infalibles y seguros* que nos definan los impactos, que nos indiquen las estimaciones de daños al medio ambiente, o que nos ponderen la importancia real de cada perturbación.

3.2. LOS CONCEPTOS

Para tener una visión integral de las acciones medioambientales del hombre, es fundamental tener unas ideas sobre el medio ambiente que permitan razonar donde estamos, qué perturbaciones sufrimos, qué ocurre con nuestro entorno y qué se puede hacer para minimizar las alteraciones negativas que producimos directa o indirectamente, o que genera la Naturaleza y en un momento dado dificultan la vida humana.

Cuando se habla del medio ambiente, se piensa en la ecología, en el paisaje, en la montaña, en la costa, en la calidad de vida, en los parques nacionales, en la contaminación, etc., y así llegamos hasta cerca de 1000 palabras y frases relacionadas con ese concepto.

Esto nos indica la diversidad de áreas y disciplinas que engloba según sea el punto de vista, como puede ser el naturalista, el económico, el cultural o el social.

Lo primero que debemos aclarar es definir técnicamente el medio ambiente, que puede ser considerado como un conjunto de agentes y factores físicos, químicos y biológicos y de factores sociales que en un momento determinado pueden tener efectos directos o indirectos sobre los seres vivos o sobre las actividades humanas.

Si nos basamos en un enfoque de gestión, lo definiremos como el conjunto de los factores físicos, químicos, biológicos, sociales, económicos y estéticos en el que vive y se desarrolla un organismo.

En el primer caso se consideran unos factores que actúan sobre los seres vivos en un momento dado, en el segundo se considera un lugar y unas condiciones en las que se desenvuelven los seres vivos a lo largo de su vida.

Así, la visión en un caso considera que los organismos y el medio son dos cosas distintas, mientras que en el otro, ambos se consideran como un conjunto de medio, actividades, condicionantes y organismos.

Al final llegamos a dos posibilidades: Un enfoque *biocéntrico*, independiente de la existencia del hombre, en el que el medio ambiente es la Naturaleza, en la que interaccionan los objetos naturales, vivos o no.

Bajo este punto de vista estamos en ecosistemas en los que el hombre y sus actividades constituyen un elemento más.

La otra posibilidad es un enfoque *antropocéntrico*, en el que el medio ambiente se percibe como un espacio físico y de información, que se define a través de las relaciones del hombre con su entorno, es decir, el medio se considera solamente en referencia a especie humana.

A partir de estos dos enfoques se pueden deducir dos posibilidades en cada uno de ellos.

Del enfoque biocéntrico se deduce que si el hombre es un objeto natural, toda acción sobre el medio, positiva o negativa, es natural, por lo que la degradación de los ecosistemas o, incluso, la desaparición de la especie humana, son

procesos naturales, pues la existencia del medio no está condicionada por la existencia del hombre.

Por otra parte, el otro razonamiento biocéntrico es que al existir un estado natural, no se acepta que este se modifique de forma lenta o rápida a causa de las actividades humanas, pues estas nos encaminarán a un estado artificial, hecho no viable, puesto que el hombre, al ser un objeto natural, no debe incidir sobre el medio ambiente.

Del enfoque antropocéntrico las dos posibilidades son las siguientes: Por una parte se puede considerar una postura egocéntrica, en la que el hombre es un ser diferente de los objetos naturales, a los que domina. En este caso el medio ambiente se toma como una fuente de recursos y como un conjunto de materias y situaciones que el hombre puede modificar y adaptar a sus necesidades y caprichos.

Por otra parte, y con una visión más técnica, se considera la necesidad de establecer un equilibrio entre los derechos del hombre y los de la Naturaleza. En este caso las actividades humanas son necesarias para su desarrollo, siempre que respeten la capacidad de carga de ellas que pueda soportar la Naturaleza.

Y, ¿cuál es el enfoque verdadero?

Parece ser que lo razonable es tener un enfoque *bioantropocéntrico*, mixto, en el que se consideren las áreas humanas y las de la Naturaleza, y en el que se busquen aproximaciones y no alejamientos.

En esa situación tenemos los ecosistemas, donde prima la Naturaleza (en el aire, en el agua y en el suelo), y los antroposistemas, en los que el hombre utiliza materia y energía y en los que mantiene relaciones sociales, económicas y políticas.

3.3. LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Y ¿qué ocurre con la contaminación atmosférica?

Pues ese problema, que es el objeto de este libro, es relativamente sencillo de encuadrar dentro de lo que acabamos de exponer en el epígrafe anterior.

Tenemos fuentes naturales de contaminación atmosférica (volcanes, etc.) y fuentes antrópicas (industrias, ciudades, etc.).

Todas afectan al medio ambiente: al aire, al suelo, al agua, a la flora, a la fauna y al hombre, por lo que habrá que considerar, siguiendo con un enfoque racional bioantropocéntrico, las perturbaciones, sus fuentes (naturales o no), los receptores (naturales o no), los factores incidentes (como el clima o la altitud), y la gestión antrópica del problema: análisis, control, medida, prevención, economía y legislación.

Así, el enfoque de la contaminación atmosférica de los ecosistemas, de la ve-

getación, de la fauna o sus efectos sobre la salud humana, se encuadran en un conjunto de relaciones del hombre y de sus acciones con el medio, a nivel puntual, local, regional o planetario, según sea cada caso, como ocurre por ejemplo con las emisiones de una fábrica, con el smog, con las lluvias ácidas o con una erupción volcánica, respectivamente.

3.4. LOS INDICADORES

En el ambiente descrito en los epígrafes anteriores y bajo ese análisis conceptual, diversas partes de esta publicación dedican su esfuerzo a intentar mostrar, mediante *indicadores de impacto*, las estimaciones de las diversas perturbaciones provocadas por la contaminación atmosférica, tanto por las fuentes como en los receptores, y particularmente y entre otras, en las siguientes áreas:

- Efecto invernadero.
- Degradación de la capa de ozono.
- Toxicidad y ecotoxicidad.
- Riesgos de accidentes.
- Acidificación del medio (depósitos ácidos).
- Previsión de daños (agrarios).
- Cálculo de daños (cosechas y masas forestales).

CAPÍTULO 4

LAS ACTIVIDADES HUMANAS, LOS FACTORES AMBIENTALES Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

4.1. LAS ACTIVIDADES HUMANAS

No hace falta indicar que las actividades humanas son una de las causas fundamentales de la contaminación atmosférica, y desde luego la que crea las fuentes artificiales de ella.

Como idea básica, mostramos en la tabla adjunta la incidencia general de las actividades humanas sobre el medio ambiente.

Dentro de esas actividades humanas, las que más afectan directamente al me-

INCIDENCIA DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

<p>AGRICULTURA</p> <ul style="list-style-type: none">• Agotamiento del suelo.• Artificialización de la vegetación y del paisaje.• Desestructuración y desestabilización de los ecosistemas. <p>GANADERÍA: PASTOS</p> <ul style="list-style-type: none">• Inestabilidad. <p>EXPLORACIONES MINERAS</p> <ul style="list-style-type: none">• Ruido.• Emisión de polvo.• Movimientos de tierra.• Pérdidas de suelo.• Eliminación o destrucción de la vegetación y alteraciones de la fauna asociada.• Contaminación de aguas superficiales o subterráneas.• Desviación de cauces.• Alteración del paisaje.• Sobreexplotación de recursos naturales.	<p>APROVECHAMIENTO FORESTAL</p> <ul style="list-style-type: none">• Deforestación por consumo de madera.• Deforestación por crecimiento urbano.• Incendios y plagas.• Repoblaciones con especies no autóctonas o de interés comercial. <p>INDUSTRIA</p> <ul style="list-style-type: none">• Consumo de materias primas.• Contaminación atmosférica.• Contaminación del agua.• Contaminación del suelo.• Grandes catástrofes o accidentes.• Toxicidad y problemas para la salud humana. <p>CIUDAD</p> <ul style="list-style-type: none">• Contaminación• Impacto sobre el paisaje.• Ocupación del suelo.• Modificaciones o destrucción de fauna y vegetación. <p>ACTIVIDADES DE RECREO</p>
---	--

dio atmosférico, e indirectamente a los demás, como el agua, el suelo, la flora, la fauna o el hombre, son:

- Las explotaciones mineras.
- La agricultura (plaguicidas que acaban apareciendo incluso en el agua de lluvia, como mostraremos en otras partes de esta obra, en la descripción de trabajos de investigación realizados por nosotros en 1972 en Francia).
- El desarrollo industrial (la industria genera emisiones de todo tipo).
- Las aglomeraciones humanas (la tendencia de la población a acumularse en las ciudades provoca un gran aumento de las emisiones de las calefacciones y por el crecimiento del parque de vehículos).
- El transporte (vehículos, automóviles, aeropuertos, ferrocarril y puertos).
- Las guerras.

4.2. LOS FACTORES AMBIENTALES

4.2.1. Bases y acciones generales

Está comprobado que más del 80% de los problemas de cáncer que padece la especie humana está causado por factores exógenos, y que gran parte de estos están constituidos por agentes contaminantes del medio.

Aquí se pueden citar la clarísima correlación existente entre el tabaquismo y

los cánceres de pulmón o de laringe, los problemas de salud provocados por la exposición permanente a agentes químicos cancerígenos, tanto en el ambiente laboral como a nivel doméstico, o el abuso de la insolación en las épocas estivales (efectos de la radiación ultravioleta por exceso de baños de sol).

Y esto no es nuevo, pues ahí están las citas del descubrimiento ¡en 1775! del cáncer de escroto de los deshollinadores (limpia-chimeneas), la frecuencia de los cánceres de vejiga en los trabajadores de las industrias productoras de bencidina en los años 30, los casos de mesotelioma pulmonar asociados a exposiciones profesionales al amianto (asbestosis) observados en los años 50, o los problemas descubiertos en 1974 en los sistemas respiratorios o linfáticos de los trabajadores de las industriales del plástico.

Y esto sólo en lo referente al cáncer en la especie humana.

Debemos indicar, por otra parte, que existen más de 85.000 productos químicos en el mercado, de los cuales solo se han estudiado bien sus efectos sobre la salud en no más del 30% de ellos.

La acción de los productos nocivos sobre las especies vivas depende de múltiples factores, de tipo ecológico –propios de los ecosistemas–, de tipo físico, químico o biológico –propios de los productos–, o de tipo ambiental, propio y específico del medio en un momento dado.

En lo que se refiere a estos últimos, podemos agruparlos en factores intrínsecos, propios de la especie considerada, y

en factores extrínsecos, propios del medio que la rodea.

4.2.2. Factores intrínsecos

- Caracteres biológicos propios de la especie.
- Cepa.
- Caracteres particulares de cada ecofase.
- Estado fisiológico.

¿Cómo reaccionan los seres vivos según estos factores? Pues esto depende del tipo de agresión, entre otras cosas.

Por otra parte existen grandes diferencias de sensibilidad a los contaminantes en función de la especie, de la familia y del individuo.

La ecofase es muy importante, pues los huevos con un corion grueso son más resistentes, y lo mismo los individuos con una fase muy lenta de metabolismo. Así, las crisálidas de muchos lepidópteros son muy resistentes al ácido cianhídrico, mientras que las mariposas adultas son muy sensibles al gas.

4.2.3. Factores extrínsecos

Cuando se emiten agentes contaminantes a la atmósfera, quedarán expuestos a la acción de los factores externos bióticos, como son los organismos que los procesan o que los asimilan, y a la acción de los factores externos abióticos, como temperatura, luz y humedad.

En conjunto, la acción más o menos integral de estos factores tiende a reducir el efecto de los contaminantes, salvo en algunos casos concretos como son los sinergismos o los depósitos ácidos, en los que los contaminantes interaccionan entre sí bajo la acción de estos factores, tal como ocurre también con la formación de los PAN.

Estos temas se tratarán en los capítulos correspondientes. Solamente indicaremos aquí que la temperatura, la humedad, la luz, los vientos y la altitud, entre otros factores, condicionan totalmente la acción de los agentes contaminantes, incidiendo sobre su evolución química, sobre su agresividad y sobre su tiempo de residencia (difusión y dispersión), al margen de la actuación humana.

CAPÍTULO 5

UNIDADES

En función del sistema, del país, de la Asociación o según acuerdos internacionales, existen diversas unidades de medida para muchos elementos y factores de la contaminación atmosférica (Sistema Internacional, Sistema

Métrico Decimal, sistemas anglosajones, etc.).

A continuación indicamos la mayoría de las unidades de uso común en contaminación atmosférica.

5.1. UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL (SI)

A	Amperio (intensidad de corriente eléctrica)	mol	Mol (cantidad de materia)
C	Coulombio (carga eléctrica)	N	Newton (fuerza)
Cd	Candela (intensidad luminosa)	Pa	Pascal (presión)
F	Faraday (capacidad eléctrica)	rad	Radián (ángulo plano)
H	Henry (inductancia eléctrica)	s	Segundo (tiempo)
Hz	Hertz (frecuencia)	S	Siemens (conductancia eléctrica)
J	Joule (energía)	T	Tesla (inducción magnética)
K	Kelvin (temperatura)	V	Voltio (tensión eléctrica)
Kg	Kg (masa)	W	Vatio (watt) (potencia)
Lm	Lumen (flujo luminoso)	Wb	Weber (flujo de inducción magnética)
Lx	Lux (iluminación)	Φ	Ohm (resistencia eléctrica)
m	Metro (longitud)	°C	Grado centígrado (temperatura)

5.2. CONSTANTES BÁSICAS

N_A (o L)	Número de Avogadro ($6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)	c	Velocidad de la luz en el vacío ($2,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)
K	Constante de Boltzmann ($1,382 \cdot 10^{23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)	R·	Número de Reynolds
F	Constante de Faraday ($9,649 \cdot 10^4 \text{ C mol}^{-1}$)	Sc	Número de Schmidt (evaporación de vapor en el aire)
R	Constante de los gases ($8,314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)	σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($5,672 \cdot 10^{-8} \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4$)
μ_0	Permeabilidad del vacío ($4\text{M} \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$)	g	Aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/seg}^2$)
h	Constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)		

5.3. GENERALES

Ppm	Partes por millón
Ppb	Partes por 1000 millones (miliardo)
Pphm	Partes por billon
cm^3/m^3	
gr/m^3	
mg/m^3	
$\text{mg}/\text{N m}^3$	Miligramos/ m^3 normal
ppm en volumen	
ppm en masa	
mgr/m^3	
mg/cm^2	
gr/m^2	
kg/km^2	
Cal	Caloría (4,184 J)
EV	Electrón-volt ($1,602 \cdot 10^{19} \text{ J}$)
Erg	10^{-7} J
Ue	Entropía $\text{cal}/\text{gr}^\circ\text{C}$ (4.184 J/kg/K)
D	Dina (10^{-5} N). Fuerza
Atm	Atmósfera ($1,030 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$). Presión
Torr	Torricelli (mm de Hg; 133,3 Pa). Presión
$^\circ\text{C}$	($0^\circ \text{C} = 273,2 \text{ K}$). Temperatura
Escala Bacharach	Índice de opacidad, de 0 a 9
Escala Ringelmann	Índice de opacidad, de 1 a 4, con múltiples observaciones

% de volumen	Concentración
% de peso	Concentración
gr/10 ³ Kcal	Concentración
gr/km	Emisiones de vehículos
kg/hora	Contaminante atmosférico producido por hora
kg/Tm	Contaminante atmosférico producido por Tm de producto fabricado
mg/Tm	Contaminante atmosférico producido por Tm de producto fabricado
gr/seg	Velocidad de emisión
mol/m ² ·h	Tasa de evaporación/m ² y hora
mol/cm ³	Concentración
gr/l	Densidad
Color	
kg/cm ²	Presión
Escala ASTM	Corrosión
gr/100 ml	
Kcal/kg	Poder calorífico (PCI o PCS)
%	Humedad relativa
Nm ³ /h	Concentración
Tm/año	Contaminante producido en 1 año
kg·m/s ²	Fuerza
Hp	Potencia (caballo de vapor, equivalente a 0,746 Kw)
Atm	Presión
Psi	Presión (51,7 torr.)
mbar	Presión
cp	Viscosidad (0,001 kg/m·s = 0'01 dina·s/cm ²)
cSt, o, cs	Viscosidad cinemática 80,01 cm ² /s = 10 ⁻⁶ m ² /s = 1 cp/(gr/cm ³)
μ	Viscosidad del aire (a 20°C y 1 atm es: 0,018 centipoise = 1,8·10 ⁻⁵ kg/m·seg)
°R	Temperatura Reaumur (1,8 K)
Lv	Rango visual (en km)
m/seg	Velocidad
mol/seg	Flujo molar
2Vw sen φ	Aceleración de Coriolis (m/seg ²). Siendo V la velocidad del cuerpo, ω la velocidad angular de la Tierra y φ la latitud
Gr/seg·m ²	Emisión por unidad de área
Cu/Q	Concentración a nivel del suelo (μgr/m ³). Siendo c la concentración, Q el caudal y u la velocidad del viento (en chimeneas por ejemplo)
Iη	Penetración (siendo η la eficiencia en %)
M ² /gr	Área de absorción de un carbón activo
Dm, cm, mm, Å	Medidas de grosor de láminas
seg, min., horas, días, semanas	Tiempo de residencia

$\mu\text{gr/Kcal}$	Emisión
gr/GJ	Emisión
E_{by}	Poder emisivo monocromático de un cuerpo negro (W/m^3)
Q	Emisión de radon del suelo ($\text{p Ci/m}^2\cdot\text{seg}$)
Ml/min	Absorción de un gas por el cuerpo humano
Pa (Pascal)	Presión atmosférica · (1 atm = 10,33 m de H_2O = 760 mm de Hg = 760 Torr. = 101,3 Kpa = 1,013 bar = 1,033 kgf/cm^2)
ρ	Densidad molar (mol/cm^3)
V_m	Volumen molar (l/mol)
G_g	Velocidad másica ($\text{kg/m}^2\cdot\text{h}$)
K_g	Coefficiente de transferencia de materia para la fase gaseosa ($\text{Kmol/m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{atm}$)
L	Caudal de líquido absorbente (Kmol/h)
L_m	Velocidad molar de un líquido ($\text{Kmol/m}^2\cdot\text{h}$)
Q_c	Caudal calorífico emitido (Kcal/seg)
α	Resistencia específica al paso de partículas (m/kg)

En USA, ppm se refiere a volumen o a moles si se trata de concentración de productos en un gas, y a peso o a masa si

se trata de productos en un líquido o en un sólido.

Si la gravedad específica de un líquido o de un sólido es 1,0, $\text{ppb}=\mu\text{gr/kg}$.

SEGUNDA PARTE

Los agentes contaminantes

CAPÍTULO 6

CLASIFICACIÓN GENERAL

6.1. CLASIFICACIÓN BÁSICA

CLASIFICACIÓN BÁSICA Y FUENTES DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Fase	Agente	Fuente
Partículas sólidas o líquidas	Metales pesados	Polvo extraterrestre, industrias.
	Compuestos minerales	Volcanes, erosión eólica. Industrias, combustiones.
	Compuestos orgánicos naturales	Combustiones, incineración de residuos, plaguicidas, incendios, industrias, ciudades.
	Compuestos orgánicos de síntesis	Industrias.
	Compuestos radiactivos	Centrales nucleares, explosiones nucleares, uso de compuestos radiactivos (medicina, investigación).
	Aerosoles	Combustiones, aglomeraciones urbanas.
Compuestos gaseosos	Monóxido de carbono	Combustión en vehículos, volcanes, emisiones de seres vivos.
	Anhídrido carbónico	Respiración de los seres vivos, combustiones (combustibles fósiles), volcanes, intercambio con agua y suelo.
	Hidrocarburos y otros compuestos orgánicos	Combustión de vehículos, industria petroquímica, industria química, incineración de residuos, vegetales, bacterias.
	Compuestos de azufre	Combustibles, combustiones, suelo, industria mineral, volcanes, bacterias.
	Compuestos de nitrógeno	Combustibles, combustiones, industrias (abonos), bacterias.
	Derivados halogenados	Suelos, vegetales, industria extractivas o de elaboración (flúor, cloro), combustiones (plásticos).
	Otros	

6.2. CLASIFICACIÓN DE LOS AGENTES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS SEGÚN SU COMPOSICIÓN

- **Derivados del azufre:**
 - SH₂
 - SO₂ y derivados
- **Derivados del carbono:**
 - CO₂
 - CO
 - Hidrocarburos
 - Aldehidos
 - Etileno
- **Halógenos y derivados:**
 - F y derivados
 - Cl y derivados
 - Otros halógenos y derivados
- **Derivados del nitrógeno:**
 - NO
 - NO₂
 - N₂O
 - NO₃
 - PAN
 - PPN
 - PBN
 - NH₃
- **Aerosoles**
- **Partículas sólidas**
- **Ozono**
- **Metales pesados y afines:**
 - Pb
 - Cd
 - Ni
 - Be
 - Hg
 - Cr
 - V
 - Zn
 - Amianto
 - Arsénico
 - Cianuros
 - Talco
 - Fibra de vidrio
- **Sustancias orgánicas volátiles:**
 - Hidrocarburos (ya citados)
 - Disolventes
 - Productos químicos intermedios, como el cloruro de vinilo
- **Otros**

6.3. PRINCIPALES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS DE ORIGEN INDUSTRIAL Y URBANO

Contaminantes básicos	Anhídrido sulfuroso Monóxido de carbono Óxidos de nitrógeno Hidrocarburos Polvos (sedimentables y en suspensión) Humos	
Contaminantes especiales	Derivados del azufre	Anhídrido sulfuroso Nieblas de ácido sulfúrico Ácido sulfhídrico Sulfuro de carbono Cloruros de azufre
	Derivados del nitrógeno	Óxidos de nitrógeno Amoníaco y sus derivados Ácido nítrico Cianógeno Ácido cianhídrico Cianuros
	Halógenos y sus derivados	Flúor Cloro Bromo Yodo Ácido fluorhídrico Ácido clorhídrico Ácido bromhídrico Ácido yodhídrico Ácido fluorosilícico Fluoruros Oxicloruro de carbono
	Compuestos orgánicos	Dióxido de carbono Monóxido de carbono Hidrocarburos Acetileno Aldehídos Aminas Anh. y ácido maleico Anh. y ácido acético Ácido fumárico Anh. y ácido ftálico Compuestos orgánicos volátiles del S (mercaptanos y otros) Compuestos del cloro Compuestos del plomo Piridinas y metilpiridinas (picolinas)

Contami- nantes especiales	Otros compuestos inorgánicos	Arsénico y sus derivados
	Partículas sólidas	Partículas de origen natural, orgánicas e inorgánicas Partículas urbanas de restos de construcciones, de partes de vehículos, etc. No metálicas, con: P, As, Sb, Si, Se, Cl, Metales pesados con: Zn, Cd, Pb, Cu, Co, Hg, Al, Fe, Mn, Cr, Mo, W, Ti, Va Metales ligeros con: Na, K, Ca, Mg, Be Partículas de sustancias minerales
	Aerosoles	Marinos (naturales) Terrestres industriales Terrestres urbanos
	Varios	Olores molestos Partículas radiactivas

CAPÍTULO 7

LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS

7.1. GENERALIDADES Y CLASIFICACIÓN

Definimos las partículas como el conjunto de materia dispersada en la atmósfera y condensada en forma sólida o líquida, cuyos tamaños oscilan entre 0,05 y 500 μ . Están compuestas por una mezcla compleja de productos de naturaleza diversa, dependiendo de su origen.

En núcleos industriales, el 96% de las partículas sólidas está constituido por restos industriales, carbón, hollines y ceniza.

En zonas urbanas aparecen restos de escombros, de vehículos, hollines y alquitranes, cenizas y materia orgánica.

En zonas exclusivamente agrarias, predominan las partículas vivas y la materia orgánica.

En las partículas en general, es decir, en el polvo, encontramos partículas inertes, formadas por residuos orgánicos e inorgánicos y partículas vivas, constituidas principalmente por granos de polen, bacte-

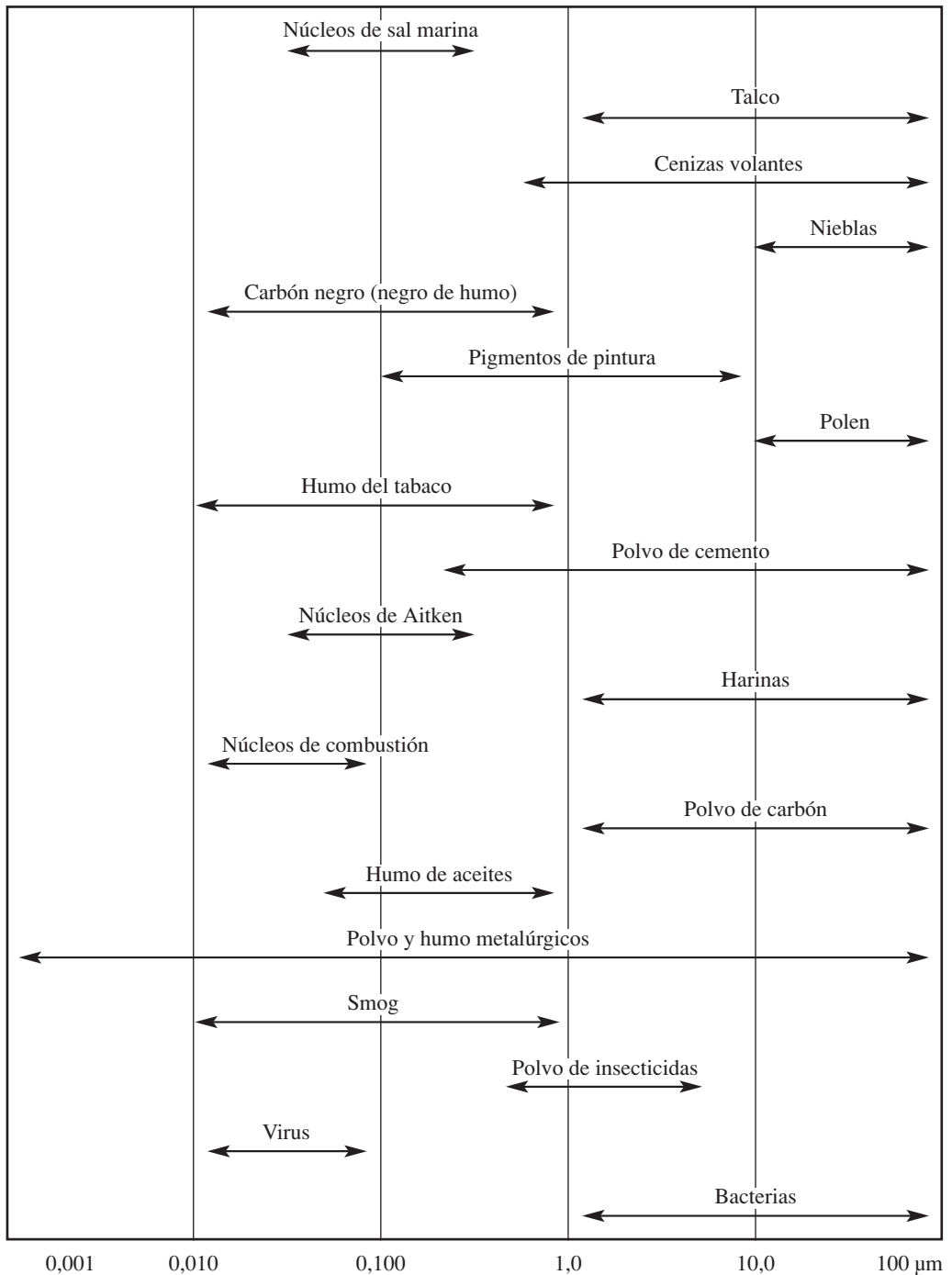
rias y esporas y, en menor grado, algas, huevos de insectos, insectos, semillas, etc.

Usualmente se clasifican, atendiendo al proceso de formación, en: primarias, que son el resultado directo de procesos físicos o químicos peculiares de la fuente emisora, y secundarias, que son aquellas que se producen a partir de reacciones químicas en la atmósfera.

Las partículas primarias se clasifican a su vez siguiendo varios criterios: tamaños y distribuciones normales encontradas, tipos de fuentes, y relación entre el tipo de fuente, tamaño de las partículas, y composición química de las mismas.

El concepto tamaño de una partícula requiere alguna consideración. El tamaño de una partícula es susceptible de expresarse en función de su diámetro físico o geométrico, o bien en términos de un diámetro equivalente referido a una propiedad óptica, eléctrica o aerodinámica; la tabla adjunta muestra los tamaños de los diámetros geométricos de esferas equivalentes de las partículas más comunes.

CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS SEGÚN SUS TAMAÑOS



La clasificación por tamaños tiene especial interés para conocer la capacidad de dispersión o transporte. Según este criterio, se distinguen dos tipos de partículas:

- Partículas sedimentables, que son aquellas que tienen un diámetro comprendido entre 5 y 100 μ e incluso mayores, y que alcanzan el suelo más o menos lejos de su fuente de emisión, según su tamaño.
- Partículas en suspensión o aerosoles, que presentan diámetros inferiores a 5 μ .

Las partículas de pequeño tamaño están controladas por las turbulencias atmosféricas y por el viento; la velocidad de caída es prácticamente nula, ya que el movimiento browniano es despreciable, por lo que pueden transportarse a grandes distancias. Por el contrario, las partículas de tamaño mayor

tienden a tener características comunes con las condiciones locales del suelo o con las emisiones de las industrias de la zona.

7.2. COMPOSICIÓN

Las partículas en general, es decir, el polvo, son una mezcla compleja de productos entre cuyas características de composición se encuentra la de que normalmente existe un predominio de componentes que depende de la zona de muestreo.

El polvo se compone de partículas inertes y de partículas vivas (en términos generales).

a) *Partículas inertes*

Están formadas por residuos orgánicos e inorgánicos. Los residuos más importantes son los indicados en el cuadro adjunto.

TIPOS DE RESIDUOS EN LAS PARTÍCULAS INERTES DEL AIRE

Residuos orgánicos		Residuos inorgánicos
De origen vegetal	De origen animal	
Fragmentos de madera Fragmentos de algodón Fragmentos de pelos Fragmentos de epidermis Almidón Fibras diversas	Lana Seda Telas de araña Epidermis Pelos Plumas y plumón Escamas	Carbonatos Cloruros Sulfatos Sílice Arcilla Yeso Hollines Alquitrán Carbón Caliza Minerales diversos Metales

b) *Partículas vivas*

Son principalmente los granos de polen, las esporas y las bacterias.

En menor grado aparecen también algas, huevos de insectos e insectos, semillas, etc.

7.3. FORMA

La forma de las partículas de polvo es muy importante en lo que se refiere a la contaminación atmosférica del Medio Natural, principalmente en el caso de los vegetales.

Si las partículas son de tendencia esférica, tendrán más posibilidad de penetrar en los estomas que si son filamentosas o ramificadas; por el contrario, estas últimas tendrán más facilidad para adherirse a las superficies foliares y obturar exteriormente los huecos de intercambio de gases; a las lenticelas les ocurre lo mismo.

Aparte de esto, el polvo, al depositarse sobre las hojas, provoca reacciones químicas, como se indica en el apartado correspondiente.

El polvo, en general, tienen formas muy variadas; la materia orgánica tiende a ser irregular y de mayor volumen que la inorgánica.

La materia inorgánica presenta aristas, y tiende a tomar forma granulosa, de placas o de bastones.

Su penetración en los animales y en el hombre depende también en parte de la forma, pues las partículas esféricas

pasan mejor los filtros iniciales de las vías respiratorias que si son filamentosas o ramificadas.

7.4. PROPIEDADES FÍSICAS RELACIONADAS CON LA CONTAMINACIÓN DEL MEDIO

Para ser transportadas por los vientos, las partículas que no sedimentan enseguida tienen como característica una gran superficie respecto de su masa.

Las partículas de una nube de polvo están cargadas eléctricamente debido a la captación de iones atmosféricos o a cargas electrostáticas. Las cargas son de los tres signos: el polvo calizo es positivo, el silíceo es negativo, etc.

Como norma, Rudge indica que los no metales y oxácidos se cargan positivamente y los metales y óxidos básicos, negativamente.

La carga eléctrica del polvo es de interés puesto que, a causa de ella, se adhiere a las superficies sobre las que se deposita, añadiéndose a este hecho las características propias del polvo, las propias de la superficie y la atracción debida a la masa.

Las partículas del aire tienen gran afinidad entre sí, sobre todo las sólidas y líquidas y por ello, pueden actuar como núcleos de condensación y facilitar la formación de nieblas. Además, absorben y difunden la luz, provocando estos fenómenos una dismi-

nución de la penetración e intensidad de las radiaciones solares influyendo, como consecuencia, en las actividades fotosintéticas y respiratorias de los vegetales, así como en las reacciones fotoquímicas atmosféricas y en la situación meteorológica local.

7.5. ORIGEN

El polvo presente en la atmósfera y cuyos componentes generales ya se han indicado, tiene como origen las causas más diversas, como se observa en la tabla adjunta.

ORIGEN DE LA PRESENCIA DE PARTÍCULAS SÓLIDAS EN LA ATMÓSFERA

Origen natural	Origen debido a la actividad humana
Descomposición de las rocas y del suelo. Acción del sol. Arrastres de aguas. Volcanes. Animales y vegetales microscópicos. Polen. Esporas. Bacterias. Polvo extraterrestre.	Explotaciones ganaderas. Construcciones y materiales de construcción. Actividad química y médica. Actividad humana propiamente dicha (ropa, calzados, transportes, residuos urbanos, etc.). Industrias (desde las extractivas hasta las metalúrgicas y cerámicas). Combustiones (térmicas, calefacciones, vehículos). Polvo radiactivo.

CAPÍTULO 8

DERIVADOS DE AZUFRE

8.1. SH₂

Este compuesto se produce en la Naturaleza bajo la acción de sulfobacterias.

Su concentración normal en el aire es de unas 0,2 ppb.

Las emisiones de origen industrial vierten a la atmósfera el equivalente a 3·10⁶ tm de azufre/año en forma de SH₂.

Es un compuesto que, en la atmósfera, se oxida casi siempre a SO₂, cosa que puede ocurrir en presencia de ozono:
 $H_2S + O_3 \rightarrow SO_2 + H_2O$.

8.2. SO₂ Y DERIVADOS

Entre los derivados del azufre, es el principal contaminante. La fuente más importante de SO₂ de origen natural es la actividad volcánica.

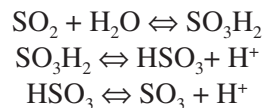
Su concentración normal en la atmósfera es de 0,2 ppb.

El SO₂ es un gas denso, más pesado que el aire. Se puede licuar a 20 °C, y

3,3 atm. y es muy soluble en agua: en un litro de agua se pueden disolver 80 l. de SO₂ (aunque además de la disolución existan ciertas reacciones químicas).

En cuanto a propiedades químicas de interés, en lo que se refiere a la contaminación atmosférica se pueden citar las siguientes:

- Es un reductor energético y puede oxidarse fácilmente, a velocidades variables.
- En el agua actúa de la siguiente forma, indicada según tres etapas:



La combinación dará, pues, un diácido (débil) de constantes de disociación:

$$\begin{aligned}K_1 &= 1,7 \cdot 10^{-2} \\K_2 &= 10^{-7}\end{aligned}$$

La actividad humana produce la mayor parte del SO₂ presente en la atmósfera y entre ella la mayor cantidad proviene de

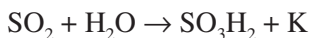
las combustiones, sobre todo de la combustión del carbón. El petróleo y el carbón contienen cantidades variables de azufre, y en su combustión producen SO₂.

Generalmente, las emisiones más importantes de SO₂ a la atmósfera tienen lugar en las aglomeraciones urbanas (calefacción y vehículos automóviles), aunque ciertas industrias ubicadas en zonas agrarias pueden producir cantidades apreciables del gas (centrales térmicas, refinerías de petróleo, etc.).

El SO₂ tiene carácter reductor, como hemos indicado, y como tal sufre una serie de transformaciones a partir del momento en que aparece en la atmósfera; esto quiere decir que no permanece estable, sino que se incorpora al ciclo del azufre en la biosfera.

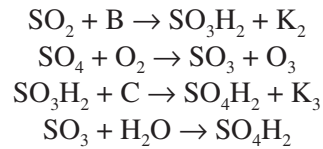
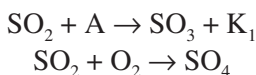
Bajo la acción de los rayos UV se verifica que: SO₂ + O₂ → SO₃ + K

Ante la presencia de vapor de agua el SO₂ se transforma en ácido sulfuroso, con desprendimiento de calor; la reacción es catalizada por partículas sólidas como Mn o Fe.



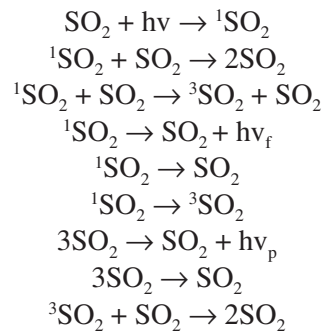
El SO₃H₂ no es estable y, debido a reacciones fotoquímicas (rayos UV, etc.), se transforma en SO₄H₂.

Así pues, la evolución total del SO₂ en la atmósfera, independientemente de que gran parte del gas no se altere, pues puede ser asimilado por seres vivos y suelos (absorbido y adsorbido), es la siguiente:

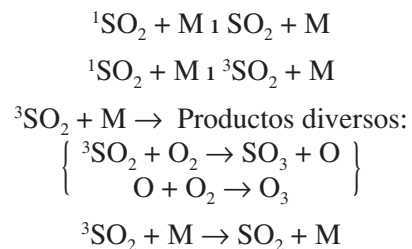


Hemos de indicar también que los niveles de SO₂ en el aire son variables; desde 0,2 ppb en zonas no contaminadas, como se ha indicado antes, hasta niveles muy elevados en el valle de México, en Bangkok y en otros puntos del planeta (se alcanzan valores de 1 y hasta 2 ppm).

Por otra parte, debemos saber que el SO₂ entra en excitación electrónica al absorber la radiación solar, existiendo una fotooxidación con las siguientes reacciones:



Si llamamos M a una molécula ajena al SO₂ como pueden ser O₂, H₂O, N₂, olefinas, etc., y si consideramos las interacciones existentes entre los elementos traza, tendremos:



CAPÍTULO 9

DERIVADOS DEL CARBONO

9.1. CO₂

Inicialmente consideramos el anhídrido carbónico como un compuesto no contaminante, pues es un componente del aire, es utilizado por los vegetales en la fotosíntesis y en principio su presencia en proporciones normales en suelos, aire y seres vivos no puede ser considerada como nociva.

La mayor parte del CO₂ se produce en la respiración de las biocenosis, y sobre todo en las combustiones de productos fósiles (petróleo y carbón).

El nivel de CO₂ en la atmósfera está aumentando de modo alarmante, fundamentalmente durante los últimos decenios, debido al desarrollo industrial. Se habla de 278 ppm de CO₂ presentes en el aire en 1950, de 340 ppm en 1987, de 360 ppm en 1991, etc.

Los organismos fotosintéticos extraen $11 \cdot 10^{10}$ Tm/año, y se aportan $7,2 \cdot 10^{10}$ Tm/año procedentes de la respiración de los seres vivos y otras tantas procedentes

de las combustiones. Esto indica que el aumento anual del contenido de CO₂ en la atmósfera es de 1 a 4 ppm.

La incidencia del aumento del contenido de CO₂ en la atmósfera sobre la biosfera es inmensa, pues puede provocar desde alteraciones climáticas hasta perturbaciones en el desenvolvimiento normal de los seres vivos. Es a partir de estas situaciones cuando el CO₂ puede ser considerado como un compuesto que altera las características del medio atmosférico, como explicaremos detalladamente en otros capítulos.

Los efectos sobre los seres vivos de una proporción variable de CO₂ en la atmósfera han sido muy estudiados, y particularmente en lo que se refiere a investigación sobre vegetales y su posible incidencia en el crecimiento, desarrollo y productividad (acción perturbadora sobre la respiración, y asimilación en la fotosíntesis). Por otra parte, sabemos que al aumentar la concentración de

CO₂ en la atmósfera aumenta la energía que queda en la Tierra procedente del Sol, y ello lo hace en forma de calor. Este efecto (efecto invernadero) es causado por la transparencia del CO₂, que por una parte permite pasar mejor a la radiación solar y por otra provoca una mayor retención de la radiación IR emitida desde la Tierra.

Las consecuencias se prevén, como ya indicamos, bastante dramáticas, calculándose que en la primera década de este siglo XXI habrá un aumento apreciable de las lluvias en las zonas de pluviometría elevada y un fuerte descenso de las precipitaciones en las zonas áridas, acentuándose así en ambos extremos la situación actual en lo que afecta al medio natural continental (aparte de la inundación de muchas tierras emergentes y bajas próximas a las costas, al derretirse parte de los casquetes polares).

9.2. CO

Fue señalado por *Lassane* en 1776 y reconocido por *Cruikshank* en 1796. El monóxido de carbono existe en la atmósfera de todas las grandes ciudades, en las cuales su fuente principal es la combustión incompleta del carbón, del petróleo y de otros combustibles orgánicos, en viviendas, en industrias o en gases de escape de los vehículos de motor; estos gases de escape pueden contener del 1 al 15 por 100 de CO.

El mar es también una importante fuente del CO atmosférico. En la super-

ficie del mar en zonas alejadas de la costa se han detectado cantidades de CO casi 100 veces más elevadas que las que corresponden a su solubilidad a la presión parcial en esas zonas. Parece ser que se origina por oxidación biológica causada por los organismos marinos.

En la tabla adjunta se indican sus fuentes básicas.

FUENTES BÁSICAS DEL CO ATMOSFÉRICO

Naturales	Artificiales (combustiones)
Océanos	Gasolinas
Vulcanismo	Carbón
Oxidación de los terpenos vegetales	Madera
Oxidación del CH ₄	Incineración de residuos urbanos
	Incendios forestales
	Consumo de tabaco

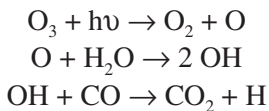
La proporción de CO en los gases de escape de los motores de gasolina o diesel ha sido objeto de numerosos estudios, y es variable.

Los datos que se suelen aportar son relativos, pues la proporción de gases depende también, entre otros factores, del tipo de combustible y de la potencia, marcha y estado de conservación del motor, así como de la altitud sobre el nivel del mar.

Actualmente se tienden a disminuir fuertemente las emisiones de CO mejorando las condiciones de funcionamiento de los motores, habiéndose alcanzado resultados bastante esperanzadores.

El CO de la atmósfera no tiene una concentración fija, sino que varía según el lugar. Normalmente oscila entre 0,020 y 1,5 ppm en lugares no contaminados, y puede sobrepasar las 100 y hasta las 320 ppm en la proximidad de focos emisores (generalmente en ciudades con mucho tráfico de vehículos y ciertas condiciones climatológicas).

El tiempo de permanencia del CO en la atmósfera es de 0,2 años, teniendo en ella una descomposición rápida. Las reacciones que pueden explicar esta descomposición son, primero, la descomposición fotoquímica del ozono, después la reacción del oxígeno atómico con el vapor de agua y finalmente la transformación a CO₂ y H.



Por otra parte, múltiples organismos degradan o asimilan el CO, habiendo realizado el autor su tesis doctoral sobre la asimilación de este gas por dos especies vegetales de uso frecuente en ornamentación urbana.

El humo del tabaco presenta una cantidad apreciable de CO: la combustión normal de un gramo de tabaco produce de 0,1 a 0,3 cm³ de este gas.

En la atmósfera de las minas, el CO es emitido por oxidación lenta del carbón y por los explosivos utilizados.

Estos últimos (en aplicaciones militares) pueden generar cantidades importantes de CO: según *Svetlov* un kg. de pólvora B produce 300 l. de CO y 1 kg

de toilita puede originar hasta 600 l del mismo gas.

En la industria del aluminio, al efectuarse la combustión de los ánodos en la electrolisis, se producen cantidades apreciables de CO.

Su presencia y formación pueden llegar a ser peligrosas en las cabinas de proyección de los cines.

El gas del alumbrado contiene hasta un 18 por 100 de CO y el gas de agua está formado en un 40 por 100 por CO; los gases de los altos hornos tienen hasta un 34 por 100 de CO y los de los hornos de cok contienen entre el 5 y el 7 por 100.

Una vez visto el aspecto general del origen del CO, pasamos ahora a concretar algo más sobre la fuente principal del gas: nos referimos al CO producido por la combustión incompleta de los productos derivados del petróleo en los motores de los vehículos. A este respecto debemos hacer notar que la proporción del CO de ese origen presente en la atmósfera de las ciudades, varía mucho según las condiciones específicas de cada núcleo urbano y de cada zona de ese núcleo urbano, pues los vientos, la altura de los edificios, etc., contribuyen a agravar o a disminuir el tanto por 100 de este agente contaminante del aire; así, por ejemplo, el 97 por 100 del CO presente en la atmósfera de Los Angeles es atribuido a los vehículos automóviles; en cambio, en París, debido a la amplitud de las vías urbanas y al límite de altura de los edificios, unido a la presencia de vientos, el origen del CO presente en el aire es atribuible en mucho

menor proporción a los vehículos de motor.

9.3. HIDROCARBUROS

Constituyen un grupo muy heterogéneo de contaminantes, y tienen como fuente principal las combustiones incompletas en las instalaciones fijas, y las de carburantes en los motores de los vehículos de transporte.

Los vegetales producen cierta cantidad de hidrocarburos terpénicos, y creemos que es casi la única fuente natural.

Se pueden considerar, en conjunto, cuatro grandes grupos de causas de emisión de hidrocarburos a la atmósfera:

- *Transportes:*
 - Vehículos automóviles.
 - Ferrocarriles.
 - Aeronaves.
 - Navegación.
- *Combustiones en instalaciones fijas:*
 - Industrias.

- Calefacción.
- *Manejo de los combustibles:*
 - Refinerías.
 - Evaporación de depósitos de vehículos.
 - Pérdidas de gasolina (evaporación).
- *Fuentes naturales:*
 - Vegetación
 - Emanaciones del suelo.

Desde el punto de vista de la salud humana, los dos grupos básicos de hidrocarburos son los aromáticos y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (H.A.P.).

Transportes

Los hidrocarburos producidos en las emisiones debidas a los transportes terrestres pueden ser ligeros o pesados.

Los vehículos automóviles no queman totalmente los combustibles y emiten una parte atomizada (benzo-3,4 pireno).

FACTORES DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS TRANSPORTES

Factor	Proceso y comparación
Comparación según tipos de motor	<ul style="list-style-type: none"> • Vehículos diesel Emiten 30 veces menos CO que los de gasolina, 10 veces menos hidrocarburos, 3 veces menos NO_x y 35 veces más partículas • Motores de 2 tiempos Emiten 2 veces más CO que los de 4 tiempos, 10 veces más hidrocarburos y 2 veces menos NO_x • Vehículos GLP Emiten hasta el 80% menos de CO que los de gasolina y 50% menos del conjunto de HC y NO_x
Velocidad	HC y CO disminuyen al aumentar la velocidad, hasta un nivel desde los 60 km/h. NO _x aumenta con la velocidad
Temperatura	El arranque en frío produce 2 veces más CO que en caliente y 3 veces más de HC

Los barcos y ferrocarriles pierden asimismo parte de los combustibles (pesados), por no ser quemados totalmente.

En cuanto a las aeronaves, las emisiones son variadas, apareciendo en el aire por su causa diversos hidrocarburos, y sobre todo aromáticos como benceno, tolueno, meta y paraxilenos, orto-xileno, etc.

La cantidad de hidrocarburos vertidos en los transportes depende fundamentalmente de:

- Tipo de combustible.
- Tipo de motor.
- Estado del motor.
- Edad del motor.
- Características de la circulación.
- Legislación vigente.

Combustiones en instalaciones fijas

En este caso, la naturaleza del combustible líquido o gaseoso es fundamental en el momento de calcular el volumen de emisiones de hidrocarburos a la atmósfera.

El fuel-oil, combustible muy utilizado en industria y calefacciones, tiene varias características que pueden suponer cierta incidencia sobre la contaminación atmosférica:

- Viscosidad.
- Punto de vertido (o de fluidez)
- Contenido en agua y sedimentos.
- Contenido en cenizas.
- Inflamabilidad.
- Contenido en carbono (Índice de *Ri-chardson*) y en azufre.

**TABLA DE GROB ET AL.
DE CONCENTRACIÓN MEDIA
DE HIDROCARBUROS
EN ATMÓSFERA URBANA**

Hidrocarburo	Concentración (en ppm)
Metano	2,00
Etano	0,05
Etileno	0,03
Acetileno	0,03
n-Butano	0,03
Isopentano	0,02
Propano	0,02
Tolueno	0,02
n-Pentano	0,02
m-Xileno	0,02
Solutano	0,02
Propileno	0,01
Buteno	0,01

Los aparatos de combustión, según sean sus características, edad y estado de funcionamiento, influyen en cuanto a volumen de hidrocarburos no quemados.

Las salidas de humos y emanaciones (chimeneas y conductos) influyen mucho, según sean sus características de altura, volumen de las emisiones, diámetro, condiciones meteorológicas, etc.

Las industrias consumen, naturalmente, grandes volúmenes de hidrocarburos (hornos, calderas, calefacción, aprovechamiento de productos, centrales térmicas, etc.), de los que parte son vertidos a la atmósfera.

Las combustiones incompletas sintetizan hidrocarburos. En ellas se desarrolla un craking de los compuestos alifáticos en el que se producen hidrocarburos no saturados (olefinas) procedentes de

los compuestos no quemados. Estos productos son responsables, en parte, de la aparición de PAN (nitratos de peracilo) en zonas muy contaminadas y con acción fotoquímica intensa debida a la radiación solar, entre otras causas.

9.4. ALDEHÍDOS

Tienen como origen principal la oxidación incompleta de los carburantes y de los aceites de engrase de los motores, aunque también aparecen en los residuos de combustiones de gas natural.

Su fórmula general es RCOH y por ella vemos que contienen el grupo carbonilo, de carácter no saturado, lo que hace que tengan bastante reactividad.

Se oxidan fácilmente a ácidos y constituyen un grado intermedio de oxidación entre alcoholes y ácidos, sufriendo una desproporción y dando ácido y alcohol (transformación de *Cannizzaro*).

En el medio atmosférico, el formaldehído (que también se origina como primer producto de la función clorofílica de los vegetales: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCHO} + \text{O}_2$), la acroleína (aldehído acrílico), el cloral, el aldehído crotónico y los monoaldehidos son los compuestos que más pueden afectar a los seres vivos. La mayoría de estos productos son irritantes y tóxicos, y aparecen, además de en las combustiones incompletas, en las industrias que los sintetizan, en los incineradores de basuras y en las cercanías de las refinerías de petróleo.

CAPÍTULO 10

DERIVADOS DEL FLÚOR

Los halógenos y compuestos «productores de sales» son electronegativos (máxima electronegatividad en el flúor) y plantean grandes problemas en lo que se refiere a la contaminación atmosférica del medio agrario, principalmente el flúor y sus derivados.

Casi todas las emisiones de halógenos a las atmósferas se deben a actividades industriales.

El flúor es el máximo agente contaminante dentro de este grupo. El medio agrario se ve particularmente afectado, puesto que los focos de emisión suelen estar situados en zonas agrarias de interés, sobre todo en los países europeos y, particularmente, en España. Los derivados del flúor afectan principalmente a las masas forestales (coníferas) y a la ganadería, como se estudiará en los capítulos correspondientes.

El flúor existe en la atmósfera en forma natural como gas y en algunas partículas, aunque en muy baja concentración.

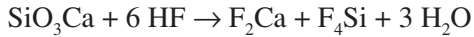
Las principales fuentes de flúor y derivados son la industria del aluminio, que utiliza F_6AlNa_3 (criolitas) como fundentes, y las plantas de fabricación de derivados de flúor.

Las fábricas de abonos fosforados y las industrias que utilizan compuestos silíceos y arcillas también producen emisiones de flúor, aunque en menor cantidad que los casos citados en el párrafo anterior.

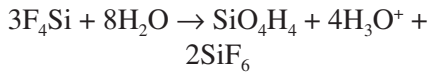
En las zonas industriales donde se emiten flúor y sus derivados, y en su entorno, la concentración de flúor puede llegar hasta $5\mu\text{gr}/\text{m}^3$, pero al ser acumulativo, puede causar graves daños a la vegetación y a la fauna.

El fluor nunca se presenta aislado, sino que lo hace formando los compuestos ya indicados, principalmente el ácido fluosilícico.

En los suelos actúa formando fluoruros, al actuar el ácido fluorhídrico sobre los silicatos:



Si el gas se hidroliza se forman ácidos:



Los compuestos de flúor contaminantes pueden ser partículas sólidas o gases, siendo los principales, entre las primeras, las criolitas o los fluoruros sódico o de aluminio, y, entre los segundos, el ácido fluorhídrico y el ácido fluosilícico.

En todos los países industrializados se plantean problemas con este halógeno, pues la industria del aluminio es su principal fuente.

Las zonas agrarias afectadas surgen esporádicamente en la prensa, incluido nuestro país, y los problemas económico-sociales que se provocan llegan, a veces, a alterar el orden público.

En España aparecen alteraciones debidas al flúor en varias zonas, en las proximidades de las industrias del aluminio, de derivados de flúor y del vidrio (los efectos sobre éste se observan instantáneamente por formarse cuerpos opacos al reaccionar con el Si), y también en puntos muy localizados de Madrid, Aragón, Andalucía, Cataluña y Levante debido a diversos procesos industriales.

Por otra parte, hemos de indicar que el uso de los freones como agentes frigo-

rígenos o como agentes propulsores en los sprays y aerosoles de uso doméstico, hace que estos hidrocarburos cloro fluorados, que son muy volátiles, se emitan a la atmósfera en cantidades apreciables, lo que plantea graves problemas a la capa de ozono estratosférico, hasta el punto que se ha suprimido su utilización en múltiples países.

De todos modos, los freones no son tóxicos y son químicamente inertes, pues no son inflamables y son inodoros, incoloros e insípidos. Esto se tuvo en cuenta cuando sustituyeron al SO_2 y al NH_3 en los frigoríficos domésticos, al ser mucho menos peligrosos.

Los CF_2Cl_2 y CFCl_3 (CFC 12 y CFC 11, respectivamente), son CFC que atacan a la capa de ozono y que provocan, además, efecto invernadero, estando actualmente sus concentraciones atmosféricas en el orden de las 0,29 ppb el CFC 11 y de 0,50 ppb el CFC 12.

Los compuestos de flúor más importantes en lo que a contaminación se refiere son:

- Ácido fluosilícico.
- Ácido fluorhídrico.
- Criolita.
- Chiolita.
- Fluoruro sódico.
- Fluoruro de aluminio.

CAPÍTULO 11

OZONO

Si consideramos al ozono como un constituyente natural de la atmósfera, no por ello puede dejar de ser estudiado como contaminante cuando su concentración sea superior a la normal.

Su concentración, a nivel del mar, puede oscilar entre 40 y $7 \mu\text{gr}/\text{m}^3$, aunque es variable, pues una tormenta provoca formación de ozono, la luminosidad puede agregarlo a otros contaminantes, etc.

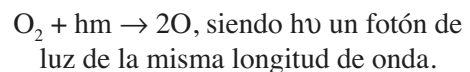
Si la contaminación es baja (en zonas urbanas), el ozono puede reaccionar con las olefinas de los escapes de los vehículos de motor, y su concentración disminuye. El uso de envases de aerosoles y sprays y la emisión de los gases inertes que actúan como expelentes, produce una disminución de la concentración del ozono en las ciudades, por lo que se ha prohibido la fabricación de estos expelentes en la mayoría de los países (aparte del problema que provocan como CFC).

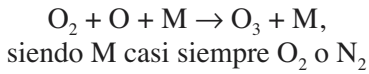
Por el contrario, si la concentración es elevada y la radiación solar es intensa, el nivel de ozono aumenta, y puede llegar hasta $1.400 \mu\text{gr}$. en el caso de ciertos smogs oxidantes.

No tratamos aquí sobre la presencia y evolución del ozono en la estratosfera pues es tema de otra Parte de esta obra.

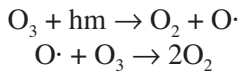
El ozono, desde el punto de vista de la salud humana, es un contaminante secundario si su concentración es anormal, y su origen artificial es el resultado de una serie de reacciones fotoquímicas de compuestos orgánicos volátiles y de óxidos de nitrógeno.

La tendencia natural es hacia una concentración del ozono en la atmósfera en equilibrio fotoquímico, con pequeñas oscilaciones a lo largo del año. Esto es así porque el oxígeno del aire y el mismo ozono atmosférico absorben la radiación UV, verificándose las reacciones

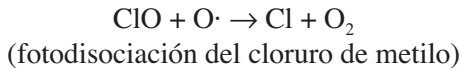
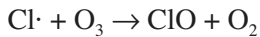
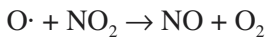
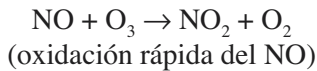




Y el ozono se descompone:

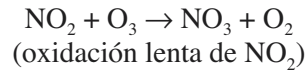


En relación con las nieblas fotoquímicas, tratadas en un capítulo específico de esta obra, se verifica que



Por otra parte, indicamos que el ozono reacciona con los hidrocarburos olefínicos, obteniéndose un ozónido intermedio, que se puede romper de dos formas dando origen a *zwitteriones*.

Si el ozono oxida el NO_2 que pueda existir como contaminante atmosférico, se verificará que:



Si existen aldehidos en el aire, el ozono también los oxida, y así se puede explicar la reducción de concentraciones de algunos de estos contaminantes al final del día en atmósfera urbana, pues son oxidados por el ozono que está presente durante el día en cantidades relativamente elevadas.

En general se puede resumir un conjunto de procesos así:

$$\text{NO} + \text{A} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_3,$$

pudiendo ser A cualquiera de estas formas: HC (hidrocarburos), VOC (componentes orgánicos volátiles), ROG (gases orgánicos reactivos), NMHC (hidrocarburos no metánicos) o NMOG (gases orgánicos no metánicos).

CAPÍTULO 12

DERIVADOS DEL NITRÓGENO

12.1. LOS ÓXIDOS Y SU FORMACIÓN

Los compuestos de nitrógeno que se indican en la tabla adjunta son nocivos

para los seres vivos. Los compuestos como NO, NO₂, N₂O, NO₃, etc., engendran reacciones fotoquímicas en la atmósfera, sobre todo en el caso de ciudades con mucha luminosidad y contaminadas.

DERIVADOS DEL NITRÓGENO, FUENTES Y ESTABILIDAD EN EL AIRE

Derivado	Fuente	Estabilidad en el aire
NO	Bacterias, motores, combustiones	Estable, pero en los tubos de escape de los vehículos se transforma rápidamente en NO ₂
NO ₂	Combustiones	Estable
NO ₃		Inestable
N ₂ O	Bacterias	Estable
N ₂ O ₃		Inestable, pues se verifica la reacción $N_2O_3 \rightarrow NO_2 + NO$
N ₂ O ₄		Inestable, pues se verifica la reacción $N_2O_4 \rightarrow 2NO_2$
N ₂ O ₅		Inestable, pues se verifican las reacciones $N_2O_5 \rightarrow N_2O_3 + O_2 \rightarrow NO_2 + NO + O_2$
NH ₃		

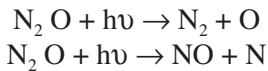
En el medio natural este tipo de contaminación no es importante, excepto en casos aislados de algunas plantas de fabricación de fertilizantes y casos muy concretos de vías interurbanas de circu-

lación de automóviles (debido a los motores de explosión).

Sin embargo, estos productos, en presencia de derivados del azufre, de humedad y de luz, sufren una serie de

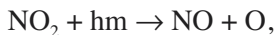
reacciones, que más adelante se indicarán, y provocan los depósitos ácidos, tema que se trata en el capítulo correspondiente.

El N_2O tiene una concentración media en la atmósfera de 0,25 ppm, hasta la tropopausa, y después se fotodisocia con la altitud según las reacciones:



Su principal fuente está constituida por la degradación del N proteico que realizan los microorganismos del suelo, y su producción varía con la estación según sea la actividad de aquellas.

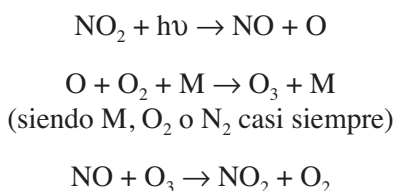
El NO_2 se disocia por acción fotoquímica:



y produce una coloración gris amarillenta en las ciudades con elevado índice de contaminación, y reacciona con otros agentes contaminantes, como se verá más adelante.

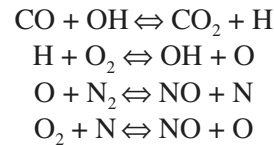
El NO y el NO_2 están relacionados según el equilibrio $2NO + O_2 \rightleftharpoons 2NO_2 \rightleftharpoons N_2O_4$

La formación del NO_2 en la atmósfera por esta vía es lenta, estando relacionados el NO, el NO_2 y el O_3 por las siguientes reacciones:

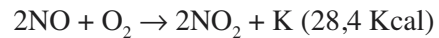


El NO se suele formar por oxidación del NH_3 o por combustiones a altas temperaturas.

En la combustión de los hidrocarburos ocurren las siguientes reacciones:

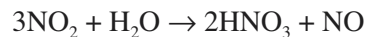


En los escapes de los vehículos se verifica la reacción:



Es decir, el NO se transforma rápidamente en NO_2

Ese NO_2 de la atmósfera se transforma en NO_3H bajo la acción del vapor de agua del aire, y el ácido se convierte, a su vez, en NO_3NH_4 al reaccionar con NH_3 del aire:



Como indica *Ramade*, se podría explicar el poder fertilizante de la nieve suponiendo que los copos, al caer, arrastran los nitratos de los aerosoles del aire y los depositan en el suelo; al fundirse la nieve en primavera se incorporan estos compuestos a las tierras en un momento en el que las necesidades de los vegetales en nitratos son elevadas.

Ciertos productos nitrogenados, como el NH_3 y el NO_3H , pueden producir contaminaciones locales en las proximidades de los lugares de fabricación.

Generalmente, los NO_x (NO_2 y NO principalmente) se presentan en ciertos procesos de combustión (motores de ex-

plosión y calefacciones) e industriales (fábricas de NO_3H , procesos de nitración, etc.). Tienen carácter corrosivo, son oxidantes y actúan como catalizadores en la formación del smog, al mismo tiempo que producen grandes alteraciones en los vegetales y en la fauna (en esta última atacan los tejidos oculares y las mucosas, y oxidan el Fe de la hemoglobina, impidiendo el transporte de O_2 y causando la muerte).

La concentración admisible en los ambientes industriales se acepta en unas 5 ppm (9 mg/m^3) o en menos, y en la imisión en 1 mg/m^3 en media hora. La industria genera el 6% de los NO_x , y la combustión el 18%.

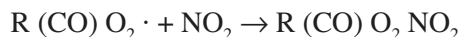
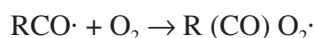
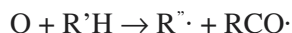
En zonas urbanas la concentración oscila entre 0,01 y 0,6 ppm, siendo la circulación automóvil la responsable del 76% de la totalidad de los NO_x presentes en el aire.

Por lo que se refiere a las nieblas fotoquímicas, en las que intervienen el NO y sobre todo el NO_2 , serán tratadas en el capítulo correspondiente.

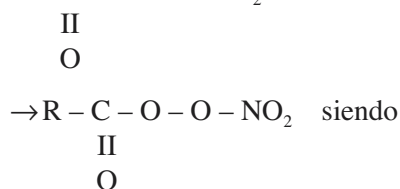
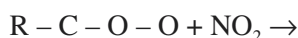
12.2. PAN, PPN Y PBN

Ciertos contaminantes de la atmósfera reaccionan entre sí por acción fotoquímica en lugares de elevado índice de luminosidad y contaminación. Como consecuencia, se forman unos compuestos, de base radicales aromáticos, alifáticos o heterocíclicos, que aparecen en el smog oxidante de California (Los Ángeles).

El proceso químico de formación es el siguiente:



y la reacción general es:

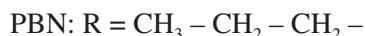
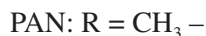


R = Radical aromático, alifático o heterocíclico, como indicamos.

En el proceso de formación de los PAN (nitratos de peroxiacetilo) aparece el ozono, sobre todo en las primeras etapas.

Los smog ácidos producidos en la formación de los PAN (y bajo la acción del ozono) se han detectado en zonas de los alrededores de Los Angeles, en Holanda y en Fos-sur-Mer (Francia).

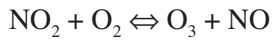
Los PPN (nitrito de peroxipropionilo) y PBN (nitrito de peroxibutirilo) son menos tóxicos que el PAN, y son los primeros miembros de la serie alifática.



La concentración de PAN fuera de las proximidades de los focos contaminados es de unas 50 ppb, aunque ello depende, sobre todo, de las condi-

ciones meteorológicas (inversiones, vientos, etc.).

Si existe ozono, se forma al reaccionar el O_2 y el NO_2 en presencia de radiación UV:



Este ozono reaccionará con los hidrocarburos presentes en el aire y los convertirá primero en alcoholperóxidos, después en peroxiacilos y finalmente en PAN.

CAPÍTULO 13

METALES Y DERIVADOS

13.1. BASES GENERALES

Los metales que aparecen en la atmósfera, en su inmensa mayoría tienen como origen las actividades humanas.

Aparecen a nivel aislado o junto con otros productos, como polvo o formando aerosoles.

En ciertos casos, como ocurre con las lluvias ácidas, esas precipitaciones, además de los productos *convencionales* que las constituyen y les dan el carácter de ácidas, pueden ir cargadas con otros elementos, que son con frecuencia estos metales:

Be	Th
Zu	Al
Pb	Hg

Estos elementos metálicos son nocivos para los seres vivos si se presentan como contaminantes, es decir, si aparecen en concentraciones anormales en la atmósfera, y se incluyen entre los contaminantes primarios.

Los metales pesados más comunes (aunque es frecuente que algunos autores incluyan en este grupo algunos que no lo son), de densidad superior a los 4 g/cm^3 , son desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, los siguientes:

Pb	Cd	Be
Zn	Th	V
Hg	Ni	Cr

En los seres vivos la mayoría de los metales se acumulan y se fijan en diferentes órganos, siendo sectores sensibles los individuos más frágiles (niños, ancianos, enfermos). Su peligrosidad radica en que pueden aparecer en bajísimas concentraciones, pero ese carácter acumulativo multiplica su nocividad.

13.2. ORIGEN BÁSICO Y USOS

Los procesos industriales, el transporte y la combustión son las principales fuentes de los metales en el aire.

En concreto, en muchos combustibles se volatilizan Pb, Zn y Cd.

La contaminación por algunos metales es conocida desde hace más de 2.000 años, como ocurre con el Pb o con el Hg (para la producción de vino, para las amalgamas en la extracción de oro, etc.).

El *plomo* se utilizó como antidetonante en las gasolinas desde principios del siglo xx, habiéndose prohibido este uso en la Unión Europea desde 2001.

La soldadura con estaño desprende partículas de óxido de plomo, pues el material de estaño para soldar contiene hasta el 70% de plomo. La soldadura eléctrica provoca la formación de humos que contienen los metales sobre los que se trabaja.

El decapado en caliente de superficies pintadas provoca la formación de humos que contienen materiales de las pinturas tales como Pb, Cd o Cr.

Las propias pinturas llevan metales en sus pigmentos tales como Pb (pinturas rojas al minio, naranjas o amarillas), Cd (pinturas amarillas), Cr (pinturas anticorrosión) o Hg (ciertas pinturas marinas).

En USA las concentraciones permitidas de Pb en ambientes industriales son de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como media en 8 horas, y de 450 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en puntas de 15 minutos.

FUENTES BÁSICAS DEL PLOMO ATMOSFÉRICO

Escapes de los motores de combustión.
Emissiones de la combustión de carbón.
Emissiones en la extracción.
Emissiones en el refinado.

El plomo atmosférico en forma de partículas o como aerosoles se puede presentar como se indica en la tabla adjunta.

FORMAS DE PRESENTACIÓN DEL PLOMO EN LA ATMÓSFERA

Pb
Pb S
Pb SO ₄
Pb Br Cl
Pb CO ₃
Pb Br ₂
Pb Cl ₂
Pb O _x
Pb (OH) Cl
Pb (OH) Br
Pb ₃ (PO ₄) ₂
2Pb Br Cl · NH ₄ Cl
3Pb O · Pb SO ₄
2Pb O · Pb Cl ₂
2Pb O · Pb Br Cl

El *mercurio* atmosférico puede provenir de la industria, de la incineración de basuras urbanas o de ciertos tubos fluorescentes.

En la extracción y en el refinado se emiten a la atmósfera cantidades apreciables de este metal.

En la tabla adjunta se indican los usos fundamentales del mercurio.

USOS FUNDAMENTALES DEL MERCURIO

Electrolisis	Aparatos eléctricos
Pinturas	Instrumentos de control
Amalgamas (estomatología)	Productos farmacéuticos
Catálisis	Papel y pasta de papel
Tratamientos agrícolas	Curtidos
Tratamiento de plásticos	Agente de transmisión de calor
Amalgamas industriales	

A continuación se exponen las actividades más importantes que emiten mercurio a la atmósfera.

FUENTES BÁSICAS DE EMISIÓN DE MERCURIO A LA ATMÓSFERA

Industrias del cloro
Industrias de la sosa
Aparatos eléctricos
Instrumentos de control
Catálisis
Producción primaria del metal
Producción secundaria del metal
Minería de los sulfuros
Industrias de superfosfatos

Al tener una presión de vapor relativamente alta, el mercurio metal puede evaporarse desde el suelo, y este proceso se puede intensificar por acción microbiana, que transforma el mercurio inorgánico del suelo en compuestos de metal y dimetilmercurio, también de alta presión de vapor.

En general, la presencia de mercurio en la atmósfera es más elevada en las ciudades, en las zonas industriales, en ciertas zonas volcánicas y en ciertas áreas agrícolas.

En ciertos países, como USA, las concentraciones permitidas de Hg a nivel industrial se cifran en $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como media en 8 horas, y en menos para los componentes mercuriales alquílicos.

El *cadmio* es otro metal problemático en lo que se refiere a la contaminación atmosférica.

En principio, tanto su extracción, su uso en acumuladores, pilas, tratamiento de superficies o en las industrias plásticas, como la combustión de carbones, hidrocarburos y plásticos, son fuentes básicas de emisión.

El *níquel* se emite a la atmósfera en ciertos procesos industriales y en diversas manufacturas, así como en la combustión de aceites residuales.

El *berilio* se emite a la atmósfera en los procesos de extracción. Asimismo en su metalurgia, y sobre todo en la fundición del metal, se generan emisiones apreciables.

La combustión de grandes cantidades de carbón provoca la presencia en el aire de concentraciones de Be no despreciables.

En USA la concentración permitida a nivel industrial es de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como media en 8 horas.

El *vanadio* se desprende sobre todo en ciertos procesos industriales y en diversos procesos metalúrgicos. Asimismo se emiten cantidades apreciables (trazas) en la combustión del fuel-oil.

El *romo* es un metal bastante problemático, pues tanto él como algunos de sus derivados o formas (romo hexavalente, etc.) son altamente tóxicos para las biocenosis.

Se emite al aire en ciertos procesos de recubrimiento electrolítico y de manufacturado, así como en la combustión del carbón y en la incineración de residuos en general.

El *cinc* es un metal soluble en ácidos y bases, pero insoluble en agua.

En los procesos de extracción y manejo puede aparecer en forma de polvo, que es bastante tóxico e inflamable, y plantea riesgos de explosión.

En otro orden de cosas, la combustión de residuos puede provocar la emi-

sión de metales alcalinos y alcalino-térreos y restos de metales (en forma sólida o gaseosa) de óxidos metálicos o de sales metálicas mezclados con otras emisiones, disueltas o como componentes de los humos.

En general, en estos casos suelen aparecer Pb, Zn, Cd, Hg y Mn.

CAPÍTULO 14

DERIVADOS DEL CLORO, DEL BROMO Y DEL YODO. RESIDUOS NUCLEARES

El *ácido clorhídrico*, de numerosas aplicaciones industriales, es un ácido inerte, muy corrosivo, muy tóxico por inhalación para la fauna y altamente fitotóxico, incluso en concentraciones muy bajas.

Es muy soluble en agua, por lo que en ambientes húmedos, si existe una fuente emisora, puede estar presente en el aire aunque sea en concentraciones mínimas, con el consiguiente peligro.

La incineración de ciertos materiales, como las basuras urbanas, emite, entre otros productos (como metales pesados o ácidos fluorhídrico), ácido clorhídrico, y se debe tener en cuenta que en numerosos países estos residuos se incineran sin lavado de gases y sin ningún otro tipo de tratamiento. Estas basuras contienen polímeros orgánicos clorados, que al quemarse originan ese HCl.

El *cloro* aparece en el aire en forma de partículas o como gas (como Cl₂ o como ClH), y puede tener como origen el agua de mar al arrastrar sal sólida o el

ión cloruro, disuelto, al evaporarse aquella.

Su concentración, en forma natural, puede alcanzar los 5µg/m³.

La formación del ClH puede tener como origen el SO₄H₂ presente en la atmósfera como consecuencia de la acidificación fotoquímica del SO₂, explicada en los capítulos correspondientes que actúa sobre el ión cloruro que viene del mar según la reacción

Aparte de las emisiones industriales, la actividad humana del transporte ha sido una importante fuente de cloro y de sus derivados, pues los gases de escape de los motores de explosión, al quemar derivados del plomo antidetonantes, contenían aerosoles de haluros de plomo, que por acción fotoquímica se descomponían y daban origen a Cl atómico. Al prohibir el uso del plomo tetraetilo como antidetonante de las gasolinas en ciertos países (Unión Europea, etc.) en 2001, se ha eliminado en adelante una fuente importante del halógeno.

El *bromo* del aire procede o bien del mar, o bien de contaminación artificial, al generarse en la combustión de gasolinas con componentes antidetonantes derivados del plomo.

Al igual que el cloro, el bromo puede venir incluido en el aire marino en gran parte como gas, pero también algo como partículas, como consecuencia de la evaporación del agua marina, que lo arrastra.

En capítulos anteriores hemos indicado una tabla con los componentes que se generan en la combustión de gasolinas con plomo, y entre estos aparecen tres o cuatro que, a su vez, al descomponerse por acción fotoquímica, liberan bromo, gas que permanece así, o se une o reacciona con otros productos existentes en el aire (aerosoles, ácidos, vapor de agua, etc.).

El *yodo* del aire puede tener el mismo origen marino o ciertas actividades industriales, como la producción de energía de origen nuclear, entre otras.

El contenido de yodo en la atmósfera puede llegar hasta $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en condiciones normales, siendo su concentración media de $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Con este elemento ocurre algo similar a lo que ocurre con el bromo, en el sentido de que abunda mucho más en la

forma gaseosa que en la forma particular cuando su origen es oceánico.

En el océano se desprende directamente o a través de reacciones fotoquímicas.

En otro orden de cosas, aprovechamos este epígrafe para citar el tema nuclear, en el que puede aparecer el yodo y en que en la tabla adjunta se indican los residuos que pueden aparecer en el aire.

Las fuentes artificiales más importantes son la combustión de productos fósiles, que genera yoduros, o los procesos de fisión nuclear para producción de energía, que forman I^{131} . Este último puede ser absorbido por las partículas sólidas presentes en el aire y su concentración atmosférica dependerá de la concentración de estas.

El I^{131} puede presentarse como I_2 gaseoso, que es el más absorbido por las partículas sólidas presentes en el aire, o como yoduros alifáticos, como es el caso del CH_3I .

La producción de energía nuclear implica la extracción de los minerales de uranio, su concentración, el enriquecimiento, la fabricación de elementos (pastillas) combustibles y la transformación de la energía.

En cada fase se puede generar contaminación atmosférica, siendo esta como se indica en la tabla adjunta.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA GENERADA EN LAS DIFERENTES FASES DE LA INDUSTRIA DE LA ENERGÍA NUCLEAR

Fase	Contaminante emitido en el aire
Extracción	Polvo y partículas de suelo y roca. Radon y su serie.
Concentración y tratamiento	U Th Ra Po Pb
Enriquecimiento	Emisiones no radiactivas debidas a la producción de la gran cantidad de electricidad que consume este proceso.
Fabricación de los elementos combustibles	Pérdidas generales del 1%.
Transformación de la energía (centrales nucleares)	Pueden ser productos de fisión o productos de activación. <ul style="list-style-type: none"> • Efluentes gaseosos hidrogenados: <ul style="list-style-type: none"> – Productos de fisión gaseosos: Yodo y trazas de gases raros. – Hidrógeno. • Efluentes gaseosos aireados. • Calor a través de la refrigeración con aire o con agua.
Tratamiento de los combustibles usados	I^{131} , C^{14} , tritio y radioisótopos del Ru, del Cs y del Sr.

CAPÍTULO 15

AMONÍACO, SULFATO AMÓNICO Y OTROS CONTAMINANTES MENORES

15.1. AMONÍACO Y SULFATO AMÓNICO

Gran parte del amoníaco existente en la atmósfera es de origen natural, como consecuencia de la hidrólisis de la urea de las excretas animales, y fundamentalmente de la orina.

En muchos de estos procesos biológicos el N_2 se reduce a NH_3 en condiciones de temperatura y presión apropiados.

Se presenta así en forma gaseosa, lo mismo que en ciertos procesos industriales o en la combustión del carbón. En estos casos de producción artificial de NH_3 , las condiciones son de alta presión, alta temperatura y presencia de hidrógeno gas y de un catalizador.

El amoníaco de origen natural representa el 80% del total existente en la atmósfera, y se mantiene en la atmósfera como NH_3 o como ión amonio.

Si existe contaminación por SO_2 , pueden verificarse diversas reacciones,

en las que se oxida y da origen a sulfato amónico.

El sulfato amónico puede presentarse cristalizado si la humedad relativa es baja (de menos del 80%), mientras que si la humedad relativa es alta (superior al 80%), aparece disuelto en las microgotas de agua de la atmósfera.

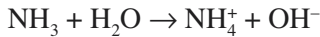
Parece lógico pensar que si el agua atmosférica está en forma de niebla y si existe presencia de SO_2 y de NH_3 , se forme el $(NH_4)_2 SO_4$ y que permanezca allí. Si la niebla se evapora, el sulfato amónico cristaliza y constituye núcleos de condensación del vapor de agua.

Así, este proceso influye sobre la visibilidad atmosférica, dependiendo su mayor incidencia del nivel de humedad relativa, como antes hemos indicado. Si existe condensación bajará la visibilidad.

El amoníaco presente en el aire como amoníaco gas o como sulfato amónico, oscila en su concentración en el entorno de los $5 \mu g/m^3$, con pocas variaciones, a

no ser que algún proceso industrial emita fuertes cantidades que eleven esa concentración, pero a nivel puntual.

El amoníaco, como hemos visto, es muy soluble en el agua y en los ácidos débiles, y actúa según la siguiente reacción:



Así se solubiliza en las partículas de agua atmosféricas, y es una propiedad a tener en cuenta a la hora de tratar el gas para eliminarlo en los procesos de lavado de gases, como se verá en los capítulos correspondientes.

15.2. ETILENO

El etileno es un alqueno de fórmula C₂H₄. Es un gas incoloro, con sabor y olor dulce. Es extremadamente inflamable, con alto riesgo de incendio y explosión. Se obtiene por craqueo térmico de alcanos gaseosos y de diversas fracciones del petróleo.

El etileno es un hidrocarburo nocivo para los seres vivos a pequeñas concentraciones, que con 0,005 ppm ya son dañinas para ciertas especies.

Como hormona de crecimiento se utiliza en la conservación de alimentos, pudiendo retrasar el crecimiento de muchas especies y frutos a partir de concentraciones de 0,05 ppm.

15.3. FORMALDEHÍDO

El formaldehído se origina en la naturaleza en la degradación del metano.

En la actividad humana se forma en la combustión incompleta de los motores de vehículos automóviles. Asimismo entra en la composición de numerosos productos, como aglomerados de madera (tableros), papel, productos textiles, materiales de aislamiento térmico a base de espuma de urea-formol, en muchos plásticos y en diversos tipos de moquetas.

El formaldehído tiene una biodegradación rápida, por lo que su concentración suele ser superior en la atmósfera de interiores que en el exterior.

FUENTES BÁSICAS DE FORMALDEHÍDO EN LA ATMÓSFERA

Ubicación	Fuente
Externa	Degradación natural del metano Combustión incompleta en motores de explosión Protectores de la madera
Interna	Combustión de tabaco Tableros de aglomerados Maderas encoladas Espumas aislantes de urea-formol Muebles Cocinas de gas Colas de empapelado de paredes Materiales de revestimiento: – Moquetas – Pinturas – Alfombras Protectores de la madera Agentes desinfectantes Agentes esterilizantes Productos de limpieza Colas con formaldehído Superficies plásticas Barnices de suelos Textiles para cortinas

Según las recomendaciones de la OMS, en interiores no debe superarse una concentración de 1 ppm durante 8 horas, aunque en ciertos países se exige que sea inferior a 0,08 ppm.

En la tabla adjunta se indican las fuentes básicas del formaldehído en la atmósfera.

La exposición del hombre al formaldehído se indica a continuación:

EXPOSICIÓN DEL HOMBRE AL FORMALDEHÍDO (SEGÚN LA OMS, MODIFICADO)

Fuente	Período	Ubicación	Exposición media (en mg/día)	
Exterior	15% del tiempo	Al aire libre, ciudades, campo	0,02	
Interior	60% del tiempo	Domicilio	0,5-10 (el último tramo superior corresponde casi siempre a viviendas pre o semiprefabricadas)	
			Oficinas, tiendas, etc.	0,2-0,8
	25% del tiempo	Lugares de trabajo	En lugares expuestos a 1 mg/m ³	5
			En lugares con fumadores	0,1-1
Fumadores	> 20 cigarrillos/día		1	

15.4. ARSÉNICO

El arsénico aparece en diversas actividades humanas, que comprenden desde muchos tratamientos agrícolas hasta los tambores de las fotocopiadoras, pasando por la industria farmacéutica.

Es un elemento tóxico cuando tiene cierta concentración en la atmósfera, y cuando se forma anhídrido arsénico se va acumulando en los vegetales, siendo así mayor su toxicidad, y más si los ingieren los animales.

Esta perturbación es más bien de tipo más o menos puntual.

Se presenta en los aerosoles de ciertas zonas industriales (en fábricas de superfosfatos, etc.).

15.5. BENCENO

El benceno es un disolvente con numerosas aplicaciones en la vida cotidiana, y está presente en numerosos productos, como los que se indican en la tabla adjunta.

PRODUCTOS COMUNES EN LOS QUE APARECE EL BENCENO

Gasolinas
Tintas
Pinturas
Aceites
Caucho
Plásticos
Detergentes
Humo del tabaco

Es un irritante de la piel y de las mucosas, pudiendo originar pérdidas de apetito y cefaleas, y aumenta el riesgo de leucemia.

El cambio de las gasolinas con plomo a las gasolinas sin plomo supone añadir al combustible otros productos, como hidrocarburos aromáticos, entre los que se encuentra el benceno, por lo que estos nuevos combustibles contienen más benceno que los anteriores, aunque, en principio, el catalizador debe destruirlo, pero se debe tener en cuenta que un catalizador viejo no elimina totalmente el hidrocarburo.

En ambiente limpio el benceno atmosférico suele tener una concentración que oscila entre 1 y 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En ambiente urbano ésta concentración oscila entre 5 y 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, según sea cada caso.

El benceno puede producir sinergias asociado a otros contaminantes que tienen poder oncogénico.

En ambientes industriales aumenta considerablemente el riesgo de leucemia si la concentración de benceno es elevada.

15.6. TRICLOROETILENO

El tricloroetileno (TCE), casi seguro generador de cáncer de hígado, se utiliza en múltiples aplicaciones industriales, pero sobre todo (más del 90%) en la limpieza en seco de ropa y en el desengrasado de metales.

Como componente se utiliza en lacas, tintas, pinturas, barnices y adhesivos.

La OMS recomienda que no se supere la concentración en el aire de 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante 24 horas.

15.7. TOLUENO

Es un hidrocarburo volátil, que se forma en los escapes de los motores de explosión o en ciertos componentes y procesos industriales, siendo muy importante su uso como disolvente.

También se utiliza en ciertos desodorantes, que pueden contener hasta un 10% de este hidrocarburo, o en barnices, pinturas, limpiadores y colas.

Provoca alteraciones cerebrales, alucinaciones y otros efectos muy graves, como veremos en el capítulo correspondiente.

Existen casos históricos de problemas de contaminación por tolueno como consecuencia de su depósito inadecuado en vertederos industriales, como ocurre con el vertedero de Montchanin, en Francia, donde se depositaron con técnicas inapropiadas y durante 10 años, cientos de toneladas de residuos de este hidrocarburo volátil.

La OMS recomienda que no se superen concentraciones de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante 24 horas.

15.8. BENZOPIRENO

Entre los hidrocarburos aromáticos policíclicos, el benzopireno es importante desde el punto de vista de la contami-

nación atmosférica por sus propiedades cancerígenas, como otros muchos compuestos de este grupo.

Procede de la combustión industrial y doméstica del carbón y de los hidrocarburos, de la incineración de residuos, del humo del tabaco y, en general, de la combustión de productos carbónicos. Forma sinergismos con las microondas.

CAPÍTULO 16

HUMO DE TABACO

16.1. BASES DEL PROBLEMA

El tabaquismo, desde que históricamente se extendió por todo el planeta a partir de 1493 (véase capítulo 1), es el principal responsable de una serie de enfermedades que afectan al hombre y potencia y forma sinergismos con otras. La principal afección es el cáncer de pulmón, aunque, en este caso, un aire contaminado por agentes ajenos al tabaco agrava el problema.

El tabaquismo implica la presencia en el aire de diversos agentes contaminantes que afectan en primer lugar al fumador, y en segundo lugar, y en forma muy apreciable, a las personas que están en su entorno –el tabaquismo pasivo–.

Los mayores problemas que implica el tabaquismo son:

- Daños en la salud del fumador.
- Daños en la salud de los fumadores pasivos.
- Pérdidas de rendimiento laboral.

- Grandes gastos en sanidad y seguro social.
- Dificil erradicación por moda.
- Dificil erradicación por adicción.
- Dificil erradicación por ser un fuerte ingreso por impuestos en las arcas de los Estados.
- Grandes intereses en fortísimos grupos empresariales.

En la mayoría de los países desarrollados, el humo del tabaco constituye un contaminante atmosférico de primer orden, sobre todo por sus implicaciones sanitarias, laborales, sociales y económicas.

En los próximos años se desatarán fortísimas campañas en todos los países desarrollados, con restricciones de todo tipo para los fumadores, con modificación de impuestos a otros compensatorios y con grandes demandas y denuncias por daños a la salud, a nivel individual y colectivo.

16.2. COMPOSICIÓN DEL HUMO DEL TABACO

En principio contiene alrededor de 3.800 sustancias gaseosas o sólidas, de las que una mayoría son mutágenas y/o carcinógenas.

De todos estos elementos y compuestos, sólo la nicotina es específica del tabaco.

Entre ellos se encuentran productos tóxicos como CO, NO_x, NH₃ o nicotina, otros productos tóxicos como la acetona, el ácido fórmico, el formaldehído o la acroleína, que además inhiben el movimiento ciliar de las células del sistema respiratorio humano, y otros que son claramente cancerígenos (más de 43 productos con esta última característica).

El humo del tabaco es el agente oxidante más concentrado al que se expone el organismo humano, teniendo la fase gaseosa de su aerosol hasta 10.000 moléculas oxidantes (radicales libres de rápida degradación) de media por cada inhalación.

En la tabla adjunta se indican los componentes básicos del humo del tabaco.

De la tabla se deduce que la concentración en los lados es muy superior a la del frente, y realmente es la que más contamina, aunque se diluye rápidamente

antes de alcanzar a los fumadores pasivos.

Parece ser que los productos más dañinos son:

- Benceno:
 - Se absorbe entre 40 y 50 µg/cigarri-
llo.
 - Un fumador inhala del orden de los
2 mg/día.
 - Un fumador pasivo inhala del orden
de los 0,2 mg/día.
- Hidrocarburos aromáticos policíclicos:
 - Es de destacar el benzo-a-pireno
por peligroso.
- Cadmio:
 - Un cigarrillo contiene entre 0,9 y
2,3 µg, y se inhala el 10%.
- Níquel
- Polonio 210:
 - Además de cancerígeno, es radiac-
tivo.
- Nitrosaminas:
 - Son los más cancerígenos de todos
los componentes.
- Dioxinas:
 - 4,3 pg/kg de peso/día un fumador
de 20 cigarrillos/día.
- Productos fitosanitarios:
 - Casi todos los utilizados en las
plantaciones de tabaco.

**COMPONENTES BÁSICOS DEL HUMO DEL TABACO,
EFECTO, CONCENTRACIÓN Y LOCALIZACIÓN DEL HUMO
(SEGÚN DIVERSOS AUTORES, MUY MODIFICADO)**

Producto	Efecto	Concentración en el centro	Concentración en los lados
Partículas	Tóxicos, cancerígenos, cocancerígenos	1,05·10 ¹² (número)	3,50·10 ¹² (número)
Alquitranes	Tóxicos	20,80 (mg)	44,10 (mg)
CO	Tóxico	31,40 (mg)	148,00 (mg)
Nicotina	Tóxico	0,92 (mg)	1,69 (mg)
NO _x	Tóxicos	14,00 (μg)	51,00 (μg)
Fenol	Tóxico	0,23 (mg)	0,60 (mg)
Ácido cianhídrico	Tóxico, inhibidor del movimiento ciliar		
Ácido fórmico	Inhibición del movimiento ciliar		
Catecol	Cocancerígeno		
Acetona	Tóxico, inhibidor del movimiento ciliar		
NH ₃	Tóxico	0,16 (mg)	7,40 (mg)
Formaldehido	Tóxico, inhibidor del movimiento ciliar		
Acroleína	Inhibidor del movimiento ciliar		
Benceno	Cancerígeno		
Sulfuro de carbonilo	Tóxico		
N-nitrosodimetilamina	Cancerígeno		
N-nitrosopirrolidina	Cancerígeno		
3-vinilpiridina	Tóxico		
Gamma-butirolactona	Cancerígeno		
Quinoleína	Cancerígeno		
N-nitrosornicotina	Cancerígeno		
NNK	Cancerígeno		
2-toluidina	Cancerígeno		
Cd	Cancerígeno		
Ni	Cancerígeno		
N-nitrosodietilamina	Cancerígeno		
Benzantraceno	Cancerígeno		
Benzo-a-pireno	Cancerígeno	35 (ng)	135 (ng)
Hidrazina	Cancerígeno		
Polonio 210	Cancerígeno		
Policloro-dibenzodioxinas	Tóxicas	5 (μg/m ³)	

CAPÍTULO 17

LOS AEROSOLES

17.1. BASES GENERALES

Los aerosoles son pequeñas gotas en suspensión en el aire e incluso partículas sólidas, y constituyen dispersiones de líquidos o de sólidos en el aire. El polvo, los humos, las cenizas o las nieblas ácidas son una de las causas de la contaminación atmosférica, y constituyen la base los aerosoles.

La industria, en términos generales, emite una enorme gama de productos a la atmósfera, entre los que se encuentran aerosoles de todas clases: desde óxidos de hierro de las acerías, hasta amianto y fluoruros de todo tipo en las plantas de fabricación correspondientes.

Los mecanismos básicos de formación a partir de sus precursores son:

- Oxidación fotoquímica.
- Oxidación catalítica en presencia de metales pesados.
- Reacciones en presencia de agua, de SO_2 y de amoníaco.

Los aerosoles son responsables, en parte, del aumento de la opacidad de la atmósfera.

El medio ambiente se ve influido por estos contaminantes de muy diversas formas: la opacidad de la atmósfera provoca alteraciones (disminución) de la actividad fotosintética de los vegetales (producción de oxígeno) y aumento de emisiones de CO_2 en todos los seres vivos; la presencia de agentes extraños como plaguicidas, cloro, etc., produce daños en todos los seres vivos, unas veces por acumulación y otras por acción directa; el depósito de partículas sedimentables de origen industrial sobre suelos agrícolas origina modificaciones frecuentemente perjudiciales para los cultivos, y, como consecuencia, incide negativamente sobre la salud del hombre y de los animales.

En las zonas urbanas los aerosoles plantean problemas de todo tipo.

17.2. CLASIFICACIÓN Y DIMENSIONES

Los aerosoles pueden ser, según su origen:

- Polvo terrestre, que han levantado los vientos.
- Sal marina, procedente de la superficie marina.
- Humos y partículas de las combustiones.
- Productos químicos.
- Partículas orgánicas.
- Polvo volcánico.

Según sus dimensiones, los aerosoles pueden ser:

- Partículas o núcleos de *Aitken* (de radio inferior a 0,1 μm).
- *Partículas grandes* (de radio entre 0,1 y 1 μm).
- *Partículas gigantes* (de radio superior a 1 μm).

Por otra parte, se pueden indicar que:

$$n(r) = \frac{dN}{d(\log r)},$$

siendo:

$n(r)$ = Número de partículas de radio comprendido entre r y $r + \delta r$

N = Número de partículas de radio menor que r

r = Radio de las partículas.

ORIGEN DE LOS AEROSOLES ATMOSFÉRICOS BÁSICOS

Origen natural	Actividades humanas
Suelos y rocas	Partículas (origen industrial)
Incendios forestales	Partículas (origen urbano)
Sal marina	Sulfatos (de SO ₂)
Residuos volcánicos (cenizas, etc.)	Nitratos (de NO _x)
Sulfatos (de H ₂ S)	Hidrocarburos (de combustión, etc.)
Sales amoniacales (de NH ₄)	
Nitratos (de NO _x)	
Hidrocarburos	

Los aerosoles, según su ubicación geográfica, pueden ser, *aerosoles continentales o aerosoles de zonas industriales, urbanas o de áreas no antropizadas de las tierras emergidas, aerosoles marítimos*, correspondientes a la atmósfera inmediata localizada sobre mares y océanos, y *ruido de fondo*, que corresponde a los aerosoles de la troposfera media y superior.

En las zonas continentales, las partículas más pequeñas, que corresponden a los núcleos de *Aitken*, suelen constituir entre el 15 y el 35% del total de los aerosoles en las zonas industriales y urbanas, correspondiendo el resto a las partículas grandes y gigantes.

En las zonas marítimas, la mayoría de los aerosoles son de los grupos grandes y gigantes, aunque su radio es muy variable, pues depende totalmente de la humedad atmosférica.

Muchos aerosoles, al chocar entre sí, se unen y se coagulan, por lo que con el tiempo, las partículas que quedan en el aire en una zona de poco movimiento disminuyen en número y aumentan de tamaño.

En este sentido, la fórmula de *Smoluchowski* nos indica que:

$$\frac{dn_t}{dt} = Kn_t^2$$

siendo:

K = Constante dependiente de ciertas propiedades del aire, del tamaño de las partículas y de su difusividad.

t = Período de tiempo estudiado.

n_t = Número de partículas presentes en el tiempo t

17.3. CONDENSACIÓN Y VISIBILIDAD

Generalmente, los aerosoles están constituidos por parte líquida y por parte sólida, de la cual algunos componentes pueden ser solubles y otros insolubles.

Los componentes solubles determinan la formación en la atmósfera de gotas de pequeñas dimensiones, teniendo en cuenta lo antes indicado referente a la humedad atmosférica: Si esta es alta, es decir, si sube mucho la humedad relativa y supera la que corresponde a la de la disolución saturada de la sal seca soluble de la partícula, se condensará el agua sobre esa partícula, apareciendo entonces el aerosol como una disolución saturada que contiene partículas insolubles. Si sigue subiendo la humedad, aumentarán

las dimensiones de las gotas y se reducirá el grado de saturación.

Al final, si las dimensiones de las gotas crecen, habrá más posibilidades de sedimentación, por lo que una situación meteorológica de humedad relativa alta en presencia de aerosoles implica la casi segura precipitación, que estará determinada siempre por la condensación del vapor de agua de la atmósfera sobre las partículas que constituyen el aerosol.

En la tabla adjunta se indican dos de las sales solubles más importantes de los aerosoles atmosféricos.

SALES SOLUBLES BÁSICAS DE LOS AEROSOLES ATMOSFÉRICOS

Aerosol	Sal soluble	Humedad relativa a la que se transforma en una disolución saturada (en %)
Marítimo	Na Cl	75
Continental	(NH ₄) ₂ SO ₄	81

Las precipitaciones así formadas arrastrarán a la mayoría de esas gotas grandes (aerosoles grandes y gigantes), depositándose sobre la vegetación y sobre el suelo.

En otro orden de cosas, la presencia de aerosoles atmosféricos afecta directamente, en sentido negativo, a la visibilidad en la atmósfera.

Si se aplica la conocida fórmula de la evolución (pérdida) de la intensidad de un haz de luz en la distancia, que se propaga en la atmósfera,

$$I = I_0 e^{-\sigma x},$$

donde:

I = Intensidad de la luz

I_0 = Intensidad inicial

σ = Coeficiente de extinción = b + k

b = Efecto de dispersión de la luz

k = Efecto de absorción de la luz

La intensidad decrece con la distancia, y a agravar esto contribuyen de manera determinante los núcleos de *Aitken* de los aerosoles atmosféricos.

Además, la dispersión la provocan las partículas grandes, siendo

$$b = NK\pi r^2,$$

donde:

b = Dispersión de la luz

N = Número de partículas de radio r

K = Relación dispersión/área de las partículas, dependiente de r, de su índice de refracción y de la longitud de onda de la luz incidente

r = Radio de las partículas

Así pues, la condensación, la humedad relativa y la estabilidad atmosférica, como fenómenos climáticos, son factores determinantes de la concentración y del tamaño de los aerosoles atmosféricos.

17.4. ACTIVIDAD QUÍMICA

Los aerosoles de la atmósfera, por su condición, pueden absorber gases, diluir, diluirse o catalizar diferentes reacciones.

Según sea su superficie tendrán mayor o menor actividad. En general, su superficie media ronda los 5 m²/g, de los

que 2,5 m² corresponden al propio aerosol y el resto (la otra mitad) está formado por gases, que suelen ser CO₂ (300 μg/g), CO (30 μg/g), NH₃ (60 μg/g) o CH₄ (60 μg/g).

Por otra parte, y debido a veces a su capacidad catalítica, es relativamente frecuente que provoquen sinergismos con otros contaminantes o si existen determinadas condiciones meteorológicas.

17.5. VALORACIÓN DE AEROSOLES

Las partículas de aerosoles se depositan por fuerzas gravitacionales, y a veces con el concurso de la lluvia o de la nieve. Estos mecanismos son especialmente efectivos para partículas de diámetro inferior a 1 μm.

Sin embargo, los tiempos de permanencia en la atmósfera son más bajos para las partículas más pequeñas (0,1 a 1 μm).

Se ha sugerido que la velocidad de caída se explique por la ley de *Stokes*, aunque introduciendo factores de corrección que tengan en cuenta ciertas características.

Stokes demostró que un objeto esférico cayendo a través de un medio viscoso alcanzará una velocidad constante de caída cuando la fuerza de la viscosidad (que aumenta con la velocidad) llega a ser igual y opuesta al peso del objeto, menos la debida al empuje del aire. Comprobó también que la velocidad de caída V/l es proporcional al cuadrado

del radio r del objeto. Luego si la esfera es pequeña, siendo constantes otros factores como el peso, la densidad, y ciertas características del aire, el objeto caerá más despacio.

Diversos autores propusieron varios factores de corrección, estableciendo la fórmula:

$$V_f = \frac{2}{g} \cdot g \cdot r^2 \left(\frac{\delta - \delta_a}{\eta} \right) \left(1 + \frac{B}{r \cdot p} \right)$$

donde:

- V_f = Velocidad final de caída.
- r = Radio de la partícula esférica.
- g = Aceleración de la gravedad.
- δ = Densidad de la partícula.
- δ_a = Densidad de la atmósfera.
- η = Coeficiente de viscosidad del aire.
- p = Presión del aire.
- B = Constante para cada temperatura. Su valor, si p se expresa en milibares y r en centímetros, es de 0,0062 a -55°C , y de 0,0084 a $+23^\circ\text{C}$.

Con esta fórmula se pueden controlar los depósitos de aerosoles, tanto los de origen gaseoso como los que se han formado con núcleos de partículas sólidas contaminantes.

Ante precipitaciones en forma de lluvia o nieve se han propuesto diversas fórmulas que sirven para calcular los contaminantes que se eliminan con estos fenómenos meteorológicos, hallando primero las velocidades de caída de las partículas en esa situación de lluvia o de nieve.

La fórmula a aplicar para el cálculo de los contaminantes eliminados sería:

$$\frac{dq}{dt} = \int_0^N EqwAdn$$

donde:

- w = Velocidad de caída.
- A = Proyección horizontal de la gota.
- q = Concentración de contaminantes eliminados por unidad de volumen.
- t = Tiempo.
- E = Eficacia de la captación, que depende del tamaño y superficie de la gota, y del instrumento empleado para su captura.
- N = Número de partículas recogidas por el colector.
- qwA = Masa teórica de contaminantes interceptados por unidad de tiempo.
- $EqwA$ = Masa de contaminantes interceptada en la unidad de tiempo (se introduce el factor corrector E).

Así pues, dq/dt expresa la masa total de contaminantes eliminados por lluvia o por nieve en un dt .

La solución a la integral es:

$$q = q_0 \exp(-S_A t)$$

que expresa el descenso de la concentración de contaminantes en la unidad de volumen, con el tiempo. En ella,

- q_0 = Concentración inicial
- S_A = Coeficiente de dispersión baja en la concentración equivalente a:

$$\int_0^N EwAdn$$

Es función del arrastre por lavado.

En otro orden de cosas, las nubes y las partículas de agua suspendidas en el aire tienen cierto interés por lo que suponen un interesante sistema natural de ab-

sorción de contaminantes. Varios autores indican que la concentración de contaminantes dentro de las gotas de agua de las nubes se puede expresar con la fórmula:

$$K = \frac{\varepsilon \cdot q}{L}$$

donde:

K = Concentración de contaminantes en las gotas de agua de la nube (en mg/l).

ε = Coeficiente de permanencia en la nube ($0 < \varepsilon < 1$).

L = Contenido de agua en fase líquida en la nube (en g/m³).

q = Concentración de contaminantes en el aire (en g/m³).

El coeficiente toma valores diferentes según sea el tipo de contaminante,

estando comprendido, para el SO₂ por ejemplo, entre 0,01 y 0,10. Para otros contaminantes los valores serán muy diferentes, como ocurrirá con los plaguicidas. Estos productos, presentes en las aguas de lluvia de todo el mundo, varían su concentración en función de factores dispares, como pueden ser el tipo de producto utilizado en las zonas de origen, los vientos, las condiciones meteorológicas generales, la época del año, etc. En experiencias realizadas por nosotros hace casi 30 años comprobamos que, en áreas forestales, K puede alcanzar valores relativamente elevados para el lindano, y lo mismo ocurre con otros plaguicidas clorados, como puede verse en la tabla adjunta.

VALORES APROXIMADOS DE K OBTENIDOS A PARTIR DE DIVERSAS EXPERIENCIAS CON PLAGUICIDAS ORGANOCORADOS

Área	Período	Lindano	Dieldrin	pp'-DDT	Clordano	PCP
Francia	1973	0,94·10 ⁻³ media	-		-	-
Inglaterra	1964-65	75,10 ⁻⁶	19,10 ⁻⁶	3,10 ⁻⁶	-	-
Inglaterra	1966-67	60,10 ⁻⁶	8,10 ⁻⁶	46,10 ⁻⁶	-	-
Ohio	1965	25,10 ⁻⁶	-	150,10 ⁻⁶	-	-
Hawaii	1970-71	5,10 ⁻⁶	5,10 ⁻⁶	3,10 ⁻⁶		
Hawaii	1971-72	3,10 ⁻⁶	12,10 ⁻⁶	4,10 ⁻⁶	1,10 ⁻⁶	60,10 ⁻⁶

CAPÍTULO 18

EL SMOG Y LA CONTAMINACIÓN FOTOQUÍMICA

18.1. GENERALIDADES SOBRE EL SMOG

La palabra smog proviene de la unión de las palabras inglesas *smoke* y *fog*.

Cuando existen en el aire partículas higroscópicas invisibles en suspensión, de poca densidad pero en concentración suficiente, se pueden formar neblinas y nieblas.

Si esas partículas consisten en humos, hollines y otros productos, se forman núcleos de condensación mayores y visibles, dando lugar a que esas nieblas se unan con el efecto visible del humo, provocando la aparición del smog, más o menos espeso y de efectos muy negativos para la salud, sobre todo si existe presencia de SO_2 .

El smog se suele presentar en las ciudades con elevado índice de contaminación atmosférica, y cuando estas son propensas a las nieblas. Son los casos de Londres y de los Ángeles, que dieron lugar a la diferenciación de dos

tipos de smog: Smog ácido y smog fotoquímico.

En la tabla adjunta se indican algunas ciudades y zonas industriales con verdaderos problemas provocados por la conjunción población-clima-tráfico-calefacción-contaminación, y otras que han conseguido atajarlos.

18.2. SMOG ÁCIDO

Es el típico de Londres, y es el smog sulfuroso. Se suele producir en invierno, con una insolación baja y ambiente húmedo, ante fuertes emisiones de SO_2 . Se forma un aerosol que se va acidificando, transformándose al final en SO_4H_2 .

En los años 50 del siglo pasado se produjo en Londres la gran alarma que originó un plan de lucha contra la contaminación atmosférica urbana de esa ciudad, que consiguió rebajar extraordinariamente los niveles de contaminantes en el aire urbano hasta límites aceptables.

CIUDADES Y ZONAS INDUSTRIALES DEL MUNDO QUE HAN TENIDO O TIENEN PROBLEMAS DE SMOG O DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Ciudades y zonas industriales que han reducido considerablemente sus niveles de smog o de contaminantes atmosféricos	Ciudades y zonas industriales con graves problemas de smog o de contaminantes atmosféricos
Londres (UK) Tokio (J) Los Ángeles (USA) Rotterdam (N) París (F) Madrid (E) Nueva York (USA) Filadelfia (USA) Zürich (S) Fos-sur-Mer (F) Áreas industriales de Bélgica Áreas industriales de la cuenca del Ruhr (D) Polígono industrial de Huelva (E) Polígono industrial de Avilés (E)	México DF (Méx) Bangkok (Th) Santiago de Chile (Chil) Magnitogorsk (ciudad y zonas industriales, Rus) Sao Paulo (Br) Bogotá (Col) El Cairo (Eg) Atenas (Gr) Kiev (Ukr) Estambul (Tu) Bombay (I) Yakarta (Ind) Shangai (Ch) Islamabad (Paq)

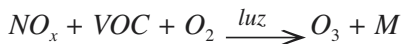
El episodio que citamos originó un aumento espectacular de las defunciones causadas por enfermedades de las vías respiratorias, siendo tal la situación, que, posiblemente, fuera el desencadenante de la toma de medidas reales y eficaces en la lucha contra la contaminación atmosférica, a nivel de las ciudades con problemas de este tipo, en el mundo desarrollado.

18.3. SMOG FOTOQUÍMICO: FORMACIÓN

Es el que se origina en Los Angeles como consecuencia de una fuerte insolación y por la presencia de NO_x y de hidrocarburos. Esta situación provoca que estos dos grupos de contaminantes se constituyan en unos precursores que dan origen a otros contaminantes secundarios como son los oxidantes fotoquímicos,

entre los que se incluyen el ozono, los aldehídos, los nitratos de peroxiacetilo (PAN), los nitritos de peroxibutirilo (PBN), los nitritos de peroxipropionilo (PPN), ciertos ácidos nítricos, etc.

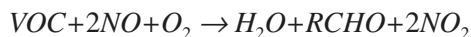
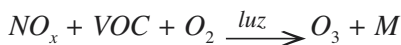
En principio, los NO_x, los hidrocarburos y el oxígeno, en presencia de luz, dan origen a ozono y a otros componentes del smog de carácter irritante:



siendo:

M = Diversos componentes irritantes del smog.

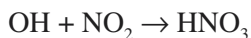
También se verifican las reacciones ya indicadas en otros apartados:



RCHO = Aldehídos

R = Hidrocarburo

Y también se verifica que el NO_2 reacciona con radicales OH, dando ácido nítrico:



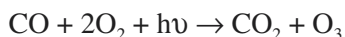
En la formación de estos productos, y sobre todo en la del ozono, existe un ciclo entre el NO_2 , el O_3 y el NO.

Con la radiación solar el NO_2 forma oxígeno atómico y ozono, pero el NO destruye el ozono, y el balance dependerá de la intensidad de la radiación solar y de las concentraciones de NO_2 y de NO.

Si existen ciertos hidrocarburos no saturados, como las olefinas y otros, son oxidados por O, HO (hidroxilo) y HO_2 (hidroperoxilo), para dar NO_2 .

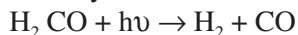
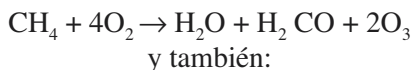
Al final el ozono no se utiliza, y así va aumentando su concentración.

Por otra parte se verifica que:



donde se produce O_3 a partir del CO

y además, la oxidación del metano también produce O_3 :



18.4. MODELIZACIÓN DE LA FORMACIÓN DEL SMOG

Se han utilizado modelos tanto para analizar la influencia de diferentes parámetros como para estudiar la evolución

de diversas concentraciones de ozono en zonas amplias.

Así, en Europa se citan los siguientes modelos:

- *Modelo noruego*. Es un modelo de *Lagrangé* de transporte a largas distancias, que incluye múltiples reacciones químicas y fotoquímicas (más de 100 reacciones entre 40 productos diferentes).

La superficie tratada es de $150 \times 150 \text{ km}^2$, y las condiciones meteorológicas se simulan determinando la trayectoria de diferentes masas de aire.

- *Modelo AERE, del Reino Unido*. Es un modelo AERE Harwell para transporte regional, y comprende más de 300 reacciones entre uno 40 contaminantes atmosféricos.

Se consideran las condiciones meteorológicas en mezclas instantáneas estacionarias en un espacio de $450 \times 360 \times 1,3 \text{ km}$.

- *Modelo Stern, de Alemania*. Utiliza el modelo SAI euleriano de corrientes de aire para el cálculo de vientos, y el modelo EKMA de la EPA para los procesos químicos.

Tiene en cuenta también la advección y la difusión, y muchas de las bases meteorológicas se fundamentan en observaciones de campo.

18.5. GENERALIDADES SOBRE LA CONTAMINACIÓN FOTOQUÍMICA

Ya se ha tratado en otras partes de esta obra la evolución de ciertos contami-

nantes en la baja atmósfera, solos o en mezcla.

La contaminación fotoquímica se produce a causa de la agresión de los oxidantes fotoquímicos que se generan por acción de la luz sobre algunos contaminantes atmosféricos.

La radiación solar actúa sobre algunos contaminantes, sobre todo en la troposfera baja (hasta los 11 km de altitud, más o menos), de manera que provoca sobre esos contaminantes, que se califican como *precursores*, una serie de reacciones fotoquímicas más o menos complejas que se traducen en la generación de otros contaminantes.

Los precursores más frecuentes son los *Compuestos Orgánicos Volátiles* (COV), los NO_x , el CO y el NH_4 .

Los contaminantes generales suelen ser básicamente el ozono, que es el más importante por su toxicidad y abundancia, y en mucha menos cantidad los PAN, los aldehídos, el ácido nítrico, el ácido fórmico y otros.

La contaminación fotoquímica se suele localizar sobre las zonas emisoras de contaminantes (ciudades y áreas industriales), o en las áreas a las que los vientos transportan esos contaminantes.

Esta contaminación varía a lo largo del día, tanto en el tipo de transformaciones (fases de luz y de oscuridad) como por las emisiones (muchos más vehículos durante el día), a lo largo de la semana (descanso de muchas actividades el fin de semana), y de forma estacional en los países con fuerte insolación, y es una

de las fuentes básicas del smog oxidante, tratado en otros epígrafes.

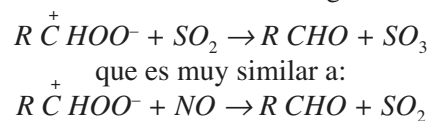
Se debe tener en cuenta que, además de los contaminantes indicados, la presencia de SO_2 puede afectar directamente a este tipo de contaminación.

El SO_2 es muy frecuente, y es fácil que aparezca en las zonas donde existen reacciones fotoquímicas.

Los aerosoles que se forman en estos ambientes tienen fuerte contenido en sulfatos, que proceden de procesos de acidificación que se apoyan parcialmente en la acción de catalisis o de apoyo de los contaminantes que originan la contaminación fotoquímica, como el NO_2 , el O_3 , los COV o el oxígeno.

Si existe una fotodisociación, el SO_2 es oxidado por el NO_2 con gran rapidez, proceso que es lento si no hay actividad fotoquímica.

El SO_2 y el O_3 pueden reaccionar rápidamente si existen COV, según:



El SO_3 que se forma se hidrata en la atmósfera y forma una niebla de SO_4H_2 , que si se une a la toma de luz por el NO_2 , reduce considerablemente la visibilidad en el territorio afectado. Este tema se trata en otras partes de la obra.

18.6. EL PROBLEMA EN LA UNIÓN EUROPEA

La Unión Europea, en relación sobre este tema con la OMS y con diversos

programas y convenios de las Naciones Unidas, estableció el V Programa hasta el año 2000 y después el VI Programa.

En ellos se planteó reducir las emisiones de NO_x y de COV, y controlar el ozono, habiendo promulgado hasta el momento diferentes Directivas de seguimiento y control de disolventes y de reducción de emisiones.

En España se trata el tema en la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico de 1972, y posteriormente en varios Reales Decretos.

Se establece en este país una serie de indicadores de estado, de presión y de respuesta, de los que se han desarrollado los de presión referentes a los COV. Este indicador, identificado por At 19, se refiere a las emisiones antrópicas de COV no metánicas. Las emisiones se miden en Tm.

En España cerca del 70% de las emisiones de COV son de origen antrópico, de las que la mitad corresponde al transporte y el 26% al uso de disolventes.

CAPÍTULO 19

LOS OLORES EN EL MEDIO AMBIENTE

19.1. DEFINICIONES Y DETECCIÓN DE LOS OLORES

El olor es una sensación del sentido del olfato que se nota al conectar los productos químicos volátiles olorosos con el sistema olfatorio y transmitirse por el sistema nervioso al cerebro.

La detección del olor puede ser humana o analítica. Para ello se han utilizado una serie de técnicas que comprenden desde la apreciación personal hasta el juicio de un panel de técnicos. Para estudiar un olor habrá que tener en cuenta: la intensidad (imperceptible a muy fuerte), la calidad (identificación), y la detectabilidad del olor (probabilidad de detección a diferentes niveles). Para la apreciación objetiva y en la investigación sobre los olores, la cromatografía y la espectrometría de masas dan los mejores resultados, pero también pueden utilizarse la ionización a la llama, la espectrofotometría infrarroja, y la espectrometría de resonancia magnética nu-

clear. Otras técnicas son la escentrometría, los medidores fijos o portátiles, el sistema Drawnicks, el método Hemean, los TGD(TLD-1) o los TEGD (Reaco). No obstante, no puede existir técnica alguna que valore la sensación de agrado o disgusto provocada por un olor.

En general sería incorrecto tratar de un olor, ya que, en realidad, normalmente suelen presentarse mezclas de olores, aunque en actividades como las explotaciones ganaderas puede predominar ampliamente el olor del purín –que a su vez es mezcla de olores–.

19.2. ORIGEN Y CLASIFICACIÓN DE LOS OLORES

En principio, los olores se originan en todas aquellas actividades industriales, urbanas o agrarias que los generan.

Las estaciones depuradoras urbanas suelen estar situadas en las afue-

ras de las ciudades. Muchas industrias (petroquímicas, extractivas, etc.) están situadas en el medio no urbano y no hablemos ya de las industrias agroalimentarias, cuya mayoría está situada cerca de los puntos generadores de

materia prima, es decir, en el campo o en pequeños núcleos rurales.

Finalmente, indicamos que las actividades agrarias en sí son las principales generadoras de olores en el medio natural.

OLORES FRECUENTES Y SUS FUENTES GENERADORAS

Componentes olorosos	Actividades generadoras de olores
Sulfuro de hidrógeno	Papeleras, refinerías, industrias y actividades agrarias, vertederos, depuradoras.
Mercaptanos	Papeleras, refinerías, industrias y actividades agrarias, vertederos, depuradoras.
Sulfuro de metilo	Papeleras.
Sulfuro de dimetilo	Papeleras.
Amoníaco	Refinerías, fábricas de fertilizantes, industrias y actividades agrarias, vertederos, depuradoras.
Dióxido de azufre	Refinerías, centrales térmicas, calderas.
Óxidos de nitrógeno	Fábricas de fertilizantes.
Urea	Fábricas de fertilizantes.
Aldehídos	Fábricas de fertilizantes, tratamiento de metales.
Fluoruros	Fábricas de fertilizantes, fábricas de derivados del flúor, fábricas de vidrio.
Fenoles	Tratamiento de metales, plaguicidas, bases para antibióticos.
Hidrocarburos	Refinerías, pinturas y barnices, calderas.
Compuestos clorados	Plaguicidas.
Aminas	Industrias agroalimentarias, vertederos, depuradoras.

Los umbrales de detección y de reconocimiento de los productos olorosos dependen de diversos factores, pero como orientación general, podemos establecerlos como se indica en el cuadro adjunto.

En otro orden de cosas, los olores se pueden clasificar según diversos criterios, como los expuestos en las tablas adjuntas.

CRITERIOS BÁSICOS DE CLASIFICACIÓN DE OLORES

Criterio	Sensación
Calidad	Dulce Ácido Acre Amargo Podredumbre
Intensidad	Definida según concentración
Persistencia	Duración de la sensación después de la inhalación
Exposición	Intensidad x duración
Molestias	Agradable Neutro Desagradable Insoportable

**UMBRALES DE RECONOCIMIENTO Y DETECCIÓN DEL OLOR
DE DIVERSOS PRODUCTOS QUE PUEDEN CONTENER
LAS AGUAS RESIDUALES**

Producto	Umbral de reconocimiento (ppm de volumen)	Umbral de detección (ppm de volumen)
Ácido sulfhídrico de Na ₂ S	47,10 ⁻⁴	5,10 ⁻⁴
Escatol	22,10 ⁻²	—
Ácido sulfhídrico gas	47,10 ⁻⁵	—
Fenol	47,10 ⁻³	—
Metilmercaptanos	21,10 ⁻⁴	10 ⁻³
Etanotiol	10 ⁻³	—
Amoníaco	468,10 ⁻¹	—
t-butiltiol	9,10 ⁻⁵	—
Alil mercaptanos	16,10 ⁻³	—
Propanotiol	74,10 ⁻⁵	—
Metilaminas	21,10 ⁻³	—
Dimetilaminas	47,10 ⁻³	—
Trimetilaminas	21,10 ⁻⁵	—
Paracresol	10 ⁻³	—
Alilaminas	28	—
Dietilaminas	498,10 ⁻³	—
Etilmercaptanos	10 ⁻³	3,10 ⁻⁴
Ácido propiónico	20	—
Metanotiol	21,10 ⁻⁴	—

OLORES MOLESTOS SEGÚN SUS COMPONENTES

Componente	Fórmula	Olor (orientativo)
Aminas	CH ₃ NH ₂ , (CH ₃) ₃ N	A pescado
Mercaptanos	CH ₃ SH, CH ₃ (CH ₂) ₃ SH	A zorro (o mofeta)
Sulfuros orgánicos	(CH ₃) ₂ S	A col podrida
Diaminas	NH ₂ (CH ₂) ₄ NH ₂ NH ₂ (CH ₂) ₅ NH ₂	A carne podrida
Amoníaco	NH ₃	Amoniacal
Ácido sulfhídrico	SH ₂	A huevos podridos
Escatol	C ₈ H ₅ NHCH ₃	Fecal

**ALGUNOS TIPOS PRIMARIOS DE OLORES SEGUN SU ESTRUCTURA
Y COMPONENTES BÁSICOS**

Olor	Estructura	Componente fundamental
Alcanforado	Esférica, Ø=7Å	Hexacloroetano
Almizclado	Disco, Ø=10Å	Sebacatos de etileno
Flores	Disco con cola	Éteres, esterés, acetato de metilo
Menta	Cuña	Mentol
Etéreo	Bastón	Cloruro de metilo, etileno
Picante	Moléculas electrofílicas	Acetaldehído
Pútrido	Moléculas nucleofílicas	Putrescina, cadaverina

19.3. RELACIONES ENTRE LA CONCENTRACIÓN Y LA INTENSIDAD DEL OLOR

La concentración establece la dosis y la intensidad el efecto del olor.

Al controlar la concentración de una sustancia en una masa de aire por métodos químicos, se puede establecer una relación entre la dosis y el efecto (concentración-intensidad).

Fechner estableció la fórmula:

$$I = F \cdot \log(C/C_0)$$

donde:

I = Intensidad de percepción del olor,

F = Constante de *Weber-Fechner* para la sustancia considerada,

C = Concentración real de la sustancia en el aire,

C_0 = Concentración umbral de percepción,

S.S. Stevens ha sugerido aplicar la fórmula:

$$I = K \cdot C^s$$

donde:

I = Intensidad de percepción del olor.

K = Constante para la sustancia considerada.

C = Concentración real de la sustancia en el aire.

s = Constante de *Stevens*.

Con viento estable, la correlación entre I y C es posible, pero si el viento es inestable, caso muy frecuente, esta correlación es casi nula.

19.4. DISPERSIÓN DE LOS OLORES

Los fenómenos atmosféricos de dispersión son un mecanismo más de la Naturaleza para minimizar posibles alteraciones, como es el caso de la presencia de gases volátiles odoríferos en el aire, que serán diluidos con mayor o menor velocidad a causa de esta dispersión en función de diversos factores.

En consecuencia, todo aquello que favorezca la dispersión disminuirá los efectos de los olores en intensidad y en tiempo de acción.

Si los olores se generan en una fuente puntual y fija, se favorece la dispersión elevando la altura del punto de salida de los gases (por ejemplo, con una chimenea), aumentando la velocidad de salida de estos, aumentando su temperatura o añadiendo aire a los gases para diluir antes de la salida.

Si la fuente es difusa, el problema se resolverá cambiando procesos y materias primas, o ubicando las instalaciones industriales en un lugar con vientos fuertes a lo largo de todo el año, factor este poco real, que limitaría mucho ciertas actividades industriales.

19.5. LOS OLORES EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA A LA FUENTE

En una atmósfera totalmente estable y en calma, la difusión de un olor es tal que su intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia al foco productor.

En caso de situación atmosférica de turbulencia, se puede aplicar la fórmula:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-C \cdot x}$$

donde:

I_x = Intensidad del olor a la distancia x

I_0 = Intensidad del olor en la fuente

C = Constante

x = Distancia a la fuente (en metros)

I_0 y C se determinan experimentalmente para diversos productos, existiendo tablas para alguno de estos [SH_2 , $(\text{CH}_3)_2\text{S}$, etc.].

La relación I_x/I_0 expresa el descenso relativo de la intensidad del olor, pudiendo escribirse: $I_x/I_0 = e^{-C \cdot x}$

Según lo expuesto, los olores en el medio abierto a nivel horizontal, independientemente de los tratamientos que se indican en el capítulo correspondiente, pueden ser mitigados mediante zonas tampón y mediante cortinas vegetales semipermeables, pues la difusión a través de pantallas y obstáculos es mayor, y por consiguiente se disminuye la concentración I_x de la fórmula a igualdad de distancia x .

CAPÍTULO 20

SINERGIAS ENTRE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

20.1. EXPLICACIÓN BÁSICA

Los agentes contaminantes que se vierten a la atmósfera pueden reaccionar entre sí, al menos muchos de ellos, y dar lugar a compuestos de actividad más o menos intensa y de mayor o menor nocividad.

Esta sinergia o aumento de la perturbación por reacción entre compuestos se agudiza sobre todo en las ciudades o en los polos de desarrollo industrial, lugares en los que las emisiones son diversas y los agentes se mezclan al difundirse en el aire.

Las interacciones entre los productos vertidos a la atmósfera se deben a meca-

nismos de acción complejos, como pueden ser reacciones fotoquímicas, óxido-reducción, catalisis, polimerización, etc.

Fuera de las ciudades se presenta con más frecuencia el caso de un sólo contaminante o, si acaso, dos o tres, debido a que los focos emisores suelen estar aislados (fábricas de cemento, industrias del aluminio, plantas de producción de derivados de flúor, etc.).

20.2. SINERGIAS FUNDAMENTALES

A título de orientación indicamos a continuación los casos de sinergías más características:

Aldehídos }
 Hidrocarburos } + Óxidos de nitrógeno → P.P.N.
 P.A.N.
 P.B.N.

Dióxido de azufre + ozono
 Smog ácido (Londres)
 Smog oxidante (Los Angeles, Países Bajos, Fos)
 Dióxido de azufre + agua → ácido sulfuroso.

Dióxido de azufre + dióxido de nitrógeno + agua, $\xrightarrow{\text{Luz}}$ ácido sulfúrico y lluvias ácidas.

Dióxido de azufre }
 Aldehídos } $\xrightarrow{\text{Rad. U.V.}}$ { oxígeno atómico
 Dióxido de nitrógeno } { oxígeno atómico
 { oxígeno atómico + monóxido de nitrógeno.

Oxígeno atómico + oxígeno molecular → ozono
 Monóxido de nitrógeno + oxígeno molecular → trióxido de nitrógeno.
 Trióxido de nitrógeno + oxígeno molecular → dióxido de nitrógeno + ozono.

h) Dióxido de azufre + dióxido de nitrógeno oxidantes → trióxido de azufre
 oxígeno molecular + ozono + sales de hierro
 Olefinas + ozono { aldehídos
 { polímeros

Dióxido de azufre + ácido sulfúrico
 Ácido fluorhídrico + sulfato de berilio

Monóxido de carbono + { ácido nítrico
 { ácido cianhídrico
 { ácido sulfhídrico

Ozono + agua oxigenada

{ Polvo orgánico
 { Polvo inorgánico + diversos gases
 { Humos

Monóxido de carbono + etileno
 Ozono + polen de gramíneas → aumento de alergias (fiebre del heno)
 Amianto + humo del tabaco → aumento del cáncer de pulmón
 Ozono + NO_x + PAN + luz solar → afectan gravemente a la respiración
 Humo del tabaco + radon + partículas de radio → acción potenciada sobre el pulmón
 Hidrocarburos policíclicos + ciertos disolventes (dodecano, etc.) → acción tóxica potenciada
 Humo del tabaco + radon → multiplica por 5 el riesgo cancerígeno
 CO + ruido → potencia el efecto del ruido en el oído interno
 Benceno + campos electromagnéticos → aumento de la incidencia de la leucemia aguda
 Plaguicidas + campos electromagnéticos → aumento de la incidencia de la leucemia agua
 Benzopireno + radiaciones microondas → aumento de la incidencia de tumores
 Radon + radiación electromagnética → aumento considerable de los efectos de la radiación

TERCERA PARTE

Las fuentes de contaminación atmosférica

CAPÍTULO 21

BASES GENERALES Y ACTIVIDADES CONTAMINANTES DEL AIRE

21.1. BASES GENERALES

Sabemos que la contaminación atmosférica es un problema grave de la humanidad, y conocemos mucho, aunque no todo, sobre los agentes contaminantes.

Pero, ¿y las fuentes de estos contaminantes? ¿y hacia qué situación nos encaminamos en los próximos años?

El problema ha ido cambiando en los últimos 35-40 años, siendo al principio, y como ya se ha indicado, contaminación, sinónimo de contaminación atmosférica urbana, encontrándonos ahora en la siguiente situación:

- La contaminación básica del aire se genera por la combustión de productos fósiles (carbón, petróleo y gas natural) y de residuos.
- Una parte importante se genera en las actividades urbanas, a pesar de haberse mejorado sensiblemente la calidad de ciertas emisiones (calefacción, vehículos, etc.).
- Una parte importante y muy variada de contaminantes se genera en la industria.
- La demanda de energía en la Unión Europea aumentará del 20 al 30% para el año 2012.
- El parque de vehículos de la Unión Europea aumentará un 25% para el año 2010.
- El recorrido medio de cada vehículo de la Unión Europea aumentará un 18%.
- La incineración de residuos urbanos se extenderá en toda la Unión Europea.
- El calentamiento global.
- Las reacciones fotoquímicas de los contaminantes en la atmósfera.
- Los problemas de la capa de ozono.
- Los problemas inmediatos del humo del tabaco.
- El aumento considerable del tráfico aéreo.

- El aumento considerable de la producción y del consumo.
- La aparición constante de nuevos productos.
- La migración de las poblaciones rurales a las ciudades.

Las emisiones básicas se generan en dos grandes grupos de fuentes, a saber:

- Ciudades.
 - Tráfico.
 - Calefacción-refrigeración.
 - Edificios.
- Industria.
 - Producción de energía.
 - Fabricación de productos.

Cada uno de estos grandes grupos, y dentro de ellos cada fuente particular, emite casi siempre diversos contaminantes, siendo muy difícil encontrar fuentes de un solo producto.

Por otra parte, algunas emisiones, y sobre todo las de ciertas zonas urbanas, en condiciones meteorológicas y de luz determinadas, se transforman en otros productos agresivos para el medio.

Así, podremos agrupar el conjunto del problema de la contaminación atmosférica en cinco áreas básicas:

- Emisiones.
- Transporte y dispersión.
- Transformaciones químicas y fotoquímicas.
- Inmisiones.
- Efectos.

Este conjunto es aplicable en cualquier escala de espacio y de tiempo, y es tan real, como que las emisiones de los miles y miles de fuentes de origen antropogénico ya modifican la composición original del aire, tanto por el aumento progresivo de los productos *contaminantes clásicos* como por la emisión de nuevas sustancias, a lo que hay que añadir las modificaciones de factores planetarios como el clima o la capa de ozono, que inciden sobre la contaminación atmosférica y sobre los que esta influye directísimamente.

21.2. ORIGEN DIRECTO DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

El origen directo de los contaminantes atmosféricos se recoge en la tabla adjunta.

ORIGEN DIRECTO DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Base	Fuente
Fuentes naturales	<p>Descomposición de las rocas y del suelo. Volcanes. Brumas. Incendios de origen natural y seminatural: – Incendios forestales (Europa, Asia, América). – Fuegos de las praderas africanas. – Fuegos en la Pampa, en la selva y en el Chaco. Espacio exterior: – Polvo extraterrestre. – Meteoritos. – Sideritos. Actividad y presencia de seres vivos: – Respiración de animales y vegetales. – Emisión de polen. – Esporas. – Residuos naturales de la presencia humana. – Bacterias y virus. – Microorganismos. – Fermentaciones. – Putrefacciones.</p>
Industrias agrarias	<p>Explotaciones ganaderas. Industrias de la alimentación. Papeleras. Varias.</p>
Industrias no agrarias	<p>Siderurgia. Industrias del cemento. Fábricas de aluminio y flúor. Planta de fabricación de fertilizantes. Refinerías de petróleo. Polos de desarrollo. Varias.</p>
Combustiones (instalaciones fijas)	<p>De combustibles sólidos: – Calefacciones. – Usos domésticos. – Térmicas. – Industrias. De combustibles líquidos: – Calefacciones. – Usos domésticos. – Térmicas. – Industrias. De combustibles gaseosos (licuados o no): – Calefacciones. – Usos domésticos. – Industrias.</p>

(Continuación)

<p>Transportes</p>	<p>Vehículos automóviles: – De explosión. – Diesel. – De gas. Ferrocarriles: – Combustibles líquidos. Aviación: – Contaminación en aeropuertos. – Contaminación de la estratosfera (vuelos supersónicos). Navegación marina: – Combustibles líquidos.</p>
<p>Ciudades y centros industriales</p>	<p>Smog oxidante. Aglomeraciones de industrias: – Sinergias. Contaminación de áreas urbanas: – Sinergias. Smog ácido. Humo del tabaco.</p>

21.3. ORIGEN INDIRECTO DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Los factores meteorológicos son causas fundamentales en el nivel de contaminación del Medio Ambiente.

Los vientos, las precipitaciones, la humedad, la temperatura, y la luminosidad afectan directamente a muchos contaminantes y a sus mezclas, siendo típicas las reacciones fotoquímicas y químicas entre contaminantes atmosféricos, que dan origen a otros productos casi siempre más agresivos (acidificación, etc.).

Los vientos arrastran los contaminantes a otros lugares más o menos lejanos de sus fuentes, provocando así la contaminación de zonas ajenas a los puntos de emisión.

Las características topográficas y ecológicas de las zonas contaminadas son también factores a tener muy en cuenta en los estudios sobre contaminación atmosférica.

La presencia o ausencia de vegetación, la influencia de las masas de agua, la situación en valles o mesetas, el suelo, etc., pueden llegar a marcar el signo de los niveles de contaminación de una comarca afectada por este problema.

21.4. ACTIVIDADES INDUSTRIALES POTENCIALMENTE CONTAMINANTES DEL AIRE

Las actividades industriales que de un modo u otro contaminan la atmósfera, son muchas, y el análisis de los contami-

nantes emitidos por cada uno de los procesos industriales es extraordinariamente complejo, por lo que nos limitaremos a indicar los procesos industriales de mayor interés adoptados por el Consejo de Europa y que pueden afectar directa o indirectamente al Medio Ambiente.

Siderurgia. En conjunto, una siderurgia integral es el sector más contaminante de todos, puesto que emite todo tipo de contaminantes, y en cantidades importantes.

Este tipo de industrias dispone, aparte de las calderas generales de combustión que emiten contaminantes que dependen del tipo de combustible, de una serie de procesos unitarios siderúrgicos muy contaminantes, que originan perturbaciones de la calidad del aire, y que son los siguientes:

- Baterías de cok y recuperación de subproductos.
- Aglomeración de minerales (sintetización y peletización).
- Acerías de oxígeno (procesos LD, LDAC, KALDO y similares).
- Fabricación de acero en hornos de arco eléctrico.
- Fabricación de afino de acero en convertidor.
- Acerías Martin.
- Fabricación de ferroaleaciones.
- Unidades de servicios.

Generalmente, se emiten partículas sólidas en el transporte y almacenado del mineral, en su preparación y en la

aglomeración (granulado). El polvo de granulometría comprendida entre 10 y 100 μ es de composición química variable según los procesos utilizados, predominando principalmente los siguientes compuestos: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , cok, FH , K_2O , Na_2O , PbO y ZnO . Aparecen asimismo humos rojizos de óxidos de hierro, sobre todo en los altos hornos, en los convertidores y en los hornos Martin.

Fundiciones. La contaminación se localiza en zonas muy próximas al foco. Se producen partículas sólidas en el modelado y en la conservación de las arenas. Aparecen SO_2 y CO en las combustiones, fenoles y acroleína en la colada, y malos olores en diversas fases del procesado.

Calderería. Se producen, fundamentalmente, partículas sólidas y líquidas, y gases más o menos tóxicos.

Los aceites de lubricado, los gases y humos procedentes de las sales fundidas, y las partículas que se producen en la preparación de las superficies, producen contaminaciones muy localizadas.

Los hornos producen cianuros, CO y CH_4 . Las soldaduras originan emisiones de óxidos de hierro, humos tóxicos con fluoruros, ozono, etc. A veces, se forma NO_2 , y se pueden presentar partículas de berilio. Si la temperatura de los sopletes es elevada, aparece cadmio.

Galvanoplastia. Este tipo de industria produce contaminantes diversos en las distintas etapas del proceso:

- Decapado y oxidación anódica: se emiten vapores ácidos.

- Oxidación alcalina: se emiten vapores alcalinos.
- Desengrasado: se emiten derivados del cloro, al utilizar se disolventes clorados.
- Proceso de pintura (aplicación y secado o cocido): se forman vapores y aerosoles como consecuencia de la evaporación de los disolventes.
- Limpiezas en emulsión: se producen vapores de hidrocarburos.

Producción de metales no férricos.

En la producción de plomo, cinc y cobre, aparte de los procesos de combustión, en los que las emisiones de contaminantes dependen del combustible utilizado, los procesos más contaminantes son el tratamiento del mineral y la fusión, en los que se producen SO_2 , CO_2 , CO y partículas sólidas.

En la producción de cobalto se emiten, fundamentalmente, partículas finas y gruesas.

En el refinado, durante la fusión de residuos, en los hornos eléctricos o en la recuperación, los contaminantes emitidos dependen de la carga tratada, del combustible y de los procedimientos utilizados. En general, los contaminantes emitidos son productos de combustión, impurezas diversas contenidas en los restos tratados y óxidos y partículas metálicas, cuyas dimensiones varían de 0,1 a 1μ , según el metal utilizado.

En la recuperación del aluminio, se emiten nieblas sólidas.

A continuación se indican los procesos, en orden decreciente, según su acción contaminante:

- Producción de aluminio (perjudicial sobre todo por sus emisiones de fluoruros).
- Producción de plomo.
- Producción de cinc.
- Producción de cobre.
- Producción de estaño, mercurio, cromo, cadmio, antimonio, magnesio y manganeso.

Industria química. En este caso, las fuentes y los contaminantes son muy variados. En general, la contaminación en la industria química puede provenir, bien del producto final fabricado (pérdidas en la recuperación), o bien del rendimiento insuficiente de los diferentes procesos de fabricación.

Los contaminantes emitidos son fundamentalmente gases y vapores, y en menor grado partículas sólidas. También hay que distinguir entre los contaminantes emitidos:

- Los que se producen en gran cantidad por la industria química pesada, en particular por la industria química mineral (fabricación del SO_4H_2 , del NO_3H , del PO_4H_3 , del ClH , del F, etc.). que van desde el SO_2 y NO_x hasta la producción de partículas halógenas.
- La multitud de productos derivados de la química orgánica (productos intermedios o finales), generados en los procesos de incineración y prepara-

ción. Se emiten halógenos, hidrocarburos, olores, y todo tipo de gases y vapores tóxicos.

- Hay que destacar la contaminación por flúor originada en la industria de los fertilizantes, y sobre todo en la fabricación de los superfosfatos, en el proceso de concentración del ácido fosfórico por inyección de aire. El aire evacuado puede contener alrededor de 10gr. de flúor por cm^3 . Incluso con instalaciones especiales para remediar esta contaminación, se estima que una fábrica importante puede evacuar por su chimenea 1,6 kg. de flúor por hora.

Industria textil. Las diferentes operaciones del procesado de materias primas como lana, algodón y fibras sintéticas, originan alteraciones en la composición de la atmósfera próxima.

La limpieza y el cardado del algodón y de la lana, producen emisión de partículas.

El blanqueo del algodón, del lino o de la lana, producen SO_2 y Cl_2 .

La carbonización de impurezas produce humos, partículas de carbono y olores.

El tinte, la impermeabilización y la limpieza de las fibras sintéticas, originan SH_2 y O_2 .

Industrias alimentarias. La mayoría de estas industrias producen olores y partículas sólidas. La incineración de los subproductos, origina gases y humos.

Industrias de la celulosa. En este tipo de industrias, la contaminación por

malos olores es generalmente más importante que la debida a las emisiones gaseosas. En algunas de las fases del procesado de la madera, aparecen contaminantes diversos, como los indicados a continuación:

- En el cocido y lavado se emiten cenizas y SO_2 en las pastas al bisulfito, y SH_2 , mercaptanos y SO_2 en el papel Kraft.
- En los digestores se producen metilmercaptanos, sulfuro de metilo, etcétera, y en los evaporadores, SH_2 y diversos compuestos orgánicos.
- Los hornos de recuperación emiten SNa_2 , SH_2 , SO_2 , CO , CO_3Na_2 , etc., los hornos de cal, CO_3Ca , SH_2 y sales de sodio.
- Los efluentes líquidos producen SH_2 , metilmercaptano, sulfuro y disulfuro de metilo, y productos orgánicos diversos.

Industrias aeronáuticas y electrónicas. Se producen partículas, humos y vapores.

Predominan, como contaminantes atmosféricos, las partículas sólidas: As, Ba, Be, Cd, Cr_2 , O_3 , Mn, Hg, Se, Te, Pb, Zn, etc.

Se presentan, asimismo, los productos típicos procedentes de combustiones en hornos e incineradores.

Industrias del cemento. El cemento se fabrica mediante piedra caliza y arcillas, con otros componentes secundarios, como sulfatos alcalinos y alcalinotérricos, etc. Es una mezcla de silicatos y aluminio de calcio, con cal y yeso.

En los diferentes estadios de fabricación se presentan problemas de contaminación debidos a las partículas sólidas. En la cantera, transporte, pulverización, cocido (hornos), manejo del cemento acabado, y otras fases, se desprende polvo que llega a las zonas próximas, afectando gravemente al medio agrario.

El polvo emitido está compuesto, principalmente, por CaO, y en menor cantidad, por SiO₂, K₂O, SO₃, MgO, y Na₂O. También se han observado trazas de ciertos elementos como B, Zn, Cu, Mn, Mo, y sesquióxidos de aluminio.

Las fábricas de cemento son industrias con un intercambio gaseoso con la atmósfera muy elevado. El aire tomado de ella es devuelto al final del ciclo, transformado en ciertos compuestos, o bien en su mismo estado inicial. El nivel que alcanza este intercambio, se deduce del hecho de que la producción de 1 Tm de producto acabado precisa de 2 Tm de materias primas, y de 6.000 a 12.000 m³ de aire. Si se observa que la producción de las fábricas españolas (58 en total), se acerca a los veinte millones de toneladas anuales, puede deducirse la importancia que adquiere dicho intercambio gaseoso con la atmósfera.

En términos muy generales, una factoría de fabricación de cemento puede emitir unas 600 toneladas de polvo/km²/año.

Industrias del petróleo. La industria petrolífera se caracteriza por sus enormes dimensiones debido a la difusión e importancia que han adquirido sus productos en la vida moderna.

Los contaminantes generalmente emitidos son: SO₂, SO₃, CO₂, NO_x, hidrocarburos ligeros, volátiles o pesados inquemados, SH₂, mercaptanos de olor desagradable, partículas de polvo y hollines.

Las cantidades vertidas a la atmósfera varían según el origen del petróleo bruto, los tratamientos efectuados y los productos obtenidos. A continuación se indican los contaminantes emitidos en las distintas etapas del tratamiento del crudo:

- Almacenamiento, transporte y expedición del petróleo y sus productos: Originan pérdidas por evaporación de hidrocarburos ligeros y de compuestos sulfurados.
- Instalaciones de destilación: Se emiten pequeñas cantidades de hidrocarburos, mercaptanos y sulfuro de hidrógeno.
- Instalaciones de craking catalítico: En la regeneración del catalizador, o con los gases de combustión, se emiten monóxido de carbono, hidrocarburos y polvos finos.
- Refinerías: Se emite, sobre todo, sulfuro de hidrógeno.
- Antorcha: Los gases inutilizables emitidos en una refinería, se envían a una antorcha donde se queman. En este proceso se emiten polvos y humos.

Fabricación de cok. Se producen, fundamentalmente, partículas sólidas, vapores y las emisiones típicas de las combustiones.

Las partículas están formadas por polvo de carbón; los vapores pueden ser de alquitrán, y los gases son CO, SO₂, CO₂, etc.

Instalaciones industriales de combustión. La emisión de contaminantes a la atmósfera depende de diversos factores: tipos de combustibles y chimeneas.

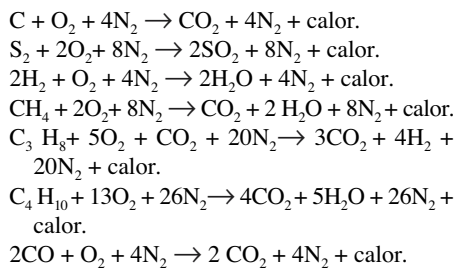
Los principales contaminantes producidos, independientemente del tipo de combustible (gas, petróleo o carbón), son: SO₂, SO₃, SH₂, NO_x, NH₃, CNH, HCHO, CIH, fluoruros, partículas y materia orgánica, y, además, CO y CO₂.

21.5. LA COMBUSTIÓN

La combustión es un proceso generalizado, y dentro de él existen diversas modalidades, aunque siempre basadas en la combinación viva del combustible con el oxígeno del aire, con desprendimiento de calor.

En la combustión se producen una serie de reacciones, como se indica en la tabla adjunta.

REACCIONES BÁSICAS DE COMBUSTIÓN



Cuando la combustión se efectúa en el aire, este se convierte en el *comburente* o cuerpo que aporta el oxígeno necesario para el proceso.

El nitrógeno presente en el aire se oxida algo, aportando pequeñas cantidades de NO_x.

Se llama *Poder Calorífico* a la cantidad de calor desprendida por la combustión completa de 1kg de combustible sólido o líquido o de 1 m³ N de combustible gaseoso, con los productos de combustión referidos a 0 °C.

Se llama *Poder Calorífico Superior* al Poder Calorífico cuando el agua presente procedente de la humedad del combustible o de la combustión está totalmente condensada.

Se llama *Poder Calorífico Inferior* al Poder Calorífico cuando el agua presente procedente de la humedad del combustible o de la combustión permanece en estado de vapor..

$$PCI = PCS - 54 H - 6A,$$

siendo:

PCI = Poder Calorífico Inferior.

PCS = Poder Calorífico Superior.

H = % de hidrógeno del combustible.

A = % de humedad del combustible.

En general, el PCI se refiere a combustibles sólidos o líquidos, y el PCS se refiere a gases.

La diferencia entre el PCI y el PCS es que el primero es inferior al segundo en un 3% para los combustibles sólidos o líquidos y en un 10% para los gases.

Las características básicas de los combustibles referentes a la contamina-

ción atmosférica se indican en la tabla adjunta.

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS COMBUSTIBLES EN RELACIÓN CON LA CONTAMINACIÓN

Característica	Definición
Inflamabilidad (Todos) Contenido en azufre (todos) Contenido en productos volátiles (todos) Poder aglutinante (carbón) Calibre (carbón) Producción de cenizas (todos) Contenido en agua (todos) Grado de fusión de las cenizas (carbón) Viscosidad (líquidos) Punto de escurrimiento (líquidos) Contenido en residuos (líquidos) Índice de Conradson (líquidos) Gas natural (NO _x) Gas licuado (CO, NO _x)	Aptitud de inflamarse. Orgánico, sulfuros, disperso. El combustible arde mejor cuanto antes desprenda productos volátiles. Capacidad de formar un cok compacto. Tamaño. Después de la combustión van llenando las parrillas.

CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS QUE SE PUEDEN ENCONTRAR EN LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Derivados del carbono:	CO ₂ , CO, hidrocarburos inquemados
Derivados del azufre:	SO ₂ , SO ₃ , H ₂ SO ₄
NO _x :	NO, NO ₂
Hollines	
Partículas en suspensión	

CAPÍTULO 22

FUENTES NATURALES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

22.1. FUENTES EN GENERAL

En el capítulo anterior se han indicado, en la tabla correspondiente, las fuentes naturales de contaminación atmosférica.

cie de una gran cantidad de materiales en forma líquida, sólida y gaseosa. Los procedentes de los últimos grupos ascienden a través de la atmósfera conformando lo que se conoce como la *columna eruptiva*.

22.2. EL VULCANISMO

22.2.1. Bases generales

Cuando un volcán entra en erupción, se produce la salida a la superfi-

En lo que se refiere a la fase sólida, está compuesta por partículas. Los efectos climáticos que esta puede provocar dependen del tamaño de esas partículas, que es lo que determina su tiempo de residencia en la atmósfera, la zona de la misma en que se llegan a

COMPONENTES NATURALES (RESIDUOS) PRESENTES EN LAS PARTÍCULAS INERTES DEL AIRE

Residuos orgánicos		Residuos inorgánicos
De origen vegetal	De origen animal	
Fragmentos de madera Fragmentos de algodón Fragmentos de pelos Fragmentos de epidermis	Lana Seda Telas de araña Epidermis Pelos Plumasy plumón Escamas	Carbonatos Cloruros Sulfatos Sílice Arcilla Caliza Minerales diversos

instalar, y sus características. Así, podemos tener partículas de mayor tamaño, que si llegan en gran cantidad a la troposfera, pueden detener las radiaciones de calor procedentes del suelo en dirección al espacio, y de esta manera pueden provocar un calentamiento de la superficie terrestre. Por otro lado están las partículas de menor tamaño, los *aerosoles*. Este término engloba las diminutas partículas de cenizas volcánicas que pueden permanecer en la atmósfera hasta un máximo de seis meses, y las moléculas de dióxido de azufre, que a veces reaccionan con el vapor de agua presente en la atmósfera formándose ácido sulfúrico, que puede quedar en suspensión en forma de pequeñas gotas durante un período que puede durar hasta dos años o algo más.

En cuanto a la fase gaseosa, se pueden encontrar emisiones de vapor de agua, dióxido de carbono, dióxido de azufre, ácido sulfhídrico, ácido clorhídrico, ácido bromhídrico y otros compuestos químicos, que provocan con su presencia o con su aumento de concentración, una grave alteración de la atmósfera.

Este tema no estaría completo si no habláramos de los diferentes tipos de erupciones que pueden presentarse, pues al fin y al cabo son las que determinan la magnitud de las emisiones, el nivel de la atmósfera y la extensión del planeta que pueden verse afectados.

Por otra parte, para comprender bien estos procesos, es necesario comentar ciertos aspectos acerca del mecanismo de erupción volcánica.

El magma, todavía en el interior de la Tierra y que asciende hacia la superficie, es un sistema formado por una mezcla de una fase líquida y otra gaseosa. En este sistema interviene la presión de vapor (presencia de gases) y la presión confinante (la presión del conjunto: el magma más la roca que lo rodea). En el momento en que la primera iguala o supera a la segunda, se produce la *nucleación*, proceso por el cual se forman vesículas gaseosas dentro del líquido magmático. El crecimiento de estas vesículas está controlado por una serie de condicionantes, como son la viscosidad, la densidad, la tensión superficial, el contenido en volátiles y la velocidad de difusión del líquido magmático.

Hemos de indicar, además, que el *nivel de saturación* es aquel en el que los volátiles, dentro del magma, están inestables y saturados, tras lo cual llega el *nivel de vesiculación*, en el que los gases escapan del líquido.

22.2.2. Tipos básicos de erupciones

En función de los principios antes indicados, podemos tener dos tipos de erupciones, con consecuencias muy diferentes:

- *Erupciones poco explosivas*: El magma que asciende hacia la superficie es muy fluido y tiene poca viscosidad, produciéndose rápidamente la nucleación, creciendo las vesículas al unirse unas con otras. Con menos densidad que el líquido, los gases acumulados se sitúan en la zona superficial y salen

sin problemas ni violencia. Posteriormente sale el líquido magmático, también sin explosividad.

Este tipo de erupciones emite gases y cenizas a poca altura, afectando sólo a su entorno inmediato y alterando únicamente el microclima local.

- *Erupciones muy explosivas*: Se trata de magmas poco fluidos y muy viscosos. La nucleación y la unión de vesículas es mucho más lenta. Al no producirse la separación de fases, el magma se va enfriando y aumentando su volumen, generando una sobrepresión que llega a exceder entre 10 y 100 veces la presión atmosférica. Esto provoca un ascenso rápido, siendo la salida del material muy violenta, con gran explosividad.
- Este tipo de erupciones genera grandes columnas eruptivas, que llevan enormes cantidades de gases y cenizas hasta alturas de 40-50 kilómetros. Esto significa que el clima se verá afectado a escala global.

22.2.3. Efectos medioambientales de los volcanes

Enfriamiento de la superficie terrestre

Cuanto menor sea el albedo, mayor será la temperatura terrestre. Este albedo depende de la cantidad de partículas presente en la atmósfera, de las capas de nubes y de la cantidad de zonas con hielo y nieve y demás zonas claras de la superficie terrestre.

Aquí es donde entran en acción los ya citados aerosoles de origen volcánico, que tienden a dejar pasar el calor reflejado por la Tierra, mientras que impiden que el calor procedente del Sol llegue a la superficie terrestre.

Observando gráficos que representan la densidad de aerosoles presentes en la atmósfera y la época en que se han tomado los datos, se puede hallar una clara relación entre las grandes erupciones volcánicas y descensos bruscos de la temperatura. Estas erupciones no sólo afectan a la temperatura, sino también al régimen de lluvias. Así, se puede constatar que tras un período de intensa actividad volcánica en que se produce un aumento de la cantidad de aerosoles en la estratosfera, con la consiguiente reducción de la radiación solar que llega a la Tierra, se observa un descenso brusco de la temperatura y de las precipitaciones. En el caso opuesto se da la circunstancia de que tras largos períodos sin actividad volcánica importante, la estratosfera está más limpia y llega mayor cantidad de radiación solar a la superficie terrestre, lo que supone mayor temperatura, mayor evaporación de agua y mayor cantidad de precipitaciones.

Lluvia ácida

Ya se indicó en otros epígrafes de esta obra, que la lluvia ácida es un proceso que se forma al interaccionar las moléculas de dióxido de azufre con el vapor de agua presente en la atmósfera, formándose ácido sulfúrico. Así, cuando llueve, este ácido cae sobre la superficie

terrestre, provocando no sólo la acidificación de suelos, ríos y lagos, sino daños y destrucción de vegetales.

El problema no sólo afecta a las zonas de emisión de dióxido de azufre, sino que éstos materiales ácidos pueden ser transportados por los vientos y trasladados a cientos de kilómetros de distancia, donde si coinciden con lluvias, descargarán su corrosivo cargamento sobre toda la superficie receptora de la precipitación.

Este proceso, aparte de las fuentes antrópicas, que se tratan en otros apartados de esta obra, se ve potenciado por los volcanes, que todos los años emiten grandes cantidades de dióxido de azufre a la atmósfera. Para dar una idea de lo que estamos tratando, indicamos que el volcán Merapi, situado en Java, emite diariamente 200 toneladas de azufre en forma de dióxido, aparte de grandes cantidades de cloro y de bromo. Esto ha llevado a la situación de que la lluvia, en 10 kilómetros alrededor del volcán, tiene un marcado carácter ácido, con las consecuencias que ello trae consigo.

22.2.4. Erupciones históricas con marcada contaminación atmosférica

Tambora

El volcán Tambora se encuentra en la isla Sumbawa, en Indonesia. El 5 de abril de 1815 entró en erupción, y durante 10 días se calcula que emitió 80 km³ de materiales a la atmósfera. Tal fue la

explosividad del proceso, que los 4.000 metros de altura que suponían la coronación de la isla quedaron reducidos a 2.700 metros tras la violenta erupción, quedando un agujero de varios kilómetros de diámetro y de más de 100 metros de profundidad.

La explosión llegó a ser oída en Sumatra, a más de 1.500 kilómetros de distancia. La isla de Lombok, a 160 km de distancia, fue completamente cubierta por una capa de cenizas de más de medio metro de espesor.

Los efectos climáticos fueron catastróficos y llevaron a llamar a 1816 el *año sin verano*, debido a los efectos que sobre el clima tuvo la gran cantidad de materiales emitidos a la atmósfera, como los aerosoles, que tardaron más de dos años en caer a la superficie terrestre. Otro efecto provocado por la erupción se sintió en diversas partes de Java (a 500 km de distancia), que durante tres días seguidos, permanecieron en la más completa oscuridad. Además, otro efecto devastador puede deducirse del hecho de que se perdieron las cosechas de los tres años siguientes a la erupción.

Krakatoa

Krakatoa era una pequeña isla volcánica situada entre las islas de Sumatra y Java, hasta que la noche del 26 de agosto de 1883 entró en erupción el volcán que dominaba la isla. La erupción con explosión fué tan violenta que llegó a oírse a una distancia de casi 5.000 km, destruyendo la isla y provocando la desaparición

ción de ella y de otras dos islas más. La terrible explosión hizo que la isla, con una altura de 2.400 metros sobre el nivel del mar, quedara reducida a un enorme agujero en el océano a más de 1.500 metros de profundidad bajo las aguas.

La gran cantidad de material emitido a la atmósfera, más de 5 km³, provocó la reducción mundial de la radiación solar en un 13 % durante todo el año siguiente, originando un descenso de las temperaturas de casi 0,5 °C en el hemisferio norte. Las corrientes de viento (*Jet Stream*) dispersaron las cenizas volcánicas, que dieron la vuelta completa a la Tierra en tan sólo 13 días. Sus efectos todavía se sentían 3 años después de la erupción, pudiendo observarse en ciudades como París y Nueva York un Sol de color verde al atardecer, y preciosas lunas llenas de color azul.

Estos hechos le han dado el título de erupción más explosiva y violenta de las que el ser humano tiene recuerdo, además del mayor ruido jamás escuchado.

Skaptor Jokel

La erupción de Skaptor Jokel (Laki) tuvo lugar en Islandia. Comenzó el 8 de Junio de 1783, y continuó durante 8 meses una erupción de lava basáltica a través de grietas en una cantidad de 14 km³ que cubrieron una zona de más de 500 km². El contacto de la lava con el agua aumentaba la explosividad de la erupción, lanzando chorros de lava a una altura de más de 1.000 metros.

Los gases emitidos alcanzaron una altura de 15 km, formándose aerosoles

que provocaron el invierno más frío de la costa este de Estados Unidos en más de 200 años, bajando casi en 4 °C la temperatura media durante ese período. Las consecuencias también repercutieron a escala global, registrándose un descenso de 1 °C en todo el hemisferio norte. La erupción, además, provocó la muerte de la totalidad del ganado de la isla y de las cosechas, y la desaparición de un 25% de la población por falta de alimentos.

Pinatubo

El Monte Pinatubo, situado en Filipinas, entró en erupción el 12 de Junio de 1991, continuando con fuerza hasta el 26 de julio del mismo año. Expulsó unos 5 km³ de lava dacítica (de carácter ácido), y emitió a la atmósfera la mayor cantidad de SO₂ nunca antes medida.

La columna eruptiva alcanzó una altura de 20 km, dando la vuelta a la Tierra en menos de un mes, concentrándose en latitudes tropicales.

Esta emisión de gases provocó un descenso de las temperaturas en más de 3 °C en algunas regiones, y se ha calculado que condujo a un descenso global de la temperatura de 0,5 °C durante un período hasta cuatro años después de la erupción.

El Chichón

El Chichón, volcán de México con una altura de poco más de 1.000 metros

sobre el nivel del mar, entró en erupción entre el 28 de marzo y el 4 de abril de 1982, formándose con la actividad eruptiva una caldera de un kilómetro de diámetro y unos pocos centenares de metros de profundidad.

Aunque el volumen de lava emitido no fue nada significativo (unos $0,3 \text{ km}^3$ de traquiandesitas), la erupción de El Chichón destacó por una inusual gran proporción de SO_2 emitido a la atmósfera.

Su importancia también reside en que fué la primera gran erupción en ser estudiada al detalle mediante instrumentos modernos en relación con los efectos atmosféricos y climáticos que podía producir. Así, mediante el lidar se pudo observar que todo el SO_2 emitido a la atmósfera –unos 7 millones de toneladas–, se convirtió en aerosoles, con composición de ácido sulfúrico, en 6 meses.

La columna eruptiva alcanzó una altura de 30 km en la atmósfera, y se comprobó que los gases dieron la vuelta a la Tierra en 20 días, permaneciendo concentrados en la latitud 30° norte durante 6 meses.

Mediante globos sonda se descubrió que tras la erupción había 20 millones de toneladas de ácido sulfúrico en la atmósfera, y un año después se descubrió con sorpresa que todavía permanecían en ella 8 millones de toneladas..

Esta gran cantidad de aerosoles produjo un enfriamiento global de la superficie del planeta de casi 1°C en la primavera y otoño siguientes a la erupción,

seguido de un brusco aumento de temperatura en el verano de 1983. Además, se produjo un hecho curioso, como fué el calentamiento de la estratosfera en algo menos de 5°C , hecho que alteró el ciclo fotoquímico del ozono presente en la atmósfera.

22.3. LLUVIAS SUCIAS

En ciertas zonas del mundo el viento puede arrastrar y transportar desde el suelo masas de polvo que luego se depositan en lugares lejanos a su origen, bien por sedimentación o bien porque son arrastradas por las lluvias.

Son los casos de las arenas del desierto del Sahara cuando a veces llegan en forma de polvo rojizo o amarillento a algunas zonas del sur de Francia arrastradas por el *siroco*, o el de la isla de Mallorca y el sureste de España, cuando también a veces se presentan precipitaciones que arrastran un lodo rojizo muy fino.

Los vientos y las lluvias pueden arrastrar toda clase de materias finas si las despegan del suelo o de sus inmediaciones.

22.4. BRUMAS Y NIEBLAS MARINAS

Ya hemos indicado en algunas de nuestras obras lo que supone desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, este tipo de fenómenos meteorológicos.

Las brumas y las nieblas de origen marino transportan partículas (cristales) salinas que se van aglomerando en núcleos de condensación, que acaban depositándose en el suelo en el interior de los continentes en zonas costeras o próximas a las costas.

Las cantidades que se depositan pueden llegar a ser muy apreciables, pues en el norte de Europa se calculan depósitos anuales en el suelo del orden de los 40gr/m², básicamente de Na Cl, con algo de Ca Cl₂ y de KBr, sales que son arrastradas por las lluvias a lo largo del año.

Por otra parte, esos mismos núcleos salinos y la condensación que provocan pueden intensificar la formación de nieblas en muchas áreas del mundo.

22.5. POLVO EXTRATERRESTRE

De todos los materiales que se desplazan por el espacio, una ínfima parte choca con la atmósfera y gran parte de ella se desintegra, penetrando algunas partículas hasta la corteza terrestre.

Estas partículas son del orden de varios miles de Tm/día, y tienen dimensiones entre 0,05 y 0,6μ.

Cuando por su abundancia constituyen un aerosol, a 40 km de altitud pueden tener una concentración de 10⁻¹²g/cm³.

Al entrar en la atmósfera lo hacen a gran velocidad, que se va reduciendo por el rozamiento con el aire hasta que en los últimos metros parte de ellas pueden estar en suspensión, aunque al final todas sedimentan sobre el suelo.

A partir de los 10 km de altitud en la troposfera, y a medida que nos separamos de la superficie terrestre, el polvo extraterrestre empieza a ser más abundante que el procedente de la Tierra.

El polvo extraterrestre absorbe prácticamente la mitad de la energía solar que llega a nuestro planeta, reenviando después gran parte de ella a la Tierra.

La composición del polvo extraterrestre depende de su origen, clasificándose según su procedencia como se indica en la tabla adjunta.

ORIGEN Y COMPOSICIÓN DEL POLVO EXTRATERRESTRE

Origen	Composición
Meteoritos	Na, Al, Mg, Si, K, Ca, Ti, Cr, etc.
Sideritos	Fe, Co, Ni, etc.

22.6. CONTAMINACIÓN DE ORIGEN ANIMAL

Bacterias

Las bacterias están presentes en el aire en fuertes cantidades, aumentando su concentración según sea la ubicación de la masa atmosférica:

Océano	Zonas forestales
Alta montaña	Zonas periurbanas
Costas	Zonas urbanas interiores

Descomposición de la materia orgánica

Los microorganismos provocan fermentaciones, corrupciones y putrefacciones de la materia orgánica según sean las condiciones ambientales de humedad, temperatura y aireación, pudiendo ser procesos aerobios o anaerobios según sean estas condiciones.

Así, se generan nitrógeno nítrico, nitrógeno amoniacal, metano, anhídrido carbónico, sulfuros diversos, ácido sulfhídrico, ácidos orgánicos, carbonatos ácidos, amoníaco, etc.

Emisiones humanas naturales

El hombre emite 10 m³/día de aire saturado con un 4% de CO₂. En esa emisión, aunque las vías y los órganos respiratorios actúan como filtros de lo que se aspira, siempre existen residuos de lo absorbido, como pueden ser restos orgánicos, microorganismos y residuos del humo del tabaco respirado y de la contaminación atmosférica urbana.

Emisiones de la fauna

Al igual que el hombre, los animales con aparato respiratorio aspiran y emiten el aire que ha entrado a su sistema respiratorio, emitiendo los restos de lo que han filtrado, que serán función del ambiente en que se encuentren.

22.7. CONTAMINACIÓN DE ORIGEN VEGETAL

Hongos y esporas

Los hongos, los musgos, los líquenes y en general las plantas criptógamas, emiten *esporas* o células capaces de producir nuevas plantas de su especie, que están en su mayoría en la baja atmósfera o menos de 1.600 m de altitud, siendo su concentración máxima en verano y a una altitud inferior a los 60 m.

Estas esporas pueden ser origen de algunas enfermedades de las vías respiratorias.

En la tabla adjunta se indica una clasificación básica de las plantas productoras de esporas.

PLANTAS PRODUCTORAS DE ESPORAS

Grupo	División básica
Talofitas	Algas Hongos Líquenes
Briofitas	Musgos Hepáticas
Pteridofitas	Helechos Equisetos Licopodios Psilotinae Psilophytinae

Polen

El polen se puede definir como las microsporas de las plantas con flor, que constituyen el aporte masculino en la reproducción vegetal por esa vía.

Los granos de polen abundan sobremanera en el aire, pues una planta adulta puede producir en algunas épocas del año varios millones de granos al día.

El polen es diseminado por el viento (reproducción o polinización anemófila) a distancias mayores o menores según sean su tamaño y forma. El polen más diminuto puede permanecer en suspensión en el aire durante bastante tiempo, y lo mismo ocurre con el polen de mayor tamaño pero con sistema de sustentación aérea como alas, alerones o sacos de aire, como es el caso del polen de las gramíneas.

El tamaño del polen normal oscila entre las 10 y las 50 μ , según la especie.

En ambiente húmedo el polen aumenta de tamaño y peso, pues casi siempre tiene carácter higroscópico. Así, en lugares con nieblas o lluvias frecuentes el polen sedimenta más rápidamente.

La situación meteorológica pasa a tener un papel fundamental en este tipo de contaminación, pues en la estación de reproducción de la especie correspon-

diente, si el ambiente es seco, si la temperatura es elevada, si el viento es de cierta entidad y si la vegetación es abundante, el polen se produce en grandes cantidades y se desplaza muy lejos.

El polen plantea problemas relativamente graves para la salud humana, pues es un alergénico muy potente, constituyendo en algún caso, como el de las gramíneas un peligro importante para algunos sectores sensibles de población en ciertas épocas del año. Las alergias al polen afectan a grandes grupos de población y suponen, por los problemas sanitarios que causan, pérdidas económicas importantes.

El polen puede alcanzar los 12 ó 15.000 m de altitud, y puede ser transportado en forma de nubes a cientos de kilómetros de su lugar de origen.

En lugares de mucha producción, como algunos bosques cuya especie dominante es el *Pinus*, se pueden depositar, poco antes de la primavera, hasta 900 g/ha/día.

CAPÍTULO 23

**FUENTES FIJAS
DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA**

**23.1. FUENTES NATURALES
FIJAS**

En principio, pueden considerarse como fuentes fijas de este tipo los volcanes y las zonas marinas o costeras donde se forman las brumas y las nieblas marinas.

Los fuegos del *chaqueo* de Bolivia y de otros países y los de las praderas africanas aunque la mayoría son provocados, al repetirse anualmente, pueden ser considerados también como fuentes naturales fijas.

**23.2. COMBUSTIONES
EN INSTALACIONES FIJAS**

Las instalaciones industriales, las calderas o las calefacciones domésticas corresponden a las llamadas instalaciones fijas.

En principio consideramos las siguientes:

- De combustibles sólidos:
 - Calefacciones
 - Térmicas
 - Industrias
 - Uso doméstico
- De combustibles líquidos:
 - Calefacciones
 - Térmicas
 - Industrias
 - Uso doméstico
- De combustibles gaseosos (licuados o no):
 - Calefacciones
 - Térmicas
 - Industrias
 - Uso doméstico.

La combustión en estas instalaciones depende de los factores indicados en la tabla adjunta.

FACTORES DE COMBUSTIÓN Y CASOS ESPECÍFICOS

- Tipo de combustible:
 - Sólido
 - Líquido
 - Gas
- Tipo de aparato de combustión:
 - Para sólidos
 - Para líquidos
 - Para gases
- Sistemas de evacuación:
 - Cálculo de chimeneas
 - Mantenimiento
 - Tiro
 - Altura
 - Temperatura
- Sistemas de conductos de calefacción:
 - Sistemas con combustibles sólidos.
 - Sistemas con combustibles líquidos.
 - Sistemas con combustibles gaseosos.
 - Caso de las centrales térmicas.
 - Caso de las incineradoras de residuos urbanos.

23.3. INDUSTRIAS AGRARIAS

Los establecimientos agrícolas, forestales o ganaderos son fuentes fijas de contaminación atmosférica. Las más importantes son las siguientes:

- Explotaciones ganaderas.
- Industrias alimentarias.
- Papeleras.
- Madereras.
- Celulosas.

Las emisiones son diversas, y van desde el amoníaco y el metano (explotaciones ganaderas) hasta los SO_x , el SH_2 , NO_x , etc., de las demás, según procesos y actividades.

23.4. INDUSTRIAS NO AGRARIAS

Comprenden una gran gama de establecimientos industriales, como los que se indican a continuación:

- Siderurgia y metalurgia.
- Cementeras.
- Extractivas a cielo abierto.
- Fábricas de aluminio.
- Industrias del flúor.
- Plantas de fertilizantes.
- Refinerías de petróleo.
- Polígonos industriales.
- Industrias de metales no férricos.
- Industrias químicas.

Las emisiones comprenden prácticamente todos los tipos de gases y partículas existentes, dada la variedad de actividades que se incluyen.

CAPÍTULO 24

FUENTES MÓVILES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

24.1. BASES GENERALES.

Se denominan fuentes móviles de contaminación atmosférica aquellos procesos emisores que se desplazan y no permanecen en un mismo punto expulsando agentes contaminantes que afectan siempre al mismo territorio.

Esto no quiere decir que unas fuentes móviles no pueden contaminar un mis-

mo territorio, pues es el caso típico de la parte de contaminación atmosférica urbana correspondiente a los automóviles, que provocan un nivel de contaminación atmosférica de fondo más o menos constante según las horas del día y la época del año.

Las fuentes móviles básicas de contaminación atmosférica son las que se indican en la tabla adjunta.

FUENTES MÓVILES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

- Vehículos automóviles:
 - De explosión.
 - Diesel.
 - De gas.
- Ferrocarriles:
 - Combustible líquido.
- Aviación:
 - Contaminación en aeropuertos.
 - Contaminación de la estratosfera (vuelos supersónicos).
- Navegación marina:
 - Combustibles líquidos.

24.2. VEHÍCULOS AUTOMÓVILES

Nuestra forma de vida actual basa gran parte del desplazamiento de las personas y de las mercancías en los automóviles y en los camiones, habiéndose llegado en estos momentos a producciones de más de 35 millones de vehículos/año, y a un número superior a los 400 millones de ellos circulando por el mundo.

Los vehículos automóviles emiten los siguientes contaminantes:

- CO
- HC
- NO_x
- Partículas
- SO₂
- Aldehídos
- CO₂
- H₂
- Cl₂

El tipo y porcentaje del contaminante emitido dependerá del tipo de motor del vehículo, del combustible que se utilice, del estado del motor y del régimen de circulación.

Los motores de los vehículos pueden ser:

- Motores de explosión.
- Motores Diesel.
- Motores de dos tiempos.
- Motores con turbina de gas.
- Motores Wankel o rotativos.

24.2.1. Vehículos con motor de explosión

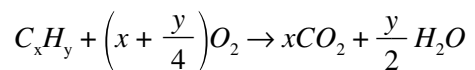
La fuente mecánica suele estar constituida por motores de cuatro tiempos y 4 ó 6 cilindros, aunque también se fabrican con 5, 8, 10 y 12 cilindros. Estos motores consumen gasolina como fuente energética, que al quemarse en el proceso y salir los residuos por los tubos de escape, produce sobre todo los siguientes contaminantes atmosféricos:

- CO
- HC
- NO_x
- Partículas

Por otra parte, las emisiones, además de las que salen por los tubos de escape, pueden proceder de la evaporación de los depósitos y de pérdidas del motor por el cárter o por los depósitos de aceite.

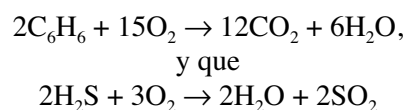
Las gasolinas son mezclas de diversos componentes, de fórmula media aproximada C₈ H₁₇.

Su combustión se realiza según la ecuación:



Si en esta reacción hay déficit de oxígeno, los residuos de la combustión contendrán hidrocarburos inquemados, hidrógeno y CO, y sobre todo este último.

También se verifica que:



Los hidrocarburos inquemados proceden del combustible, y sobre todo de los aceites de lubricación.

En los motores que tratamos el NO se forma a partir de N_2 y de O_2 a temperatura superior a 2.700 °K.

En otro orden de cosas, se empezaron a utilizar catalizadores en los motores de explosión en Europa hace 30 años con objeto de reducir emisiones contaminantes, y estos sistemas se han generalizado y durarán mientras permanezca el uso de este tipo de motores.

Las limitaciones de las emisiones y pérdidas de los motores, en lo que se refiere a productos contaminantes de la atmósfera, se establecen en la legislación vigente en la Unión Europea, y a ella remitimos al lector, explicándose en profundidad esta normativa y los límites legales para cada contaminante en los capítulos de esta obra referentes a la legislación sobre contaminación atmosférica.

24.2.2. Vehículos con motor Diesel

En principio, los motores de combustión son más limpios en sus emisiones que los de explosión, pues en el proceso siempre hay exceso de aire y la combustión del carburante es prácticamente completa.

El problema surge cuando la bomba de inyección no está bien regulada, pues la mezcla que se inyecta deja de ser homogénea o incluso se inyecta mal, y el oxígeno aportado que es ampliamente

suficiente en una situación normal, deja de ser suficiente, por lo que parte del combustible no se quema bien y se evapora, se destila o se carboniza parcialmente, dando lugar a una emisión de gases y partículas compuestos fundamentalmente por:

- CO
- Hidrocarburos inquemados
- Alquitranes
- Olores
- Humos negros
- Humos blancos
- Aldehídos

Generalmente estos motores pueden emitir humos negros al arrancar en frío o cuando están a potencia máxima, siempre que la mezcla quemada no se la apropiada.

El motor Diesel se utiliza en camiones y en muchos automóviles.

24.2.3. Vehículos con turbinas de gas, con motores Wankel o motores rotativos, o con motores de dos tiempos

Estos vehículos llevan motores ligeros, sencillos (los motores rotativos Wankel llevan hasta un 30% menos de piezas) y de muy buen rendimiento, y se utilizan en aviación (turbinas), en algunos camiones y, todavía muy tímidamente, en algunos automóviles y en motocicletas.

Sus emisiones son, en general, inferiores a las de los motores de explosión o de combustión convencionales, y mu-

chos técnicos piensan que si se mejora el proceso de los motores de dos tiempos, estos pueden convertirse en la base del transporte del futuro.

24.3. FERROCARRILES Y NAVEGACIÓN

Los ferrocarriles que utilizan motores que consumen hidrocarburos, generalmente tienen instalados motores Diesel, con la problemática que ya hemos indicado.

Las emisiones se efectúan en las estaciones, donde se concentran, y en el recorrido, si bien en este caso se trata de fuentes puntuales que se desplazan, aunque de gran potencia.

La navegación utiliza los hidrocarburos como fuente de energía. Los barcos consumen combustibles derivados del petróleo, siendo fuentes puntuales de emisión de contaminantes atmosféricos.

En los puertos industriales y comerciales, las emisiones corresponden a las chimeneas de un número limitado de barcos, que luego se desplazan por el mar como fuentes puntuales de contaminación atmosférica.

Sin embargo, en los puertos deportivos pueden estar estacionados cientos de pequeñas embarcaciones de recreo, todas con su motor, siendo este la fuente básica de propulsión en la mitad de ellos.

Los motores de estos barcos son unos de explosión y otros Diesel, y su funcionamiento origina en épocas estivales una

contaminación atmosférica que puede ser apreciable si el tráfico es intenso, como suele ocurrir en estas épocas.

Se debe tener en cuenta, además, que en ciertas zonas, como ocurre en las islas Baleares, existen cientos de puertos deportivos, contando alguno de ellos con más de mil amarres, con lo cual estas fuentes emisoras pueden cobrar cierta importancia en algunas situaciones.

24.4. AVIACIÓN

Los motores de aviación consumen combustibles de alta calidad derivados del petróleo.

Dominan ampliamente los reactores, aunque también se utilizan en mucha menor proporción los aviones turbohélice y los de motor de pistón.

Al haber aumentado enormemente el tráfico aéreo en el mundo, las emisiones de los aviones también han aumentado proporcionalmente, aunque la legislación de los países desarrollados va exigiendo cada vez menos emisiones y menos ruido.

En principio, los principales contaminantes que emiten son:

- Aldehídos
- CO
- NO_x
- Partículas
- Tolueno
- Ortóxileno
- Paraxileno
- Benceno

La aviación comercial parece que ha reducido sus expectativas de los años 80 en lo que se refiere a los vuelos supersónicos a gran altitud, lo que de un modo u otro evitará el aporte de contaminantes a zonas muy sensibles de la atmósfera, como se indica detalladamente en otras partes de esta obra.

24.5. VEHÍCULOS Y ACTIVIDADES MILITARES

No debemos desdeñar una condición humana que desgraciadamente debemos

padecer, tanto en el mundo actual como en el pasado y en el futuro. Me refiero a la violencia generalizada, y como consecuencia, a las actividades de previsión, prebélicas y bélicas.

Las actuaciones de previsión, como son las actividades normales de los ejércitos de tierra, mar y aire, llevan consigo grandes y numerosos desplazamientos por cualquiera de estos medios, con las consiguientes emisiones de los motores que mueven a los vehículos terrestres, a los aviones y a los barcos.

VEHÍCULOS MILITARES

Tierra	Aire	Mar
Automóviles Jeeps Transportes blindados Carros de combate Ferrocarriles	Aviones Helicópteros Cohetes	Grandes barcos de superficie o barcos de línea Portaaviones Portaaeronaves Barcos medios Pequeñas embarcaciones Submarinos

Las actuaciones prebélicas y bélicas multiplican enormemente los desplazamientos y, en consecuencia, las emisiones.

Se ha de tener en cuenta que muchos de estos vehículos, como los carros de combate, los aviones o los barcos de guerra, disponen de motores de enorme potencia, consumiendo todos ellos derivados del petróleo, y emitiendo contaminantes en cantidades muy apreciables.

A esto hay que añadir las destrucciones, incendios, derrames y demás efec-

tos de los conflictos bélicos, que como ocurrió en la Guerra del Golfo, en Chechenia, en Yugoslavia y en otros muchos conflictos localizados que se han padecido en los años 90, y en los que empiezan a los pocos años de comenzado el nuevo siglo, como el de Afganistan, provocan cuantiosas emisiones de contaminantes a la atmósfera (véanse en otra parte de esta obra los efectos de las emisiones de los incendios de los pozos de petróleo de Kuwait en la Guerra del Golfo).

24.6. ACTIVIDADES ASTRONÁUTICAS

Esta actividad, todavía elitista y propia de pocos países, se ha desarrollado intensamente a lo largo de los últimos 50 años, siendo ahora muy frecuente el envío de grandes cohetes militares o de investigación a muchos lugares del Globo, de su entorno o de nuestro sistema planetario.

Estos cohetes disponen de motores de enorme potencia que emiten cantidades gigantescas de contaminantes durante el breve período de tiempo de funcionamiento, y los sueltan en las diferentes

capas de la atmósfera a lo largo de su ascenso.

Por otra parte, y esto ya lo hemos citado en alguna de nuestras obras, los residuos y la basura espacial son una muestra del desprecio humano por estos restos, que hasta que no acaban siendo un peligro real no se tienen en cuenta, y siguen la misma trayectoria que la de los residuos en los ríos, en las costas, en las ciudades o en muchos casos en los propios domicilios.

La presencia de estas *macropartículas* en zonas próximas a la atmósfera, si sigue multiplicándose, pasará a ser un problema grave y de exclusiva responsabilidad antrópica.

CAPÍTULO 25

TRATAMIENTO DE RESIDUOS INDUSTRIALES

25.1. BASES GENERALES

Al igual que los residuos urbanos, los residuos industriales plantean problemas de volumen, de ocupación de espacio y de pérdida económica si no se aprovechan, además de los gastos de su gestión y de la agresión medioambiental que suponen.

Para tratarlos existe una serie de procedimientos que dependen de múltiples factores, como el tipo de residuo, el costo, el volumen, el mercado o el nuevo residuo que se genera en alguno de los sistemas de tratamiento.

Bajo el punto de vista de la contaminación atmosférica, los procedimientos que debemos tratar son aquellos que producen emisiones a la atmósfera, que son básicamente algunos de los tratamientos térmicos, y en concreto la incineración, la producción de plasma térmico y la gasificación.

En principio, estos tratamientos generan contaminantes atmosféricos como los siguientes:

- Dioxinas
- Furanos
- Compuestos clorados de origen:
 - Compuestos organoclorados
 - Cloruros minerales
 - Cloruros metálicos → HCl
 - PVC $\begin{matrix} \nearrow \text{Cl}_2 \\ \searrow \text{HCL} \end{matrix}$
- Partículas
- Aerosoles
- Metales:
 - En forma de gas
 - Sólidos
 - Oxidos
 - Sales
 - Puros
- NO_x:
 - SO₂
 - CO
 - HF

25.2. INCINERACIÓN

25.2.1. Bases de la incineración

Una de las tecnologías disponibles para el tratamiento de los residuos, tanto urbanos como peligrosos, es la incineración.

La incineración es una combustión de materiales (urbanos o de cualquier otro tipo) que, generalmente, contienen:

- Fracción combustible.
- Fracción no combustible.
- Agua.

En esa combustión los residuos se transforman en otros materiales, a saber:

- Gases.
- Partículas.
- Humos.
- Cenizas.
- Inquemados especiales.
- Escorias.
- Carbón activo.

Estos materiales constituyen los residuos de proceso, con gran reducción de volumen, con características propias y de ellos se debe tener previsto su tratamiento, gestión y disposición final.

Frecuentemente la combustión de los residuos se aprovecha para generar energía eléctrica, con lo cual se recuperan parcialmente las inversiones de mantenimiento y funcionamiento.

Es bastante frecuente que ciertos residuos peligrosos no tengan prácticamente otra alternativa, siendo esta tecnología la

que más se promueve ahora en los Estados Unidos y en la Unión Europea.

El rechazo social a la incineración, que todos conocemos, si se realiza conscientemente, debe ir dirigido a tecnologías de incineración obsoletas, y nunca a métodos de alta temperatura y multicámaras, que reducen las emisiones a cantidades muy inferiores a las previstas en la legislación y con una composición totalmente aceptable desde puntos de vista técnicos y sanitarios.

Es la solución que, cuando existen limitaciones prácticas, geográficas, demográficas, técnicas y/o económicas, propone el PNRU en su Programa Nacional de Valorización Energética.

25.2.2. Sistemas de incineración

• Gases:

- Cámara de combustión.
- Horno rotatorio con cámara de post-combustión.
- Horno con lecho fluidizado.

• Residuos líquidos:

- Horno rotatorio con cámara de post-combustión.
- Cámara de combustión.
- Horno con lecho fluidizado.

Se incluyen en estos residuos: disolventes orgánicos, residuos aceitosos, aguas con contaminantes orgánicos y productos halogenados orgánicos.

• Residuos pastosos de fuerte viscosidad.

- Horno rotatorio con cámara de post-combustión.

- Horno de lecho fluidizado.

- **Lodos orgánicos.**

- Horno rotatorio con cámara de post-combustión.
- Horno de lecho fluidizado.

- **Residuos sólidos orgánicos de bajo punto de fusión.**

- Horno rotatorio con cámara de post-combustión.
- Horno de lecho fluidizado.

- **Residuos sólidos secos.**

- Horno rotatorio con cámara de post-combustión.
- Horno de lecho fluidizado.

Se incluyen en ellos los residuos granulados, picados, troceados o en polvo de elevada granulometría.

- **Grandes residuos.**

- Horno rotatorio con cámara de post-combustión.
- Horno con parrilla.

- **Residuos líquidos o pastosos disueltos en bidones o tambos.**

- Horno rotatorio con cámara de post-combustión.
- Horno con parrilla.

- **Residuos sanitarios.**

- Horno de pirólisis.
- Horno rotatorio con cámara de post-combustión.

Se incluyen aquí los residuos biosanitarios asimilables a urbanos y los residuos biosanitarios especiales (contagiosos, tóxicos y de otros tipos).

25.2.3. Calderas de recuperación de calor

En ciertos tipos de hornos (rotativo con cámara de postcombustión, lecho fluidizado, etc.) los gases de combustión alcanzan elevadas temperaturas, y pueden utilizarse para diversos usos, a saber:

- Generación de vapor.
- Calefacción de agua.
- Calefacción de un fluido térmico.

La rentabilidad de la planta (o la disminución del coste de funcionamiento, según se mire) mejorará con este aprovechamiento complementario de forma manifiesta.

Tipos de calderas de recuperación de calor

Pueden ser:

- *Calderas horizontales:* Son para carga alta, y se limpian bien. Se usan sobre todo para residuos sólidos.
- *Calderas verticales:* Son para líquidos o para productos asimilables a gases.

Circuito térmico

Se trata de circuitos cerrados agua-calor-vapor y presión-agua, que toman calor de los hornos para generar el vapor que ha de ser utilizado en alguno de los usos indicados al principio de este epígrafe.

25.3. PLASMA TÉRMICO

El *plasma térmico* o plasma en equilibrio es un gas con parte de sus átomos y moléculas ionizados, que se consigue mediante una corriente eléctrica o con un arco eléctrico.

Se obtiene a presiones relativamente altas ($\cong 10$ mbar), a temperaturas superiores a 16.000 °K similares en electrones e iones, y en equilibrio. Esto hace que la energía eléctrica de este plasma se transforme en alta energía calorífica.

El plasma térmico permite:

- Vitrificar los residuos inorgánicos.
- Pirolizar los residuos orgánicos.
- Vaporizar, condensar o hacer aleaciones con las fracciones metálicas.
- Recuperar metales.

Sus aplicaciones son múltiples, siendo las básicas las siguientes:

- **Destrucción o eliminación (compuestos orgánicos).**
 - Neumáticos.
 - PCB.
- **Inertización por vitrificación (compuestos inorgánicos).**
 - Cenizas volantes diversas.
 - Resinas de intercambio iónico.
 - Amianto.
- **Recuperación (metales valorizables).**
 - Catalizadores.
 - Aluminio.
 - Metales especiales.

La recuperación con este procedimiento es innovadora y abre muchas posibilidades a la industria.

Los casos más viables conocidos hasta el momento son los de los catalizadores industriales y el del aluminio.

En el primer caso, está bastante generalizado el uso de catalizadores en la industria, pues muchos procesos para la obtención de productos químicos los utilizan.

Los catalizadores contienen cantidades elevadas de metales pesados y tienen un ciclo de vida bastante corto, siendo de uso normal los primeros años, se regeneran varias veces después y, finalmente, cuando dejan de ser activos se desechan y pasan a ser un residuo.

Este proceso dura entre cuatro y seis años, según el caso de que se trate.

Las soluciones actuales son el transporte y la disposición a vertedero controlado, o llevarlos a un depósito de seguridad. Ambas tienen el problema de que incorporan un producto con un fuerte contenido en metales pesados en forma de óxidos, y que, además, son bastante solubles, por lo que suponen un peligro añadido si forman un lixiviado.

Mediante el plasma térmico se pueden recuperar cantidades importantes de metales (90-95% de recuperación de Mo y de Co de los catalizadores agotados en la hidrosulfuración del petróleo), reduciéndose notablemente el volumen del residuo y perdiendo sus escorias gran parte de la solubilidad del

residuo inicial (pérdida de gran parte de su capacidad contaminante si se generan lixiviados).

En el segundo caso, es decir, en las industrias del aluminio, normalmente se produce del 3 al 5% de escorias cuando se procesa o se elabora aluminio fundido.

COMPOSICIÓN BÁSICA DE LAS ESCORIAS DEL ALUMINIO

<p>Óxidos de aluminio. Nitruros de aluminio. Aluminio (metal) atrapado. Fundentes. Elementos de aleación.</p>

Esta escoria, considerada como fuente para la recuperación del metal, pues lo contiene en el 30 al 60% del total de su peso, se procesa generalmente en hornos rotativos calentados con quemadores de gas o de fuel-oil en atmósfera de aire.

El volumen de estas escorias que se genera en el mundo es muy elevado (en España, del orden de las 200.000 Tm/año), por lo que su aprovechamiento es de gran interés para la industria.

Con la tecnología del plasma térmico, en este caso se aplica el siguiente proceso: En el horno rotativo se provoca una oxicomustión, con la que se eleva la temperatura; se introduce la escoria, baja la temperatura y vuelve a subir; cuando alcanza los 500 °C se suprime la fuente de oxicomustión y se sustituye por plasma en atmósfera inerte como

fuelle de energía, hasta llegar a la temperatura del proceso, de 800 °C.

El sistema es muy ventajoso desde todos los puntos de vista, pues, en resumen, presenta las mejoras siguientes:

- Se recupera del 15 al 20% más de aluminio.
- Se reducen en un 30 al 40% las emisiones de los gases.
- Se reduce en 2/3 el consumo energético específico.
- Se evita el proceso de formación de aluminotermias.
- Se reduce el volumen final de residuos.
- Los residuos finales necesitan mucho menos tratamiento.

El plasma térmico es, pues, un sistema muy prometedor, y a muy corto plazo sus aplicaciones en recuperación de productos de los residuos se multiplicarán.

25.4. GASIFICACIÓN

La *Gasificación* es otro proceso térmico que, en ciertas circunstancias, puede ser interesante para procesar algunos residuos y recuperar productos.

Consiste en una combustión parcial controlada en presencia de oxígeno y de vapor de agua. El gas, depurado y bien procesado, es similar a un gas de síntesis, formado sobre todo por CO y H₂, con buenas posibilidades de uso industrial (inicialmente contiene CO + H₂, CO₂, N₂, CH₄ y residuos carbonosos).

CAPÍTULO 26

TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS URBANOS

26.1. BASES GENERALES

El aprovechamiento de los residuos urbanos puede realizarse mediante diferentes procesos, que pueden tener interés como vía para deshacerse de ellos o como sistema de reciclado y aprovechamiento económico.

Estos procesos pueden ser transformaciones aerobias para producir compost, transformaciones anaerobias para producir biogás, obtención de rechazos combustibles, incineración o procesos químicos o termoquímicos (pirólisis o hidrogenación u oxidación de la fracción orgánica).

Entre todos ellos, la producción de biogás, la incineración y la pirólisis son procedimientos que generan emisiones a la atmósfera.

26.2. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Al fermentar la materia orgánica de los residuos urbanos después de ser de-

positados en las zonas de vertido, y tras ser cubiertos con capas de material inerte, se generan biogás y lixiviados o licores que contienen agua y una elevada carga contaminante.

El biogás está compuesto por los gases que se indican en la tabla adjunta.

COMPOSICIÓN BÁSICA DEL BIOGÁS

Componente	% en volumen
CH ₄	50-65%
CO ₂	30-45%
H ₂	0,1-2%
O ₂	0,1-5%
H ₂ S	0,001-2%
H ₂ O	0,1-9%
N ₂	trazas
Hidrocarburos	trazas
Mercaptanos	trazas
Diversos productos organoclorados	trazas
CO	trazas
NH ₃	trazas

El elevado contenido en metano hace que el poder calorífico inferior del biogás de vertedero sea bastante elevado (si está presente en un 60%, el P_{ci} es de 5.600 Kcal/m³N), por lo que es viable su utilización en determinadas circunstancias (que se genere una cantidad apropiada, que no sea corrosivo a causa de una posible fuerte concentración de algún componente con esta característica, etc.).

El biogás se puede utilizar:

- Produciendo electricidad con una turbina.
- Produciendo calor en una caldera.
- Aportándolo a la red de distribución de gas.

El proceso de formación del biogás en los vertederos tiene las fases que se indican en la tabla adjunta.

FASES DE LA FORMACIÓN DEL BIOGÁS EN UN VERTEDERO

Fase	Características	Duración
Fase aerobia	Inmediatamente después del vertido. Gran influencia del N ₂ Aumento progresivo del CO ₂ . Descenso progresivo del O ₂	15 días
Fase anaerobia con ausencia de CH ₄	Falta aire. Aumento intenso del CO ₂ . Descenso del N ₂ Aparece H ₂	60 días
Fase anaerobia con formación de CH ₄	Aumento progresivo del CH ₄ Descenso progresivo de todos los demás.	700 días
Fase anaerobia de estabilización	Se alcanzan condiciones y proporciones estables y definitivas de los componentes del biogás.	8-15 años

El biogás puede constituir un peligro en los vertederos, pues se desplaza entre los huecos y puede formar bolsas, lo que plantea posibles problemas de incendios en días de alta temperatura y de explosiones si se alcanzan concentraciones críticas del CH₄, que reaccionará con el oxígeno del aire.

Asimismo puede ser una fuente de malos olores, por contener mercaptanos y H₂S.

El aprovechamiento del biogás se realiza instalando una red de captación mediante drenajes con tuberías apropiadas (perforadas con agujeros o con ranuras) y pozos, que con un sistema de aspiración apropiado llevarán el gas al punto de almacenamiento o a la red de distribución.

FACTORES DETERMINANTES DE LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE UN VERTEDERO

Composición de los residuos urbanos.
 Temperatura ambiente (a lo largo del año).
 Humedad ambiente (a lo largo del año).
 Heladas.
 Nieve.
 Precipitaciones.
 Tipo de vertedero.
 Diseño del vertedero.
 Topografía del vertedero.
 Sistema de explotación del vertedero.

En general, y solamente a título orientativo, podemos indicar que una producción normal de biogás puede rondar en el orden de los 80-100 m³ de gas/Tm de residuo urbano depositada en el vertedero, teniendo en cuenta que la

producción total puede acercarse a los 400 m³ de biogás/Tm de residuos urbanos y que existen fracciones que no gasifican, pérdidas, bolsas aisladas, etc. Las producciones indicadas de 80-100 m³ de gas/Tm de residuo pueden mantenerse a lo largo de 8-10 años.

26.3. INCINERACIÓN

Se trata de un proceso de combustión destinado a consumir el residuo urbano crudo, fracciones de él o rechazos procedentes de separación de fases y de tratamientos previos.

En cualquiera de los casos se puede realizar el proceso simple o se puede recuperar energía, como se indica en la tabla adjunta:

PROCESOS DE INCINERACIÓN DE LOS RESIDUOS URBANOS Y RESIDUOS FINALES

Materia prima	%	Residuo final
Residuo urbano crudo	100	Ninguno. Energía calorífica → Energía eléctrica. Escorias. Gases
Rechazos combustibles procedentes de la separación y recuperación de fracciones	35-60	Ninguno. Energía calorífica → Energía eléctrica. Escorias. Gases
Rechazos combustibles de procesos de afino	10-20	Ninguno. Energía calorífica → Energía eléctrica. Escorias. Gases.

La incineración es aconsejable como sistema en cualquiera de los casos siguientes:

- Climatología adversa gran parte del año.
- Si se dispone de poco territorio.

- Si el suelo es caro.
- Si existen problemas graves de paisaje.
- Si la energía es cara en la zona.
- Si existe mucha demanda de energía.
- Si es una parte de un tratamiento integral de los residuos urbanos.
- Si no existe un fuerte rechazo social al procedimiento.
- Si resulta rentable la instalación, por otros motivos.

La incineración se está utilizando intensamente en los países de la Unión Europea por algunas de las causas que apuntamos, siendo el caso de España diferente debido a estas mismas causas, y sobre todo a las últimas, al haberse politizado el tema y al haberse erigido en bandera de determinados grupos político-sociales.

El sistema debe considerarse, como repetimos siempre, bajo los puntos de vista técnico, ecológico, económico y social, y después de los correspondientes análisis, es cuando se debe decidir su viabilidad en cada caso.

De todos modos, la valorización energética de los residuos urbanos cobra una especial importancia en el Plan Nacional Español de Residuos Urbanos (2000-2006), y en él se contempla el desarrollo de numerosas plantas al respecto, haciendo un fuerte hincapié en el control de las emisiones (véase en el capítulo de esta misma obra referente al Plan).

La incineración del residuo urbano crudo recibe una materia prima compuesta por:

– **Fraciones no combustibles:**

- Metales
- Vidrio
- Otros inertes

– **Fraciones combustibles:**

- Papel
- Cartón
- Gomas
- Textiles
- Madera
- Plásticos
- Agua.

En principio, los rechazos de una combustión de este tipo, que consisten en escorias, cenizas, humus, e inertes, pueden suponer del 15 al 40% del total de la materia prima inicial.

Una planta incineradora se compone básicamente de los elementos indicados en la tabla adjunta.

Además, las instalaciones variarán si se va a producir solo vapor para calefacción (baja presión), o si se va a necesitar vapor a alta presión para generar energía eléctrica.

La incineración de los residuos urbanos, en lo que se refiere a emisiones, plantea una serie de problemas que han sido resueltos en gran parte como consecuencia de la presión social al respecto.

Las emisiones de gases y humos se han reducido enormemente, teniendo en cuenta que unos y otros contienen pro-

ductos peligrosos, y lo mismo ocurre con las escorias y con las cenizas.

Aún así, ciertos componentes como los que se indican pueden plantear graves problemas para el medio ambiente.

Una planta incineradora productora de energía eléctrica debe tener una capacidad de procesamiento mínima del orden de las 30.000 Tm de residuos urbanos/año, ascendiendo esta cifra a 50.000-60.000 Tm/año en los países avanzados, en los que las condiciones socio-políticas permitan este tipo de plantas y en los que los condicionantes económicos y ecológicos sean netamente favorables.

Las incineradoras deben operar a temperaturas apropiadas, regulando la presencia de aire: aire en exceso reduce la temperatura y completa la combustión. El problema se presenta si esta temperatura es baja (800-1.000 °C), pues las dioxinas y los furanos no se destruyen a menos de 1.200-1.400 °C,

por lo que se debe tender a elevar las temperaturas, a instalar sistemas con varias cámaras de combustión, a buscar tratamientos completos de las emisiones (incluyendo UV de sistemas cerámicos, si hace falta) y a plantear previamente la salida (en principio, vertedero controlado) para los 150 a 300 kg de escorias y cenizas que se generan/Tm de residuo urbano tratado.

26.4. PIRÓLISIS

Es un sistema basado en la combustión incompleta de los residuos urbanos, que se realiza en presencia de poco oxígeno o en su ausencia.

Así se carbonizan los residuos y se reduce el 90% de su volumen inicial.

Con este proceso se genera gas, utilizable en la planta de tratamiento o en el exterior.

CAPÍTULO 27

EMISIONES DEL USO DEL CARBÓN

27.1. EL CARBÓN. BASES GENERALES

Este combustible fósil procede de la acumulación de vegetales y de fenómenos que los sepultaron en la Era Primaria (Carbonífero), junto con largos procesos químicos, de temperatura y de presión a lo largo del tiempo, especialmente en la Era Terciaria (lignito) y en el Cuaternario (turba).

Los carbones pueden ser de varios tipos según su antigüedad y según su proceso de formación, lo que les confiere diversas características desde el punto de vista de su uso y según enfoques medioambientales. En la tabla adjunta se indican los diversos tipos de carbón existentes.

TIPOS DE CARBÓN

Antracita
Hulla magra
Hulla semigrasa
Hulla grasa (para coque)
Hulla grasa (de gas)
Hulla grasa (de llama larga)
Hulla seca
Lignito
Turba

CONSTITUYENTES DEL CARBÓN DE LA UNIÓN EUROPEA

Productos carbonosos	70-90%
Agua	0-7%
Azufre	0,5-2%
Nitrógeno	1-2%
Productos inorgánicos (a nivel trazas)	5-20%

El carbón se utiliza como fuente energética en las siguientes actividades:

- Calefacción doméstica: Antracita, lignito.
- A nivel doméstico (cocinas): Antracita, lignito.
- Calefacción industrial: Antracita, lignito.
- Energía industrial (calderas): Antracita, lignito.
- Siderurgia (como reductor): Hulla.
- Centrales termoeléctricas: Antracita, hulla, lignito.

El uso del carbón se generalizó como fuente energética con la Revolución Industrial, pues hasta entonces solo se utilizó realmente desde el siglo XVIII en usos domésticos y algo en siderurgia.

A partir de esa época, el desarrollo de la civilización se sustentó en gran parte en la máquina de vapor, en los altos hornos y en el ferrocarril, instrumentos todos consumidores de carbón, llegando este producto a cubrir en 1.900 el 90% de las necesidades mundiales de energía.

A partir de la Primera Guerra Mundial y sobre todo después de la Segunda, el uso del carbón en los países más avanzados decayó enormemente al ir siendo sustituido por otras fuentes energéticas como el petróleo o la energía nuclear, mientras que en áreas fuera de Europa Occidental o de USA su producción se ha incrementado (China, Rusia, Suráfrica, Polonia, etc.).

En la actualidad, en los países de la OCDE se utiliza fundamentalmente en las centrales termoeléctricas y en siderurgia, y su origen es propio o importado, siendo las reservas mundiales así:

- Rusia: 23%
- USA: 23%
- China: 11%
- Australia: 9%
- Europa: 9%
- Otros: 25%

27.2. CICLO DE VIDA DEL CARBÓN

27.2.1. Extracción

El carbón se extrae de galerías subterráneas o en explotaciones a cielo abierto.

Las minas a cielo abierto suponen el 35% de la producción actual mundial, siendo el resto explotaciones subterráneas.

Desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, las explotaciones a cielo abierto generan polvo de estériles y de carbón, mientras que las explotaciones subterráneas, a pesar de la ventilación, tienen una atmósfera contaminada por gases, partículas y, a veces, por grisú, con el consiguiente peligro añadido.

La silicosis es una enfermedad asociada a este tipo de minería.

Aparte, si la mina es de hulla, el metano existente se libera, con una emisión media de 13 kg de CH_4 /Tm de carbón extraído.

27.2.2. Tratamiento

Primero se realiza una separación o triaje para eliminar estériles, y después un calibrado.

Del triaje se obtienen carbón comercial, de menos de 15% de cenizas, producto mixto, con un 30 a 40% de cenizas, y schlamm y estériles.

El carbón comercial es el que se negocia, y el mixto y el schlamm se suelen utilizar para autoconsumo en producción de energía.

Los esteriles se llevan a escombreras.

En esta fases, si se utilizan los mixtos y el schlamm en producción energética, las emisiones son las propias de una combustión de carbón de baja calidad.

27.2.3. Transporte

El carbón se transporta por ferrocarril, en barco, por carretera, por cinta transportadora o por caroducto.

Las emisiones des polvo surgen al mover el producto en la carga y en la descarga.

27.2.4. Almacenamiento

Los parques de carbón se instalan en la mina o en los lugares de consumo.

La contaminación atmosférica que generan provienen de la acción del viento sobre los grandes depósitos de carbón, que arrastra polvo del mineral y que en algunos casos extremos puede alcanzar el 0,5% del total almacenado.

27.2.5. Combustión

El uso del carbón como combustible doméstico para cocinas y calefacciones a partir del siglo XVIII tuvo sus primeras manifestaciones contaminantes en el famoso *smog* (pea soup) de Londres.

La combustión del carbón genera las siguientes acciones contaminantes de la atmósfera:

- El carbono se oxida a CO_2 , produciéndose una media de 2,7 Tm de CO_2 /Tm de carbón quemado.
- El azufre se oxida a SO_x . A más contenido en azufre, habrá más emisiones de SO_x (sobre todo SO_2 y SO_3). Si partimos de un carbón con el 1% de azufre, las emisiones son de 20 kg de SO_2 /Tm de carbón quemado. Si el carbón contiene el 10% de azufre, la emisión será del orden de los ¡200 kg de SO_2 /Tm de carbón quemado!
- El nitrógeno del aire de combustión y una fracción del nitrógeno orgánico contenido en el carbón se transforman en NO_x en cantidades que dependen, entre otras cosas, de las condiciones de la combustión. Los NO_x producidos oscilan entre los 5 y los 20 kg/Tm de carbón quemado según sea el procedimiento de combustión.

- Los gases restantes proceden de la oxidación incompleta del carbón, y son fundamentalmente CO (de 0,3 a 5,5 kg/Tm de carbón quemado) y COV (de 0,04 a 0,7 kg/Tm de carbón quemado).
- Aparte, después de los tratamientos de las emisiones, en los que se recuperan la mayoría de las cenizas, se generan las partículas finas que no han podido captar los sistemas de recuperación, y estas van a la atmósfera.

27.3. CARACTERÍSTICAS DEL CARBÓN EN RELACIÓN CON LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Algunos contaminantes de los que acabamos de citar que se emiten en la combustión del carbón, tienen como origen la propia composición del carbón y sus características a saber:

Azufre: Se puede presentar de cualquiera de las formas siguientes:

- Como azufre orgánico en la materia orgánica del carbón.
- Como sulfuros (sobre todo de Fe) dispersos en nódulos o como partículas.
- Como sulfato de calcio, de magnesio o de hierro, o como otros sulfatos alcalinos mezclados con la fracción mineral.

Por otra parte, el azufre, al arder produce sobre todo SO_2 y algo de SO_3 , como ya hemos indicado.

Los sulfatos alcalinos se volatilizan, se descomponen o quedan en las cenizas.

El SO_3 favorece las condensaciones corrosivas de carácter ácido.

Contenido en materias volátiles: Al calentar el carbón a 800 ó 1.000 °C, y sobre todo la hulla, se desprende un conjunto de gases combustibles llamados *materias volátiles* que se inflaman de modo inmediato.

Si el contenido en estas materias es elevado, aumenta el riesgo de emisión de hollines y alquitranes en la medida en que el sistema de combustión aproxime más o menos el proceso a la combustión completa.

Poder aglutinante: Ya se ha tratado en otro epígrafe, y es la capacidad de que con el calor el carbón se aglutine y forme un coque más o menos compacto. Los carbones flojos y la antracita no se aglutinan y los carbones grasos se aglutinan en demasía, pues forman conglomerados que impiden una combustión completa, generando así hollines y alquitranes.

Calibre: Según sea el tamaño del carbón que se quema y según sea el tipo de combustión, se generarán más o menos agentes contaminantes atmosféricos.

Un carbón de tamaño homogéneo permite una buena circulación de aire y una buena combustión.

Si no ocurre esto, es decir, si existe mezcla de calibres (gruesos y polvo), el polvo tapaná los huecos, faltará aire y la combustión será defectuosa, con exceso de aire en unas zonas y con falta en otras.

27.4. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE COMBUSTIÓN Y DE GESTIÓN

Los sistemas de combustión pueden ser:

- Hogares de calefacción individual.
 - Estufas.
 - Cocinas.
 - Calderas de calefacción individual.
- Calderas industriales.
- Calderas de calefacción central.

Las calderas pueden ser no tubulares, de tubos de humo o de tubos de agua, y según el sistema de calefacción pueden ser: de hogar de carga manual, de carga mecánica, parrillas mecánicas y hogares de carbón pulverizado.

Según sea el sistema se emitirá mayor o menor cantidad de contaminantes,

independientemente de la calidad del combustible.

Por otra parte, el manejo es importantísimo desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, y el mantenimiento es fundamental.

La limpieza, los controles de presión, el caudal o volumen de combustible / hora, el control del aire primario, el control del aire secundario, etc., influyen directamente en las emisiones, pues una buena gestión implica menor contaminación.

27.5. LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS

En la tabla adjunta se indican unas líneas generales de las emisiones de las centrales termoeléctricas.

EMISIONES DE LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS

Agente contaminante	Emisión, en Tm/año, para una potencia de 1.000 MW		
	Carbón	Fuel-oil	Gas
SO _x	150·10 ³	60·10 ³	0,015·10 ³
NO _x	23·10 ³	25·10 ³	13·10 ³
CO	0,25·10 ³	0,009·10 ³	Muy poco
HC	0,5·10 ³	0,7·10 ³	Muy poco
Partículas	5·10 ³	0,8·10 ³	0,5·10 ³

Las centrales termoeléctricas de carbón emiten los contaminantes que se citan.

Los SO_x son básicamente SO₂ y en menor proporción SO₃.

Los NO_x son, sobre todo, NO y NO₂.

Las partículas son fundamentalmente cenizas e inquemados, presentándose a veces hollines si la combustión no es correcta.

En los parques de carbón se genera polvo, y lo mismo ocurre en el manejo del mineral.

Si las calderas utilizan carbón pulverizado, las cenizas contienen escorias y cenizas volantes.

En los años 60 a 90 del siglo pasado las centrales termoeléctricas de carbón se orientaron hacia las grandes chimeneas, algunas de ellas de más de 300 m de altura (As Pontes y Andorra la Nueva en

España), basándose en la difusión y en la dispersión.

Actualmente la línea que se sigue es hacia una mejor calidad de los combustibles, hacia tratamientos de recuperación de gases y partículas, al procesado previo de los carbones en algunos casos y a técnicas de incineración perfeccionadas.

CAPÍTULO 28

EMISIONES DEL TRATAMIENTO DEL PETRÓLEO

28.1. BASES GENERALES

28.1.1. Origen

El petróleo se ha formado a lo largo de millones de años con restos de organismos que vivían en el mar, en los lagos y en las costas. Después de varios cataclismos geológicos, estos organismos se fueron cubriendo con sedimentos y actuaron la presión y la temperatura junto con bacterias aerobias y anaerobias, degradando esa materia orgánica con desprendimiento de N, S y O y formación de hidrocarburos líquidos y gaseosos.

28.1.2. Composición

El petróleo se componen de:

80 - 88%	C
10 - 15%	H
0 - 3%	N
0,2 - 5%	S
0 - 1%	O

28.1.3. Historia resumida

La explotación industrial del petróleo se puede considerar que comenzó a mediados del siglo XIX en EE.UU. con la perforación del primer pozo (E.L. Drake, 27-8-1859), y con el establecimiento de la primera refinería poco después.

A mediados del siglo XX el petróleo suponía una parte relativamente importante en el panorama energético mundial, que se disparó en pocos años a causa del descubrimiento de los grandes yacimientos de Oriente Medio, Alaska, Mar del Norte y África, y por el rápido aumento de las necesidades energéticas generales, sustituyendo progresivamente al carbón en la mayoría de los países industrializados.

En la actualidad el petróleo ocupa el 41% del consumo mundial de energía, existiendo unas reservas del orden de lo indicado en la tabla adjunta.

RESERVAS MUNDIALES DE PETRÓLEO CONFIRMADAS A MEDIADOS DE LOS AÑOS 90

Oriente Medio	65,5%
Iberoamérica	13,6%
África	6,1%
Rusia y Europa del Este	5,8%
Norteamérica	3,0%
China	2,4%
Europa Occidental	1,6%

Los principales países consumidores son EE. UU, (24%), Rusia (14%), Japón (8%), Alemania (4,3%) y Francia (3%).

28.2. CICLO DE VIDA DEL PETRÓLEO

28.2.1. Extracción

La extracción del petróleo del subsuelo se realiza fundamentalmente mediante pozos en el continente y con plataformas *off-shore* en el mar, consiguiéndose obtener del 40 al 60% del contenido de cada yacimiento.

En la extracción solamente se emiten los hidrocarburos muy volátiles más o menos libres que contengan el petróleo, en la medida que estén al aire libre, considerándose esta contaminación del orden de 0,1 kg/Tm de petróleo bruto extraído.

28.2.2. Transporte

En general los grandes puntos de tratamiento o de consumo del petróleo están situados lejos de los puntos de pro-

ducción, por lo que debe ser transportado a grandes distancias.

Las dos vías fundamentales de transporte son la marítima y los oleoductos.

La vía marítima supone el uso de buques cisterna, que si plantean grandes peligros de contaminación del mar y de las costas, desde el punto de vista de las emisiones a la atmósfera solamente tendremos en cuenta los escapes de los motores de estos navíos, y si existe un derrame, la evaporación de las fracciones más volátiles, que se facilita al extenderse la masa de petróleo por el mar y estar por ello una gran superficie de aquel en contacto con la atmósfera.

Los oleoductos solo plantean problemas de una pequeña evaporación de hidrocarburos en casos de accidente o de atentados terroristas que provoquen pérdidas y salida del petróleo al aire libre.

Otra vía de menor entidad es el transporte en camión de los productos obtenidos en las refinerías, para su distribución en las gasolineras, en las industrias y a nivel doméstico. El problema se reduce a evaporación en caso de accidentes.

28.2.3. Tratamiento

El tratamiento básico del petróleo es la refinación del crudo, aunque antes de su transporte a las refinerías debe ser canalizado a través de ciclones para eliminar los lodos y trozos de roca que pueden haberse incorporado durante la extracción, y también debe ser estabilizado para separar los gases absorbidos y algunas fracciones muy ligeras.

El objetivo del refino es transformar mediante operaciones físicas y químicas un producto bruto de composición variable según sea su origen, en una serie de productos de base para la industria petroquímica, y sobre todo en combustibles, lubricantes y alquitranes.

Las técnicas y procedimientos fundamentales de refino son:

Destilación primaria

El procedimiento básico de refino de petróleo es la destilación, que es un proceso que consiste en calentar progresivamente los componentes del petróleo para separarlos entre sí.

El petróleo se introduce en un horno a 370 °C, elevándose los vapores generados a una torre de destilación atmosférica.

Cada nivel de temperatura de ebullición corresponde a una etapa del fraccionamiento y separa un producto específico, obteniéndose:

- Gases muy ligeros.
- Gasolinas ligeras.
- Gasolinas pesadas.
- Keroseno.
- Gasóleo.
- Residuo atmosférico (residuo pesado).

Ese último residuo se suele llevar a una columna de destilación en vacío, en la que se alcanzan temperaturas de 480 °C que permiten separar el destilado, que será transformado por craqueo catalítico o por hidrocarburos, y el residuo, que servirá para fabricar betunes y alquitranes o que será transformado por viscoreducción.

PRODUCTOS DE LA DESTILACIÓN FRACCIONADA DEL PETRÓLEO

Tipo físico de hidrocarburo	Hidrocarburo	Temperatura de obtención	Uso
Gases	Metano, etano, propano, butano	Hasta 40 °C	Combustibles
Naftas (Gasolinas)	Pentano, hexano, heptano, octano, nonano	40 °C - 180 °C	Combustibles Disolventes
Queroseno para reactores	Decano-hexadecano	200 °C - 300 °C	Combustible Craqueo
Gasóleo	Hidrocarburos de 16 a 25 átomos de carbono	300 °C - 375 °C	Craqueo Combustible
Fuel	Hidrocarburos de 20 a 40 átomos de carbono	≥ 350 °C	Combustible Lubricación
Residuos ligeros	Vaselina	Semisólida	Lubricantes Pomadas
Residuo pesado	Parafinas Alquitranes	Sólidas Sólidos	Impermeabilizantes Asfaltos

Conversión secundaria

Se aplica sobre todo para los crudos pesados y ante la creciente demanda de gasolinas, y se utilizan los siguientes procedimientos:

- Reformado: Paso de gasolinas pesadas por un catalizador de platino a poco menos de 500 °C para transformarlas en una base para carburantes de alta calidad.
- Craqueo: Disociación de las moléculas del destilado en vacío y recomposición de ellas, formando productos más ligeros. Se puede hacer por craqueo catalítico, por viscoreducción o por hidro craqueo.
- Alquilación: Síntesis de parafinas ramificadas a partir de elementos del gas de craqueo catalítico, de la que se obtienen gasolinas estables de alto índice de octano (gasolinas sin plomo).
- Desulfuración: Eliminación del azufre a través de un catalizador en presencia de hidrógeno a una temperatura entre 315 y 450 °C, y recuperación de ese azufre.
- Tratamientos de acabado: Se actúa sobre los compuestos que afectan al color, al olor, a la acidez o a la formación de depósitos de otros productos.

Así se obtienen finalmente carburantes, lubricantes, alquitranes y subproductos como el azufre.

En esta fase, es decir, desde que entra el petróleo en una refinería hasta que sale como productos acabados, se pierde del orden del 3%, sobre todo por evaporación.

28.2.4. Uso energético

El uso que más nos concierne es la combustión, en la que se emiten derivados del azufre, hidrocarburos inquemados, derivados del nitrógeno, etc.

En la tabla adjunta se indican las emisiones básicas:

**EMISIONES BÁSICAS
PROCEDENTES DEL
TRATAMIENTO Y USO
DEL PETRÓLEO**

NO _x
Partículas
CO
CO ₂
CH ₄
SO _x
Humos
(con diversos porcentajes de C, H, S, N y O)
H ₂ S
Mercaptanos
Alquitranes
HCN
HCHO
HCl
Hidrocarburos aromáticos
Hidrocarburos alifáticos
Hidrocarburos halogenados
O ₃

Por otra parte, la industria petroquímica utiliza el gas de síntesis, las olefinas y los hidrocarburos aromáticos obtenidos en el refino, para fabricar una serie de productos químicos derivados, de gran importancia en la vida actual.

PRODUCTOS FABRICADOS EN LA INDUSTRIA PETROQUÍMICA

GAS DE SÍNTESIS		Hidrógeno	
		Amoníaco	Ácido nítrico
			Urea
			Abonos
		Metanol	Resinas formol
Ácido acético			
		Anh. carbónico	Urea
OLEFINAS	Etileno	Polietileno	Plásticos
		Óxido de etileno	Anticongelantes
			Detergentes
			Fibras sintéticas
		Ácido acético	Acetato de celulosa
			Acetato de vinilo
	Cloruro de vinilo	Plásticos	
	Tricloroetileno	Lavado en seco	
	Propileno	Polipropileno	Plásticos
		Acetona	Disolventes
		Acrilonitrilo	Fibras acrílicas
		Óxido de propileno	Anticongelantes
	Detergentes		
Fracción C.	Butadieno	Cauchos sintéticos	
AROMÁTICOS	Benceno	Ciclohexano	Nylon
		Fenol	Resinas fenólicas
		Anilina	Colorantes
		Alquilbencenos	Detergentes
	Tolueno	TNT	Explosivos
			Poliuretanos
	Xilenos y Etilbenceno	o-xileno	Plastificantes
			Insecticidas
		m-xileno	Resinas y fibras
			Poliéster
	p-xileno	Poliéster	
Etilbenceno	Poliestireno		

CAPÍTULO 29

EMISIONES DEL USO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

La energía geotérmica es una energía renovable-no renovable que se basa en el calor interno de la Tierra generado por la desintegración de los elementos radiactivos presentes en las capas profundas de nuestro planeta.

A medida que profundizamos en el suelo aumenta la temperatura según un gradiente geotérmico, que suele ser variable entre unas zonas y otras de la Tierra (3,3 °C/100 m en París, 10 °C /100 m en Alsacia, 100 °C / 100 m en Lardello, etc.).

Al existir un gradiente de temperatura, existirá un flujo de calor desde las profundidades hacia la superficie, que procede por conducción si la roca es impermeable, y por convección en otros casos.

Los yacimientos geotérmicos son depósitos de masas minerales calientes, fisurados y permeables, por donde pueda circular el agua como fluido portados del calor.

Pueden ser de varios tipos:

- De alta temperatura ($T > 150$ °C)
- De temperatura media (90 °C $< T < 150$ °C)
- De baja temperatura (30 °C $< T < 90$ °C)
- De muy baja temperatura ($T < 30$ °C)

En cualquiera de los tipos de energía geotérmica se pueden emitir contaminantes a la atmósfera, que dependen básicamente del lugar y de la composición química del fluido geotérmico.

En general se emiten H₂S (corrosión de metales, daños a las pinturas, daños a la vegetación, toxicidad para la fauna y el hombre), CO₂ (volúmenes del orden de los de una central térmica de carbón) y NH₃ (más peligroso si reacciona con el H₂S para dar sulfato amónico), fundamentalmente.

Hemos de señalar además, que del total de la energía que se obtiene, el 90% se vierte al medio en forma de calor residual.

CAPÍTULO 30

EMISIONES DEL USO DEL GAS NATURAL

30.1. FORMACIÓN Y COMPOSICIÓN

El gas natural se ha formado, como el petróleo, por depósito de organismos vivos (básicamente plancton) en el fondo de los océanos, cerca de los continentes, a lo largo de mucho tiempo hace millones de años.

Las capas de organismos mezclados con partículas rocosas acabaron por constituir una masa sólida que por las condiciones de presión y temperatura, entre otras, se transformó, dejando filtrar petróleo y gas natural.

Ambos productos se fueron desplazando hacia arriba a través de las capas permeables hasta que quedaron bloqueados en domos de terreno impermeable o contra fallas rocosas, y al acumularse, dieron origen a los yacimientos actuales.

En general, el gas natural, más ligero, suele ocupar la parte superior del yacimiento (roca almacén), el petróleo el centro y el agua salada la parte más baja.

El gas natural puede ser húmedo, si contiene hidrocarburos líquidos en suspensión, o seco, si no los contiene.

A veces, el gas aparece solo o con cantidades ínfimas de petróleo por haber emigrado con mayor facilidad o por no haberse formado el líquido en cantidades suficientes, constituyéndose así los yacimientos de gas natural.

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos acompañados a veces por sustancias azufradas o nitrogenadas, como se indica en la tabla adjunta.

COMPOSICIÓN BÁSICA DEL GAS NATURAL

Metano (80-90% del total)
Propano
Butano
Otros hidrocarburos (trazas)
Nitrógeno
Dióxido de carbono
H ₂ S
Otros derivados del azufre

30.2. ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE

El gas natural tiene el problema del almacenamiento y del transporte, que se resuelven, el primero, con la licuefacción, sometiéndolo a temperaturas del orden de $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$, en las que se comprime hasta licuarse, almacenándose en esferas, que todos conocemos; el segundo se resuelve con las redes de gas licuado, que están constituídas por: gasoductos de transporte desde los yacimientos a los puntos de embarque, instalaciones de licuación, buques metaneros que lo llevan a las costas de los lugares de consumo,

instalaciones de recepción y de regasificación, y red de tuberías de distribución general.

30.3. EMISIONES

En la actualidad el gas natural cubre casi el 25% de la demanda mundial de energía, y su consumo crece considerablemente.

La contaminación atmosférica que se genera por el uso de este hidrocarburo se emite a lo largo de su ciclo de vida, según se indica en la tabla adjunta.

EMISIONES EN EL CICLO DE VIDA DEL GAS NATURAL

Fase	Emisiones y causas de contaminación
Extracción	Pérdidas y fugas de gas (0,25% del total) SO _x NO _x Hidrocarburos
Tratamiento	Gas seco CO ₂ NO _x Partículas Hidrocarburos SO _x H ₂ S
Transporte	Partículas CO NO _x SO ₂ CH ₄ CO ₂ Gas seco (fugas) Gasoductos (fugas, accidentes, atentados) Buques metaneros (fugas, accidentes, atentados) Las pérdidas pueden alcanzar del 0,5 al 1% del total en volumen
Almacenamiento	En cavidades salinas (fugas) En acuíferos apropiados (fugas)
Distribución	Pérdidas Fugas Accidentes Atentados
Transformación de la energía en energía eléctrica, en calor o en la fabricación de productos de síntesis (plexiglás, etc.).	Partículas CO NO _x HC CO ₂ Humos secos SO ₂

CAPÍTULO 31

EMISIONES DEL USO DE LOS BIOCOMBUSTIBLES

31.1. BASES GENERALES

La biomasa, definida con un concepto energético, es la materia de origen biológico que en nuestro caso es susceptible de ser utilizada en usos energéticos.

Dentro de este término se incluye un conjunto de materias como pueden ser las plantas de los cultivos energéticos o cultivos destinados a obtener unos vegetales que van a ser transformados en energía, y prácticamente la mayoría de

los residuos sólidos orgánicos de origen agrario o doméstico, incluidos los residuos forestales y los de la industria agroalimentaria.

31.2. TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLE

En las tablas adjuntas se indican los principales biocombustibles y posibles fuentes.

RESIDUOS AGRARIOS DE POSIBLE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

Residuos agrícolas	Residuos forestales	Residuos ganaderos
Residuos de cereales	Corteza	Purines
Residuos de leguminosas	Serrines	Estiércol
Residuos de tubérculos	Astillas (desperdicios)	Lisier
Residuos de cultivos industriales	Leñas	Deyecciones avícolas
Residuos de cultivos forrajeros	Desbroces	
Residuos de frutales	Restos de montes quemados	
Residuos de industrias agrícolas	Pies menores	
	Matorral	
	Maderas de baja calidad	
	Restos de industrias forestales	

BIOCOMBUSTIBLES BÁSICOS

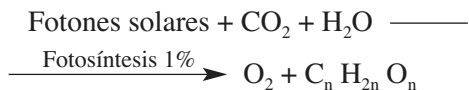
Grupo	Producto	Propiedades
Alcoholes y derivados	Metanol (CH ₃ OH) (Alcohol metílico)	Corrosivo Disolvente Molécula de base para síntesis
	Etanol (C ₂ H ₅ OH) (Alcohol etílico) • Etanol anhidro • Etanol hidratado Metil-tercio-butil-éter (MTBE) Etil-tercio-butil-éter (ETBE)	Corrosivo Corrosivo
Esteres	• Ester de aceite de colza (Diester) • Ester de aceite de girasol • Ester de aceite de copra • Ester de aceite de palma • Ester de aceite de maíz	Parecidos a los gasóleos

31.3. PRODUCCIÓN Y CONSUMO GLOBALES

$$\frac{F_p}{F_{ch}} = \frac{3.000 \cdot \alpha}{17,2} = 175 \alpha$$

Si la reacción general de la fotosíntesis es:

Así, para que F_p sea superior a F_{ch} , es suficiente con que:



$$\alpha > \frac{1}{175}$$

si el flujo solar medio recibido por la Tierra es de 300 w/m² (300.000 Kw/km²), tendremos que el flujo de producción F_p de materia orgánica vegetal será:

Entonces, si más de 1/175 de la superficie del planeta está cubierta por vegetación, como es el caso, el flujo de producción de materia orgánica a partir de la energía solar es superior al de consumo por el hombre.

$$\begin{aligned} F_p &= 300.000 \cdot 0,01 \cdot \alpha = \\ &= 3.000 \alpha \text{ Kw/m}^2, \end{aligned}$$

siendo a la fracción de la superficie terrestre cubierta por la vegetación.

Esto abre la posibilidad de una orientación hacia un totalitarismo energético ecologista (todo energías renovables), vía que puede plantear desequilibrios irreversibles de todo orden: desarrollo masivo de cultivos energéticos a costa de perder la producción alimentaria, degradación de suelos, etc.

Si el flujo solar recibido es 17.400 veces superior al consumo humano medio o flujo de consumo F_{ch} , tendremos:

31.4. PROCESOS

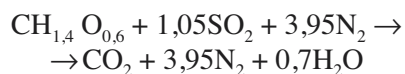
Volviendo a los biocombustibles, la biomasa puede ser transformada en combustibles líquidos o gaseosos transportables por procesos de conversión biológica o por acción termoquímica. Por la primera vía se obtienen metano y etanol y por la segunda vía aceites y gas de síntesis (una mezcla de H_2 y de CO), que a su vez puede ser transformado en metano y en metanol.

La acción termoquímica se basa en la descomposición térmica de la biomasa, y comprende los siguientes posibles procesos:

Combustión

Se quema la biomasa en exceso de oxígeno a temperaturas relativamente elevadas (800-1.200 °C). Así se liberan energía calorífica y residuos sólidos y gaseosos, como se indica en el cuadro adjunto.

La reacción de combustión es:



siendo $CH_{1,4}O_{0,6}$ la fórmula media de la biomasa.

La combustión se compone de tres etapas, aunque normalmente son casi simultáneas: fase de secado (evaporación del agua), fase de volatilización (a partir de 200 °C) y fase de formación y combustión de gases (a partir de 500 °C).

En la combustión de biomasa se emiten SO_x , partículas y NO_x , pero controlando el aire en exceso y con instalaciones adecuadas de tratamiento, estas emisiones se pueden reducir al mínimo.

Gasificación

Se somete la biomasa a temperaturas de 700 a 1.500 °C, en presencia de algo de oxígeno.

Así, se generan gases y residuos sólidos, por una mezcla de acción pirolítica y de acción oxidante sobre la biomasa.

El proceso se indica en el cuadro adjunto.

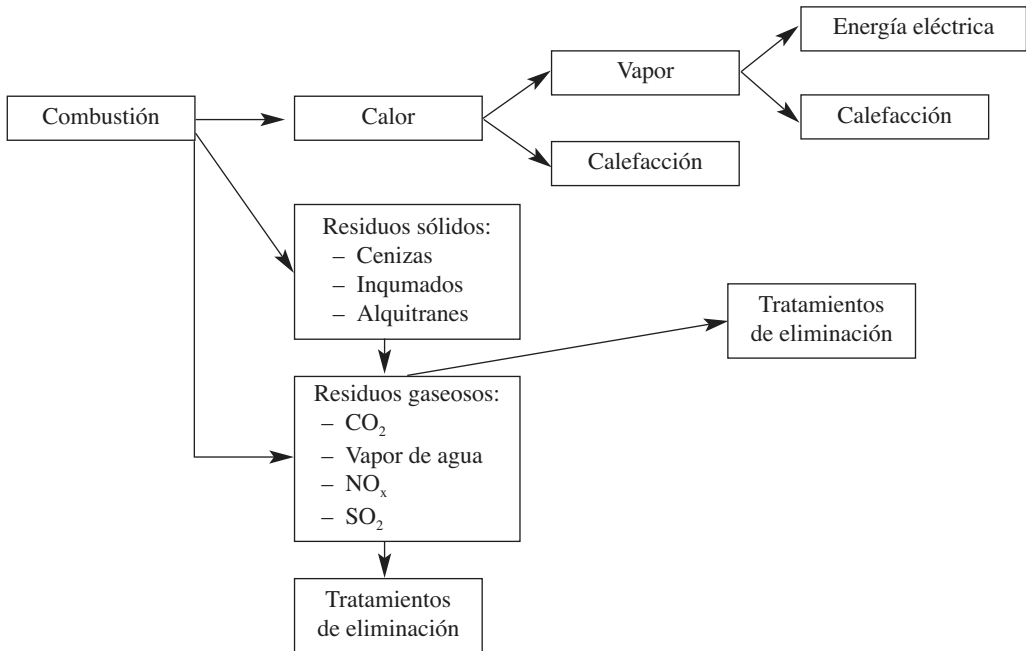
La gasificación puede ser:

- Con aire, con O_2 , con H_2 , con CO_2 o con agua, siendo el aire el agente gasificante de más interés.
- Con suministro de calor directo o indirecto.
- Con reactor en lecho móvil en contracorriente o en corriente paralela, o con lecho fluido, con flujo ascendente o con flujo cruzado.
- Con catalizadores.

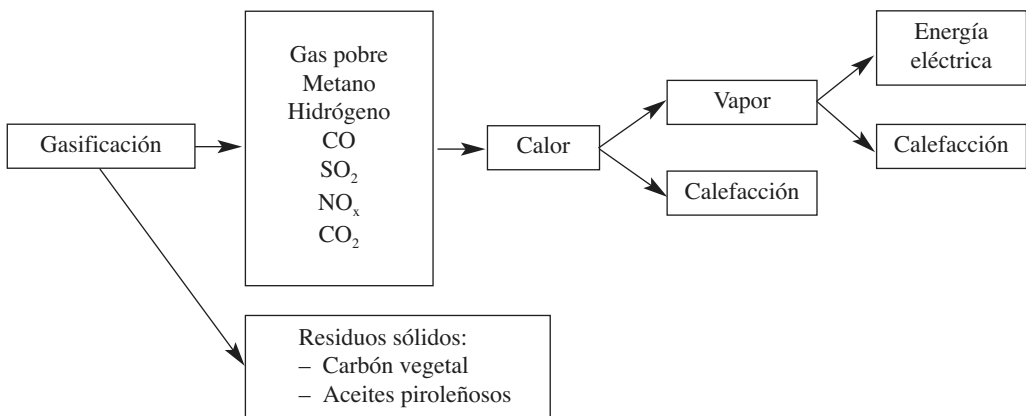
Pirólisis

Es una combustión incompleta en ausencia de oxígeno, a temperaturas entre 350 y 1.200 °C.

PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LA BIOMASA



PROCESO DE GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA



Se generan carbón vegetal, aceites piroleñosos y gas pobre, fundamentalmente.

El proceso se indica en el cuadro adjunto.

La pirólisis puede ser:

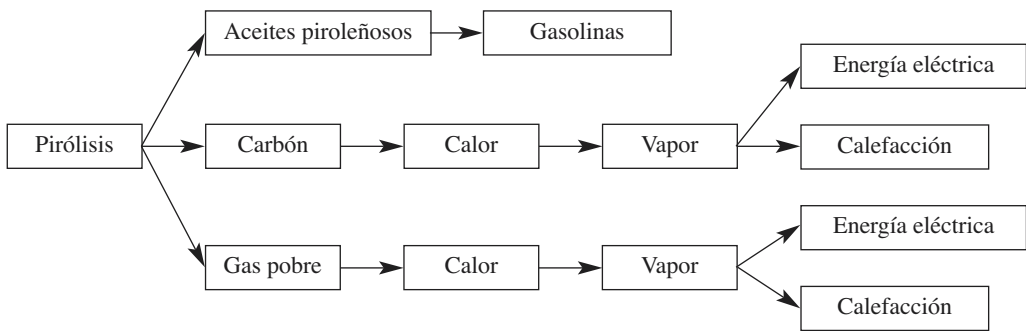
– A temperatura y velocidad de calentamiento bajas

– A temperatura y velocidad de calentamiento altas.

– Pirólisis especiales:

- Al vacío.
- Flash.
- Fast.

PROCESO DE PIRÓLISIS DE LA BIOMASA



CUARTA PARTE

La atmósfera y el clima en relación con la contaminación atmosférica

CAPÍTULO 32

EL CLIMA Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

32.1. ALTERACIONES GENERALES

Las relaciones entre el clima y la contaminación atmosférica son intensas, y ambos se influyen mutuamente en múltiples aspectos.

Los ecosistemas dependen, entre otras cosas, de los equilibrios de los factores bióticos y abióticos incidentes, como temperatura, humedad, luz, etc., entre estos últimos. Si se alteran estos equilibrios por causas extrañas, como la contaminación atmosférica, se alterarán los ecosistemas.

El aporte de CO₂ de los volcanes, de los combustibles y de partículas de inquemados, hollines, etc., afecta a la radiación solar que entra hacia la Tierra.

Se debe tener en cuenta, por otra parte, el proceso que sufre la radiación solar al entrar en la atmósfera y contactar con diversas capas atmosféricas, con las nubes y con el suelo, con el agua y con la vegetación.

Las radiaciones solares son reflejadas parcialmente por las nubes, por las partículas sólidas presentes y por las nieblas (smog). Cuanta más contaminación de partículas sólidas exista, más reflexión habrá y entrará menos energía a la superficie terrestre, lo que provocará un descenso de las temperaturas, como ocurre, por ejemplo, después de grandes erupciones volcánicas.

Por otra parte, el aumento del CO₂ que hemos citado antes, así como la presencia de ozono y de algunas partículas orgánicas, además del vapor de agua, causan el efecto invernadero, con la consiguiente alteración del clima, como se indica en los capítulos correspondientes de esta obra.

La contaminación atmosférica altera el clima por estas vías, modificando las radiaciones solares recibidas, las temperaturas y la pluviometría.

32.2. EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE EL CLIMA

Como forma muy didáctica de mostrar los efectos generales de la contami-

nación atmosférica sobre el clima, y los efectos del clima sobre la contaminación atmosférica, a continuación desarrollamos una tabla, resumiendo con ella algunos de estos efectos.

EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE EL CLIMA

Sector sobre el que la contaminación atmosférica ejerce sus efectos	Efectos
Radiaciones solares	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de la radiación solar directa - Reducción de parte de la radiación ultravioleta que entra - Reducción de las horas diurnas de insolación
Capa de ozono	
Visibilidad	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción notable en el entorno de las ciudades contaminadas - Efectos enmascarados sobre el centro de las ciudades por la acción de <i>isla de calor</i> - Los fines de semana, de menor producción de contaminantes, aumenta la visibilidad
Humedad	<ul style="list-style-type: none"> - Aumenta la humedad relativa, al formar las partículas de contaminación núcleos de condensación - Aumentan las nieblas - Aumentan las brumas
Precipitaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Aumentan las precipitaciones - Las precipitaciones se hacen más intensas - Aumentan las precipitaciones en los días laborables
Efecto invernadero y recalentamiento global	

32.3. EFECTOS DEL CLIMA SOBRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

- *Dispersión vertical de los contaminantes*
 - A mayor presión atmosférica, más pesado será el aire y menos dispersión habrá.

- Los anticiclones son negativos a este respecto.
- Si el gradiente térmico vertical es superior a 1 °C /100 m, habrá situación de equilibrio atmosférico estable, y habrá más contaminación.
- Las inversiones térmicas concentran los contaminantes.
- La ubicación de los focos de contaminación es fundamental, por los

condicionantes climáticos de cada lugar:

- Valles
 - Costas
 - Mesetas y llanuras
 - Exposición (orientación)
- *Dispersión horizontal de los contaminantes*
 - Influye enormemente la velocidad del viento.
 - Los obstáculos y la temperatura del suelo alteran la dispersión horizontal.
 - Los vientos fuertes y las turbulencias dispersan los contaminantes.
 - Los contaminantes, si se elevan en vertical, pueden ser transportados a grandes distancias.
 - Las precipitaciones horizontales, sobre todo las nieblas y las brumas, agravan el problema de la contaminación.
 - *Transformación de contaminantes*
 - La temperatura, la luz y la humedad producen en ciertos grupos y mezclas de contaminantes reacciones fotoquímicas, con fuerte tendencia a la acidez en muchos casos, provocando, entre otras cosas, las lluvias ácidas.
 - Esas condiciones climáticas favorecen ciertas oxidaciones.

32.4. FENÓMENOS CLIMÁTICOS Y CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Indicamos en forma de tabla los fenómenos climáticos relacionados con la contaminación atmosférica.

FENÓMENOS CLIMÁTICOS RELACIONADOS CON LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

- Movimientos atmosféricos horizontales
 - Circulación de masas calientes ecuatoriales
 - Circulación de masas frías polares
 - Rotación de la Tierra
 - Influencia del relieve terrestre
 - Influencia del mar
- Movimientos atmosféricos verticales
 - Influencia de la temperatura
 - Influencia de la presión
 - Influencia de la humedad
 - Estabilidad atmosférica
 - Influencia de la altura de mezcla
- Vientos
 - Dirección
 - Velocidad
- Inversiones térmicas
- Fumigación
- Calmas atmosféricas

Los contaminantes afectan al medio a nivel climático global en los siguientes fenómenos básicos:

- Calentamiento global
 - CO₂
 - Aerosoles
 - Otros gases de efecto invernadero
- Alteración de la capa de ozono
 - CFC
 - Otras causas antrópicas
- Lluvias
- Presencia de SO_x, de NO_x y de partículas en el aire

CAPÍTULO 33

LA ATMÓSFERA

33.1. COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA

33.1.1. Ubicación

La atmósfera terrestre es la envoltura gaseosa que rodea a la Tierra y que permanece unida a ella gracias a la atracción de la fuerza gravitatoria. Su límite inferior son los continentes y los océanos de la superficie del planeta, y se extiende más allá de los 1.000 km de altura. La densidad de la atmósfera disminuye con la altura a medida que la presión atmosférica va siendo menor, de manera que en los primeros 5 km se encuentra contenida la mitad de su masa total.

33.1.2. Zonas

El aire de la atmósfera está compuesto por una mezcla de gases cuya proporción se mantiene prácticamente constante en las capas bajas, y por una serie de

partículas sólidas y líquidas que se encuentran presentes en suspensión en cantidades variables. En función de la composición del aire, se diferencian dos capas en la atmósfera. Los primeros 80 km reciben el nombre de *homosfera*, ya que el aire está formado por una mezcla prácticamente homogénea de gases. Pero a mayor altura los gases se disponen en capas paralelas en función de sus pesos moleculares y de otros factores, en la región conocida como *heterosfera*.

33.1.3. Composición

La composición del aire de la homosfera se mantiene constante gracias a los continuos movimientos verticales que aseguran su mezcla continua. Las turbulencias impiden que los gases menos pesados, como el hidrógeno y el helio, se disocien de los más pesados y escapen hacia las capas más altas.

La proporción de los distintos gases presentes en el aire de los primeros

25 km de altura de la atmósfera es la que aparece en la tabla adjunta.

COMPOSICIÓN GASEOSA BÁSICA DE LA ATMÓSFERA

Componente	% en volumen	Peso molecular
Nitrógeno (N ₂)	78,084	28,02
Oxígeno (O ₂)	20,946	32,00
Argón (Ar)	0,934	39,88
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,034	44,00
Neón (Ne)	0,0018	20,18
Helio (He)	0,000524	4,00
Ozono (O ₃)	0,0002	48,00
Hidrógeno (H ₂)	0,00005	2,02
Metano (CH ₄)	Trazas	
Criptón (Kr)	Trazas	
Xenón (Xe)	Trazas	

33.1.4. Gases básicos

Los principales componentes son el nitrógeno, el oxígeno, el argón y el dióxido de carbono, que suman entre los cuatro el 99,8% del volumen total del aire. El 0,4% restante está formado por trazas de distintos gases. Tan sólo el oxígeno y el nitrógeno suponen un 98% del volumen, y sus proporciones permanecen constantes en prácticamente toda la heterosfera. El resto de los gases presentan un mayor rango de variación, pero desempeñan importantes funciones en el balance energético de la atmósfera y en los procesos termodinámicos. También están presentes en la atmósfera otros componentes cuya proporción varía enormemente, como son el vapor de agua, los aerosoles, las partículas en suspensión y, en general, todos los produc-

tos y materias considerados como contaminantes, tanto si son de origen natural (erupciones volcánicas, etc.) como si aparecen por causas antrópicas. En este sentido, las previsiones desde 1970 a 2010 son las siguientes:

CO: aumento del 1,2%

COV: aumento del 1,1%

NO_x: aumento del 1,2 al 2,6% según el hemisferio de que se trate

O₃: aumento del 0,8 al 2,1% según el hemisferio de que se trate

CO₂: aumento del 0,6%

CH₄: aumento del 1%

SO₂: reducción, salvo en Oriente Medio, Africa y sur de Asia

33.1.5. Dióxido de carbono

La concentración atmosférica de CO₂ puede presentar variaciones, tanto espaciales como temporales. Las fuentes naturales de emisión de CO₂ a la atmósfera son la respiración, la descomposición natural de la materia orgánica, los incendios por causas naturales, las emanaciones volcánicas y el intercambio entre la atmósfera y los océanos. El CO₂ puede proceder también de fuentes artificiales, teniendo como principales orígenes la utilización de combustibles fósiles y la deforestación.

Las emisiones naturales se encuentran compensadas por la existencia de dos grandes sumideros o pozos, de manera que existe un equilibrio natural en

el intercambio de CO_2 con la atmósfera. Los responsables de la absorción del CO_2 son los océanos y la vegetación. Los océanos pueden comportarse como fuentes o como sumideros en función de la temperatura de las aguas. En general los océanos actúan absorbiendo CO_2 en las latitudes altas, donde la disminución de la temperatura aumenta la solubilidad del CO_2 , y liberándolo en los trópicos.

La vegetación, tanto de las aguas oceánicas como de la superficie terrestre, extrae el CO_2 de la atmósfera para emplearlo como sustrato de la fotosíntesis en la generación de compuestos orgánicos. Parte del CO_2 fijado regresa a la atmósfera como producto de la respiración al degradar compuestos para la obtención de energía, pero el resto permanece retenido durante mucho más tiempo en forma de biomasa. Tanto los océanos como la vegetación pueden actuar absorbiendo o liberando CO_2 , por lo que desempeñan una función reguladora de los flujos de entrada y salida de este gas en la atmósfera. Sin embargo, las emisiones antrópicas de CO_2 han ido aumentando progresivamente y se ha roto el equilibrio, de forma que la concentración actual es un 30 % más alta que antes de la revolución industrial.

Debido a la localización superficial de las principales fuentes de emisión y de los sumideros de CO_2 , y al tratarse de un gas pesado, podrías esperarse grandes variaciones verticales del mismo. En la realidad esto no ocurre, ya que la mezcla turbulenta que existe en la troposfera asegura que al menos en los 20 primeros kilómetros de altura se man-

tenga relativamente constante. Sin embargo, sí que pueden existir variaciones del contenido en CO_2 del aire entre distintas zonas del planeta en función de la localización de las fuentes y de los sumideros. También existe una variabilidad de tipo estacional debida a la fotosíntesis neta de la vegetación durante la época de crecimiento, y a la emisión durante el resto del año. Por otra parte, la absorción de los mares fríos de las regiones polares durante el invierno hace que la concentración en el verano sea menor. Estas variaciones estacionales son mucho más marcadas en el hemisferio norte.

33.1.6. Ozono

El ozono (O_3) es un componente que se encuentra en muy baja concentración a nivel del suelo, pero que aumenta rápidamente con la altura. La mayor parte del ozono contenido en la atmósfera se acumula entre los 15 y los 35 km de altura, pero su máxima concentración se acumula entre los 20 y los 25 km. Las características del ozono y los fenómenos en los que participa son muy distintos en función de la capa atmosférica en la que se encuentre. El ozono troposférico sufre variaciones espaciales debidas a los movimientos verticales y horizontales del aire, mientras que el ozono estratosférico presenta variaciones estacionales que pueden alterar el equilibrio fotoquímico de la atmósfera.

Estos temas sobre el ozono se desarrollan ampliamente en los capítulos específicos, y allí remitimos al lector.

33.1.7. Agua

El vapor de agua es otro componente que presenta grandes variaciones de concentración en la atmósfera. A baja altura la proporción de vapor de agua presente en el aire oscila entre el 0 y el 4 % en volumen, pero disminuye rápidamente con la altura, de tal forma que a los 12 km de altura prácticamente se encuentra casi ausente de la composición del aire.

El agua presente en la atmósfera procede de la evaporación de las aguas superficiales y de la evapotranspiración de las plantas, y llega a las zonas altas de la troposfera gracias a los movimientos verticales del aire. El agua no se encuentra nunca en equilibrio en la atmósfera, y está circulando constantemente en un ciclo cerrado. El agua se evapora en los océanos y continentes, es transportada a latitudes medias, se condensa en forma de nubes y se precipita, regresando de nuevo a la superficie.

La cantidad de agua contenida en el aire es un factor muy importante en el estudio del clima y en meteorología por el gran número de fenómenos en los que interviene: condensación, congelación, sublimación, precipitación, liberación de calor latente en los cambios de estado y balance energético, siendo el principal responsable del efecto invernadero que atrapa la radiación terrestre. Existen diferentes parámetros para cuantificar la cantidad de vapor de agua del aire, de los que los principales son los siguientes:

- *Presión de vapor*: presión parcial del vapor de agua en la atmósfera.

- *Humedad relativa*: cantidad de agua presente en el aire en comparación con la que podría contener en estado saturado en las mismas condiciones de temperatura.

- *Humedad absoluta o densidad de vapor*: masa de vapor de agua por unidad de volumen del aire.

La humedad relativa del aire depende de la temperatura, de forma que las variaciones diarias de temperatura hacen que aumente durante la noche y disminuya durante el día. También existe una variabilidad estacional, siendo mayor la humedad relativa en invierno que en verano, pues las bajas temperaturas hacen que la cantidad máxima de agua que pueda contener el aire sea menor. Por el contrario, la humedad absoluta es máxima en verano, cuando la radiación solar y la evaporación son mayores, y mínima en invierno. Al depender directamente de la temperatura, también pueden existir variaciones locales en la humedad del aire en función de las condiciones meteorológicas.

33.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ATMÓSFERA: ESTRUCTURA TÉRMICA VERTICAL

33.2.1. Bases generales

La temperatura de la atmósfera experimenta grandes variaciones en función de la altitud, y en función de estas variaciones la masa gaseosa que rodea al planeta se puede dividir en cuatro ca-

pas: *troposfera*, *estratosfera*, *mesosfera* y *termosfera*. Estas capas se encuentran separadas por unas zonas de transición que reciben el nombre de *tropopausa*, *estratopausa* y *mesopausa*. Asimismo, existen otras divisiones según otros criterios. Cada una de estas regiones presenta una serie de características propias.

Aunque la distribución de la humedad es también un factor determinante, el equilibrio atmosférico (estabilidad o inestabilidad) depende en gran parte de la distribución vertical de la temperatura.

En ambiente seco, gradientes $> 0,7 - 0,8 \text{ }^\circ\text{C}$ indican inestabilidad

En ambiente húmedo, gradientes $> 0,6 - 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ indican inestabilidad

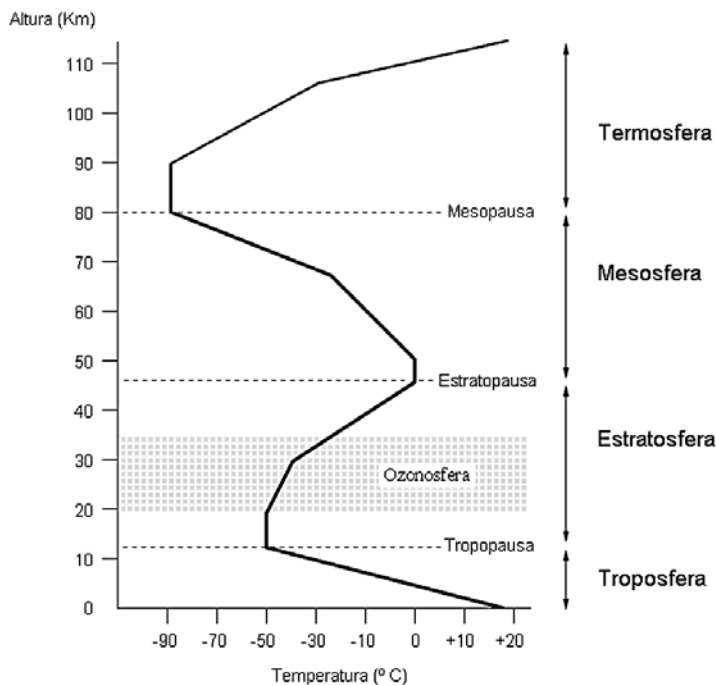
En ambiente seco, gradientes $< 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ indican estabilidad

En ambiente húmedo, gradientes $< 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$ indican estabilidad

También hemos indicado que la atmósfera es un sistema termodinámico, en el que todo desplazamiento vertical sigue un proceso adiabático.

Al subir una partícula de aire, se enfría; al bajar, se calienta. Esto ocurre puesto que la presión desciende al subir la partícula, por lo que esta se dilata. Cuando baja la partícula, la presión aumenta y la comprime, calentándola.

DIVISIÓN DE LA ATMÓSFERA EN CAPAS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA



33.2.2. Troposfera

Es la capa inferior de la atmósfera, y se extiende desde la superficie del planeta hasta los 12 km de altura. La troposfera es la capa de mayor importancia en lo referente a los seres vivos, incluido el hombre, ya que en ella se desarrolla su actividad y tienen lugar la mayor parte de los fenómenos meteorológicos. Esta capa se caracteriza por la existencia de turbulencias y por la continua mezcla de gases. En ella se encuentra contenido el 80 % de la masa total de gases de la atmósfera, y casi la totalidad del vapor de agua, las nubes y los aerosoles.

El cambio de temperatura que se produce en su límite superior, la *tropopausa*, actúa como obstáculo de los procesos convectivos, dificultando el intercambio de materia con la estratosfera.

La temperatura disminuye de forma constante conforme aumenta la altura de la troposfera, a razón de 0,65 °C cada 100 m., como se explica detalladamente en otros apartados de esta obra.

A medida que aumenta la distancia a la superficie terrestre disminuye la temperatura, y a los 12 km de altura, en el límite superior de la troposfera, es de unos 55 °C bajo cero.

Aunque normalmente se sitúa la tropopausa en los 12 km de altura, este valor no es continuo en toda la atmósfera. El espesor de la tropopausa es distinto en función de la latitud, diferenciándose dos o incluso tres capas y las correspondientes discontinuidades entre ellas. En

los trópicos la tropopausa se sitúa entre los 16 y los 18 km de altura, y en los polos entre los 9 y los 10 km. La transición de una a otra tropopausa no es gradual, sino que tiene lugar en forma de bruscas discontinuidades. Estas zonas, situadas entre los 35 y 50 grados de latitud en cada uno de los hemisferios, se caracterizan por la presencia de vientos muy veloces. Entre la tropopausa polar y la tropical se puede diferenciar otra tropopausa entre los 10 y los 12 km de altura. La altura de cada tropopausa tampoco es fija, ya que varía en función de las estaciones, siendo mayor en verano que en invierno, o incluso de un día a otro.

33.2.3. Estratosfera

Comprende la atmósfera situada entre los 12 y los 50 km de altura. En los 20 primeros km la temperatura permanece prácticamente constante. A partir de los 30 km de altura la temperatura aumenta debido a la presencia abundante de ozono, que absorbe la radiación solar ultravioleta, alcanzando en la estratopausa la temperatura de 0 °C. El ozono está presente en la atmósfera desde el nivel del suelo hasta casi 100 km de altura, pero la máxima concentración se encuentra en la capa de aire comprendida entre los 20 y los 25 km, que recibe el nombre de *ozonofera*. A pesar de que en la estratopausa la concentración de ozono no es tan alta como en la ozonofera, la menor densidad del aire hace que con una menor absorción de la radiación se localice allí el máximo de temperatura de la estratosfera.

En verano la temperatura aumenta con la altura en prácticamente toda la estratosfera, existiendo una capa de aire frío sobre la tropopausa a $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En invierno existen grandes variaciones en función de la latitud.

Sobre la tropopausa ecuatorial y tropical se encuentran las masas de aire más frío, a una temperatura de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, y por encima de los $50\text{-}60^{\circ}$ de latitud norte existe una zona en la que la temperatura se mantiene prácticamente constante, en torno a los $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La baja temperatura del aire situado sobre la tropopausa evita que las corrientes de convección procedentes de la troposfera entren en la estratosfera. Así, a diferencia de la troposfera, los movimientos verticales de gases están muy limitados. Sin embargo, existen fuertes corrientes horizontales de aire.

El contenido en vapor de agua de la estratosfera es muy bajo, y no existen precipitaciones. Por el contrario, las concentraciones de hidrógeno y de helio son superiores a las de la troposfera, ya que la densidad del aire es más baja.

33.2.4. Mesosfera

Se sitúa entre los 50 y los 80 km de altura. En la mesosfera la presencia de ozono va desapareciendo rápidamente con la altura, lo que hace que la temperatura disminuya desde los $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ de la estratopausa hasta los $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ de la mesopausa.

La mesosfera se compone de bajas concentraciones de nitrógeno, hidróge-

no y helio, que se encuentran en forma ionizada por la acción de los rayos ultravioletas.

33.2.5. Termosfera

Se extiende desde los 80 km de altura hasta el límite difuso entre la atmósfera y el espacio situado a más de 1.000 km de distancia de la superficie terrestre, pudiendo dividirse en dos subzonas: la propia *termosfera*, hasta la termopausa, a 600 km, y la *exosfera*, que comprende desde la termopausa hasta el exterior.

La densidad de esta capa es muy baja, y principalmente se compone de oxígeno y nitrógeno en estado molecular o atómico. A partir de la mesopausa la temperatura aumenta de forma drástica y continua debido a la absorción de radiación solar ultravioleta por los átomos de oxígeno y nitrógeno. A 500 km de altura la temperatura es ya superior a los $1.500\text{ }^{\circ}\text{C}$; sin embargo, hablar de temperatura en este caso carece de sentido, ya que el número de partículas presentes es muy escaso y la temperatura se considera como una propiedad de la materia.

33.2.6. Estabilidad atmosférica

Según el gradiente térmico de la atmósfera y el gradiente adiabático seco, se pueden definir las tres situaciones de estabilidad atmosférica:

- *Estable*: El descenso vertical de la temperatura es inferior al gradiente adiabático seco.

- *Inestable*: El descenso vertical de la temperatura es superior al gradiente adiabático seco.
- *Indiferente*: El descenso vertical de la temperatura es igual al gradiente seco.

Estas condiciones teóricas no se cumplen muchas veces, pues existen diversos fenómenos relacionados con la atmósfera que alejan las condiciones de adiabatismo, como las siguientes:

- Inversiones térmicas: Confieren una gran estabilidad atmosférica.
- Acción del suelo de despedir o de tomar calor: Influye mucho sobre la temperatura del aire.
- Presencia de nieblas espesas: Confiere estabilidad.
- Presencia de nubes: Confiere estabilidad.
- Intercambios de calor: Condensación, evaporación, hielo y nieve, etc.
- Humedad atmosférica: Reduce las variaciones térmicas.
- Movimientos descendentes: Subsidiencia, que comprime la masa de aire y confiere estabilidad a la atmósfera de la zona.
- Desplazamiento por encima de la zona de grandes masas de aire, frías o calientes: Provoca cambios térmicos y de las turbulencias en las capas atmosféricas inferiores. Si la masa es fría y la capa inferior caliente, provocará inestabilidad, si la de arriba es caliente y la de abajo fría, la situación será de estabilidad.

- Desplazamiento similar pero de dos masas de aire, primero una fría y después una caliente de desplazamiento lento: se puede formar una capa de inversión.

33.2.7. La temperatura y la superficie terrestre

En otro orden de cosas, la topografía y el relieve influyen considerablemente sobre el estado térmico de la atmósfera.

En los valles se acumulan con frecuencia masas de aire frío en las capas bajas atmosféricas, lo que provoca la formación de nieblas, que acentúan el enfriamiento. Esta situación genera muchas veces situaciones de inversión térmica, con la consiguiente estabilidad atmosférica y los consiguientes problemas de concentración de la contaminación atmosférica, si existe.

Por otra parte, los movimientos de las masas de aire en las zonas montañosas (brisas), suelen ser provocados casi totalmente por diferencias térmicas verticales.

En las costas, se explica en otros apartados que gran parte de la existencia de las brisas costeras está provocada por la diferencia térmica de las masas de aire ubicadas sobre el mar y sobre la tierra, respectivamente.

Además, se debe tener en cuenta que las corrientes marinas transportan calor de unos lugares a otros, enfriando masas de aire en contacto con ellas en unas zonas y calentándolas en otras, provocan-

do situaciones térmicas atmosféricas no acordes con las que corresponderían según la latitud.

Las zonas urbanas, a su vez, constituyen islotes de calor, con perfiles de temperatura diferentes de los de su entorno. Crean corrientes ascendentes y provocan situaciones de inestabilidad atmosférica hasta altitudes de 800 - 1.000 m.

33.2.8. Evolución de la temperatura

A nivel planetario, las zonas más cálidas se ubican en el entorno del ecuador (en concreto, a 10°N), siendo la temperatura media anual algo más alta en el hemisferio norte.

La temperatura desciende a medida que nos desplazamos desde el ecuador hacia los polos, hecho mucho más acentuado en invierno. Además, la diferencia de temperatura entre los meses más cálidos y más fríos se acentúa si seguimos ese mismo desplazamiento, que por otra parte es más patente en los continentes que el mar.

Desde un punto de vista fundamentalmente agrario, diversos autores, como *Papadakis* y otros, han establecido clasificaciones de los diferentes regímenes térmicos que existen en el planeta, describiendo las características mensuales, estacionales y anuales de cada uno de ellos.

A corto plazo, y, en concreto, a nivel diario, la evolución de la temperatura está marcada por la intensidad de la radiación solar que se recibe. Lógicamente, la temperatura irá subiendo a medida que

avanza el día, hasta dos o tres horas después de alcanzar el sol su máxima altura, empezando después a descender el resto del día y a lo largo de la noche hasta alcanzar los mínimos, que suelen presentarse a la salida del sol, en que empieza el nuevo ciclo.

La temperatura diaria atmosférica oscila según las pautas indicadas, aunque esto no es totalmente exacto al incidir sobre ella una serie de factores externos, como son las condiciones de equilibrio atmosférico, ya citadas, la limpieza del cielo (un cielo despejado implica máximos de temperatura mayores y mínimos más bajos que un cielo cubierto), la presencia de mar o de continente en la superficie terrestre (sobre el mar las oscilaciones térmicas diarias son inferiores que sobre el continente, y los máximos se presentan antes (una o dos horas, en concreto) o el relieve de la superficie.

33.3. LAS CAPAS BAJAS DE LA ATMÓSFERA

El aire de las capas bajas de la atmósfera es el que presenta una composición gaseosa más uniforme, aunque pueden existir en él pequeñas cantidades de gases procedentes de las emisiones de los volcanes y de las industrias que son considerados como contaminantes. Entre estos, los más importantes son el monóxido de carbono, el dióxido de azufre, el monóxido de nitrógeno, el dióxido de nitrógeno y el amoníaco.

Las capas bajas de la atmósfera se caracterizan también por contener gran

cantidad de polvo y aerosoles, procedentes de fuentes de emisión tanto naturales como artificiales. El polvo está formado por partículas sólidas en suspensión, y los aerosoles se definen como la dispersión de materia condensada. El polvo procede principalmente del viento que barre los desiertos y las estepas, que pone en suspensión gran cantidad de materia del suelo. Esta es la razón de que el aire procedente de las regiones tropicales sea el que mayor carga de polvo contenga.

Otras fuentes de emisión de partículas sólidas a la atmósfera son los incendios, las erupciones volcánicas y las industrias. El tiempo de permanencia del polvo en el aire depende directamente del tamaño de las partículas que lo componen, en función del cual van a sedimentar de forma más o menos rápida. La cantidad de polvo presente en el aire varía de forma significativa en función de la altura, las condiciones meteorológicas y de la presencia de fuentes cercanas de emisión (para ampliar este tema consúltese el capítulo correspondiente de esta misma obra).

En el aire también se encuentra una gran cantidad de sales en suspensión procedentes de la evaporación de la espuma de los océanos, y de materia orgánica, como granos de polen y microorganismos.

La presencia de gases como el oxígeno, el nitrógeno y el dióxido de carbono en el aire de las capas bajas, es fundamental para el desarrollo de las funciones vitales de los seres vivos. El oxígeno es necesario para realizar las

funciones de respiración, combustión y descomposición de la materia orgánica. El nitrógeno del aire no puede ser captado directamente por la vegetación. Solamente las bacterias pueden captarlo y utilizarlo como nutriente, enriqueciendo el suelo con compuestos nitrogenados que van a ser absorbidos por el sistema radicular de las plantas. La presencia de CO_2 también es fundamental, ya que es uno de los sustratos de la fotosíntesis y la principal fuente de carbono de las plantas en la síntesis de los compuestos orgánicos.

El aire que se encuentra retenido en el suelo forma parte también de la atmósfera, aunque las proporciones de los gases que lo forman son algo diferentes debido a los procesos biológicos que desarrollan los organismos edáficos. Las bacterias realizan una absorción de oxígeno y nitrógeno, y se produce una gran cantidad de dióxido de carbono producto de la descomposición de la materia orgánica. La composición del aire va a ser distinta en función de la profundidad, ya que cuanto mayor es ésta más difícil se hace el intercambio de aire con la atmósfera exterior. La presión atmosférica es el factor que determina el intercambio de aire entre las capas bajas de la atmósfera y el suelo. Cuando disminuye se produce liberación del aire del suelo, y cuando aumenta penetra en él el aire del exterior. La renovación de la atmósfera edáfica también está favorecida por la radiación solar, que calienta el aire más cercano a la superficie y provoca su expansión, o por las precipitaciones, que llenan los poros del suelo de agua y hacen que expulsen el aire que contienen.

Este tema se desarrolla ampliamente en el capítulo correspondiente.

33.4. FÍSICA Y TERMODINÁMICA ATMOSFÉRICA

33.4.1. Bases generales

En estos primeros años del siglo XXI estamos volcados en el tema de la energía en todas sus formas: las *limpias* y renovables y las *sucias* y no renovables, y en todo lo que esto conlleva.

El desarrollo humano necesita energía para mantener y mejorar la calidad de vida: Calor transformado en energía para los cultivos, energía eléctrica, energía mecánica, etc.

La Termodinámica se ocupa ahora de todo lo relacionado con las transformaciones de la energía.

Los sistemas se modifican al cambiar los valores de las magnitudes que, en nuestro caso, básicamente son la temperatura, el volumen, la presión y la masa. Así, el cambio será patente en los estados sólido, líquido o gaseoso (vapor) del agua presente en el medio ambiente.

Las transformaciones y cambios de estado pueden ser reversibles, irreversibles, abiertos o cerrados, en función de si existe o no equilibrio entre la temperatura y la presión, o de si el estado final del sistema es distinto o igual al inicial.

Si ya tratamos, dentro de estos conceptos, del aire atmosférico, debemos considerarlo, con la ciencia meteoroló-

gica, como una mezcla de dos gases perfectos: el aire seco y el vapor de agua. Ambos aportan sus características específicas. El primero a su vez es una mezcla de varios componentes naturales gaseosos, sólidos y líquidos, que muchas veces va acompañado de componentes no naturales generados en las actividades humanas, como son los agentes contaminantes. El segundo componente, el vapor de agua, se presenta cambiando de estado con facilidad, absorbiendo o liberando calor en cada uno de estos cambios.

Al mezclarse el aire seco y el vapor de agua, crean el medio para que los seres vivos terrestres puedan vivir, pues la respiración en los animales, y la transpiración y la evapotranspiración en plantas y suelos, son procesos condicionantes de la vida.

Las leyes y los procesos termodinámicos son, pues, fenómenos que rigen y condicionan gran parte de los procesos climáticos, siendo fundamentales en los procesos bióticos ligados al clima.

33.4.2. Energía y trabajo. Casos específicos

La energía está formada por una estructura discontinua, y es emitida y absorbida por los *cuantos* (un *cuanto* es la cantidad mínima de energía que puede transportar una radiación).

Los gases se retraen al ceder calor, es decir, al enfriarse, y se dilatan al absorber calor. Cuando se dilatan aumentan su volumen. Si una masa de gas de su-

perficie S y volumen V se dilata un espacio dl, el aumento de volumen será: $dV = Sdl$.

Si el gas está sometido a una presión P con una fuerza F ejercida sobre él, se-
rá, $P = \frac{F}{S}$, por lo que tendremos, al mul-
tiplicar: $PdV = Fdl$

Pero, a su vez, Fdl es el trabajo dW que realiza el gas al dilatarse, con lo que obtenemos $dW = PdV$

Si el cambio de volumen en la expansión del gas es de V_1 a V_2 , tendremos:

$$W_{1,2} = \int dW = \int_{V_1}^{V_2} PdV$$

El trabajo que realiza un gas al retraerse o al expandirse depende de las trayectorias que haya tenido desde su situación inicial a la final, que pueden ser infinitas al no tratarse de masas rígidas, por lo que $dW = PdV$ no es una diferencial exacta.

$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV = P(V_2 - V_1)$$

El trabajo reversible puede presentarse en situaciones específicas como las siguientes:

a) *A presión P constante (isobárica)*, tenemos $P = cte.$ y $dP = 0$

Pero si T_2 es la temperatura final y T_1 es la temperatura inicial de la masa de gas, sabemos que:

$$T_2 - T_1 = \frac{P}{R} (V_2 - V_1)$$

Siendo R una constante específica del gas, por lo que

$$W = R (T_2 - T_1)$$

Si el calor total es Q, será

$$Q = c_p (T_2 - T_1),$$

siendo c_p el calor específico (verdadero) a presión constante. Y además,

$$dQ = c_p dT = \gamma c_v dT.$$

b) *A volumen V constante (isócara)*, tenemos $V = cte$ y $dV = 0$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV = 0$$

$Q = c_v (T_2 - T_1)$, siendo c_v el calor específico a volumen constante.

En este caso no existe trabajo exterior, y el calor, absorbido o desprendido, según el caso, solo hace variar la energía interna del gas.

Así, será:

$$dQ = c_v dT$$

c) *A temperatura constante (isoterma)*, será $T = cte$ y $dT = 0$

$dW = PdV$, pero como $PV = RT$, donde T es la temperatura absoluta, tendremos:

$$P = \frac{RT}{V} \text{ y } dW = \frac{RT}{V} dV, \text{ por lo que}$$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{RT}{V} dV = RT \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$$

El calor será $Q = AW = ART \ln \frac{V_2}{V_1}$, siendo A el equivalente térmico de la unidad de trabajo, de valor $1/427 \text{ Kcal. (kgm)}^{-1}$

$$y \quad dQ = PdV = dW$$

La energía interna será constante, pues la temperatura lo es.

d) A calor constante (adiabática), tenemos $Q = \text{cte}$ y $dQ = 0$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV \text{ y } PV^\gamma = P_1V_1^\gamma, \text{ siendo}$$

$$c_p dT = VdP \quad \text{y} \quad c_v dT = -PdV$$

c_p = Calor específico a presión constante

$$\text{Por otra parte, } d \frac{P}{P} + \gamma \frac{dV}{V} = 0, \text{ y si}$$

se integra, $\ln P + \gamma \ln V + \text{cte}$, por lo que $PV^\gamma = \text{cte}$, que es la ecuación de *Poisson*.

También podemos indicar que en un régimen permanente la temperatura T es independiente de tiempo, con lo que será válida la ecuación de *Laplace*: $\nabla^2 T = 0$

Si la fuente de calor uniformemente repartida se encuentra en el medio considerado, y siguiendo en el régimen permanente, podemos establecer otra forma de la ecuación de *Poisson*:

$$\nabla^2 T + \frac{Q_m}{K} = 0$$

∇ = Laplaciana

Q_m = Cantidad de calor producida por unidad de tiempo y por unidad de volumen

K = Conductividad térmica

En un proceso adiabático, el calor específico (c_c) es $c_c = 0$, pues el calor contenido en la masa de gas es constante e independiente de la temperatura.

Por lo que se refiere al aire, objeto final de estos epígrafes, debemos tener en cuenta que el calor específico del aire seco es prácticamente constante según la temperatura, siendo

$$c_{p_{\text{aire seco}}} = 0,24 \text{ cal / g} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{v_{\text{aire seco}}} = 0,17 \text{ cal / g} \cdot \text{K}^{-1}$$

Además, hemos de indicar que la mayoría de los procesos atmosféricos tienen variaciones de presión, temperatura y volumen, y en este caso casi todos son de tipo adiabático.

33.4.3. Balances de energía

El balance energético de un cuerpo es la suma algébrica de los flujos energéticos que intercambia con su entorno, es decir, ese balance se puede considerar como la variación de su energía interna.

Aplicado a problemas climatológicos en relación con el medio, si analizamos esos flujos energéticos en lo que se refiere a una cubierta vegetal o a un suelo desnudo, será:

$$\rho c_h \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = E + \phi_s + \phi_h + L\phi_w, \text{ siendo}$$

ρ = Masa específica

c_h = Capacidad térmica másica

T = Temperatura

E = Radiación neta

ϕ_s = Densidad de flujo de calor en el suelo por conducción

ϕ_h = Densidad de flujo de calor convectivo en el aire

L = Calor latente de vaporización del agua

ϕ_w = densidad de flujo convectivo del vapor de agua

$\rho c_h \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)$ = Variación del calor almacenado en la cubierta vegetal o en el suelo desnudo.

Si no existe variación de calor, estaremos en situación de equilibrio térmico, por lo que será entonces

$$E + \phi_s + \phi_h + L\phi_w = 0$$

que es la ecuación del balance de energía en un instante dado. Si queremos integrar el balance de energía en un plazo dado (día, noche, o incluso más tiempo), se sustituyen las densidades de flujo de calor por cantidades de calor, y la radiación neta por la exposición energética neta, quedando entonces:

$$H + Q_s + Q_h + LQ_w = 0 \quad , \text{ siendo}$$

H = Exposición energética neta

Q_s = Cantidad de calor en el suelo (de conducción).

Q_h = Cantidad de calor en el aire (convección).

L = Calor latente de vaporización del agua.

Q_w = Cantidad de calor en el vapor de agua (convección).

La radiación neta efectiva se obtiene de: $E_e = E_D - E_O$

donde

E_e = Radiación neta (efectiva) de onda larga.

E_D = Contrarradiación de onda larga.

E_O = Radiación de onda larga emitida por la cubierta vegetal o por el suelo.

Por otra parte, $E_o = \epsilon \sigma T_s^4$

donde

ϵ = Emisividad en onda larga, que para vegetación y suelo normales oscila entre 0,90 y 1 (este último caso corresponde al cuerpo negro).

σ = Constante de *Stefan-Boltzmann* (es $5,6698 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^{-4}$).

T_s = Temperatura efectiva de radiación en la superficie.

33.4.4. Ecuación de estado de los gases (perfectos). Ley de Dalton

Cuando se estudia el aire atmosférico, se debe tener en cuenta que es una mezcla de gases sometidos a las leyes de la física.

Por otra parte, ese aire atmosférico contiene vapor de agua, hecho que determina su intercambio con la cubierta vegetal, por lo que su presencia y concentración es un factor vital para muchos seres vivos.

En conjunto, la fase gaseosa del aire y su vapor, menos en el caso en que haya saturación, es decir, salvo si existe equilibrio entre la fase gaseosa y la fase líquida del agua, se consideran gases perfectos.

Así pues, el aire cumple la ecuación de estado de los gases perfectos, que asocia el volumen del gas, su temperatura y su presión si existe equilibrio térmico:

$$PV = \frac{m}{M} RT$$

siendo

P = Presión del gas.

V = Volumen de la masa de gas.

m = Masa del volumen V del gas.

M = Masa molar del gas: para el aire seco es 0,029 kg/mol y para el vapor de agua es 0,018 kg/mol.

R = Constante de los gases perfectos, de valor 8,314 J/K·mol⁻¹.

T = Temperatura del gas.

Si n = Número de moles del gas, es

$$n = \frac{m}{M}$$

Por otra parte, $\rho = \frac{m}{V}$, siendo

ρ = Masa volúmica del gas (en kg/m³).

$$\text{Será entonces } \rho = \frac{MP}{RT}$$

ρ oscila, normalmente entre 1,29 kg/m³ si la presión es 1013,25 hPa, a 0 °C y si el aire está seco, y 1,19 kg/m³ si estamos a 25 °C.

Según la *Ley de Dalton*, la presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales de los gases que constituyen la mezcla, siendo la presión parcial la que tendría uno de los gases si ocupara el volumen V a la temperatura T.

Así, será:

$$P = \sum_i P_i \quad PV = \left(\sum_i \frac{m_i}{M_i} \right) RT,$$

partiendo de que $P_i V = n_i RT$

Al final se llega a que:

$$P_A = P_a + P_v$$

$$P_A = P_a + e$$

siendo

P_a = Presión parcial del aire seco.

P_v = Presión parcial del vapor de agua.

P_A = Presión del aire atmosférico.

e = Tensión parcial del vapor de agua o presión parcial del vapor de agua en el aire.

Esta última ecuación, como ya hemos indicado, es válida salvo en situaciones de saturación, es decir, no se puede aplicar cuando existe equilibrio entre las fases líquida y gaseosa del agua.

33.4.5. El vapor de agua en la atmósfera: vaporización y saturación. Ecuación de Clapeyron-Clausius

Ya hemos indicado en otro apartado de este capítulo que el agua se presenta en el aire atmosférico en cualquiera de sus tres estados físicos en función de las condiciones existentes de temperatura y presión, pasando de uno a otro lógicamente absorbiendo calor o despidiéndolo en función del sentido del paso al estado siguiente.

El agua tiene un calor latente de evaporación o calor másico de vaporización L de valor $L_v = 2,501 \text{ MJ/kg}$ a 0°C .

Asimismo tiene un calor latente de fusión $L_f = 0,334 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$.

Con estas bases vemos que para evaporarse el agua desde los planos de agua como el mar, los ríos, los embalses o los lagos, de una cubierta vegetal o del suelo desnudo, necesita una fuerte cantidad de energía en forma de calor, que será tomado del aire o de los propios planos de agua.

Si se trata de una condensación, se desprende calor, que será tomado por el aire.

La tensión de vapor en equilibrio con el agua líquida o tensión de vapor saturante solo depende de la temperatura, y las variaciones en función de esta última se pueden representar mediante la fórmula de *Clapeyron-Clausius*.

$$L = T(V_v - V_\ell) \frac{de}{dT}$$

L = Calor másico de vaporización (calor latente de vaporización).

T = Temperatura absoluta.

V_v = Volumen másico de la fase gaseosa, en m^3/Kg .

V_ℓ = Volumen másico de la fase líquida, en m^3/Kg .

e = Tensión de vapor en equilibrio.

Si consideramos el vapor de agua como un gas perfecto, y si despreciamos V_ℓ , podremos tener

$$V_v = \frac{1}{\rho_w} = \frac{RT}{M_w \cdot e} \text{ siendo}$$

ρ_w = Masa específica del vapor de agua.

M_w = Masa molar del agua.

ya que antes hemos indicado que

$$\rho = \frac{m}{W} = \frac{MP}{RT}$$

combinando las dos ecuaciones, podemos tener:

$$\frac{de}{e} = L \frac{M_w dT}{RT^2}$$

A partir de esta fórmula, y considerando $L = \text{cte}$ (a una temperatura dada),

$$\ln e(T) = a - \frac{b}{T}$$

y si L decrece con la temperatura, *Dupré* obtuvo la fórmula

$$\ln e(T) = a - \frac{b}{T} - c \ln T$$

donde a , b y c pueden ser los coeficientes de *Alt*, quedando así la ecuación

$$\ln e(T) = 55,592 - \frac{6821,520}{T} - 5,135 \ln T$$

Si se quieren aplicar fórmulas simplificadas, las de más uso son:

$$\log \left(\frac{e}{e_0} \right) = \frac{a T}{b + T}$$

$$e(T) = 6,107 \cdot 10^{7,45T/(235+T)} \text{ (Magnus)}$$

$$e(T) = 6,107 \cdot 10^{7,5T/(237,3+T)} \text{ (Tetens)}$$

$$e(T) = 6,107 \left[1 + \sqrt{2} \operatorname{sen}\left(\frac{T}{3}\right) \right]^{8,82} \quad (\text{Alt})$$

siendo

$$e_0 = 6,107 \text{ hPa} \quad (\text{es e a } 0^\circ \text{C})$$

33.4.6. Primer Principio de la Termodinámica

En la atmósfera, al tratarse esta de una mezcla de gases sometida a variaciones continuas de temperatura, presión y volumen, es totalmente válido el Primer Principio de la Termodinámica, que es una forma del principio de conservación de la energía aplicado a procesos que se desarrollan a temperatura constante. El Principio establece que la energía se conserva siempre, independientemente de los cambios intermedios que existan en un proceso y teniendo en cuenta la energía interna U , de manera que $\Delta U = Q - W$, y se podrá escribir que $dQ = dU + dW$

Este proceso ya se indicó en otro apartado de este mismo capítulo, pudiéndose entonces enunciar el Principio así:

La variación de la energía interna U de un sistema es igual al calor Q desprendido o absorbido por el sistema menos el trabajo W realizado por el sistema o sobre el sistema.

33.4.7. Ley de Joule e igualdad de Mayer

La energía interna de un gas perfecto solo depende de la temperatura, siendo in-

dependiente de la presión y del volumen.

Si tenemos transformaciones abiertas isotermas, la energía interna no varía.

Así pues,

$$\frac{dU}{dP} = 0$$

$$\frac{dU}{dT} = 0$$

$$\frac{dU}{dP} = \frac{dU}{dT}$$

y se puede expresar la *Ley de Joule*:
 $dU = c_v dT$,

$$\text{siendo } c_p = \frac{dQ}{dT} \quad \text{y} \quad c_v = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT}$$

Si llamamos H a la *entalpía* o energía indicada por $H = U + P \cdot V$, esta será una función de estado, y si tenemos una transformación reversible, será:

$$dH = dU + PdV + VdP = dQ + VdP, \text{ por lo que el } \textit{Primer Principio de la Termodinámica} \text{ lo podremos expresar así: } dQ = dH - VdP$$

Mayer obtuvo la igualdad o relación de su nombre indicando que

$$dQ = c_p dT - VdP, \text{ considerando } P = \text{cte} (dP = 0) \text{ y con valores de } c_p \text{ (o de } c_v) \text{ ya indicados en otros apartados de este capítulo.}$$

Estas fórmulas y el Primer Principio de la Termodinámica tienen aplicaciones múltiples en materia climática y de estudios de contaminación atmosférica en función de las condiciones que se establezcan: isobaras, isotermas, isócoras o adiabáticas, ya explicadas en otros

apartados.

33.4.8. Evolución de la temperatura de las partículas atmosféricas

Cuando se desplaza una partícula atmosférica, si le aplicamos el Primer Principio de la Termodinámica $dQ = dU + dW$, vemos que la energía que pueda recibir en forma de calor la consumirá en realizar un trabajo y en aumentar su energía interna.

Utilizando la *Ley de Joule* y la *Igualdad de Mayer*, y considerando que estamos en un proceso reversible,

$$dU = c_v dT$$

$$dW = PdW \quad dW = RT \left(\frac{dT}{T} - \frac{dP}{p} \right)$$

$$V = \frac{RT}{P}$$

y finalmente,

$$dT = \frac{dQ}{c_p} + \frac{RT}{Pc_p} dP,$$

de donde se puede obtener la variación de la temperatura de una partícula de aire seco.

33.4.9. El aire atmosférico

El aire seco

Si una partícula de aire seco asciende en la atmósfera, se produce una expan-

sión adiabática, en la que $dP < 0$, y se enfría, es decir, $dT < 0$.

Si desciende existe una compresión, en la que $dP > 0$, y se calienta, es decir, $dT > 0$.

La variación de temperatura se obtendrá del gradiente adiabático seco

$$\gamma = - \frac{\Delta T}{\Delta Z},$$

y es del orden de 1 °C/100m,

siendo ΔZ la variación de la altitud.

Hemos de recordar lo indicado en otros epígrafes de este capítulo, en el sentido de que el aire atmosférico es una mezcla de un gas perfecto, que es el aire seco, con otro que es el vapor de agua, resultando así el aire húmedo.

El aire húmedo

El aire húmedo tiene una *humedad*

específica $Q = \frac{m_w}{m_w + m_a}$, donde

Q = Concentración másica del vapor de agua en el aire.

m_w = Masa del vapor de agua.

m_a = Masa del aire seco.

La *relación de mezcla del aire húmedo*

$$\text{es } r = \frac{m_w}{m_a}$$

r y Q son cifras próximas, pues m_w es pequeño respecto de m_a y a veces se puede despreciar.

También se puede escribir que

$$r = 0,622 \frac{e}{P - e},$$

siendo

e = Presión del vapor de agua

Si M_w = Masa molar del vapor de agua

M_a = Masa molar del aire seco ,

se puede señalar que

$$r = \frac{M_w}{M_a} \cdot \frac{e}{P - e}$$

y muy aproximadamente, $r = 0,622 \frac{e}{P}$

La *humedad relativa* es

$$H_r = 100 \frac{e_a}{e(T_a)}, \text{ donde}$$

H_r = humedad relativa

e_a = Tensión de vapor

T_a = Temperatura

$e(T_a)$ = Tensión de vapor saturante a la temperatura T_a .

Si el aire esta seco, $H_r = 0\%$, pues $e_a = 0$

Si el aire está saturado, $H_r = 100\%$, pues $e_a = e(T_a)$.

Si se considera el aire húmedo como un gas perfecto, su ecuación de estado será

$P = \rho_h R_a T$, siendo

ρ_h = Densidad del aire húmedo.

R_a = Constante específica del aire húmedo.

P = Presión total.

T = Temperatura.

El aire saturado

Ya hemos indicado en otros epígrafes que el aire saturado es una mezcla de aire seco con vapor de agua saturante. Este último estará en equilibrio con el agua en suspensión presente en la atmósfera en fase líquida (gotitas) o en fase sólida (pequeños cristales de hielo).

Si desaparece el equilibrio, o bien aumenta el agua en cualquiera de sus fases, con lo que se está formando la nube, o bien disminuye, con lo que va desapareciendo esa nube.

Cuando los productos de condensación –gotitas de agua o cristalitas de hielo– están en suspensión en el interior de partículas de aire saturado que están en movimiento ascendente, el gradiente térmico vertical del aire saturado es inferior al gradiente adiabático vertical del aire seco, pues el calor de condensación que se libera al expandirse el aire limita el enfriamiento de esas partículas de aire. En esta línea, el gradiente adiabático saturado es

$$\gamma = - \frac{\Delta T_s}{\Delta Z}, \text{ utilizándose como valor}$$

real de ese gradiente adiabático saturado la fórmula

$$\gamma_s \approx \gamma \frac{1 + \frac{L_v}{R_a} \frac{r_s}{T}}{1 + \frac{L_v^2 \epsilon r_s}{R_a C_{pa} T^2}}$$

siendo

γ = Gradiente adiabático seco

γ_s = Gradiente adiabático saturado

L_v = Calor latente de condensación (o de evaporación)

R_a = Constante específica del aire seco.

r_s = Relación de mezcla de saturación.

T = Temperatura de la partícula de aire.

ϵ = Módulo de compresión adiabática.

C_{p_a} = Calor específico (aire seco).

En otro apartado de este epígrafe se ha tratado del gradiente adiabático seco y del enfriamiento adiabático del aire seco en un ascenso o descenso verticales (1 °C/100m).

Ahora podemos definir el gradiente vertical de temperatura como la diferencia de temperaturas en una vertical de la atmósfera en sus capas bajas según la expresión

$$\alpha = - \frac{\partial T'}{\partial z}, \text{ siendo}$$

α = Gradiente vertical de temperatura.

T' = Temperatura (diferencia o variación).

z = Altitud (diferencia o variación).

En estas zonas bajas de la atmósfera (troposfera) α suele tener un valor de 0,65 °C/100m.

Al llegar a unos 11 km sobre la Tierra (en las latitudes medias), se alcanzan los -50 y -60 °C en la tropopausa, siendo la evolución térmica a partir de aquí totalmente diferente.

La estratosfera, desde la tropopausa,

tiene primero temperaturas constantes con la altura, y más arriba un aumento constante, que en el límite superior (estratopausa) es parecida a la del nivel del mar.

Naturalmente, en ambas capas de la atmósfera existen variaciones estacionales y según la latitud.

33.4.10. La condensación

Para que exista una condensación, es necesaria una situación previa de saturación.

Las partículas de aire atmosférico citadas en los anteriores epígrafes de este capítulo, con sus relaciones de mezcla del aire húmedo r y del aire saturado r_s , necesitarán primero que $r < r_s$, y después o bien se presenta un proceso en el que se produzca una disminución de r_s a humedad constante (o mejor, a cantidad constante del vapor de agua del aire), o bien se produce un aumento de ese vapor de agua en las partículas, a r_s constante.

Si r_s se reduce hasta el punto en que la partícula está saturada, ese punto se denomina *punto de rocío*.

En el límite de la saturación será $T = T_d$, siendo T_d = Temperatura del punto de rocío.

Si T baja debajo de T_d en el enfriamiento isobárico, r_s disminuye, y aparecerá una condensación del excedente del vapor de agua.

Por esta razón se forma el rocío al amanecer, y muchas nieblas nocturnas.

Si hay nieblas de advección, aparecerán condensaciones del vapor de agua.

Si hay hielo y saturación después de un enfriamiento isobárico, tendremos la temperatura del *punto de helada* T_f .

Será entonces

$$r = r_i(p, T_f)$$

$$e = e_i(T_f)$$

Si la partícula de aire se satura al ascender adiabáticamente, lo hace en un punto (p_c, T_c) . Si asciende, llegamos al punto de condensación (c_p, T_c) .

CAPÍTULO 34

LOS FACTORES METEOROLÓGICOS Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

34.1. BASES GENERALES

Ya hemos visto en otros capítulos de esta obra que los factores y las condiciones meteorológicas están influidos por *elementos externos* como la topografía o las grandes masas superficiales de agua, y por *elementos internos*, extraños o no, como ocurre con las capas bajas de la atmósfera de las zonas industriales y urbanas y de sus áreas de influencia, afectadas por la contaminación atmosférica que originan (elementos extraños), o con los vientos y corrientes (elementos naturales).

Los agentes contaminantes de origen industrial o urbano y sus mezclas y reacciones químicas y fotoquímicas, tienen así una relación directa con las condiciones meteorológicas y con sus factores incidentes, de modo que unas veces los factores meteorológicos catalizan la evolución de esos contaminantes, otras veces los dispersan y otras veces provocan sinergismos y transformaciones complejas.

Los agentes contaminantes atmosféricos se emiten en ciudades e industrias de forma irregular en el tiempo diario y estacionalmente, a causa de los cambios de las condiciones meteorológicas, por las jornadas laborales y de ocio y por las modificaciones en volumen y composición de las propias emisiones.

Se puede afirmar lo siguiente:

- El tiempo inestable y turbulento favorece la dispersión de los contaminantes.
- Las corrientes verticales favorecen la dispersión de los contaminantes.
- El tiempo de calmas meteorológicas favorece la concentración de los contaminantes.
- Las inversiones térmicas favorecen la concentración de contaminantes.
- Ciertos gradientes térmicos en condiciones de humedad específicas, pueden favorecer la estabilidad o la inestabilidad atmosférica.

- Las ciudades modifican la composición del aire urbano.
- Las ciudades modifican el equilibrio térmico.
- Las ciudades modifican la humedad del aire.
- La topografía urbana modifica las condiciones climáticas respecto de su entorno.
- La topografía de las industrias modifica las condiciones climáticas respecto de su entorno.
- Las industrias emisoras de contaminantes modifican la composición del aire de su entorno, su equilibrio térmico y la humedad del aire.
- La presencia de agentes contaminantes modifica el clima urbano, la penetración de la radiación solar y otros factores climáticos.
- Lo mismo ocurre con las industrias y las zonas industriales.
- En general, los factores meteorológicos agravan o mitigan la contaminación atmosférica.
- En general, la contaminación atmosférica afecta en muchas situaciones al clima urbano.

34.2. RADIACIÓN SOLAR

34.2.1. Bases y principios de la radiación solar

La vida existe en la Tierra gracias a la energía externa aportada por la radiación

solar, que, por otra parte, y en su aspecto biológico, es asimilada como energía química por la flora clorofílica y es utilizada como fuente de calor y de luz por los animales y por los vegetales.

Los campos electromagnéticos oscilan rápidamente y transfieren la energía en forma de radiaciones, en ondas asociadas a los fotones. Los fotones transportan la energía y la que transporta cada uno es el *cuanto*, ya citado en otros apartados.

Si $h = \text{Constante de Plank} = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{seg}$, será $1 \text{ cuanto} = h \cdot \nu$, es decir:

$$q = h \cdot \nu = h \frac{C}{\lambda}$$

Si llamamos λ a la longitud de onda, ν a la frecuencia y C a la velocidad de propagación de la onda, que en nuestro caso es la de la luz (300.000 km/seg), será

$$\nu = \frac{C}{\lambda}$$

λ se expresa, en función de cada caso, en metros, en μm (micras) o en \AA (1 \AA = $1 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}$).

ν se expresa, en hercios o hertz (1 hertz = 1 ciclo/seg.).

La radiación visible –entre las longitudes de onda de 0,4 y 0,7 μm – ocupa un tramo muy corto de todo el espectro de las radiaciones electromagnéticas que recibe la Tierra, que fundamentalmente es la comprendida entre los 0,2 y los 4 μm , aunque las radiaciones de menos de 0,2 μm (hasta 1 nm), que corresponden a los rayos X, a los rayos γ y a los

rayos ultravioleta, juegan un papel muy importante, sobre todo en los fenómenos de ionización de la atmósfera superior.

34.2.2. El espectro electromagnético

Ya hemos indicado que las interacciones entre las radiaciones electromagnéticas y los seres vivos y otros cuerpos receptores dependen fundamentalmente de las longitudes de onda de aquellas, por lo que lo primero que se debe conocer es el sector del espectro en que se ubican estas longitudes de onda.

Una radiación solar es una mezcla compleja de radiaciones en la que existe una *distribución espectral* o distribución del flujo energético en función de la longitud de onda.

Se puede indicar que

$$\phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_{\lambda} (\lambda) d\lambda, \text{ donde}$$

ϕ = Flujo emitido por una fuente en una banda espectral comprendida entre las longitudes de onda λ_1 y λ_2

λ_1 y λ_2 = Longitudes de onda que marcan los límites en que se recibe ese flujo

ϕ_{λ} = Flujo energético del espectro

El espectro solar correspondiente a las radiaciones del Sol que se reciben en la Tierra, tiene una iluminación máxima en la longitud de onda de 0,50 μm .

Por otra parte, cerca de la mitad de la energía total (del orden del 45%) se reci-

be en la franja de la radiación visible, entre 0,4 y 0,7 μm .

34.2.3. Radiaciones naturales de onda corta y de onda larga

En la realidad, prácticamente todo el flujo energético solar se ubica entre las longitudes de onda de 0,15 μm y 4,0 μm .

El flujo energético terrestre, por su parte, se localiza en una franja entre los 3 y los 100 μm de longitud de onda del espectro.

Ambos se superponen, pues, en una pequeña franja entre los 3 y los 4 μm . Esta franja marca el límite de las longitudes de onda, estando hacia abajo las longitudes de onda corta y hacia arriba las de onda larga.

34.2.4. Radiación solar: factores y circunstancias

La traslación de la Tierra alrededor del Sol

La Tierra describe órbitas elípticas en uno de cuyos focos está el Sol (según las leyes de *Kepler*). Estas órbitas se encuentran en el plano de la *eclíptica*, estando el eje alrededor del cual gira la Tierra formando un ángulo de 23° 27' con ese plano.

Si tomamos el plano del ecuador de la Tierra, su intersección con el de la eclíptica define la línea de los *equinoccios*, que no coincide exactamente con el eje

pequeño de la elipse, y lo mismo ocurre con la de los solsticios, que tampoco coincide exactamente con el eje grande de la elipse, es decir: el *solsticio de invierno* (21-22 de Diciembre) no coincide con el *perihelio* (3 de Enero) mientras que el *solsticio de verano* (21-22 de Junio) no coincide con el *afelio* (4 de Julio).

El día y la noche

La Tierra, en su movimiento de rotación, presenta una parte al Sol que se repite cada 23h 56 min 4 seg, es decir, un día es el período de tiempo que transcurre entre dos pasos de un meridiano frente al Sol.

Esa rotación de la Tierra, al desplazarse por su órbita, varía algo, y además, el planeta tiene algunos movimientos más, aparte de la rotación y de la traslación. En consecuencia, la duración del día varía estacionalmente, y lo mismo ocurre con la aproximadamente media jornada de día y la media jornada de noche, que llegan en algunos períodos del año, y sobre todo en latitudes altas, a ser muy diferentes en duración.

Recepción de la radiación solar en la superficie terrestre

Al entrar la radiación solar en la atmósfera, los gases que constituyen esta absorben una parte importante, y además de forma selectiva.

El ozono absorbe las radiaciones de longitudes de onda inferiores a $0,29 \mu\text{m}$,

y reduce algo las correspondientes al rojo, en longitudes de onda de $0,6 \mu\text{m}$. Su importancia radica en que este gas elimina las radiaciones ultravioleta peligrosas para las biocenosis del planeta.

Por lo que se refiere al oxígeno, este gas absorbe fuertemente las radiaciones de $0,76 \mu\text{m}$ de longitud de onda, aunque en una banda muy estrecha.

Por su parte, el vapor de agua, el metano y el CO_2 absorben intensamente las radiaciones (sobre todo las IR).

Si la atmósfera permite pasar gran parte de las radiaciones del espectro visible, las correspondientes al infrarrojo pasan muy limitadamente, solo en unas bandas determinadas del espectro o *ventanas atmosféricas*, como por ejemplo, la existente entre los 8 y los $14 \mu\text{m}$, del infrarrojo térmico.

El suelo recibe *radiación global*, compuesta por la radiación solar directa y por la radiación solar difusa, que es muy variable, pues depende de factores como la hora del día, el estado de la atmósfera, la latitud o la estación climática.

34.2.5. Radiaciones provenientes de la atmósfera

El vapor de agua, el CO_2 , los aerosoles y el ozono presentes en la atmósfera emiten hacia el suelo radiaciones del infrarrojo térmico, en parte, porque las absorben de la radiación solar, como ya hemos indicado en otros epígrafes.

Estas radiaciones son de longitud de onda muy larga y se ubican entre los 5 y

los 100 μm , y se pueden calcular mediante diversas fórmulas, como la de *Brutsaert*:

$$M_{L_a} = E_{L_a} = 1,24 \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{1/7} \cdot \sigma \cdot T_a^4, \text{ siendo:}$$

M_{L_a} = Exitancia atmosférica (radiación atmosférica)

E_{L_a} = Iluminación atmosférica, que a nivel del suelo es igual que M_{L_a} , pues el hemisferio está ocupado por la atmósfera.

e_a = Tensión de vapor (humedad)

T_a = Temperatura

σ = Constante de *Stefan-Boltzmann* = $5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^{-4}$

34.2.6. Radiaciones provenientes de la Tierra

La radiación terrestre corresponde a la exitancia de la superficie de la Tierra, que variará en función del cuerpo o material que emita la radiación, como se vio en la tabla correspondiente al albedo.

La atmósfera absorbe la radiación terrestre, salvo en la ventana atmosférica ubicada entre los 8 y los 14 μm si la atmósfera está clara; si hay nubes, absorben la radiación terrestre y devuelven la mitad otra vez a la Tierra (efecto invernadero).

34.2.7. Radiación neta

Es el resultado del balance de todas las radiaciones entrantes y salientes en

todas sus longitudes de onda correspondientes a la superficie terrestre, y según la OMM se debe expresar así:

$$E = (E_g \downarrow - M_g \uparrow) + (E_L \downarrow - M_L \uparrow), \text{ siendo}$$

E = Radiación neta

$E_g \downarrow$ = Radiación global

$M_g \uparrow$ = Exitancia en las ondas cortas

$E_L \downarrow$ = Iluminación (radiación) de longitud de onda larga

$M_L \uparrow$ = Exitancia en las ondas largas

Así, la Tierra absorbe una parte de la radiación global y una parte de la radiación atmosférica, refleja parte de la radiación global que recibe y parte de la radiación atmosférica, y emite la radiación terrestre.

También se puede indicar que:

$$E_g \downarrow - M_g \uparrow = E_g \downarrow - a E_g \downarrow = (1-a) E_g \downarrow, \text{ siendo } a = \text{Albedo de la superficie terrestre}$$

Por otra parte, $H = A H_g \downarrow - B$, siendo

H = Exposición energética neta

A, B = Parámetros empíricos

$H_g \downarrow$ = Exposición energética global

Este parámetro climático es muy útil para calcular las necesidades de agua en actividades agroforestales.

Indicamos finalmente que el balance de las radiaciones depende también de otros factores, como son el albedo de la superficie estudiada, la conductividad térmica y la emisividad del suelo del área estudiada, la evapotranspiración, la topografía o la velocidad del viento.

34.3. HUMEDAD ATMOSFÉRICA

Este tema se trata ampliamente en el apartado correspondiente a la Física y Termodinámica Atmosférica y en otros capítulos de esta Parte, y allí remitimos al lector.

Solamente haremos algunas puntualizaciones al respecto.

El agua es un elemento esencial para la vida hasta el punto que constituye el principal componente ponderal de los seres vivos, de los que en algunos alcanza hasta el 98% del total de su peso, siendo la media del 80%.

La mayoría de los procesos biológicos usan el agua de alguna forma, y los vegetales la utilizan, a causa de su elevado calor latente de vaporización, para regular su temperatura, evacuando a través de ella parte de la energía que reciben del Sol.

El vapor de agua juega, pues, un papel de primerísimo orden en lo que se refiere a la relación vegetación-atmósfera.

Por otra parte, ya sabemos la importancia del vapor de agua como componente de la atmósfera, tanto por su concentración –entre el 0,5 y el 3%, en general– como por los fenómenos climáticos (o más bien el tiempo atmosférico) y de contaminación en que esta implicado.

También hemos indicado que casi todo el agua atmosférica se encuentra en la troposfera, donde las moléculas de aquella permanecen una media de 10 días,

cosa a tener en cuenta cuando se estudia el arrastre de contaminantes por las precipitaciones.

Estos fenómenos están muy influidos por los cambios de estado del agua, en los que se absorbe o se desprende energía calorífica, y son, entre otros, aquellos en los que participan la precipitación, la condensación, la evaporación o la congelación, influyendo, por tanto, en la situación térmica y en el balance térmico atmosférico (véase el epígrafe referente al estado térmico de la atmósfera).

La temperatura es un factor determinante de la humedad atmosférica, reduciéndose esta al bajar aquella, por lo que en las capas altas de la atmósfera la concentración de vapor de agua es mínima, casi inexistente.

El tiempo, como antes hemos indicado, depende mucho de los cambios de estado del agua, siendo muchas veces estos cambios de estado la fuente de energía que, en casos extremos, puede dar origen a tormentas, tornados y ciclones.

34.4. LAS NUBES

34.4.1. Bases generales

Enormes masas de aire cargadas de vapor de agua cruzan, dos veces al año, de un hemisferio a otro. Contribuyen a equilibrar las diferencias entre las zonas de calor y de frío. El vapor de agua pasa de invisible a visible dependiendo de la

temperatura, ya que el aire cálido puede contener mayor cantidad de vapor de agua en suspensión que el aire frío.

Las nubes son el efecto visible de una serie de procesos dinámicos y termodinámicos que se producen en la atmósfera.

La altura de una nube indica el nivel de temperatura en que se produce la congelación del vapor invisible en gotitas visibles.

Las nubes son un indicador de la humedad relativa del aire. Si este valor es bajo, el aire estará seco y se elevará antes de que se presente cualquier desarrollo de nubes.

Las nubes se forman como resultado de la condensación del vapor de agua que contiene el aire. Para que se produzca la condensación del agua en una masa de aire, es necesario que esta se encuentre saturada. La saturación se alcanza añadiendo más vapor de agua a dicha masa de aire o enfriándola.

Si se dan las dos condiciones a la vez, la condensación se alcanza antes.

Para explicar una formación nubosa estable en la atmósfera, hay que tener en cuenta un fenómeno de los anticiclones que se denomina *subsistencia*, que ocurre cuando una capa de aire es arrastrada por un movimiento descendente y se contrae verticalmente a medida que desciende, ya que aumenta la presión.

La atmósfera estable del anticiclón implica que no existen corrientes de convección. Todo movimiento ascendente es frenado por la propia estabili-

dad del aire. En los casos de subsistencia hay inversión térmica.

Las masas de aire estables con condensación de agua, no se desarrollan en sentido vertical, y son nubes planas que se extienden horizontalmente; son del género estratos.

Las nubes que se forman por elevación forzada en una atmósfera estable, por presencia de obstáculos como montañas, etc., son de desarrollo horizontal.

Según todo esto, podemos definir una nube como el conjunto visible de gotitas de agua, de partículas diminutas de hielo, o de ambas, que se encuentran suspendidas en la atmósfera.

En una nube pueden ir mezcladas partículas de origen natural como polvo atmosférico, esporas, etc., o de origen artificial, como humos, partículas radiactivas, radicales y compuestos químicos, etc.

El aspecto de las nubes depende de varios factores, como:

- Distribución de las gotitas en el espacio.
- Intensidad y color de la luz recibida.
- Posición relativa del observador y del sol o de la luna.

Para describir una nube, generalmente se consideran los siguientes factores:

- Dimensiones.
- Forma.
- Textura.
- Estructura.

- Luminosidad.
- Color.

También hay que determinar la cantidad, la altura y su movimiento. A la cantidad es lo que denominamos *nubosidad*, refiriéndonos a la *nubosidad total* como el tanto por ciento de bóveda celeste oculto por todas las nubes existentes en un momento dado, y a la *nubosidad parcial* al porcentaje de bóveda celeste que oculta un determinado género de nubes.

La localización de las nubes se realiza mediante el empleo del radar. Con el radar se pueden localizar precipitaciones acuosas a unos 500 km de distancia, siempre que esas nubes estén formadas por cristales o gotitas de agua gruesos.

El mar y la tierra tienen efectos opuestos sobre las nubes. Si la tierra está más caliente que la superficie marina, se formarán nubes tierra adentro, mientras que el cielo permanecerá despejado sobre el mar. Encima de las islas se desarrollan con frecuencia grandes cúmulos. Si aparecen sobre el mar, es debido a que sopla aire frío procedente de la tierra sobre un mar relativamente cálido. Las capas inferiores de la corriente fría se calientan y se van haciendo cada vez más inestables, iniciando una convección y, como consecuencia, la formación de la nube.

34.4.2. Disipación de las nubes

Las nubes se disipan eliminando vapor de agua o calentando la masa de aire. El enfriamiento y el calentamiento de

la masa de aire se produce por ascenso o por descenso, respectivamente.

La disipación de la nubes se produce cuando hay corrientes verticales descendentes. Al bajar la masa de aire, se calienta adiabáticamente, y las gotitas de vapor de agua que forman la nube, se evaporan. Este descenso a gran escala es la *subsistencia*, típica de los anticiclones.

34.4.3. Formación de las nubes

El factor regulador de la formación de las nubes es la relación entre la humedad, la presión y la temperatura. En la formación de una nube hay que considerar que se trata de un fenómeno en el cual no se va a producir transferencia de calor. A medida que la masa de aire asciende, la presión atmosférica que la rodea desciende, de forma que el vapor de agua se expande, disminuyendo su presión interna y manteniendo el equilibrio. El calor necesario para la expansión procede del interior de la masa de vapor de agua, lo que implica un descenso de la temperatura de 1 °C/10 m, que se denomina *régimen de descenso adiabático seco*.

Si la masa de vapor de agua continúa enfriándose, alcanzará el punto de saturación. Por encima de este punto, una ascensión o enfriamiento adicional implica la condensación en gotas de agua y la consiguiente liberación de calor, lo que hace que el enfriamiento sea mucho más lento. Esta disminución de la velocidad de enfriamiento es el SALR o *régimen*

de *descenso adiabático saturado*, y varía según la cantidad de agua que se esté condensando.

El aire húmedo tiene mayor tendencia a ascender que el seco, y una vez que ha alcanzado la saturación, se hace más ascendente. Esto explica que cuando hay una baja presión, las nubes ascienden más lentamente. Si hay altas presiones, el aire que desciende se va calentando por compresión, las nubes se evaporan y predomina el cielo despejado.

Las nubes se encuentran a temperaturas inferiores a 0 °C, por lo que cabe esperar que las gotas de agua estén congeladas, pero esto no es así. Hasta una temperatura de -20 °C, se ha visto que las nubes siguen estando formadas por gotas de agua. La razón de que ocurra esto es por el calor latente de fusión liberado cuando una gota se congela. A no ser que la temperatura sea muy baja, las zonas que rodean a las gotas no absorben este calor, inhibiéndose la congelación. Sin embargo, el contacto con un cristal de hielo o con una partícula de polvo en una nube superfría induce a una congelación instantánea, y de ahí la formación de escarcha en la niebla cuando hace mucho frío, o la formación de hielo en los aviones.

El tamaño de las gotas de agua en las nubes es de un diámetro entre 0,002 y 0,03 mm. En el caso de la lluvia, este diámetro oscila entre 0,5 y 5 mm.

Las gotas de la nubes son, pues, muy pequeñas, y son incapaces de vencer la resistencia del aire, permaneciendo flotando en la atmósfera.

En la formación de las gotas de lluvia interviene la propiedad del agua aérea, llamada *fenómeno de Bergeron-Findeisen*: Las moléculas de agua se evaporan en la misma proporción que las que se condensan, existiendo un equilibrio. Si en el vapor de agua saturado hay hielo, se evaporan menos moléculas de la superficie del hielo que de las gotas de agua. Como consecuencia, si hay hielo la evaporación es menor y la condensación es mayor, lo que implica que el agua se encuentra sobresaturada respecto al hielo. En una nube donde hay agua y cristales de hielo, el punto de saturación está cercano al del agua, lo que tiende a reducir la humedad, generando una evaporación continua de las gotas de agua. Al final del proceso, los grandes cristales comienzan a caer, formando copos de nieve, que a niveles inferiores, más calientes, se derriten.

34.4.4. Tipos de nubes según su formación

Las nubes se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Nubes orográficas o de montaña.** Se forman cuando el viento tiene una componente perpendicular a las montañas y la humedad relativa es suficientemente alta.

Las nubes de montaña son lenticulares. Suelen aparecer como una larga barrera de nubes colocadas encima de una cordillera.

El aire se ve obligado a subir y se enfría, alcanzando la saturación a partir del

nivel de condensación. A continuación el aire se ve obligado a descender y se calienta, disipándose la nube.

La formación de estas nubes depende de varios factores, como los siguientes:

- *Características de la montaña.* Si las montañas son bajas o están aisladas, no favorecen la ascensión del aire para la condensación. En una cadena montañosa larga y elevada, el ascenso y el descenso de la masa de aire es suficiente para formar y disipar la nube. Si el viento persiste en dirección perpendicular, la nubosidad puede permanecer durante horas, presentándose entonces un *estancamiento*.
- *Dirección y velocidad del viento.* Como ya se ha indicado, el viento tiene que tener una componente perpendicular a la montaña y la masa de aire debe tener la suficiente energía al encontrarse con el obstáculo. Si hay un exceso de velocidad del viento, no se desarrolla la nube.
- *Humedad relativa del aire.* Si la masa de aire no tiene la suficiente cantidad de vapor de agua, el ascenso no es suficiente para que se produzca la nubosidad, y si se produce es a bastante altura. Si el aire seco asciende y se encuentra encima de la montaña con una capa de aire húmedo, éste es forzado a ascender, y la nubosidad puede ser mayor.
- *Estabilidad del aire.* Si el aire ascendente es suficientemente húmedo y el gradiente de temperatura es estable, la nube tendrá poco desarrollo por encima de la montaña.

Normalmente la nube se forma a barlovento. El aire que asciende es húmedo, y se enfría según un gradiente adiabático saturado, es decir 1,5 °C por cada 300 m, mientras que a sotavento el aire que descende es seco y se calienta a razón de 3 °C por cada 300 m. El aire que descende es lo que se conoce como efecto *foehn*, como se explica en otro capítulo de esta obra. Este contraste de temperatura entre el aire que sube y el que descende es más acusado cuando hay precipitaciones a barlovento, ya que desprende calor latente de condensación. La masa de aire asciende según la adiabática de saturación y descende según la adiabática seca.

• Nubes a gran altitud

Existen dos formaciones de nubes a gran altitud:

- Nubes irisadas
- Nubes noctilucientes

Ambas se forman en la estratosfera. Las irisadas se forman a una altitud entre 19 y 30 km, y las noctilucientes a unos 80 km. Estas nubes son muy finas, y de tonos azules o amarillos. Son visibles en un intervalo de tiempo muy corto, durante el crepúsculo o durante el amanecer. El Sol se encuentra por detrás de ellas y las ilumina.

• **Nubes de turbulencia.** A veces la turbulencia cercana al suelo origina la formación de nubes, sobre todo a la salida o al ocaso del Sol. Los remolinos creados por rozamiento de la masa de aire contra el suelo forman corrientes verticales irregulares, hacia arriba o hacia

abajo. El movimiento de estos remolinos mezcla toda la capa inferior, con el consiguiente transporte de calor y de humedad, que va progresando gradualmente de abajo a arriba, condensándose y formando una capa continua de nubes estratificadas, cuyo grosor depende de la capa turbulenta.

Las condiciones que deben existir para que se forme este tipo de nubes, deben ser:

- Elevada humedad relativa
- Fuerte turbulencia

La turbulencia requiere que el suelo esté caliente para que se forme y, si esto ocurre, la humedad relativa decrece; entonces la nube de turbulencia se puede formar, hasta el punto que pueda ser transportada hacia arriba y se produzca la mezcla.

Al calentarse el suelo, la temperatura aumenta. Como las partículas que se mueven en la capa turbulenta lo hacen adiabáticamente, la temperatura potencial de la mezcla es constante, y en este caso el gradiente de temperatura es el adiabático seco, es decir, la mezcla produce calentamiento por abajo y enfriamiento por arriba. Este enfriamiento es el que favorece la formación de la nube. La mezcla debe ser constante en toda la capa.

Las nubes de turbulencia son estratos o estratocúmulos, como se verá más adelante, y su espesor oscila entre los 600 y los 1.000 m. Son nubes delgadas, y si se sitúan en los niveles bajos, no producen lluvia.

Se forman a la salida del Sol, ya que es cuando se inicia el calentamiento del suelo.

Se pueden constituir fractonimbos como consecuencia de la combinación de una humedad alta, viento fuerte y turbulencia.

• **Nubes convectivas.** La convección es el transporte de calor, o de otras propiedades, por el movimiento de aire a lo largo de la componente vertical. Estos movimientos verticales están muy relacionados con la estabilidad del aire. Si hay inestabilidad, el fluido continúa moviéndose hasta que aquella cese.

Durante el movimiento ascendente el aire se irá enfriando hasta alcanzar el nivel de condensación, seguidamente la masa de aire se satura y su temperatura es la del punto de rocío. A partir de aquí la nube crece, y se constituye la nube convectiva o de desarrollo vertical.

Se forman por los siguientes procesos:

- *Calentamiento del suelo por radiación directa.* Al calentarse la masa de aire que está en contacto con el suelo, se hace menos densa que el aire que lo rodea, y como consecuencia se eleva. En el punto de condensación alcanza el punto de rocío, y se empieza a formar la nube. El movimiento ascendente se produce cuando la masa de aire ha sido suficientemente calentada, siendo así el aire inestable. Si esta inestabilidad es muy grande, los ascensos son más extensos y pueden formar cúmulos congestos, y si la inestabilidad es profunda y alcanza grandes

alturas, la nube es de gran desarrollo vertical, y se pueden formar cúmulonimbos.

Estas nubes de calentamiento directo son las llamadas *nubes de evolución diurna*. Empiezan a formarse por la mañana, van creciendo hacia el mediodía y por la tarde alcanzan su máximo desarrollo. Por la noche, al enfriarse el suelo, cesa la convección y se disipan las nubes.

- *Aire frío a altos niveles*. La inestabilidad necesaria para que se produzcan movimientos verticales se puede producir en presencia de una masa de aire frío en cotas altas. El aire frío, más denso, tiende a descender hasta alcanzar la superficie. Si hay suficiente humedad empezarán a desarrollarse las nubes de desarrollo vertical, que pueden llegar a ser muy profundas y del tipo cumulonimbos. Este tipo de inestabilidad se produce por las *gotas frías*, y las nubes ya no son de evolución diurna.
- *Calentamiento de aire en niveles bajos*, al moverse sobre una superficie más caliente. Se produce cuando una masa de aire fría y polar situada en latitudes altas entra en contacto con el mar. Esta masa se pone en movimiento hacia el sur y recorre todo el océano. A medida que va llegando a latitudes más bajas, va calentándose por rozamiento con aguas más calientes, y se va cargando de humedad hasta que llega un momento en que la masa de aire tiene la temperatura adecuada, la *temperatura de disparo*, para desencadenarse la inestabilidad. Esto implica

la formación de corrientes ascendentes y la aparición de nubes cumuliformes de desarrollo vertical.

También se pueden dar sobre la superficie de la Tierra, pero si la masa de aire es muy seca y el nivel de condensación es muy alto, no se forman las nubes.

Las nubes convectivas aisladas tienen un diámetro menor de 20 km. A veces son totalmente verticales, pero en general presentan cierta inclinación, producida por la cizalladura vertical del viento.

Sobre el mar las nubes convectivas no se producen por procesos de calentamiento por radiación directa. Sobre los océanos no hay *térmicas* como las que se originan en tierra, ya que los cambios diurnos de temperatura y la diferencia de temperatura entre el aire y el agua son pequeños.

- **Nubes de advección**. La advección es el transporte de cualquier propiedad por medio del movimiento horizontal del aire. Una nube de advección se forma cuando la corriente de aire llega de una región más caliente sobre una región más fría. El aire caliente en contacto con el aire frío se enfría, y si la temperatura desciende hasta el punto de rocío, se produce la condensación y se forma la nube. Ésta será estratiforme y con un espesor de unos 2.000 m. Muchas veces está en contacto con el suelo en forma de niebla.

- **Nubes frontales**. Pueden ser de dos tipos:

• *Aire frío empujando al aire caliente.* Hay que tener en cuenta que estamos hablando de una enorme extensión de aire frío. Esta masa de aire frío empuja a

otra gran masa de aire cálido, que se satura. Como el aire frío es más denso, se coloca debajo del cálido, y al empujarlo lo levanta, originando fuertes corrientes

CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL DE LAS NUBES

Familia	Género	Altitud	
		Media	Máxima
Nubes altas. A	Cirrus. Ci Cirrostratus. Cs Cirrocumulus. Cc	6.000 m	12.000 m
Nubes medias. B	Altostratus. At Alto cumulus. Ac Nimbostratus. Ns	2.500 m	6.000 m
Nubes bajas. C	Stratus. St Stratocumulus. Sc	150-600 m 600-1.500 m	750 m 2.400 m
Nubes de desarrollo. D	Cumulus. Cu Cumulonimbus. Cb	300-2.400 m 600-2.400 m	6.000 m 12.000 m

TIPOS BÁSICOS DE NUBES

Tipo	Composición	Profundidad	Precipitación
Ci. Cirrus	Cristales de hielo	6-12 km.	No
Cc. Cirro cumulus	Cristales de hielo y gotitas de agua subfundidas	6-12 km.	No
Cs. Cirrostratus	Cristales de hielo	6-12 km.	No
Ac. Alto cumulus	Cristales de hielo y gotitas de agua	2-6 km.	Lluvia o nieve
As. Altostratus	Cristales de hielo, gotitas de agua, gotas de lluvia y copos de nieve	2-6 km.	Lluvia y nieve continua
Ns. Nimbostratus	Gotitas de lluvia a veces subfundidas, cristales de hielo y copos de nieve	0-3 km	Lluvia o nieve débiles y llovizna.
Sc. Strato cumulus	Gotas de agua, gotas de lluvia, nieve granulada y a veces copos de nieve	0-1 km	Lluvia o nieve débiles y llovizna.
St. Stratus	Gotas de agua y a veces cristales de hielo	0.3-2 km.	Llovizna o débil lluvia.
Cu. Cumulus	Gotas de agua y en la parte inferior cristales de hielo	0.6-2 km.	Tormenta, rayos y relámpagos.
Cb. Cumulonimbus	Gotas de lluvia, granizo y copos de nieve	1-4 km.	Tormenta, granizo.

verticales y desencadenándose así la inestabilidad.

Las nubes que se constituyen son cúmulos congestos o cumulonimbos, y como se trata de grandes extensiones de masas de aire, se forman como barreras, con longitudes a veces superiores a 2.000 km. y con una profundidad de 100-150 km. Se pueden presentar a cualquier hora del día.

- *Aire cálido moviéndose sobre aire frío.* Pueden ocurrir al contrario, que sea la masa de aire cálido lo que choque contra la de aire frío. La masa de aire cálido es más ligera, y se desliza advectivamente sobre la fría y al ascender va enfriándose y condensándose. Las nubes que se forman son cirroestratos por la parte más elevada, altoestratos en las capas medias y nimboestratos y estratos en las bajas.

34.4.5. Naturaleza de las nubes

La condensación atmosférica se produce en los núcleos de condensación, formados por finas partículas higroscópicas y por iones. La condensación no tiene lugar en toda la masa de aire que se satura, sino solamente en unos puntos determinados, en los cuales las gotitas tienen unas dimensiones muy pequeñas, con un diámetro de 3-30 μ .

Su velocidad de caída es inferior a 1 cm/seg, y la menor corriente las mantiene suspendidas. Su número es muy elevado, constituyendo una cantidad de agua o de hielo variable según la nube, pudiendo ser esta más o menos húmedas.

En cualquier caso, nunca se superan los 2 gr de agua/m³ de nube.

34.5. PRECIPITACIONES VERTICALES

34.5.1. El proceso general. Células tormentosas

Se denomina precipitación al agua, ya sea en estado sólido o líquido, que alcanza el suelo procedente de las nubes.

La palabra precipitación se utiliza desde principios del siglo XX, y designa de modo genérico al conjunto de lluvia, granizo o nieve que caen sobre una zona determinada.

En el ciclo hidrológico del agua (véase el capítulo correspondiente) se dan todas las fases simultáneamente, pero si suponemos que se comienza con la evaporación del agua de la superficie del planeta a causa del calentamiento del Sol, después el vapor de agua asciende a la atmósfera y se condensa, dando lugar a la nubosidad; las gotas que forman las nubes aumentan de tamaño hasta que finalmente alcanzan el peso suficiente para caer por gravedad; del suelo llega el agua a los ríos y al mar y empieza de nuevo el ciclo; El ciclo hidrológico hace referencia a todo el globo terráqueo y para largos períodos de tiempo. La precipitación es la principal fuente de aporte en ese ciclo.

La masa total de agua evaporada en toda la Tierra durante un año es de 379.200 km³, cantidad igual al agua caída.

El enfriamiento adiabático es la causa primaria de condensación, y es la responsable de la mayor parte de las precipitaciones.

Las células tormentosas se desarrollan en 3 estados:

- *Cúmulo*: El estado de un cúmulo, con una duración de 10-15 minutos, se caracteriza por la existencia de fuertes corrientes ascendentes en su seno de hasta 60 km/h, y un arrastre horizontal de aire que proporciona una humedad adicional.
- *Madurez*: Las gotas de agua o los cristales de hielo son lo suficientemente grandes en tamaño y en número para que se produzca la precipitación. La velocidad de caída es de 30 km/h por encima de 1.500 m.
- *Disipativo*: Las velocidades descendentes se convierten en predominantes, y todo el aire de la célula se calienta dinámicamente. Cesan el arrastre ascendente y el mecanismo de condensación, y la precipitación desaparece.

Para que el agua caiga de una nube, es preciso que muchas de las gotitas se agrupen para formar gotas de un diámetro de 0,5 a 5 mm, y a este fenómeno se le llama *coalescencia*. Se produce un considerable aumento del volumen de las gotitas.

Para que se produzca la precipitación es necesario que se formen los núcleos de sublimación o condensación, que están formados por pequeñas partículas higroscópicas. Si se presentan partículas

salinas de los océanos y partículas procedentes de combustiones con ácidos nitrosos y sulfurosos, se forman núcleos muy activos.

34.5.2. Procesos productores de precipitación

El mecanismo natural de condensación no produciría por sí sólo ninguna precipitación significativa, ya que tardaría aproximadamente 24 horas en dar lugar a la formación de pequeñas gotas de lluvia a partir de un núcleo de condensación, por lo que para que se presente una precipitación son necesarios más condicionantes.

Los procesos que impiden las precipitaciones son cinco:

- Existencia de cargas eléctricas del mismo signo, lo que hace que se repelan y no pueda producirse la unión, su coalescencia, o su coagulación.
- Volumen uniforme de las partículas, lo que impide que las fuerzas higroscópicas y de capilaridad aparezcan. Esto ocurriría si hubiera deferencias de volumen.
- Temperatura uniforme de las partículas, ya que si atraviesan las zonas más frías crecerían unas a expensas de las calientes, y como la tensión de vapor de agua sobre las segundas sería mayor que sobre las primeras, se produciría un intercambio entre unas y otras.
- Que no haya turbulencia, pues aumentaría la posibilidad de coagulación de las partículas.

- La uniformidad del estado físico de las partículas.

Hay autores que determinan que lo contrario a este quinto proceso es lo más importante para que se desarrolle la precipitación. En las zonas templadas es frecuente la existencia de nubes en las que gran parte de su masa está a una temperatura inferior a 0°C , y se encuentran conjuntamente cristales de hielo con gotitas de agua subfundidas. Entonces, al ser la tensión del vapor sobre el hielo inferior que sobre el agua, se producirá una especie de destilación, y los cristales de hielo crecerán a expensas de las gotitas de agua hasta que alcancen un tamaño tal, que pueden vencer las corrientes ascendentes del aire y caer a través de la nube.

Otros defienden la teoría de que es debida a la velocidad de crecimiento de los cristales de hielo. Esta velocidad viene definida por:

- Coalescencia con las gotas de agua
- Por sublimación por el hecho de depositarse sobre ellas el vapor de agua.

Si los cristales son menores que las gotitas de agua, el segundo modelo es más activo. En latitudes templadas ambos mecanismos actúan conjuntamente.

Los procesos de colisión y coalescencia o formación de una gotita de agua líquida única por reunión de 2 o varias gotitas que entran en colisión, y la existencia de cristales de hielo, son las dos vías capaces de dar lugar al crecimiento de las gotas, con fuerzas suficientes, para vencer la resistencia del aire y alcan-

zar la superficie terrestre como precipitación.

Los estudios realizados sobre los procesos de destilación y de coagulación de las nubes de desarrollo vertical, determinan que por encima de la isoterma 0°C hay gotas que permanecen en estado de subfusión, pero a partir de un nivel superior sólo se encontrarán cristales de hielo, los cuales van aumentando de tamaño al destilarse sobre ellos las gotitas de agua que van llegando procedentes de corrientes ascendentes. Estos cristales llegarán a formar un granizo blando formado principalmente por la coagulación de las gotas subfundidas, hasta formar un granizo menudo que puede llegar a constituir un granizo grueso, pero para ello tendrá que verificarse un englamamiento o aumento de la adherencia de las gotitas de agua subfundidas que se congelan cuando entran en contacto con un sólido. Este englamamiento ocurrirá con mayor probabilidad cuanto más poderosa sea la corriente de aire ascendente y más amplia sea la zona de gotitas subfundidas. A medida que estas gotitas se van agotando la zona se hace más pequeña, y lo que cae es lluvia procedente de los gránulos. Cuando se llega a los 0°C , las gotas que eleva el viento por encima de la isoterma se destilan tan pronto que apenas se produce granizo menudo, pero el granizo blando derretido mantiene la precipitación en forma de lluvia moderada.

Si las corrientes ascendentes se detienen, la nube queda formada por cristales que al caer coagulan entre sí, cerca del nivel de los 0°C y se asocian en copos.

En niveles inferiores la nieve se funde y se forma una lluvia ligera.

En un principio se pensaba que para que se produjera la precipitación era necesaria una baja temperatura en la nube. Actualmente se ha visto que las precipitaciones se pueden producir a temperatura moderadamente positiva. Este fenómeno es debido a la ya mencionada coalescencia y coagulación de las gotitas de la nube, hasta que adquieren un volumen suficiente para vencer la corriente ascendente y caer al suelo.

Factores que influyen en la coalescencia:

- Las cargas eléctricas
- Las turbulencias
- La relación entre los tamaños de las gotas que se unen
- La tensión superficial
- La presión hidrostática en el interior de las gotitas
- La presión aerodinámica externa

Las variaciones temporales en la intensidad de precipitación son extremadamente importantes en el proceso de precipitación—escorrentía, sobre todo en áreas urbanas, así como la distribución espacial en lo que se refiere a la evacuación del agua caída, medida en mm/hora.

Los procesos microfísicos para que ocurra la precipitación son:

- Enfriamiento adiabático o dinámico.
- Mezcla de masas de aire a diferente temperatura y humedad.

- Enfriamiento radiativo, por radiación
- Enfriamiento por contacto

34.5.3. Las tormentas

Los núcleos tormentosos crean convulsiones atmosféricas locales, con corrientes ascendentes dentro de las nubes, y la altura que pueden alcanzar es de 6-8 km, afectando sólo a la base de la nube y con una rápida evolución de aparición y desaparición. Las tormentas se generan con aire cálido y húmedo en bajos niveles, aunque el aire frío actúa como disipador.

Las tormentas pueden ser de diversos tipos, de los que los principales son:

- *Tormentas de calor*: Típicas de verano, por el fuerte calentamiento de los suelos, que se transfiere al aire que ésta en contacto con ellos y se crean corrientes ascendentes que generan la nube. Suele dar intensas granizadas.
- *Tormentas asociadas a frentes nubosos*. Están asociadas a borrascas. Las tormentas de frente frío se dan en el otoño y en el invierno, y las de frente cálido en primavera.
- *Tormentas de gota fría en altura*. Se generan cuando queda aislada en altos niveles de la troposfera una masa de aire frío que gravita sobre aire caliente y húmedo en bajos niveles, quedando el aire frío-denso arriba y el aire cálido-húmedo debajo. Se crea una inestabilidad, y al subvertirse la co-

lumna surgen potentes nubes tormentosas.

- *Borrascas tropicales*. Son unos remolinos de baja presión, que forman una serie de elementos consecutivos –de 3 a 5– con sus frentes nubosos encadenados y con sus temporales de lluvia casi seguidos.

En latitudes medias las borrascas con sus frentes asociados determinan temporales de lluvia y viento, y a veces provocan grandes inundaciones.

34.5.4. Variabilidad y distribución de la precipitación

La distribución de la precipitación es muy irregular.

Los factores que afectan a la distribución son:

- *Latitud*. Es más intensa cerca del ecuador y va disminuyendo hacia latitudes más altas.
- *Origen*. Depende de la fuente de humedad.
- *Orografía*. A barlovento el aire está obligado a ascender, por lo que la precipitación está favorecida a sotavento.
- *Estacionalidad*. Las precipitaciones se distribuyen de forma muy definida según las estaciones del año. En verano las precipitaciones son muy irregulares.
- *Según ciclo circadiano*. Variaciones a lo largo del día. En el caso de las lluvias convectivas suele haber un máximo por la tarde, mientras que la nubosidad es-

tratificada frontal alcanza un máximo por la noche.

34.5.5. Medición de la precipitación

La precipitación se mide con pluviómetros o con pluviógrafos. Existen pluviómetros registradores, en los que se suministra la información cada hora de la precipitación, y totalizadores, que informan sobre la cantidad de agua caída durante una estación del año completa, o durante un mes o un año. El pluviómetro consiste en un embudo conectado a un vaso graduado por medio de un tubo estrecho. Recoge el número de milímetros de lluvia caída; 1 mm de agua que recoja implica para una superficie de 1 m², 1 litro, y de ahí que a veces las medidas se refieran a l/m².

Cuando es nieve o hielo hay que tomar las precauciones necesarias para que se vayan fundiendo según caigan al aparato, y para que el viento no enmascare la realidad.

La cantidad de precipitación no es uniforme ni en el tiempo ni en el espacio. La lluvia se mide en términos de profundidad de agua que hubiera cubierto el suelo si no se hubiera filtrado o escapado al interior de la tierra.

La localización de estos aparatos debe ser al abrigo del viento pero en sitios lo más abiertos posibles, evitando que árboles, canalones de las casas, farolas, etc., sean obstáculos que impidan caer parte de la lluvia.

Para ampliar este tema, véase el capítulo correspondiente.

34.5.6. Tipos de precipitaciones de nubes convectivas

Las precipitaciones procedentes de las nubes convectivas se denominan chubascos. Son de cierta duración y se producen a intervalos, comenzando y terminando de manera muy brusca.

Las principales nubes que dan lugar a este tipo de precipitaciones son nubes de desarrollo vertical, y podemos distinguir:

- Precipitación procedente de los *cumulus humilis*. Este tipo de nubosidad es característico del buen tiempo, y apenas tiene desarrollo, por lo que casi no da precipitación.
- Precipitación procedente de los *cumulus congestus*. Si su espesor sobrepasa los 3.000 m suele descargar, ya que están evolucionando hacia *cumulonimbus*.
- Precipitación procedente de los *cumulonimbus*. Estas nubes son de gran desarrollo vertical. Las corrientes ascendentes arrastran la humedad hacia arriba y las gotitas van aumentando de tamaño, hasta que su peso vence a la corriente ascendente y caen por gravedad.

En los *cumulus* grandes, podemos encontrar agua subfundida a una temperatura superior a los 0 °C, a gran altitud. Los cristales de hielo crecen rápidamente a expensas de las gotas de agua que los rodean y pueden dar lugar a precipitación en forma de pedrisco o producir un chaparrón tormentoso o de granizo. Si los *cumulus* sobrepasan el nivel de la isoterma 0 °C pero no alcanzan la tem-

peratura suficiente para formar cristales de hielo, no hay precipitación.

Hay determinadas sustancias que pueden provocar la formación de estos cristales, como son el CO₂ y el IAg (lluvia artificial).

Si las corrientes ascendentes no son fuertes, la precipitación es de lluvia. La lluvia es agua líquida, en la cual el tamaño de las gotas tiene un diámetro mayor de 0,5 mm.

Si la nube convectiva es caliente, puede que el nivel de condensación sea muy alto y entonces la precipitación se evapora, apareciendo debajo de las nubes unas líneas, verticales u oblicuas, manchas o rayas llamadas *virgae*. En estas nubes, si el nivel de condensación es bajo, la precipitación puede ser muy intensa y las gotas muy grandes.

Se pueden producir movimientos ascendentes de las nubes hasta grandes alturas, que hacen que sobrepasen el nivel de congelación y se hielen. En este caso, la precipitación es sólida y en forma de granizo.

Existen dos zonas de precipitación de este tipo:

- Zonas frontales bajo *cumulonimbus*
- Zonas orográficas

34.5.7. Tipos de precipitaciones

Precipitaciones frontales

Precipitación de frente frío

Cuando dos enormes masas de aire colisionan, se desencadenan fuertes as-

cendencias y se forman grandes *cumulus* o *cumulonimbus*.

Una vez pasado el frente, queda el cielo despejado y el aire es frío. Esta mejoría suele ser espectacular. Tras el paso del frente, las nubes se vuelven menos activas.

La precipitación es la misma que por nubes convectivas, en forma de chubascos transitorios intermitentes, que se desarrollan en una banda del orden de 70 km. El tipo de precipitación puede ser chubasco de agua o de granizo.

Precipitación de frente cálido

Si la masa que ataca es de aire cálido, al ser más ligero, asciende sobre la masa de aire frío y se va enfriando y condensando, dando lugar a una nubosidad estable y estratificada.

Las nubes que se forman son *nimbostratus*. En las profundidades del frente, también se forman *altostratus opacus*, *altostratus lucidus* y, en la parte más alejada, *cirros* y *cirrostratus*. Las precipitaciones proceden de los *nimbostratus* y de los *altostratus opacus*. Su extensión puede ser de algo menos de 500 km, de mayor magnitud que la precipitación de aire frío. La precipitación procedente del frente cálido es una caída uniforme y continua de lluvia, nieve o aguanieve. La masa de aire cálido lleva asociada nubosidad del tipo *stratus* o *stratocumulus*, y la precipitación que cae es de gotas de agua más pequeñas que las de la lluvia, de tamaño menor de 0,5 mm.

Este tipo de precipitaciones se denomina *llovizna*, y es el llamado *orbayu*, *chirimiri* o *calabobos*. Cuando las gotitas son microscópicas se denomina *neblina*. No hay que confundirla con la *calima*, que está formada por núcleos de partículas de polvo o de sal.

Si la temperatura es menor de 0 °C al pasar las masas de aire cálido, los *stratus* pueden dar lugar a la nieve granular.

Precipitación de frente ocluido

Normalmente el frente frío se mueve más deprisa que el frente cálido. Hay un momento en que el frente frío alcanza al cálido, y puede incluso contactar con una masa de aire frío situada al otro lado de la masa de aire cálido. El contacto entre las masas de aire frío, que por su mayor densidad tenderán a situarse debajo de la masa de aire cálido, producirá la elevación de ésta última. Decimos entonces que se ha producido una *oclusión*, que puede ser de dos tipos:

- *Oclusión fría*: El frente caliente se encuentra flanqueado por dos masas de aire frío. Una es más fría que la otra, de manera que al entrar en contacto, la segunda, por su menor densidad, tenderá a quedar por encima. Esto generará corrientes ascendentes que originarán *cumulonimbus*. La precipitación tiene una extensión de unos 80-170 km., y empieza cayendo de los *altostratus* y de los *nimbostratus* al acercarse a la oclusión. En la zona de oclusión las precipitaciones ocurren en

forma de chubascos procedentes de los cumulonimbus.

- *Oclusión cálida.* Una masa de aire es menos fría que otra, y al ser menos densa, se desliza sobre esta última. Lleva asociada nubosidad cumuliforme y estratificada, y dentro de la masa de aire más cálido hay grandes *cumulus* enmascarados por *nimbostratus*. Las precipitaciones cubren una extensión de 170-240 km., y son continuas. Tras el frente ocluido el tiempo mejora rápidamente.

Precipitación orográfica

La nubosidad se concentra a barlovento y desciende por sotavento y las precipitaciones se producen fundamentalmente a barlovento de las montañas.

Si la masa de aire es inestable, la nubosidad es cumuliforme, desarrollando *cumulonimbus*, que pueden llegar a ser muy inestables. Se presentan entonces chubascos de lluvia, de nieve o de gránizo. El tamaño de las piedras puede ser considerable, y el fenómeno va acompañado de turbulencias, engelamiento y descargas eléctricas.

Precipitación anticiclónica

Cuando existen altas y bajas presiones, la diferencia se crea por el desigual calentamiento de la superficie terrestre. Cualquier baja barométrica puede producir precipitaciones no frontales cuando convergen horizontal-

mente corrientes de aire, que luego se elevan.

34.5.8. Clasificación y descripción de las precipitaciones verticales

Son hidrometeoros. Unas precipitaciones llegan al suelo y otras se evaporan, observándose las virgas o cortinas de lluvia.

Las precipitaciones pueden ser uniformes o pueden presentarse en forma de chubasco, que comienzan y acaban bruscamente.

Lluvia. Precipitación de partículas de agua líquida que se presentan como gotas de diámetro de más de 0,5 mm, o bien como gotas pequeñas o dispersas.

Pueden producirse lluvias de barro por el arrastre de partículas de polvo o arena que contengan las nubes.

Llovizna. Precipitación bastante uniforme, constituida exclusivamente por finas gotas de agua de diámetro menor de 0,5 mm que caen muy próximas unas a otras y que proceden de una capa de estratos bastante espesa, que puede incluso tocar el suelo y convertirse en niebla.

Gránizo. Este tipo de precipitación consiste en granos de hielo más o menos esféricos, cuyo diámetro oscila entre 2 y 5 mm. Están formados por un núcleo blando, recubierto por finas capas de hielo. Descienden a temperaturas superiores a 0°C y proceden siempre de *cumulonimbus*, y casi siempre van acompañados de lluvia. Es un fenómeno de poca duración.

Pedrisco. Si las corrientes ascendentes son todavía más intensas, las bolas de hielo pueden alcanzar diámetros entre 5 y 50 mm. Están formadas por hielo transparente, alternado con capas de hielo opaco. Este tipo de precipitación es exclusiva de violentos *cumulonimbus*.

Nieve. Es una precipitación de agua sólida, cristalizada, mezclada a veces con hielo, y casi siempre está ramificada. Si la temperatura no ha descendido demasiado, del orden de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, los copos tienen una estructura esponjosa debido a los poros y huecos que presentan. La nieve va depositándose en el suelo, y si cuaja, su espesor va en aumento. Si la temperatura es superior a 0°C , la precipitación se llama *aguanieve*.

Nieve granular. Está formada por granos opacos con aspecto de nieve, esféricos y a veces cónicos, de diámetro de 2 a 5 mm en la dirección más larga. Cae en pequeña cantidad, en pleno invierno, y en ocasiones puede precipitarse continuamente acompañada de chubascos con copos de nieve o con gotas de lluvia.

Cinarra. Precipitación en forma de gránulos de hielo muy pequeños, blancos y opacos. Estos gránulos son relativamente aplanados o delgados, de diámetro inferior a 1 mm. Caen en cantidades muy pequeñas.

Cristales de hielo. Si la masa de aire procede del continente, se puede desarrollar este tipo de precipitación, constituida por cristales tan pequeños que se voltean en el aire, y sólo son visibles cuando brilla el Sol. Son cristales de

aspecto no ramificado, con forma de pequeñas agujas o columnas muy tenues, y pueden caer de una nube con el cielo despejado.

Granos de hielo. Cuando la precipitación en forma de nieve pasa por zonas de temperatura positiva, se transforma en lluvia. Si a continuación ésta pasa por otra zona de temperatura negativa, se hiela. Esta precipitación se llama *granos de hielo*, y estos granos son transparentes o traslúcidos, de forma esférica o regular, de diámetro entre 1 y 4 mm, que rebotan cuando caen al suelo.

Se pueden diferenciar dos tipos:

- Gotas de lluvia congeladas o copos de nieve casi totalmente fundidos que se han congelado de nuevo. La congelación se produce cerca del suelo.
- Gránulos de nieve envueltos en una capa fina de hielo. Se han formado por congelación de gotitas interceptadas por gránulos durante su caída, o por la recongelación del agua procedente de una fusión parcial de los gránulos.

34.5.9. Lluvia

Según la teoría de *Bergeron / Findeisen* las nubes a -20 y $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ se componen de cristales de hielo, de gotitas de agua superfrías y de vapor de agua. A estas temperaturas el aire tiene una propiedad muy característica: Si está saturado respecto al agua, está saturado respecto al hielo. Esto implica que hay demasiado vapor en el aire, y por lo tanto algo de vapor se congela

y los cristales ya existentes de hielo se agrandan.

Este proceso reduce la cantidad de agua del aire, convirtiéndose este en insaturado respecto al agua, por lo que después, algunas gotitas se evaporan para restablecer el equilibrio. A través de este proceso hay una transferencia continua de humedad desde el agua al hielo por medio del vapor y por el crecimiento de los cristales de hielo. Finalmente, éstos se hacen lo suficientemente grandes como para caer en forma de nieve. Durante el descenso atraviesan el nivel 0 °C, donde se derriten y siguen bajando ya en forma de lluvia.

El proceso del cristal de hielo explica la mayoría de las lluvias en las zonas templadas. En los trópicos, la lluvia suele proceder de nubes cálidas.

Para explicar la lluvia se propone el mecanismo de la coalescencia: Las gotitas de las nubes son muy pequeñas y muy ligeras, y permanecen en suspensión aérea. Por choques y arrastres sucesivos van adquiriendo más peso, y empiezan a caer despacio. Este fenómeno desencadena choques que hacen que las gotas vayan coalesciendo para formar gotas mayores. A mayor grosor de la nube, las gotas crecen más y caen más rápido. Por otra parte, existe un límite de tamaño de estas de 5 mm de diámetro, a partir del cual se deforman y se dispersan otra vez.

Si una convergencia está asociada a un centro de bajas presiones, forzarán la elevación del aire, y por consiguiente producirá lluvia.

34.5.10. Llovizna

No se debe confundir una lluvia ligera con una llovizna, pues esta última está formada por gotas muy pequeñas y puede ser muy densa. En los lugares donde los vientos son cálidos y húmedos y se elevan por encima de las montañas, se pueden producir lloviznas de hasta 19 mm/día.

34.5.11. Nieve

El proceso de formación de la nieve es así:

Primero se forman delgados cristales de hielo sobre los núcleos de polvo atmosférico. El aire de la atmósfera está supersaturado respecto al hielo, y por tanto el vapor se condensa inmediatamente sobre el cristal, aumentando su tamaño. Paralelamente, las gotitas de agua de la nube se evaporan en un intento de reestablecer el equilibrio, aportando un suministro continuo de vapor para el crecimiento posterior del hielo.

Existen varias formas naturales de los cristales de nieve:

- Los de altocirrus están formados principalmente por prismas cortos y sólidos, de longitud de 0,5 mm, con huecos.
- Los de cirrus son prismas de hielo cortos y sólidos.
- Los de altostratus son una mezcla de prismas y de placas hexagonales delgadas.

- Los de las nubes de niveles inferiores tienen cristales de hielo de diferente tamaño y de forma variable.

El tamaño de los cristales de nieve va aumentando a medida que descienden. Si caen desde una nube seca, se pueden evaporar. Si caen por debajo de la isoterma $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ se derriten en agua, pero si alcanzan el nivel de suelo por encima del nivel $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, es lo que se denomina nieve.

Si el aire es húmedo se forman cristales como agujas. Si es seco y se humedece rápidamente, los cristales tienen forma de lámina. Si el aire es seco, los cristales que se forman tienen aspecto de columna.

Si el ambiente está moderadamente húmedo, se forman cristales como estrellas.

La nieve cae en copos que se humedecen, colisionan y se vuelven a congelar juntos. Los copos más grandes, por encima de los 6 cm, se forman entre 0 y $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si suben las temperaturas los copos se derriten, y se convierten en lluvia o en aguanieve.

Muchas veces empieza a llover, y a medida que se evapora el agua, el aire se insatura, capta el calor latente, se enfría y la precipitación puede alcanzar la forma de nieve.

La mayoría de las precipitaciones de las latitudes polares, gran parte de las zonas templadas y algunas de los trópicos son de nieve al principio, que se convierte en lluvia a medida que atraviesan las capas calientes de la atmósfera.

Para que la nieve llegue al suelo la temperatura no debe ser superior a $2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El granizo puede alcanzar el suelo a temperaturas de $6\text{ }^{\circ}\text{C}$, porque cae más rápido que los copos de nieve.

Los requisitos fundamentales para que se produzca nieve son:

- La temperatura,
- El movimiento de aire hacia arriba producido por las bajas presiones,
- La convergencia de corrientes de aire por la barrera física de una cadena montañosa.

El aire cálido retiene más humedad que el aire frío. Cuando nieva en la costa, lo hace de manera abundante por las cantidades de agua que transportan las masas de aire caliente oceánicas que se dirigen hacia el interior del continente.

Los grandes lagos situados en latitudes elevadas son propicios a las nevadas, ya que el aire continental seco recupera la humedad y el calor a medida que atraviesa el lago, inestabilizándose.

34.5.12. Granizo

Consiste en bolas esféricas de hielo. El granizo pequeño es un núcleo de granizo recubierto por una capa de hielo.

Las nubes generadoras de granizo son muy potentes y contienen bastante agua, yendo asociadas a un tiempo relativamente cálido con fuerte calentamiento de superficie, para generar ascensiones violentas. Suelen caer en forma de densos chaparrones, unidos a tormentas con aparato eléctrico.

Se forman como las gotas de lluvia, y se congelan, se elevan y crecen por acreción. La estructura del granizo en capas es así a causa del movimiento fluctuante que realiza hacia arriba y hacia abajo, hasta que alcanza un punto donde la corriente ascendente no puede soportar el peso del grano y este termina cayendo.

Si la temperatura es muy baja, las gotitas se congelan rápidamente. A mayor temperatura, la congelación se produce más despacio, formando un hielo transparente.

Se necesitan corrientes de aire de más de 30 m/s para mantener suspendida una piedra de granizo.

34.6. ARRASTRE DE CONTAMINANTES POR LAS PRECIPITACIONES VERTICALES

Está claro que una precipitación vertical –lluvia o nieve– arrastra gases y partículas contaminantes presentes en el aire en cantidad que dependerá de:

- Intensidad de la precipitación
- Duración de la precipitación
- Tamaño de las gotas de agua o de los copos de nieve
- Solubilidad de los gases o de las partículas
- Tamaño de las partículas
- Velocidad de caída de la precipitación
- Velocidad de caída de las partículas

- Densidad de las partículas
- Concentración de los contaminantes en el aire

En principio, el fenómeno es complejo, y se basa en la intercepción de los gases y de las partículas por la precipitación.

La intensidad de esa captación decrece con el tamaño de las partículas, siendo muy baja a partir de dimensiones de estas inferiores a las 2 μ .

Como orientación podemos indicar que una lluvia constante de 1 mm/hora durante 15 minutos, arrastra una media del 25 al 30% de las partículas de más de 10 μ .

La captación de gases y partículas por las precipitaciones verticales está muy influenciada por la evaporación y por la condensación, estando a su vez todas ellas interrelacionadas tanto en lo que se refiere a la dispersión como a la transformación de los contaminantes (véase en otros epígrafes de esta obra lo referente a las reacciones fotoquímicas, etc.).

En la difusión a escala regional se utiliza el *Factor de lavado*, que se obtiene de:

$$f = \frac{\Gamma}{C}, \text{ siendo}$$

f = Factor de lavado

Γ = Concentración del contaminante por unidad de masa de lluvia

C = Concentración del contaminante por unidad de masa de aire

El factor de lavado varía para cada agente contaminante, y, como es lógico, también depende de la intensidad de la

precipitación y de la concentración del contaminante, entre otros factores.

Como cifras orientativas podemos indicar:

- Precipitaciones con contaminantes radiactivos: $500 < f < 1.000$
- Precipitaciones con SO₂: $20 < f < 500$
- Precipitaciones con partículas: $290 < f < 2.700$

Diversos autores, como *R.J. Engelman* y otros, diferencian dos fases en el lavado.

La primera es la captación en la nube (in cloud scavenging), y la segunda es el propio lavado por las gotas del agua que se precipitan hacia el suelo.

La primera fase y la segunda las relacionan con:

$$E_1 = n + (1-n) E_2 \cdot x \text{ , siendo}$$

E_1 = Eficacia de captación en la nube

E_2 = Eficacia de captación en la precipitación de las gotas hacia el suelo

n = Fracción del agente contaminante que actúa como núcleo de condensación

x = Coeficiente propio de cada contaminante

La concentración del contaminante en las gotas de agua de lluvia vendrá dada por

$$\Gamma = \frac{w \cdot C \cdot E_1}{w \cdot q \cdot \frac{E_2}{\rho}} \text{ , siendo}$$

Γ = Concentración del contaminante en la lluvia

w = Velocidad de arrastre

C = Concentración del contaminante en el aire

q = Humedad absoluta del aire

ρ = Densidad del aire

El factor o coeficiente de lavado será

$$f = \frac{\Gamma}{C} = \frac{\rho \cdot n}{q \cdot E_2} + \frac{(1-n) \cdot \rho \cdot \alpha}{q}$$

Se pueden obtener datos bastante aproximados para 24 horas con la fórmula práctica

$$f = \frac{\Gamma}{C} = 490p^{-a} \text{ , siendo}$$

p = altura de la precipitación diaria (en mm)

$a = 0,026$

Como colofón a este epígrafe podemos indicar que las precipitaciones verticales limpian la atmósfera de contaminantes con mayor o menor eficacia, y que esta eficacia es más o menos cuantificable.

En zonas de precipitaciones frecuentes se debe contar con este fenómeno meteorológico, pues limpiar el aire de contaminantes no quiere decir eliminarlos, sino que simplemente se trasladan, transformados o no, a otra fase: al suelo, a la vegetación o a las masas de agua de la superficie terrestre, y la afección a estas fases puede ser crucial en ambos casos, como se verá en diversos capítulos de esta obra.

CAPÍTULO 35

LAS ISLAS DE CALOR

35.1. BASES, PROCESOS Y EFECTOS

Todos sabemos que en la ciudad hace más calor que en el campo, y este fenómeno es lo que se conoce como isla de calor urbana. Una isla de calor resulta de una masa de material, natural o antropogénica, que absorbe e irradia calor en una mayor proporción al área circundante, lo que provoca de moderadas a fuertes corrientes atmosféricas de convección verticales hacia las capas superiores del aire.

Este efecto se superpone a las condiciones meteorológicas reinantes en un determinado lugar, aunque en presencia de fuertes vientos se verá anulado. Los grandes polígonos industriales y las grandes o pequeñas ciudades son ejemplos en los que tiene lugar este fenómeno.

Debido al efecto producido por la isla de calor, la estabilidad atmosférica será menor sobre la ciudad que en sus alrededores.

A causa de la contaminación atmosférica, la radiación solar que llega a una ciudad es entre un 10 y un 30% menor. Esta disminución está muy compensada por:

- La radiación de onda larga emitida por la superficie de la ciudad
- La capa de contaminación
- La gran cantidad de edificios que almacenan el calor recibido y lo emiten
- Existe un escaso consumo energético por evapotranspiración debido a que hay pocos y muy reducidos espacios verdes y, además, la superficie es impermeable
- El calor generado por el hombre

Dependiendo del origen de la contaminación, esto traerá consecuencias favorables o desfavorables. Será bueno en aquellas condiciones en las cuales existan fuentes de contaminación a nivel del suelo, tales como los automóviles, porque la masa de aire inestable que forma

la isla de calor permitirá un mayor volumen de aire para la dilución de los contaminantes.

Sin embargo, se observa que cuando las condiciones reinantes son casi estables o de vientos moderados, las plumas de las grandes chimeneas son transportadas hacia las afueras de las ciudades sin incrementar sus concentraciones, mientras que las situaciones de calma hacen que se formen células y circulaciones convectivas que crean diversos domos que concentran la contaminación sobre la ciudad, hecho que favorecen las islas de calor, lo que hace que dicha contaminación se acumule en las capas bajas de la atmósfera más próximas al suelo.

El efecto isla de calor es la formación de una o varias islas que no tienen por qué coincidir con el centro de la ciudad.

35.2. REPARTO DE LAS TEMPERATURAS

Las islas de calor dan lugar a temperaturas ambientales superiores (del orden de 1 a 4 °C) a las de los alrededores. Estos grados de diferencia constituyen un hecho palpable en muchos lugares.

Diferentes estudios han podido comparar lo siguiente:

- Londres: Cuando en el centro urbano hay una temperatura de 11 °C, en la periferia es de 10,3 °C y en el campo es de 9 °C.
- París: Cuando se mide en el centro una temperatura de 12,3 °C, en las periferias es del orden de los 10,8 °C.

En los mapas de isotermas se puede observar que en la ciudad las curvas están muy próximas (a nivel del suelo).

También se observa un desnivel rápido en los perfiles térmicos.

La temperatura del aire sobre la aglomeración urbana es superior a la del entorno hasta cierta altura, a partir de la cual ocurre lo contrario, siendo inferior a la de su entorno a causa de un efecto de cruzamiento o *crossover effect*.

Así, la ciudad origina un frente cálido, con gradiente de varios grados por kilómetro.

Dentro de las repercusiones urbanas hay que tener en cuenta:

- El diseño del volumen de las edificaciones
- Las necesidades de calefacción o refrigeración

En invierno y por la noche el efecto isla de calor repercute mucho en las heladas, ya que retarda su fecha de aparición en otoño y desaparecen antes en primavera, con lo cual el período libre de heladas se ve alargado. Esto puede repercutir en el fraguado del cemento y en el del alquitrán a la hora de construir edificios y vías de acceso.

35.3. CADENCIA DE LAS ISLAS DE CALOR

Dentro de las islas de calor se pueden distinguir unos ciclos y una determinada ritmicidad.

A las dos o tres horas después de la puesta del sol, la isla de calor presenta un valor máximo. Esto se debe a la que la ciudad pierde el calor de forma más lenta que la periferia o el campo. Si la ciudad es muy grande, este valor máximo puede durar hasta el amanecer.

Durante el día las zonas rurales se calientan más deprisa que la ciudad, siendo inferior así la diferencia entre ellas.

Existe también un ritmo semanal, y se ha visto que los fines de semana, debido a las menores actividades industriales, a la inferior contaminación, etc., tiende a disminuir el valor máximo de la isla de calor.

La estacionalidad no tiene una explicación tan clara, pero en un principio, el valor máximo sería menor en verano, por el hecho de no utilizarse las calefacciones. En determinadas zonas, como en el Reino Unido y en el Oeste de Estados Unidos, no ocurre así, lo que implica que las calefacciones muy probablemente no tienen un efecto totalmente determinante de las islas de calor.

35.4. CONDICIONANTES DE LAS ISLAS DE CALOR

Las islas de calor se ven afectadas por una serie de factores biológicos, físicos y socioeconómicos.

Entre ellos caben destacar:

- **El clima.** Las islas de calor dependen del clima urbano, pero éste es una variante regional del clima global. Los estudios que se han realizado en latitu-

des medias indican que parece que se atenúa en las zonas tropicales y en cambio se acentúa en zonas subárticas. Así, los edificios en grandes masas serían favorables para mejorar el clima en las zonas frías, y ocurre a la inversa en las zonas cálidas.

- **El tipo de clima.** La diferencia máxima se da con un tiempo anticiclónico y cielo despejado, lo que favorece una elevada insolación. Con viento ligero la isla de calor se atenúa, y con vientos fuertes llega a desaparecer. Cuando hay viento en general, la isla de calor sufre un desplazamiento hacia sotavento.

Por otra parte, existe una relación entre el tamaño de la ciudad y la intensidad del viento de la isla de calor, como se indica en la tabla adjunta.

RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE HABITANTES DE UNA CIUDAD Y LA VELOCIDAD LÍMITE DEL VIENTO

Número de habitantes	Velocidad límite del viento
30.000 – 50.000	4–5 m/s
120.000 – 400.000	6–8 m/s
2.000.000 – 8.500.000	11–12 m/s

Como consecuencia, se puede deducir que a partir de una velocidad límite del viento desaparece la isla de calor.

La topografía. El fenómeno de inversión térmica es muy común en ciudades que tienen un relieve muy acusado. Estas inversiones son muy diversas.

Si por la ciudad cruza un río importante y queda dividida en dos, la isla de

calor también se divide, apareciendo en trantes de lenguas frías en cada una de las partes de esa isla de calor.

Dentro de los factores socioeconómicos señalamos:

– *Las edificaciones.* Las construcciones elevadas tienen gran capacidad térmica, pero la difusión del calor es muy lenta debido a la presencia de los *cañones urbanos*, como calles estrechas, huecos interiores, etc.

Las zonas verdes y los parques son núcleos de frescor, y como consecuencia las temperaturas disminuyen de forma palpable.

– *La calidad de los elementos de construcción.* Todo lo que acumule calor facilitará el fenómeno de las islas de calor, por lo que se ha de tener en cuenta un criterio contradictorio en este sentido en lo que se refiere a la tendencia al uso de materiales de construcción que retengan el calor solar y el aportado por la acción huma-

na, que es la línea que se sigue en la actualidad (conservación y ahorro de energía) y que favorece por todo esto la formación de islas de calor.

– *El tamaño de la ciudad.* Hay diversos estudios realizados sobre ese tema. Unos afirman que existe una relación matemática entre el aumento de la temperatura y el tamaño de la ciudad. Otros afirman que el tamaño de la ciudad no es muy importante, y que los mayores contrastes se deben a la compactación de la morfología urbana.

– *El desarrollo de la ciudad.* Para analizar este punto, es necesario eliminar el aumento de temperatura global que estamos viviendo debido al efecto invernadero.

A partir de mediados del siglo pasado (en 1953), ya se vio que existía una relación, aunque no muy clara, entre el desarrollo urbano y la elevación de la temperatura.

CAPÍTULO 36

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y VISIBILIDAD

36.1. TRANSMISIÓN, ABSORCIÓN Y DISPERSIÓN DE LA LUZ EN LA ATMÓSFERA

La visibilidad de la atmósfera se define como la máxima distancia a la que se puede ver sobre el horizonte un objeto oscuro de un tamaño determinado. Esta distancia depende directamente de la transmisión de la luz en la atmósfera y del contraste del objeto con el fondo. Ambos factores se encuentran afectados por los fenómenos de absorción y dispersión de la radiación solar visible.

En la transmisión de un haz de luz a través de la atmósfera, la principal característica que se modifica es la intensidad, que disminuye de forma exponencial con la distancia recorrida según la siguiente función:

$$I = I_0 \cdot e^{-\sigma x}$$

siendo:

I = Intensidad

I_0 = Intensidad inicial

x = Distancia

σ = Coeficiente de extinción de la atmósfera.

El coeficiente σ depende de los efectos de absorción (k) y dispersión (b), y se expresa como la suma de ambos $\sigma = b + k$.

La presencia de gases o aerosoles en la atmósfera pueden hacer variar el valor del coeficiente, al participar en los procesos de absorción y dispersión de la radiación. La dispersión debida a los gases atmosféricos es principalmente dispersión de *Rayleigh*, que contribuye poco a la reducción de la visibilidad. En este tipo de dispersión no cambia la frecuencia de la luz, ya que se produce con gases y partículas de un radio inferior a $0,1 \mu\text{m}$, menores que la longitud de onda de la luz incidente.

En los procesos de absorción los gases atmosféricos no participan, ya que no absorben luz visible. Entre los gases contaminantes, tan sólo el dióxido de nitrógeno (NO_2) puede alcanzar la concen-

tración suficiente como para tener efectos importantes en la absorción. A una concentración de 0,5 mg/kg de NO₂, que absorbe luz de longitud de onda verde-azul, se puede apreciar perfectamente como la atmósfera toma un color pardo-amarillento.

Los aerosoles atmosféricos tienen mayor importancia que los gases en la modificación del coeficiente de extinción. Son partículas grandes, y su tamaño es similar a la longitud de onda visible, entre los 0,4 y los 0,8 μm, por lo que producen *dispersión Mie*. El coeficiente de extinción debido a esta dispersión viene dado por la siguiente ecuación:

$$b = N \cdot K \cdot \pi \cdot r^2$$

donde:

N = Número de partículas

r = Radio de las partículas

K = Relación dispersión-área de las partículas, que depende del radio, del índice de refracción y de la longitud de onda de la luz incidente.

La absorción de las partículas en suspensión es función de su color, siendo el efecto análogo al de la dispersión de *Mie*.

En la medida de la visibilidad, además de la transmisión de la luz influye el contraste del objeto con el fondo, cuyo valor es el siguiente:

$$C = C_0 \cdot e^{-\sigma x}$$

siendo:

C₀ = Contraste real del objeto

C = Contraste aparente

σ = Coeficiente de extinción

x = Distancia

En la definición de la visibilidad se determina que el color del objeto debe ser negro, de manera que el contraste real C₀ = -1, por lo que

$$-C = e^{-\sigma x}$$

Teniendo en cuenta que se utiliza el ojo humano como receptor, cuyo umbral mínimo es del 2%, el contraste C debe ser igual a 0,02. Se obtiene así el valor del *margen visual V* para el ojo humano:

$$e^{-\sigma x} = 0,02$$

$$V = 3,9 / 6$$

Otros factores que influyen de forma decisiva en la visibilidad son la humedad relativa del aire y la presencia de sales solubles en aerosol en la atmósfera. Al condensarse el vapor de agua sobre las sales solubles en forma de gota aumenta su radio, del cual depende el coeficiente de extinción.

El radio de la gota de agua condensada depende de la humedad relativa del aire, de manera que a una concentración determinada de sales el coeficiente de extinción varía en función de la humedad. Cuando disminuye la humedad relativa disminuye también el radio de la gota de agua condensada y por lo tanto también el radio de las partículas. El coeficiente de extinción y la dispersión se hacen menores y la visibilidad es mayor. Si la humedad relativa del aire aumenta tiene lugar el proceso inverso, y la visibilidad disminuye.

Así, en las zonas con climas húmedos, la visibilidad suele ser inferior a la correspondiente a las zonas con climas secos.

36.2. CONTAMINACIÓN Y VISIBILIDAD

La reducción de la visibilidad es uno de los indicadores más claros de la existencia de un foco de contaminación atmosférica, fácilmente apreciable en las grandes ciudades o en las zonas donde se concentra la actividad industrial. Además del evidente impacto estético negativo que conlleva, la reducción de la visibilidad supone una disminución en la cantidad de energía que recibe la superficie del planeta, ya que las capas inferiores de la atmósfera se hacen menos permeables a la radiación solar visible.

Según la NOAA, durante el siglo XX la presencia de aerosoles ha podido suponer una reducción del 20 % del calentamiento global del planeta, lo que da una idea de la importancia de la visibilidad dentro del clima. Así, esta característica de la atmósfera debe tenerse en cuenta a la hora de conocer las consecuencias de la actividad humana sobre el clima, aunque la visibilidad también puede disminuir por causas naturales, como las erupciones volcánicas.

La mayoría de los agentes contaminantes gaseosos son incoloros y transparentes, salvo los halógenos (F, Cl, Br, I), el NO_2 (que es marrón) y algunos vapores orgánicos.

Los contaminantes sólidos de la atmósfera (partículas) son los que realmente provocan problemas de visibilidad al interferir con la luz.

A nivel de áreas urbanas o de zonas industriales, las emisiones de muchos grandes vehículos con motor Diesel son visibles en cuanto lleven mal regulada la bomba de inyección o si tienen problemas en la combustión. Asimismo, las chimeneas muestran muchas veces penachos coloreados en función del tipo de emisión.

La opacidad de una de estas emisiones es función de los siguientes factores:

- Concentración de las partículas
- Distancia del observador
- Dimensiones del penacho
- Distribución de las partículas
- Angulo de la radiación luminosa solar
- Propiedades ópticas de las partículas
- Humedad del aire
- Humedad en el penacho

QUINTA PARTE

El viento y la difusión atmosférica

CAPÍTULO 37

LOS VIENTOS

37.1. CIRCULACIÓN GENERAL DE LA ATMÓSFERA

37.1.1. Bases generales

Los movimientos de la atmósfera son muy variables en el espacio y en el tiempo.

A pesar de esto, los estudios a largo plazo demuestran que existen unas grandes corrientes atmosféricas distribuidas en función de la latitud.

La Tierra tiene dos zonas frías, los polos, y una zona caliente, el ecuador; si los polos se consideran como focos fríos y el ecuador como un foco caliente, el aire recorre el trayecto entre ambos en un funcionamiento similar al de una máquina térmica de poco rendimiento, en la que la energía calorífica absorbida en el foco caliente se cede casi en su totalidad al foco frío.

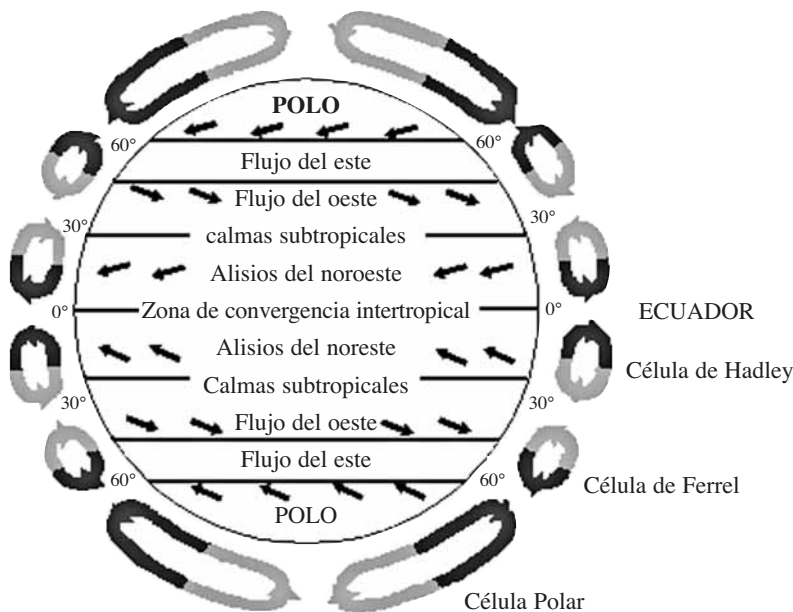
En la circulación de la atmósfera inciden diversos factores, entre los que destacan:

- Distribución de las presiones.
- Distribución de las temperaturas.
- Rotación de la Tierra.

De estos factores dependerán la dirección y la velocidad de los vientos troposféricos. Así, se establece una llamada circulación zonal, con un viento geostrófico paralelo a las isobaras y un viento térmico paralelo a las isoterma.

Se ha observado lo siguiente:

- *A nivel térmico:*
 - La tropopausa se eleva al acercarnos al ecuador.
 - La temperatura aumenta de los polos hacia el ecuador en la troposfera.
 - La temperatura aumenta desde el ecuador hacia los polos en la estratosfera.
 - Hay una asimetría entre los dos hemisferios, por debajo de los 30 km, que provoca temperaturas mínimas invernales inferiores en el hemisferio sur, y un enfriamiento de la tro-



posfera a nivel del ecuador en los meses de julio.

- Hay una inversión térmica permanente en las capas bajas de la atmósfera de los polos, más acentuada en invierno.
- *A nivel de presiones en las capas bajas de la atmósfera:*
 - Hay un núcleo anticiclónico en los polos.
 - Hay un eje de bajas presiones a una latitud de 60 °C.
 - Hay un eje anticiclónico a una latitud de 30 °C.
 - Hay un eje de bajas presiones cerca del ecuador.
- *A nivel de presiones en las capas altas de la atmósfera:*
 - Hay una amplia zona de bajas presiones sobre los polos.

- Hay un cinturón de altas presiones subtropical.

En el dibujo adjunto se representan las tres células de circulación como una imagen elemental del proceso, que, evidentemente, es mucho más complejo, pues participan todos los componentes indicados en la figura.

La rotación de la Tierra y el rozamiento provocan que:

- En latitudes elevadas la componente horizontal de la fuerza de inercia de *Coriolis* es alta, lo que hace que el rozamiento cerca del suelo sea poco importante.
- Por esa causa, la corriente polar y la corriente templada solo tienen una débil componente según los meridianos.

- Cerca del ecuador ocurre lo contrario: La fuerza de *Coriolis* es baja y el rozamiento es mucho más importante.
- La componente del viento según los meridianos cobra más importancia, haciendo que el alisio del hemisferio norte vire al noreste y el alisio del hemisferio sur, al sureste. Esto provoca una convergencia horizontal intensa en la zona de calmas ecuatoriales llamada por eso *zona de convergencia intertropical*.
- La zona de convergencia intertropical determina el ecuador meteorológico, que divide nuestro planeta en dos estaciones opuestas.

37.1.2. Circulación de la atmósfera y flujos energéticos

La circulación general de la atmósfera está ligada íntimamente a pozos y a fuentes de energía.

El equilibrio térmico de la Tierra es casi perfecto, habiendo zonas deficitarias en los polos y zonas excedentarias en el ecuador. En esta situación, para establecer ese equilibrio existe un flujo energético del ecuador a los polos a través de dos fluidos, como son el aire y la masa oceánica (recuérdese la máquina térmica citada en el epígrafe anterior).

La atmósfera transporta energía de los continentes hacia los océanos en verano, y hace lo contrario en invierno.

El excedente energético máximo se obtiene en verano cerca del ecuador, por

lo que la atmósfera deberá transportarlo, cosa que ocurre con los monzones.

Aparte, dos grandes corrientes oceánicas como el *Gulf Stream* y *Kurosivo*, son potentes fuentes de energía, cosa que transmiten en su contacto con las corrientes de aire frío que contactan con ellas.

Por otra parte, en cada hemisferio existen tres zonas de circulación intertropical:

- Zona de altas presiones subtropicales (calmas subtropicales).
- Zona del alisio.
- Zona de convergencia intertropical.

Estas zonas tienen un llamado *frente intertropical*, en latitudes en que coincide que la presión es mínima, que el viento cambia de dirección y que la temperatura del punto de rocío es de 15,5 °C.

Mediante diversos programas (GARP, ERBE, etc.) y con satélites meteorológicos, satélites geoestacionarios y de control de la atmósfera (SMM, Meteosat, NOAA, Landsat, Spot, etc.), se ha avanzado enormemente en los últimos años en el conocimiento de la circulación de la atmósfera, en los factores incidentes y en las consecuencias derivadas de dicha circulación.

37.2. EL VIENTO

37.2.1. Definición

El viento es un desplazamiento del aire predominantemente horizontal. En

las áreas montañosas el relieve determina en gran parte la importancia de los componentes no horizontales.

El desplazamiento de las masas de aire es provocado por las diferencias de presión y temperatura entre unas zonas y otras, y por una serie de fuerzas a las que está sometida cada partícula de aire.

37.2.2. Fuerzas incidentes

En principio, sobre una partícula de aire actúan:

- Fuerza de la gravedad.
- Fuerza de presión (arrastra hacia la depresión o núcleo de bajas presiones).
- Fuerza de *Coriolis* (perpendicular al movimiento de la partícula).
- Fuerza centrífuga (si las isobaras son curvas).
- Rozamiento (opuesto a la velocidad).

La aceleración de una partícula, si consideramos la aceleración local (variación del vector viento por unidad de tiempo), se puede expresar así:

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{\partial\bar{v}}{\partial t} = (\bar{v} \cdot \bar{\nabla})\bar{v}, \text{ siendo:}$$

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \text{Aceleración total}$$

$$\frac{\partial\bar{v}}{\partial t} = \text{Aceleración local}$$

$$(\bar{v} \cdot \bar{\nabla})\bar{v} = \text{Aceleración advectiva (causa-}$$

da por el proceso de transferencia provocado por el movimiento de la masa de aire).

Si consideramos que la velocidad del viento tiene como componentes:

$$u = \bar{u} + u'$$

$$v = \bar{v} + v'$$

$$w = \bar{w} + w'$$

siendo u, v y w las componentes según los ejes x, y, z , y u', v' y w' las fluctuaciones aleatorias de las mismas, de valor medio igual a 0.

Y si consideramos además que la aceleración según el componente $w, dw/dt$, se puede despreciar respecto de g , tendremos:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial x} + fv + \frac{1}{\rho} F_x$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial y} + fu + \frac{1}{\rho} F_y$$

$$\frac{dw}{dt} = 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g$$

donde:

$$\frac{du}{dt}, \frac{dv}{dt}, \frac{dw}{dt} = \text{Aceleración del viento según los ejes } x, y, z$$

g = Aceleración de la gravedad.

F_x, F_y = Componentes del vector \bar{F} , o fuerza de rozamiento por unidad de volumen.

ρ = Densidad.

F_z = Sería la componente vertical de \bar{F} , de escaso valor al lado de g , por lo

que se desprecia en la última ecuación y no se incluye.

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}, \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y}, -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} =$$

Fuerza neta de presión por unidad de masa en las direcciones de los ejes x, y, z, respectivamente.

Por otra parte, como la atmósfera puede ser considerada como un gas perfecto, dentro de situaciones más o menos normales, no extremas, habrá que tener en cuenta, además de las tres ecuaciones indicadas, la correspondiente ecuación de estado de un gas ideal (y la de continuidad), de expresión:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{v}) = 0, \quad y \quad P = \rho RT,$$

donde:

R = Constante propia del gas (aire) =

$$= \frac{R^*}{M}$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

m = Masa del volumen V del gas.

V = Volumen del gas.

R* = Constante universal de los gases = 8,314 J/K

M = Masa molecular del gas.

En otro orden, la fuerza de inercia de *Coriolis* se representa con la expresión:

$$\bar{F}_c = -2\bar{\Omega} \wedge \bar{V}_g, \text{ siendo:}$$

\bar{F}_c = Fuerza de *Coriolis*.

$\bar{\Omega}$ = Vector de la rotación terrestre instantánea.

\bar{V}_g = Vector velocidad del viento geostrófico.

37.2.3. Vientos teóricos.

Fuerzas y capa de rozamiento

Viento geostrófico

Se llama viento geostrófico al que se forma entre la tropopausa y la capa límite de la superficie terrestre (1.500 a 2.000 m), y que sólo depende del gradiente de presión y de la rotación de la Tierra.

Es paralelo a las isobaras, teniendo en el hemisferio norte a su derecha las altas presiones y a su izquierda las bajas (Ley del holandés *Buys Ballot*, enunciada en el siglo XIX).

En el epígrafe anterior hemos indicado que:

$$\bar{F}_c = -2\bar{\Omega} \wedge \bar{V}_g$$

pero F_c , como componente horizontal de \bar{F}_c , se puede representar como:

$$F_c = -2 \omega U_g \sin \phi, \text{ donde:}$$

ω = Velocidad angular de rotación de la Tierra $0,729 \cdot 10^{-5}$ rad./seg.

U_g = Componente horizontal del viento geostrófico \bar{V}_g

ϕ = Latitud

Pero la fuerza del gradiente de presión es:

$$F_p = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n},$$

y sustituyendo F_c por F_p nos quedará:

$$U_g = \frac{1}{2\omega\rho \operatorname{sen} \varphi} \cdot \frac{\partial P}{\partial n}, \text{ siendo,}$$

según los ejes x, y:

$$V_g = \frac{1}{2\omega\rho \operatorname{sen} \varphi} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$U_g = - \frac{1}{2\omega\rho \operatorname{sen} \varphi} \cdot \frac{\partial P}{\partial y}$$

Viento de gradiente

En general, tanto las líneas isobaras como las isohipsas son curvas, existiendo así una fuerza centrípeta que se añade a las del caso anterior, por lo que en nuestro caso, al contrario que el viento geostrófico, que carece de aceleración, aquí sí existe una aceleración normal.

$$\begin{aligned} \text{Módulo de la fuerza centrípeta} &= \\ &= \frac{U_h^2}{R}, \text{ siendo:} \end{aligned}$$

U_h = Velocidad del viento de gradiente.

R = Radio de curvatura del flujo circulante.

En una circulación anticiclónica en el hemisferio norte, tendremos:

$$2U_h \omega \operatorname{sen} j - \frac{U_h^2}{R} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n}$$

Si $U_g = \frac{R\omega \operatorname{sen}\varphi}{2}$, tendremos que:

$$U_h = R \omega \operatorname{sen} \varphi = 2U_g$$

Las isohipsas están separadas por una distancia mínima alrededor de un anticiclón, mientras que alrededor de un núcleo de bajas presiones están mucho más juntas.

En una circulación anticiclónica,

$$U_g \leq U_h \leq 2U_g$$

En general se debe considerar que el viento de gradiente está más próximo a la realidad que el viento geostrófico, y que ambos corresponden a una situación sin rozamiento, de movimiento solamente horizontal y de campo de presión permanente.

Viento térmico

Ya hemos indicado que la velocidad horizontal del viento en las capas bajas de la atmósfera se ve cada vez menos afectada por el rozamiento con la superficie terrestre a medida que ascendemos en altitud.

En términos amplios, la circulación general de la atmósfera a una altura determinada siempre está influida por las capas de aire de los niveles próximos, por lo que existe una relación vertical entre los vectores del viento en los diferentes niveles de la atmósfera que, a su vez, dependen, entre otras cosas, de la temperatura.

Si consideramos una capa de la atmósfera delimitada por dos niveles de presión P_1 y P_2 , en los que los vientos geostróficos correspondientes son V_{g1} y V_{g2} , paralelos a las isohipsas, para pasar de un vector viento al otro, habrá que añadir otro vector viento, también teóri-

co, que es el *viento térmico* \bar{V}_r , paralelo a las líneas de igual espesor de la capa considerada (estas líneas coinciden con las isotermas medias de esa capa, y de ahí el nombre de viento térmico).

Todo esto ocurre ya que según la fórmula de Laplace, la diferencia de geopotencial entre dos superficies isobaras es proporcional a la temperatura virtual media de la capa atmosférica considerada:

$$z_2 - z_1 = 29,291 T_{vm} \ln \frac{P_1}{P_2}$$

siendo:

z_1, z_2 = Niveles de altitud entre los que se encuentra la capa atmosférica considerada.

T_{vm} = Temperatura virtual media = $(1 + 0,608 r) T$

r = Relación de mezcla.

T = Temperatura.

P_1, P_2 = Presiones correspondientes a cada nivel de altitud.

Así pues, el viento térmico \bar{V}_r es la diferencia entre los sectores \bar{V}_{g1} y \bar{V}_{g2} , y su módulo es proporcional al gradiente del espesor de la capa atmosférica considerada, es decir, al de su temperatura virtual media, según la fórmula de Laplace que acabamos de indicar.

Fuerzas y capa de rozamiento

A medida que descendemos en la atmósfera en sentido vertical hacia la superficie terrestre, el rozamiento del vien-

to con esta última va aumentando hasta que llega un momento en que se convierte en una fuerza contraria al movimiento del aire que no se puede despreciar en absoluto.

Los niveles reales en que esto ocurre alcanzan del orden de los 2.000 m de altitud.

Si tenemos en cuenta entonces esta fuerza, se podrá indicar que:

$$\rho \frac{du}{dt} = - \frac{\partial P}{\partial x} + 2v\rho\omega \operatorname{sen} \varphi = F_{rx}$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = - \frac{\partial P}{\partial y} + 2u\rho\omega \operatorname{sen} \varphi = F_{ry}$$

siendo:

u, v = Componentes del vector velocidad del viento según los ejes x e y .

\bar{F}_r = Fuerza de rozamiento, con componentes F_{rx} y F_{ry} y según los ejes x e y .

Los meteorólogos utilizan las fórmulas:

$$u = U_g [1 + e^{cz} \cos (cz)]$$

$$v = U_g e^{cz} \operatorname{sen} (cz) , \text{ siendo:}$$

u, v = Componentes de la velocidad del viento.

U_g = Módulo del vector velocidad del viento geostrófico.

$$c = \sqrt{\frac{rwsen\varphi}{a_r}}$$

a_r = Parámetro de rugosidad (que depende de esta característica de la superficie considerada).

Por otra parte, debemos tener siem-

pre en cuenta que cerca de la superficie terrestre predomina el régimen turbulento a causa de los gradientes de temperatura y de presión, por la rugosidad del suelo, etc., mientras que algo más arriba, el régimen es laminar, y es donde se estudian los vientos geostroáficos y los térmicos.

37.2.4. Vientos locales

Vientos de valle, de ladera y de montaña

En conjunto, en las montañas y en los valles se pueden clasificar los vientos en cuatro tipos básicos:

- Vientos de compensación.
- Vientos de valle.
- Vientos de pendiente o de ladera:
 - Anabáticos
 - Catabáticos
- Vientos de glaciar o nevados.

Si los valles tienen unas dimensiones amplias, a partir de 10-12 km de anchos, tienen efectos específicos sobre los desplazamientos del aire. En ese caso, el aire toma el valle como un corredor y se desplaza a lo largo de su eje longitudinal, cosa que ocurre con frecuencia en los grandes valles o grandes depresiones hidrográficas europeas.

Cuando el valle se estrecha, la lámina de viento se estrecha también, se acelera y asciende; cuando el valle se ensancha, desciende la velocidad del

viento, baja otra vez el filete de corriente y se presentan ondulaciones como saltos hidráulicos y corrientes de retorno y torbellinos.

Como las temperaturas del suelo de los valles descienden menos de noche que en las cumbres, el aire en contacto con el suelo se enfría mucho más en las cumbres y será más denso, al contrario que en los valles, por lo que tiende a bajar por las laderas y ocupa el lugar del aire más caliente que estaba en el valle, que subirá hacia arriba por el centro. Se presenta entonces una corriente de circulación cerrada para cada ladera, llamándose a estas corrientes *vientos catabáticos* o de ladera descendentes.

De día, el proceso es el contrario, subiendo el viento por las laderas al calentarse el aire en el fondo del valle y en las laderas, llamándose las corrientes en este caso *vientos anabáticos* o de ladera ascendentes.

Si las precipitaciones son de nieve, como ocurre en invierno en los sistemas montañosos elevados, las laderas y el fondo del valle se cubren de nieve, por lo que las masas de aire que están en contacto con ese suelo se enfrían mucho, y entonces los vientos catabáticos o descendentes se mantienen de día y de noche. Se denominan *vientos catabáticos nevados*, y se presentan, por las mismas causas, en los glaciares.

Los vientos de compensación se forman en zonas llanas próximas a las montañas. De noche, el viento se desliza desde las montañas hacia la llanura por las causas antes explicadas, y de día

ocurre lo contrario.

Los vientos de valle son los antes indicados.

Los vientos de ladera son, aparte de lo antes indicado referente al enfriamiento del suelo y del aire, algo más complejos.

De noche, el aire frío desciende por las laderas y es arrastrado por el viento de valle.

Al amanecer, el viento de valle se detiene y se forman dos células convectivas, con subida del aire caliente a lo largo de las laderas y descenso en el centro del valle.

A mediodía desaparecen las células convectivas, y el viento de valle arrastra el aire caliente hacia arriba.

Al anochecer el viento de valle se detiene, siendo en ese momento el fondo del valle la zona más caliente del territorio. Se forman dos células convectivas, con subida del aire en el centro del valle y bajada por las laderas.

Una vez comienza la noche, continúa el enfriamiento, desaparecen las células convectivas y se presenta la situación de la noche, que hemos indicado al principio del proceso.

Los vientos de glaciar o nevados ya los hemos indicado antes. A veces, si existe un obstáculo, el aire frío del viento nevado se puede ir acumulando detrás de ese obstáculo, y lo mismo ocurre si es detenido por la circulación del viento de valle que se desplaza en sentido contrario. Si el obstáculo desaparece o si el viento de valle se debilita, cosa que ocu-

rra al anochecer, ese aire frío acumulado desciende más o menos violentamente, provocando las llamadas *avalanchas de aire frío*.

Los vientos de ladera pueden provocar situaciones de *cintura cálida*: Al deslizarse el aire frío a lo largo de las laderas, cerca de la parte superior de estas se puede formar una franja más caliente que las zonas superiores o inferiores. Esto es así porque se forma con facilidad un perfil térmico de inversión, siendo las diferencias de temperaturas del orden de los 4 a 8 °C por encima respecto del entorno superior o inferior. Esto puede ser importante para las actividades agrarias en estas zonas, pues ese microclima facilita la agricultura en lo que se refiere a menos heladas tardías, etc.

Brisas

Las brisas son vientos más o menos locales producidos por la presencia de una interfase masa de agua-continente o por la existencia de una elevación, que provocan una discontinuidad para diversos parámetros meteorológicos.

Reconocemos cuatro tipos básicos de brisa:

- Brisas costeras:
 - Brisa de mar.
 - Brisa de tierra.
- Brisas de masas de agua continentales (embalses y lagos).
- Brisas de colina.
- Brisas de áreas de regadío.

Brisas costeras

La línea de costa separa dos facies diferentes a nivel de la superficie terrestre, y tiene, como consecuencia de esta separación de medios a nivel horizontal y del suelo del planeta, efectos diversos sobre las masas de aire que están en contacto con ellas.

Durante el día, la zona terrestre se calienta antes que el mar. Esta tierra calienta a su vez las masas de aire que están sobre ella y hace que formen corrientes ascendentes. Al subir estas masas de aire, son reemplazadas por aire frío que proviene del mar próximo, formándose así las *brisas de mar*, que soplan hacia el continente.

Durante la noche, el fenómeno se invierte, pues la tierra se enfría más rápidamente que el mar, formándose en consecuencia las *brisas de tierra*, que soplan hacia el mar.

Se forman así circulaciones cerradas en un sentido o en otro, según sea día o noche.

A veces, si durante el día el contraste térmico es muy acusado, se pueden formar nieblas, pues se genera cierta condensación al bajar la contracorriente y pasar sobre el mar en dirección a la tierra.

Las brisas costeras dependen y se caracterizan de y por los siguientes factores:

- Tienen efectos determinantes sobre la temperatura de la zona
- Tienen efectos determinantes sobre la humedad de la zona

- Pueden penetrar en tierra hasta 50 km, a una altitud que puede alcanzar 1 km.
- Las brisas de mar tienen velocidades del orden de los 10 a 30 km/hora, aunque si coinciden con una inversión térmica pueden alcanzar los 60-80 km/hora.
- Las brisas de tierra tienen velocidades de 5-10 km/hora.
- La diferencia de temperatura entre el mar y la tierra es un factor determinante.
- La fuerza del viento geostrofico es un factor determinante.
- La rugosidad y el relieve del suelo constituyen un factor determinante.
- Condiciones de aparición:
 - Viento de gradiente bajo.
 - Gradiente térmico importante entre la costa y el interior (calentamiento rápido del suelo y, en contraste, poco cambio en la temperatura del mar).
 - Fuerte insolación.
 - Costa rectilínea o con curvas suaves.
 - Si existen acantilados:
 - Acantilados expuestos al sol: generan corrientes convectivas.
 - Acantilados en la sombra: la masa de aire marino estable no consigue subir y entonces se desplaza a lo largo de la costa.
 - Presencia de brisas de valle, que refuerzan las brisas de mar.
 - Las desembocaduras de los ríos crean canales para el viento, que al estrecharse el cauce provocan un au-

mento de la velocidad del filete de aire.

- El tipo de suelo y su cubierta pueden favorecer la aparición o la desaparición de las brisas costeras (los suelos calizos y rocosos y los suelos desnudos las favorecen. Las zonas agrícolas, también. Las masas forestales, no).
- La línea de costa y su curvatura provocan:
 - Línea cóncava:
 - Confluencia en la noche.
 - Difluencia de día.
 - Línea convexa:
 - Confluencia de día.
 - Difluencia en la noche.
 - Islas:
 - Confluencia de día.
 - Difluencia de noche.
- La humedad en la zona terrestre es un factor determinante.

En el caso de que exista una isla, durante el día se calienta y sube la masa de aire que está sobre ella, provocando una depresión que suele ir acompañada por una circulación ciclónica alrededor de la isla que se une al desvío del viento que provoca la isla, al ser un obstáculo a esa circulación. Esa desviación se realiza por cada lado de la isla, presentándose una aceleración en un lado del obstáculo y una disminución de la velocidad en el otro.

Durante la noche el fenómeno se invierte, formándose un anticiclón sobre la isla y una circulación anticiclónica en su entorno.

Cualquiera de estos dos movimientos del aire puede calificarse como *brisa de isla*.

Brisas de masas de agua continentales

El fenómeno es similar al que ocurre en las costas, siempre que la masa de agua sea suficientemente importante para que se genere un contraste térmico apreciable.

Durante el día existe una fuerte convección térmica y se forma una zona de subsidencia sobre la masa de agua, apareciendo entonces vientos desde esa masa de agua hacia tierra en diferentes direcciones que dependen, entre otros factores, de la topografía de las orillas y de las zonas de tierra más o menos inmediatas, y de la forma de la línea de costa.

Si la masa de agua es grande, la zona de altas presiones que se forma sobre ella origina una circulación anticiclónica que se acopla a la circulación general atmosférica.

Brisas de colina

En un territorio en el que existen cerros, montañas o colinas aisladas de dimensiones limitadas, el viento se desliza por cada lado de la colina al encontrar un obstáculo en su movimiento horizontal, acelerándose al llegar y frenando una vez que lo ha alcanzado.

Por otra parte, detrás del obstáculo se forman fuertes turbulencias, que coinci-

den con el movimiento más lento del viento en los lados de ese obstáculo una vez superado este.

En un sentido vertical, el filete de aire, al llegar al obstáculo, se eleva y se estrecha, acelerando a medida que se acerca a él y frenándose al pasar, formándose las turbulencias antes indicadas, detrás.

Brisas de áreas de regadío

En una zona seca, cuando se ponen en marcha grandes superficies de regadío, se presenta un contraste térmico entre ambas que provoca brisas de mecanismos y características similares a las de las brisas de masas de agua continentales.

37.3. VIENTOS Y TURBULENCIAS

Sabemos que la turbulencia es un movimiento caótico, desordenado y aleatorio, similar al de la agitación molecular, pero a una escala mucho mayor.

Como factor de base del movimiento de las masas de aire de las capas bajas de la atmósfera, es muy difícil de tratar, existiendo para ello diversos métodos de cálculo matemático.

La turbulencia, como proceso atmosférico, puede conducir a la condensación del vapor de agua si provoca un enfriamiento con un aumento de la concentración de vapor o con una disminución de la relación de mezcla de saturación (véase el epígrafe correspondiente).

La turbulencia atmosférica puede tener dos orígenes básicos; el primero es el mecánico.

La *turbulencia de origen mecánico* se forma en las capas bajas de la atmósfera como consecuencia del rozamiento de las masas de aire cuando se desplazan tocando la superficie terrestre, con su relieve, vegetación, masas de agua, ciudades, etc., o bien cuando esas masas rozan con otras que se desplazan a diferente velocidad.

El segundo origen puede ser de tipo térmico.

La *turbulencia de origen térmico* se origina en el calentamiento o en el enfriamiento de las masas de aire que están en contacto con el suelo. Cuando se calienta intensamente el suelo, este calienta a su vez las masas de aire que están encima y se generan así corrientes turbulentas de movimiento desordenado. Si el suelo se enfría, este puede enfriar la masa de aire que está sobre él, provocando movimientos turbulentos.

Las turbulencias, del tipo que sean, provocan modificaciones de la temperatura y de la humedad de las masas de aire afectadas, alterándose los gradientes verticales de ambos factores como consecuencia de los movimientos verticales que provoca el régimen turbulento. Se generan así variaciones adiabáticas, con expansiones o compresiones, con enfriamientos y aumentos de la humedad relativa o con calentamientos y reducción de esa humedad, respectivamente.

Estas alteraciones adiabáticas son las que generan ciertos tipos de nubes, pues

son la causa de la condensación del vapor de agua que se indicaba al principio del epígrafe.

37.4. CONVECCIÓN Y TURBULENCIAS ATMOSFÉRICAS

37.4.1. Convección en los fluidos: Situación en la atmósfera

La convección es una de las formas de transferencia de calor o de masa, y se llama así cuando ocurre en un fluido en movimiento y se efectúa por desplazamiento del fluido (otras formas pueden ser la radiación o la conducción).

En el medio atmosférico, esas transferencias se verifican entre los materiales presentes en la superficie de la Tierra y la atmósfera como fluido en movimiento, es decir, cuando existe viento.

La convección puede ser *libre*, que es cuando el movimiento del fluido es provocado por diferencias internas de densidad. La causa suele ser la existencia de gradientes de temperatura, que generan gradientes de dilatación del fluido.

Este caso es muy frecuente en la atmósfera próxima al suelo, pues durante el día el suelo se calienta y el aire que está en contacto con él, también, con lo que se reduce su masa específica; el aire más frío de su entorno lo empuja hacia arriba y ocupa su lugar, y así sucesivamente, de forma que de esta manera se transfiere la energía captada por la superficie terrestre a las capas bajas de la atmósfera.

La convección también puede ser *forzada*, si el movimiento del fluido lo causa un campo exterior de fuerzas.

En la atmósfera, este caso ocurre cuando actúan el gradiente local de presión atmosférica y la fuerza generada por el movimiento de rotación de la Tierra, cuya resultante es el viento, que provoca así el movimiento del aire por la acción de fuerzas externas.

Cuando la velocidad del viento es baja, es muy frecuente que actúen a la vez tanto la convección libre como la convección forzada, encontrándonos así con la llamada convección *mixta*. En esta situación, los movimientos y desplazamientos del aire son causados tanto por los agentes externos que provocan la convección forzada, como por los gradientes de temperatura que originan la convección libre.

El paso de un tipo de convección a otra puede determinarse mediante el *Número de Richardson*, como veremos más adelante.

37.4.2. Desplazamiento de los fluidos según su régimen. Viscosidad

De los tres tipos de transferencia de calor o de masa por convección, el segundo, es decir, el de convección forzada, puede tener a su vez dos modalidades, según que el movimiento sea de deslizamiento ordenado, que corresponde al *régimen laminar*, o si, por el contrario, es desordenado, con penetración de las partículas de unas capas en otras de forma irregular, en cuyo caso

nos encontramos en un *régimen turbulento*.

Los fluidos pueden ser más o menos viscosos. Si no tienen casi rozamiento con otras superficies, puede considerarse que tienen un régimen laminar, deslizándose unas capas sobre otras y sobre otras superficies sin prácticamente fuerzas opuestas.

En este caso, el transporte es básicamente horizontal, por *advección*, según las líneas de corriente.

Lo que ocurre con más frecuencia es que tanto si nos encontramos en un caso de contacto entre una superficie sólida, como las masas continentales de la superficie terrestre, y un fluido como el aire, desplazándose rozando con el suelo por la acción del viento, como si se trata de una interfaz de dos fluidos de densidad diferente, como el aire y el agua de la superficie terrestre, o incluso dos masas de aire de densidad diferente, existe una zona o *capa límite*, en la que la viscosidad es preponderante, y corresponde a una zona de transición entre el fluido que ve alterado su régimen (laminar a turbulento) y la otra parte, constituida por la superficie sólida o por el otro fluido de densidad diferente.

La capa límite puede definirse en función de los parámetros que definen la escorrentía de un fluido, pues habrá una capa límite en función de la temperatura, otra que es función de la concentración, otra que es función de la velocidad, etc. En este último caso, hemos de indicar que la velocidad del fluido afectado pue-

de ser cero o próxima a cero en los puntos de contacto con la otra parte (superficie sólida o fluido).

Cuando hablamos de *viscosidad* nos referimos a la resistencia de un fluido a la deformación. En nuestro caso serán las fuerzas de rozamiento del viento las que la provoquen al contactar con el suelo o con el agua de la superficie terrestre o al contactar dos masas de aire de diferente densidad.

Existe un *cizallamiento* que define estas fuerzas que es proporcional al gradiente de velocidad del fluido (viento), siendo entonces la viscosidad el coeficiente que liga este cizallamiento con la velocidad, y si consideramos que estamos en una viscosidad cinemática, tendremos:

$$v = \frac{\mu}{\rho}, \quad \text{siendo:}$$

v = Viscosidad cinemática.

μ = Viscosidad dinámica que procede de:

$$\tau = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

ρ = Masa específica (o volúmica) del fluido.

τ = Cizallamiento.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \text{Gradiente de velocidad.}$$

La atmósfera puede dividirse, bajo estos puntos de vista, en cuatro capas paralelas. La primera es la que contacta con la superficie terrestre, y es la *subcapa de rugosidad*, que está sometida al rozamiento con el suelo y depende de la

topografía, de la vegetación, de la viscosidad, etc.

En su parte superior está la *capa de superficie*, que si no se ve afectada por las características de la superficie terrestre que está en contacto abajo con la subcapa de rugosidad, tampoco lo está, o muy poco, por el efecto de la rotación de la Tierra, a causa de su proximidad al suelo. Esta capa es importantísima en múltiples fenómenos meteorológicos, y se puede admitir que en ella los flujos verticales son constantes.

Sobre la capa de superficie está la *capa externa*, en la que los movimientos del aire están influidos tanto por el suelo como por la rotación de la Tierra.

Sobre la capa externa se encuentra la *atmósfera libre*, en la que los desplazamientos de las masas de aire dependen de los gradientes horizontales de presión y temperatura por una parte y de la rotación de la Tierra por otra.

37.4.3. Transición de régimen: El número de Reynolds

En los fenómenos atmosféricos es frecuentísimo el régimen turbulento, cuyo conocimiento se busca mediante parámetros como el *Número de Reynolds*, que sirve para caracterizar y definir la transición de un régimen laminar a un régimen turbulento.

Equivale a un cociente entre las fuerzas de inercia y las de viscosidad, y se representa así:

$$R_e = \frac{\bar{\rho u} \cdot l}{\mu} \quad \text{pero } \mu = \nu \cdot \rho ,$$

y sustituyendo:

$$R_e = \frac{\bar{u} \cdot l}{\nu} \quad \text{siendo:}$$

R_e = Número de Reynolds.

\bar{u} = Velocidad media del fluido.

l = Dimensión propia del objeto o masa considerada.

ρ = Masa volúmica del fluido.

Si R_e = Valor crítico o límite de *Número de Reynolds*, tenemos que:

El Régimen es laminar si $R_e < R_{e_c}$

El Régimen es turbulento si $R_e > R_{e_c}$

37.5. VIENTO Y TEMPERATURA. LOS FLUJOS CONVECTIVOS

37.5.1. Flujos verticales

El fenómeno de la convección ya se explicó en apartados anteriores, existiendo, como sabemos, flujos convectivos de calor y de masa cuyas expresiones son similares a las correspondientes a la densidad de flujo de cantidad de movimiento, que es función de las componentes horizontal y vertical de la velocidad de una masa fluida (de aire en nuestro caso). Esto es así puesto que las transferencias por convección en una capa límite de una masa fluida en movimiento en régimen turbulento, dependen del flujo de cantidad de movimiento, ya que el aire es su medio y su vehículo.

La densidad de flujo convectivo de calor está relacionada con el gradiente térmico vertical, pues:

$$Q_h = \rho c_p T, \text{ siendo:}$$

Q_h = Cantidad de calor contenida en la unidad de volumen (de aire).

ρ = Masa volúmica del aire.

c_p = Capacidad térmica másica del aire a presión constante.

T = Temperatura.

y por otra parte,

$$\Phi_h = -\rho c_p w'T', \text{ siendo:}$$

Φ_h = Densidad de flujo convectivo de calor.

w' = Fluctuación de la componente vertical de la velocidad del viento.

T' = Fluctuación aleatoria de la temperatura.

37.5.2. Perfiles verticales en la atmósfera

Los intercambios convectivos en la atmósfera se deben básicamente a las fluctuaciones de la componente vertical de la velocidad del viento, por lo que según *Reynolds* se puede escribir, muy aproximadamente, que:

$$K_m = K_w = K_h = K_{CO_2}, \text{ siendo:}$$

K_m = Difusividad turbulenta de la cantidad de movimiento.

K_w = Difusividad turbulenta del vapor de agua.

K_h = Difusividad térmica turbulenta.

K_{CO_2} = Difusividad turbulenta del CO_2

De estas igualdades y de las fórmulas del epígrafe anterior se obtienen las expresiones del perfil vertical de la temperatura, del perfil de humedad específica, del perfil de concentración de CO_2 y del perfil de la velocidad del viento:

$$\text{Temperatura: } T(z) - T_0 = \frac{T^*}{k} \ln \frac{z}{z_{0,T}}$$

$$\text{Humedad: } q(z) - q_0 = \frac{q^*}{k} \ln \frac{z}{z_{0,W}}$$

CO_2 :

$$C_{CO_2}(z) - C_{0,CO_2} = \frac{C^*_{CO_2}}{k} \ln \frac{z}{z_{0,CO_2}}$$

$$\text{Viento: } u(z - D) = \frac{u^*}{k} \ln \frac{z - D}{z_0}$$

siendo,

$T(z) - T_0$ = Perfil vertical de temperatura.

T_0 = Temperatura de referencia a nivel de la superficie.

T^* = Temperatura de escala =

$$= -\frac{\Phi_h}{\rho \cdot C_p \cdot u^*}$$

k = Constante de von Karman.

z = Nivel (altitud) dado.

$z_{0,T}$ = Longitud de rugosidad térmica.

$q(z) - q_0$ = Perfil vertical de humedad específica.

q_0 = Humedad de referencia del aire a nivel de la superficie.

q^* = Humedad específica de escala.

$C_{CO_2}(z) - C_{o,CO_2}$ = Perfil vertical de concentración de CO_2

$C^*_{CO_2}$ = Concentración másica de escala del CO_2

$u(z-D)$ = Perfil vertical de velocidad del viento.

u^* = Velocidad de rozamiento.

D = Altura de desplazamiento (sobreelevación por encima de la vegetación, por ejemplo).

z_o = Parámetro de rugosidad (longitud de rugosidad aerodinámica).

37.5.3. Estabilidad atmosférica y perfiles de velocidad. El número de Richardson

En general, los gradientes térmicos verticales cerca del suelo influyen fuertemente sobre la estabilidad de las capas de la atmósfera, y pueden ser básicamente de dos tipos:

Los *perfiles térmicos sobreadiabáticos* (de día), en los que la temperatura decrece con la altitud con un gradiente vertical superior al gradiente adiabático, y los *perfiles térmicos de inversión* (de noche), en los que la temperatura aumenta con la altitud.

Los primeros corresponden a situaciones atmosféricas inestables, pues el aire caliente próximo al suelo tiende a elevarse, mientras que los segundos reflejan condiciones atmosféricas de estabilidad, pues, en este caso, el aire frío y denso se ubica en las inmediaciones del suelo.

En las zonas próximas al suelo el gradiente térmico vertical es cero, situación que indica que el perfil térmico adiabático se puede identificar como el correspondiente a la *neutralidad* térmica.

Richardson estableció un número que relaciona las fuerzas de flotabilidad debidas al gradiente térmico vertical, con las fuerzas de inercia resultantes de la interacción de los torbellinos con el gradiente vertical medio de velocidad.

$$R_i = \frac{g}{T_o} \frac{\frac{\partial \bar{T}}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2}, \text{ siendo:}$$

R_i = Número de Richardson.

T_o = Temperatura de referencia.

g = Aceleración de la gravedad.

El perfil térmico sobreadiabático origina un R_i negativo, mientras que el perfil térmico de inversión produce un R_i positivo.

Por otra parte, y acordándonos de los tipos de convección y de la transición de regímenes laminares a regímenes turbulentos tratados en otros epígrafes, se puede indicar que:

Si estamos en un régimen de convección libre, $R_i > -1$

Si estamos en un régimen de convección forzada, $R_i > -0,03$

Si estamos en un régimen de convección mixta, $-1 \leq R_i \leq -0,03$

De forma aproximada, y para poder aplicar estos cálculos, se puede expresar

que si se miden en dos niveles diferentes la temperatura y la velocidad del viento, que:

$$R_i = \frac{g}{\bar{T}} \frac{(T_2 - T_1)(z_2 - z_1)}{(u_2 - u_1)^2} \text{ siendo:}$$

T_1, T_2 = Temperaturas en los niveles 1 y 2

z_1, z_2 = Altura de los niveles 1 y 2

u_1, u_2 = Velocidad del viento en los niveles 1 y 2

\bar{T} = Media de las temperaturas T_1 y T_2 en K

Así se obtienen el *Número de Richardson* y el régimen de convección en que nos encontramos.

37.5.4. Determinación de los flujos verticales

Para expresar básicamente estos flujos, diversos autores han desarrollado fórmulas que llegan hasta la *ley de difusión*, a partir de las cuales existen diferentes métodos para determinarlos:

$$\phi_c = - \overline{[c] w'} = - K_c \frac{\partial [c]}{\partial z}, \text{ siendo:}$$

ϕ_c = Densidad de flujo del componente c

$[c]$ = Concentración volúmica de c

c = Componente atmosférico.

K_c = Difusividad turbulenta del componente c

w' = Fluctuación aleatoria de la componente w de la velocidad del viento.

Si los niveles z_1 y z_2 tienen una concentración de c_1 y c_2 , podemos indicar:

$$\phi_c dz = - K_c(z) d[c]$$

$$\phi_c f_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{K_c(z)} = - f_{c_1}^{c_2} d[c]$$

$$\phi_c = \frac{[c_1] - [c_2]}{X}, \text{ y } \phi_c = h_c ([c_1] - [c_2]) .$$

$$\text{siendo: } X = 1/h_c = f_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{K_c(z)}$$

X = Resistencia aerodinámica correspondiente a [c]

h_c = Coeficiente de intercambio convectivo de [c]

A partir de estas fórmulas, y como hemos indicado, existen diversos métodos para determinar los flujos verticales, de los cuales los básicos son:

- *Método de las fluctuaciones.* Necesita de una serie de mediciones de campo con instrumentos complejos, aunque es muy útil en zonas con cubierta vegetal.
- *Método aerodinámico.* Se basa en la medición, control y uso de los perfiles medios de la zona de la capa límite en la que los flujos verticales pueden considerarse como constantes, como se explicó en anteriores epígrafes.

El uso de cualquiera de estos métodos es largo y complejo, y requiere bastante instrumentación y cálculos posteriores que no se justifican en estudios para aplicar en las prácticas agrícolas o forestales normales, aunque sí son muy útiles en los análisis meteorológicos a nivel puntual o comarcal, y sobre todo para ciertos cálculos para el estudio y control de la contaminación atmosférica.

37.6. PERFIL VERTICAL DEL VIENTO CERCA DEL SUELO

37.6.1. Bases de partida. La Ley de Prandtl

Ya hemos sugerido en otros apartados lo que ocurre con el movimiento de las masas de aire según el perfil vertical, siendo muy frecuente el régimen turbulento en la zona de contacto de la atmósfera con el suelo, y, en concreto, en la proximidad de la superficie terrestre existe una capa límite turbulenta.

Los análisis generales se basan en unas suposiciones y en unas hipótesis que, en conjunto, son las siguientes:

- Partimos de superficies horizontales amplias, para que pueda existir una escorrentía con láminas de aire en equilibrio con ellas, con la capa límite bien definida.
- Asimismo suponemos que esa escorrentía del aire solo tiene una componente horizontal y otra vertical.
- Existe una analogía comprobada, ya citada, entre los movimientos turbulentos y los moleculares.
- *Longitud de mezcla l*: es similar al recorrido medio libre en la teoría cinética de los gases.
- Se establece que:

$$u' = u(z-l) - u(z) = -l \frac{\partial u}{\partial z}, \text{ siendo:}$$

u' = Fluctuación de la velocidad del viento según la componente horizontal en el nivel z .

z = Nivel superior al que llega una partícula del nivel inferior $z-l$

$u(z-l)$ = Velocidad del viento en el nivel $z-l$

- El flujo vertical de cantidad de movimiento es

$$\Phi_m = \rho \cdot u \cdot w', \text{ siendo:}$$

Φ_m = Flujo vertical de cantidad de movimiento.

ρ = Masa volúmica del aire.

u = Velocidad del viento.

w' = Fluctuación de la velocidad del viento según la componente vertical.

- Se considera un flujo medio de cantidad de movimiento y la fórmula de *Reynolds*.

- Se considera que algo separada de la superficie del suelo, la escorrentía es horizontal, por lo que:

$$\bar{w} = 0, \bar{u}' = 0, \bar{w}' = 0, \text{ quedando: } \bar{\phi}_m = \rho \cdot \bar{u}' \cdot \bar{w}'$$

- Sustituyendo con las fórmulas anteriores, tendremos:

$$\rho \bar{u}' \bar{w}' = -\rho l \bar{w}' \frac{\partial u}{\partial z}$$

- Según la suposición de *Prandtl*, las fluctuaciones de la velocidad son del mismo orden de magnitud en todas las direcciones, y tienen cierta correlación entre ellas, por lo que:

$$w' \cong -u' = l \frac{\partial u}{\partial z}$$

- La fórmula o *Ley de Prandtl* subsiguiente es:

$$\rho \cdot \overline{u' \cdot w'} = -\rho l_m^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right), \text{ siendo:}$$

l_m = Longitud media de mezcla.

- Se supone (*Prandtl*) que las fluctuaciones de la velocidad son proporcionales a la distancia al suelo, es decir: $l_m = kz$, siendo:

z = Distancia al suelo.

k = Constante de *von Karman* (de valor 0,4).

- Se supone que la densidad de flujo de cantidad de movimiento es constante a lo largo de toda la escorrentía.
- Se introduce la velocidad de rozamiento en función del cizallamiento:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}}, \text{ siendo:}$$

u^* = Velocidad de rozamiento.

$$\tau_o = -\rho \cdot \overline{u' \cdot w'} \text{ (cizallamiento).}$$

37.6.2. Perfil vertical de la velocidad del viento y parámetros de rugosidad

Relacionando la fórmula de *Prandtl* con las siguientes indicadas en el epígrafe anterior, tenemos:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u^*}{k \cdot z}, \text{ e integrando,}$$

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_o} \right)$$

La primera es la ecuación diferencial del perfil vertical de velocidad del viento. La segunda es la ecuación del perfil

logarítmico de velocidad del viento en una capa límite turbulenta (cerca del suelo).

Z_o = Parámetro de rugosidad de la superficie del suelo afectada.

El parámetro de rugosidad muestra el efecto de la rugosidad de la superficie (del suelo) sobre el perfil de velocidad del viento.

En las zonas muy próximas al suelo existe un fuerte gradiente vertical de velocidad, que va disminuyendo a medida que ascendemos.

Los parámetros u^* y z_o se calculan experimentalmente con cierta facilidad.

PARÁMETROS DE RUGOSIDAD DE VARIAS SUPERFICIES DEL SUELO

Superficie del suelo	z_o (en m)
Suelo desnudo	0,005-0,020
Plano de agua	0,002-0,006
Pradera	0,05-0,07
Campo de cereal	0,10-0,16

En principio, el parámetro de rugosidad z_o es bajo para superficies lisas, y aumenta cuando la rugosidad (relieve) de la superficie crece.

37.6.3. El perfil vertical del viento y la cubierta vegetal

En una masa vegetal sobre la que se desplaza una masa de aire por el viento, el parámetro de rugosidad z_o se puede calcular muy aproximadamente median-

te la fórmula de *Plata-Arya* o con la de *Szeicz*:

$$z_0 = 0,15 H \text{ (Plata-Arya)}$$

$$\log z_0 = 0,997 \log H - 0,883, \text{ siendo:}$$

H = Altura media de la masa vegetal.

Por otra parte, es muy importante tener en cuenta el efecto real de sobreelevación que ejerce una cubierta vegetal densa sobre el perfil de velocidad, de manera que si:

H = Altura media de la cubierta vegetal.

D = Altura de desplazamiento (sobre-elevación).

D < H (en general, D (0,7H).

Y se deberá expresar que:

$$u(z - D) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z - D}{z_0} \right),$$

es decir, esta es ahora la nueva ecuación del perfil vertical de velocidad.

En general y según *Stanhill*, se puede indicar que $\log D = 0,98 \log H - 0,15$.

Existe una relación entre el índice foliar y la masa de las hojas por una parte, y la altura de desplazamiento por otra, y

lo mismo ocurre con el parámetro de rugosidad.

Si sube el índice foliar, sube la altura de desplazamiento, y también es mayor la altura de desplazamiento a aquella altura en que es más elevada la masa foliar.

Existe un sistema sencillo de representar el perfil de velocidad en las capas bajas de la atmósfera si se mide la velocidad del viento a una altura determinada h_x

$$\frac{u(z)}{u(h_x)} = \left(\frac{z}{h_x} \right)^m, \text{ siendo:}$$

h_x = Altura de la medición de la velocidad del viento.

m = Exponente que es función de la rugosidad de la superficie, que varía entre 0,1 en un plano de agua y 0,40 en una zona urbana, y de la estabilidad atmosférica.

La vegetación actúa sobre el viento como una barrera semipermeable, dejando de ser constante en función de la altura el flujo vertical de cantidad de movimiento si estamos dentro de la cubierta vegetal.

CAPÍTULO 38

ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA Y ECUACIONES BAROMÉTRICAS

En los apartados referentes al estado térmico de la atmósfera se trata de la estabilidad atmosférica según el gradiente térmico, y en los que explican los flujos convectivos también se trata de esa estabilidad.

En este capítulo nos referiremos a la estabilidad de la atmósfera teniendo en cuenta que entran en liza múltiples elementos térmicos, de presión, de altitud, la relación de mezcla, etc., y que la contaminación atmosférica depende en gran parte de estos elementos.

38.1. MODELOS ATMOSFÉRICOS

Para poder conocer el estado de equilibrio de la atmósfera, es necesario realizar unos supuestos que, en ciertos casos, se alejan de la realidad.

Para estudiar los campos de presión es imprescindible analizar la topografía de las superficies isobáricas, ya que según sea esta, así será el flujo de las ma-

sas de aire de la zona estudiada y de su entorno.

Esa topografía será función de la presión, de la altitud y de sus variables, es decir, además, de la temperatura, de la gravedad y de la relación de mezcla.

Para poder estudiar esa topografía, los científicos han desarrollado diversos procedimientos basados en modelizar bajo supuestos simplificadores.

Estos modelos básicamente son:

• Modelo de Laplace

Supone g constante en cada capa atmosférica, y que la temperatura virtual T_v varía en función de la presión según:

$$T_v = K \cdot \ln p, \text{ siendo:}$$

$$T_v = \text{Temperatura virtual} = \frac{1 + 1,608 r}{1 + r} T$$

$K = \text{Constante}$

p = Presión

T = Temperatura

r = Relación de mezcla

De aquí se obtiene la *Ecuación de Laplace*:

$$z - z_0 = -\frac{R_a}{g} T_{vm} \ln \frac{P}{P_0}, \text{ donde:}$$

z, z_0 = Niveles de altitud de la capa atmosférica.

R_a = Constante específica del aire seco.

g = Gravedad (aceleración).

T_{vm} = Temperatura virtual media =

$$= \frac{T_v + T_{vm}}{2}$$

p, p_0 = Niveles de presión de la capa atmosférica.

T_{v0} = Temperatura para $z = 0$

Si se elimina la condición de $g =$ constante (por el concepto de geopotencial), al final queda:

$$Z - Z_0 = \frac{R_a}{G} T_{vm} \ln \frac{P}{P_0}, \text{ siendo:}$$

Z, Z_0 = Alturas geopotenciales (en metros geopotenciales).

G = Constante

1 Metro geopotencial = 9,8 J/kg

Esta última fórmula relaciona la presión y la altura geopotencial. Así se pueden definir los niveles atmosféricos por cualquiera de los tres componentes; altitud, presión o geopotencial.

• **Atmósfera estándar aeronáutica**

Considera este modelo que la troposfera y la estratosfera están divididas en capas. Los 11 km cercanos al suelo tienen un gradiente:

$$\alpha = \frac{0,65 \text{ K}}{100}$$

Por encima existe un gradiente isotérmico.

Además supone:

- g = Constante
- A nivel del mar, $T_0 = 288,15 \text{ K}$
- A nivel del mar, $P_0 = 1 \cdot 013,25 \text{ h P}_a$
- En la troposfera $\alpha = \frac{0,65 \text{ K}}{100}$
- Por encima de los 11 km, $T = -56,5 \text{ °C}$ hasta 20 km
- Por encima de los 20 km, $\alpha = \frac{0,1 \text{ K}}{100}$
- El aire está seco.
- Se establecen tablas de atmósfera estándar.

• **Atmósfera real**

- Se considera que la temperatura cambia con la altitud.
- Se considera la temperatura media barométrica.
- Se obtiene:

$$\rho_h = \rho_{ho} \cdot e^{-\frac{R}{R_a T_{mb}}}, \text{ donde:}$$

ρ_h = Densidad atmosférica.

ρ_{ho} = Densidad para $z = 0$

T_{mb} = Temperatura media barométrica, de estratos finitos =

$$= \frac{z_2 - z_1}{\int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{Tv(z)}}$$

z_1, z_2 = Altitud de cada límite del estrato.

Esta ecuación es similar a la utilizada para la atmósfera isoterma.

38.2. ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA

La estabilidad de las masas de aire de la atmósfera depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- Gradiente adiabático respecto del gradiente vertical de temperatura (o ritmo de enfriamiento).
- Condensación (depende de ella el gradiente adiabático).

Así, si las partículas de aire están más calientes que el medio en que se ubican, ascenderán, y si están más frías, bajarán, sometidas a una fuerza que es:

$$F = g \left(\frac{T_v - T'_v}{T'_v} \right),$$

que será positiva en el primer caso y negativa en el segundo (T'_v = Temperatura

virtual del medio en que se encuentra la partícula de aire).

Para el aire húmedo se pueden considerar las siguientes posibilidades de estabilidad:

- Totalmente estable: $\alpha < \gamma_s$
- Indiferente, saturado: $\alpha = \gamma_s$
- Inestable, condicionado: $\gamma > \alpha > \gamma_s$
- Indiferente, seco: $\alpha = \gamma$
- Totalmente inestable: $\alpha > \gamma$

Donde:

α = Gradiente vertical de temperatura.

γ = Gradiente adiabático seco.

γ_s = Gradiente pseudoadiabático (aire saturado).

Debemos indicar que la temperatura, la humedad, la presión y la altitud, al modificar las características de las masas de aire que ascienden o descienden, provocan estas situaciones de estabilidad, más o menos complejas, con presencia de inversiones térmicas, acción de inversión de la estratosfera sobre la troposfera, expansión, compresión, condensación, saturación, enfriamiento, calentamiento, etc. Estos procesos afectan muy directamente a las situaciones de contaminación atmosférica, siendo algunos de ellos, como las inversiones térmicas, de cierta frecuencia y gravedad en las masas de aire ubicadas sobre muchas aglomeraciones urbanas.

CAPÍTULO 39

EL RELIEVE, EL CLIMA Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

39.1. INFLUENCIA DEL RELIEVE SOBRE EL CLIMA Y SOBRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Todas estas influencias afectan a la contaminación atmosférica de forma directa (vientos, etc.), o indirecta (radiación solar, reacciones fotoquímicas, etc.).

Influencias básicas

- El relieve modela el clima en muchas circunstancias.
- La topografía puede condicionar las temperaturas.
- La topografía condiciona las precipitaciones.
- El relieve condiciona la presión atmosférica.
- El relieve condiciona la radiación solar recibida.
- El relieve condiciona los vientos.
- La altitud condiciona el clima.
- La topografía urbana (geográfica y de los edificios y calles) condiciona el clima.

El rozamiento con la superficie terrestre: Influencia del relieve

Las capas bajas de la atmósfera contactan con facies totalmente diferentes de la gaseosa, como son la líquida de mares y océanos, o la sólida, y más rugosa, que constituye los continentes.

Estas capas más bajas alcanzan hasta los 3.000 m, en general: la altitud de la capa límite llega hasta los 700 m sobre el mar y hasta los 2.000-3.000 m sobre los continentes.

En diversos capítulos de esta obra se trata sobre la influencia de los componentes básicos del clima, como la presión, la temperatura, la humedad, el viento y la base planetaria.

Esta base, terrestre o marina, al contactar con las masas atmosféricas, ejerce

una serie de efectos como son los siguientes:

- *Rozamiento*
 - Pequeño sobre el mar: de 2 a 4 veces superior en tempestades que en mar en calma.
 - Muy superior en tierra: Puede ser 8 veces mayor en zonas muy montañosas que en áreas llanas.
- *Acción sobre el viento*
 - Acción de frenado sobre las capas más inferiores que se desplazan (depósitos de partículas gruesas sedimentables).
 - A más rugosidad, más frenado.
 - Reducción de la velocidad del viento antes de los obstáculos.
 - Aumento de la velocidad del viento sobre el obstáculo (torbellinos y sedimentación de partículas).
 - Reducción de la velocidad del viento después del obstáculo.
 - Formación de vientos por diferencias térmicas y de presión.
- *Acción sobre las precipitaciones*
 - Los obstáculos provocan movimientos verticales de las masas de aire, generando así enfriamientos, condensaciones y precipitaciones (que arrastran gases y partículas contaminantes).
- *Ondas de relieve*
 - Las cadenas montañosas o las costas de fuerte relieve provocan los mismos fenómenos que los indicados para el viento, pero a otra escala, pues los filetes de aire en desplazamiento pueden ascender hasta 20 km y condicionan radicalmente

las situaciones de contaminación atmosférica de zonas muy extensas.

Efectos de la altitud continental

- Con la altitud disminuye la presión atmosférica.
- Con la altitud disminuye la densidad.
- Con la altitud disminuye el oxígeno presente.
- Con la altitud disminuye el vapor de agua.
- Con la altitud aumenta la radiación global.
- Con la altitud aumenta el ozono.
- Con la altitud aumentan los ultravioletas.
- Con la altitud aumenta la radiación directa.
- Con la altitud disminuye la duración de la insolación.
- Se debe tener en cuenta el gradiente vertical de temperatura: la temperatura en la troposfera disminuye con la altitud.
- Con la altitud aumentan los días de helada.
- En las zonas costeras, aumentan las precipitaciones con la altitud más acusadamente que en el interior.

Todos estos factores también influyen directa o indirectamente en situación de contaminación atmosférica: presencia de oxígeno y de vapor de agua, ultravioletas, ozono, radiación solar, etc.

Efectos de los relieves muy acusados y definidos

Las zonas básicas de relieve de la superficie terrestre y sus principales relevancias climáticas que afectan a la contaminación atmosférica son:

- *Cumbres de montaña*: Vientos, precipitaciones, temperatura, etc., afectan a la contaminación atmosférica.
- *Valles*: Vientos, temperatura, precipitaciones, inversiones térmicas, tormentas, etc., afectan a la contaminación atmosférica.
- *Laderas*: Los vientos, la temperatura y la insolación afectan a la contaminación atmosférica.
- *Cerros y colinas*: Los vientos condicionan la contaminación atmosférica.
- *Mesetas*: Vientos, precipitaciones, temperatura, etc., afectan a la contaminación atmosférica.
- *Llanuras*: Vientos, precipitaciones, temperatura, etc., afectan a la contaminación atmosférica.
- *Depresiones de cuencas fluviales*: Los vientos condicionan la contaminación atmosférica.
- *Mares y océanos*: Vientos, temperaturas, precipitaciones, carga eléctrica del aire, humedad, nieblas, etc., afectan a la contaminación atmosférica.
- *Zonas costeras*: Vientos, temperatura, precipitaciones, insolación, tormentas, nieblas, etc., afectan a las situaciones de contaminación atmosférica.

- *Masas de agua continentales*: Vientos, temperatura, tormentas, heladas, etc., afectan a la contaminación atmosférica.

39.2. INFLUENCIA DEL CLIMA SOBRE EL RELIEVE

Esta situación es de gran importancia desde el punto de vista medioambiental en múltiples zonas de nuestro planeta.

La erosión eólica en unos lugares, la hídrica en otros, el hielo-deshielo, los fenómenos de movimientos de masas de tierra provocados por las precipitaciones, las acción térmica sobre el suelo y sobre la vegetación, las inundaciones o las grandes sequías son incidencias claras del clima sobre la formación del paisaje, y esto se ve influenciado e influye en lo que se refiere a la contaminación atmosférica.

39.3. LOS PEQUEÑOS OBSTÁCULOS: EFECTOS

Tipos de pequeños obstáculos

En nuestra orientación medioambiental podemos considerar muchos de los pequeños obstáculos existentes en la superficie terrestre al nivel de los cortavientos, permeables, semipermeables o impermeables, y como tales tratar sus efectos sobre la contaminación atmosférica y aprovechar y adaptar a esta orientación los conocimientos y conceptos agr Climatológicos sobre los cortavien-

tos reflejados en las publicaciones indicadas.

Estos obstáculos comprenden los siguientes grupos:

- Vallas vegetales.
- Cortavientos.
- Cortinas vegetales.
- Muros y tapias.
- Taludes de carretera.
- Pequeños edificios.
- Bosques.
- Cultivos.
- Pantallas contra el ruido.

En principio, los cortavientos se han utilizado desde tiempos inmemoriales para proteger cultivos y viviendas contra el viento.

La presencia de los obstáculos que indicamos afectan del mismo modo al viento, pero además alteran los intercambios convectivos y, por tanto, el clima y la contaminación atmosférica.

Las características propias de cada obstáculo y las del viento, y las condiciones ambientales afectarán al viento y a los demás factores en función de diversos efectos, como son los siguientes:

Propiedades geométricas del obstáculo

- Altura: Afecta proporcionalmente a la zona protegida.

- Material constitutivo: Afecta en la medida de su permeabilidad.
- Grosor: Afecta sobre todo en el material vegetal.
- Permeabilidad o porosidad: Pueden ser permeables, semipermeables o impermeables, y esto afecta directamente a la entrada de los gases y partículas contaminantes.
- Estructura: Influye según sea el tipo de construcción, la especie vegetal, etc., y si se trata solo de árboles o si son árboles y arbustos.
- Longitud: Afecta en situaciones en que los obstáculos son numerosos y cortos.

Los obstáculos permeables no ejercen casi efecto sobre el viento, salvo algo de frenado.

Los obstáculos semipermeables hacen un efecto intermedio, pero sin torbellinos tras el obstáculo, teniendo una suave zona de transición con pequeños torbellinos en el filete de aire que acaba de pasar el obstáculo, hecho a tener muy en cuenta en el planeamiento de zonas con contaminación atmosférica.

Los obstáculos impermeables hacen que se estreche ese filete poco después de pasar el viento sobre ellos y crean torbellinos inmediatamente detrás del obstáculo.

Propiedades del viento

Los pequeños obstáculos reaccionan de manera diferente según sea la velocidad del viento.

El nivel de turbulencia del viento también condiciona el efecto del obstáculo.

Radiación solar

Los pequeños obstáculos afectan a la distribución horizontal de la radiación solar directa y a la radiación difusa: a la primera por crear sombras y por reflexión, y a la segunda por tapar e interrumpir la entrada de luz.

Además, alteran los intercambios del balance de radiación solar en lo que se refiere a los rayos de gran longitud de onda.

La temperatura también se ve afectada por los pequeños obstáculos, influyendo en ello el balance de la radiación solar, el balance hídrico, la velocidad del viento y la distancia al obstáculo. En general, estos obstáculos afectan a la temperatura hasta una distancia de 1 a 8 veces su altura, aumentando las temperaturas diurnas y bajando las nocturnas.

El suelo sufre unos efectos térmicos similares, siendo más intensos en la superficie y yendo en disminución a medida que se profundiza.

39.4. EL RELIEVE Y LA DIFUSIÓN ATMOSFÉRICA

La rugosidad del suelo influye, como ya sabemos, sobre el perfil de velocidad

del viento y, por tanto, sobre el estado de las capas bajas de la atmósfera y sobre cualquier situación de contaminación atmosférica.

La acción de contacto con el suelo de los filetes de las masas de aire que se desplazan pueden ser de dos tipos:

- *Contacto con suelo liso, nada rugoso.* En este caso, las fuerzas más importantes que frenan el desplazamiento son las debidas a la viscosidad, siendo las demás de menor importancia. Afectan a las partículas y a los gases.

La difusión se puede analizar mediante las fórmulas convencionales.

- *Contacto con suelo más rugoso.* En esta situación, dominarán las fuerzas propias de la rugosidad.

Aquí se puede estudiar la difusión utilizando cálculos basados en las fórmulas de *Sutton* y en las modificaciones introducidas por *Seguin*.

La rugosidad y ciertos cálculos de la difusión se basan en datos reales obtenidos mediante mástiles de control (de unos 40 m. de altura), en los que mediante anemómetros totalizadores y veletas, se hallan la velocidad y dirección del viento durante períodos de tiempo determinados y a diferentes alturas. Se obtienen de este modo curvas orientativas que se relacionan ya con los cálculos numéricos de *Sutton* y *Seguin*.

CAPÍTULO 40

CIRCULACIÓN, TRANSPORTE, DIFUSIÓN Y DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

40.1. INCORPORACIÓN DE LOS CONTAMINANTES A LA CIRCULACIÓN GENERAL DE LA ATMÓSFERA

Se puede indicar que en la atmósfera existe una dinámica de las masas de aire regida por un conjunto de leyes que han sido determinadas por la experiencia, que ya hemos indicado en capítulos anteriores y que resumimos a continuación.

Por una parte existen los movimientos horizontales, bien conocidos en lo que se refiere a la velocidad y sentido de las corrientes troposféricas y estratosféricas. Así, se ha comprobado que en el hemisferio Norte existe un viento dominante, del Oeste, a nivel de la tropopausa, de velocidad media de 35 m/seg. Esto hace que cualquier contaminante emitido a la atmósfera que alcance ese nivel, pueda dispersarse rápidamente alrededor de todo el planeta (a esa velocidad, una partícula da la vuelta a la Tierra en 12 días), como ocurre con las erup-

ciones volcánicas o con las explosiones nucleares.

Por otra parte, existen movimientos verticales que engendran una circulación atmosférica denominada célula de *Hadley*, al combinarse los vientos del Oeste con la deriva ascensional existente en las bajas latitudes. Además de la célula de *Hadley*, existe una célula similar a nivel polar y otras intermedias (células de *Ferrel*).

El resultado final de estas combinaciones es el intercambio de masas de aire entre el hemisferio Norte y el hemisferio Sur a nivel troposférico de las zonas ecuatoriales, y la transferencia de masas de aire polar a las zonas trópicos y viceversa.

Por lo que se refiere a los contaminantes, su circulación y dispersión están también influidas de forma determinante por esos movimientos (la formación de cúmulo-nimbos en las zonas tropicales puede originarse a causa de movimientos ascensionales de velocidades del orden de 30 m/seg.).

**CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS
QUE PUEDEN DESPLAZARSE A GRANDES DISTANCIAS**

Fase	Forma	Casos básicos
Gaseosa	Gas	Derivados del azufre Derivados del nitrógeno Derivados del carbono
Líquida	Aerosol (líquidos de baja tensión de vapor), líquido	Muy diversos
Sólida	Partículas (sólidos que no se sublimen)	Muy diversos

**ORIGEN BÁSICO DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS QUE
PUEDEN ACCEDER A LA CIRCULACIÓN GENERAL DE LA ATMÓSFERA**

Contaminantes atmosféricos de origen mixto (natural o antrópico)	Contaminantes atmosféricos de origen exclusivamente antrópico
SO ₂ NO _x CO ₂ CO Ciertos metales	Plaguicidas Disolventes Plastificantes Radionucléidos

**TIEMPOS DE RESIDENCIA DE LOS AEROSOLES EN DIFERENTES
ZONAS DE LA ATMÓSFERA TERRESTRE**

Zona	Alta estratosfera	Baja estratosfera	Tropopausa	Troposfera Media	Baja troposfera
Efectos y condiciones					
Tiempo de residencia	2-3 años	1 año	2 meses	30 días	7 días
Altitud	30 km	15-20 km	12 km	6.000 m	< 3.000 m

**40.2. TURBULENCIAS
Y DIFUSIÓN
DE CONTAMINANTES**

Podemos describir la turbulencia atmosférica como un movimiento caótico, desordenado y aleatorio, parecido a la agitación molecular, pero a gran escala.

Las turbulencias en las capas bajas de la atmósfera constituyen el mecanismo

fundamental de la difusión de los contaminantes. Provocan mezclas intensas de diferentes capas de aire, originando fenómenos de dilución y por tanto de disminución de la concentración de esos contaminantes.

Las turbulencias atmosféricas pueden tener origen mecánico u origen térmico; el primero está en relación directa con los fenómenos físicos de rozamiento del

viento con la superficie terrestre. El segundo depende fundamentalmente del gradiente vertical de temperaturas.

Normalmente actúan ambos factores, con preponderancia de uno o de otro.

En otros capítulos de esta obra se trata este tema con amplitud.

40.3. TRANSPORTE Y DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

40.3.1. Bases generales y mecanismos

Para conocer y calcular el transporte y la dispersión de los contaminantes en la atmósfera se debe tomar como base el *principio de continuidad-conservación*, que puede representarse así:

$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = F_e - F_s + F - P, \text{ siendo:}$$

A = Dimensión del medio (volumen).

F_e = Flujo entrante.

F_s = Flujo saliente.

F = Fuente (p. ej.: una chimenea).

P = Pozo (p.ej. absorción de contaminantes por una cubierta vegetal).

$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = \text{Variación de la masa por unidad de tiempo.}$$

Este principio se aplica en la baja atmósfera para la masa de contaminantes, para el caudal del fluido (masa de aire con contaminantes desplazándose), para su energía cinética y para su energía térmica.

Los mecanismos que intervienen en los desplazamientos (aportes y salidas de las masas de aire con contaminantes) y en el análisis de este principio, son básicamente los siguientes:

- *Advección*. Flujos de entrada y de salida de contaminantes arrastrados por el viento. Dependen de la velocidad y dirección del viento.
- *Dilución*. En nuestro caso la achacamos a la velocidad del viento, que cuanto mayor sea más dilución provocará, pues para una emisión constante de contaminante, el caudal de aire que provoca la dilución aumentará en la medida en que aumente la velocidad del viento (más volumen de aire para una misma cantidad de contaminante).
- *Flujo turbulento*. El régimen turbulento se expresa en nuestro caso con la relación:

$$R(f) = K \cdot G, \text{ siendo:}$$

R(f) = Relación de flujo.

K = Coeficiente de dispersión.

G = Gradiente de concentración de contaminantes.

- *Estado térmico de la atmósfera*. Puede acelerar o frenar la dispersión vertical de los contaminantes. A medida que aumenta la estabilidad térmica atmosférica, los máximos de concentración de contaminantes se alejan de los puntos de emisión.

El estado térmico de la atmósfera determina la altitud de la capa de mezcla o *altura de mezcla*, que se refiere a

una capa de aire en la que se distribuyen los contaminantes.

- *Efecto fuente-pozo.* Añadir contaminantes (fuente) o consumirlos (pozo) supone alterar en uno o en otro sentido el contenido en contaminantes (concentración y composición).
- *Altura de emisión.* Es el factor determinante de las inmisiones a nivel del suelo, que serán menores en función (en parte) de la altura de la fuente de emisión.
- *Presencia de obstáculos.* Un obstáculo provoca torbellinos y turbulencias que favorecen la dispersión, como se ha visto en otros epígrafes de esta obra.
- *Precipitaciones verticales.* La lluvia o la nieve, al arrastrar parte de los contaminantes hacia el suelo, modifican sus niveles de presencia en el aire.
- *Reacciones fotoquímicas.* En la atmósfera y en presencia de luz, humedad y temperaturas apropiadas, se desarrolla una serie de reacciones entre diversos contaminantes que pueden favorecer o frenar su dispersión.

40.3.2. Modelos de dispersión

Para poder representar y para analizar mejor estos procesos, se han establecido diversos modelos que tratan de aproximar lo más posible estas representaciones a la realidad.

Modelos de multicajas

Se toma un volumen determinado de una masa de aire, que se repite varias ve-

ces (multicajas), en el que la dispersión se puede representar mediante una dilución homogénea en todo ese volumen. El volumen que indicamos puede corresponder a una ciudad, a una calle, a un valle, a una comarca o a un territorio superior.

La representación se realiza mediante la fórmula:

$$X = \frac{Q}{uL\Delta y}, \text{ siendo}$$

X = Concentración de la inmisión (g/m³).

Q = Caudal de emisión de contaminantes (g/seg.).

u = Flujo saliente de advección (velocidad del viento en m/seg.).

L = Altura (m).

Δy = Anchura de la caja (m).

Modelo de Gauss

Este modelo se diseñó originariamente para calcular la dispersión del penacho emitido por una chimenea (cálculos de *Sutton, Gifford y Pasquill*).

Se considera que actúan los siguientes mecanismos:

- Dilución.
- Estabilidad térmica.
- Efecto fuente (véase el principio de continuidad-conservación).
- Dispersión turbulenta.

Se consideran, además, las siguientes hipótesis:

- Viento constante.
- Situación estacionaria (fenómeno constante en un punto dado a lo largo del tiempo).
- Terreno llano.
- Terreno sin obstáculos.
- Escalas de tiempo de 10 a 20 minutos.
- Al llegar los contaminantes cerca del suelo, rebotan por reflexión turbulenta.

En coordenadas cartesianas con el eje x en la dirección del viento, tenemos:

$$X = \frac{Q}{u} \frac{g_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \frac{g_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_z}, \text{ siendo:}$$

$$g_1 = \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

$$g_2 = \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

σ_y = Desviación típica de la distribución horizontal (en m).

σ_z = Desviación típica de la distribución vertical (en m).

H = Altura de la emisión (en m) = h + h.

h = Altura de la fuente (chimenea, etc.).

Δh = Sobreelevación del penacho.

X (x,y,z) = Concentración de contaminantes (gr/m³) en la inmisión.

40.4. DIFUSIÓN DE CONTAMINANTES

En otros epígrafes de esta obra se tratan los problemas meteorológicos en relación con la contaminación atmosférica y se analizan los fenómenos de las turbulencias, la velocidad del viento, el transporte y el desplazamiento de las masas atmosféricas, la circulación atmosférica, etc.

Si se añaden a estos análisis los de los factores meteorológicos como temperatura, humedad relativa, altitud, latitud y ubicación (costa, interior, valle, meseta, etc.), tendremos casi al completo los partícipes reales en los fenómenos de la difusión de los contaminantes en la atmósfera.

40.4.1. Velocidad media del viento

Para conocer y poder calcular las concentraciones de contaminantes en puntos determinados, es indispensable determinar previamente la velocidad media del filete o corriente de viento \bar{v} .

La concentración será X (x, y, o, H).

Si tenemos una fuente a nivel del suelo o cerca de él, será:

$$\bar{v} = \frac{1}{h_c} \int_{z_0}^{z_1} v(z) dz, \text{ donde:}$$

\bar{v} = Velocidad media del viento.

z_0 = Cota mínima de la capa de viento.

z_c = Altura de la capa afectada por la difusión.

$$h_c = \frac{z_c}{z_0}$$

Si se utilizan las fórmulas de *E.M. Smith* y *A.I. Singer*, se obtiene:

$$v_E = \int_0^\infty v(z) dz, \text{ donde:}$$

siendo:

v_E = Velocidad media equivalente.

$C(z)$ = Función de ponderación =

$$= \frac{2\alpha k}{\sqrt{\pi}} \exp(-\alpha^2 z^2)$$

$$\bar{v}(z) = qu^* \left(\frac{z}{z_0} \right)^m$$

$$\alpha^{-1} = \sqrt{2\sigma_z}$$

σ_z = Desviación típica de la distribución vertical.

k = Constante.

m = Cifra dependiente de la estabilidad $0,15 < m < 0,5$.

u^* = Velocidad de rozamiento.

Si la fuente está a la altura H , será:

$$\bar{v}(H) = qu^* \left(\frac{H}{z_0} \right)^m$$

40.4.2. Aplicación práctica de las fórmulas de difusión

La concentración de contaminantes en un punto dado se puede expresar con la fórmula de *Pasquill*, modificada por *Gifford*:

$$C(x,y,z,H) = \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \bar{v}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\}$$

A partir de ella podemos obtener:

$$C(x,0,0,0) = \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \bar{v}}$$

que indica la inmisión en el suelo para una fuente ubicada en el suelo a una distancia x .

$$C(x,0,0,H) = \frac{2Q}{\pi \sigma_y \sigma_z \bar{v}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right]$$

indica la inmisión en el suelo para una fuente ubicada a una altura H y a una distancia x .

$$C(x,y,0,H) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z \bar{v}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right]$$

Que indica la inmisión en el suelo para una fuente ubicada a la altura H y a una distancia y del eje x .

40.4.3. Difusión de contaminantes en zonas industriales y urbanas

Los procesos de difusión de los contaminantes en las capas bajas de la atmósfera dependen de diversos factores, como ya se ha indicado al principio de este epígrafe.

En lo que corresponde a zonas urbanizadas por viviendas o industrias, en las

que existen edificios, construcciones industriales, calles, plazas, etc., entre otros factores incidentes podemos indicar como fundamentales los siguientes:

- Velocidad media del viento cerca del suelo.
- Intensidad de turbulencia del filete de aire.
- Desviaciones típicas de las distribuciones de concentración.

Las zonas urbanizadas incrementan enormemente los fenómenos de turbulencia, pues aumenta mucho la rugosidad de la superficie del suelo y el almacenamiento de calor, si comparamos con el entorno.

Así, la micrometeorología urbana pasa a tener una importancia definitiva en el estudio de estos procesos, por las circunstancias y condiciones específicas propias de las zonas industriales y urbanas, que proporcionan un marco concreto que ha de definir la situación de difusión para cada caso. El tema se trata ampliamente en el capítulo correspondiente.

Una zona industrial o urbana se distingue de su entorno agrario (agroforestal o natural) por tener unas características climático-ambientales que la definen, a saber:

- Aglomeración humana.
- Industrias que emiten contaminantes.
- Ruido.
- Infraestructuras de servicios:
 - Transporte

- Agua potable
- Luz
- Aguas residuales
- Residuos urbanos
- Residuos peligrosos
- Redes de carreteras y ferrocarriles de acceso.

- Calefacción.
- Refrigeración.
- Calles, avenidas y plazas.
- Zonas verdes.

En esta situación, el resultado básico es que la zona urbanizada tiene, respecto de su entorno:

- Más rugosidad.
- Más sequía ambiental (menos humedad relativa).
- Más temperatura .

En una zona abierta sobre un suelo rugoso, el perfil de velocidad se puede expresar por:

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \log \frac{z-d}{z_o}, \text{ siendo:}$$

z_o = Parámetro de rugosidad.

d = Altura de desplazamiento.

Sobre una ciudad o sobre una zona industrial la fórmula anterior es válida, proponiendo ciertos autores (*H.H. Lettau*, etc.) que:

$$z_o = \frac{h_o}{2A}, \text{ siendo:}$$

h_o = Altura media de los edificios.

$$A = \frac{\text{Superficie total de la zona urbanizada}}{\text{Superficie analizada (viviendas o zona industrial)}}$$

El valor de A es $2 < A < 10$

Algunos autores, como S.R. Hanna, proponen:

$$d = \frac{h_o}{A^{0.3}}$$

La distribución de temperaturas, puede clasificarse según tres regímenes más o menos diferenciados, a saber:

- *Días soleados y de viento.* No existe casi diferencia entre el perfil de temperaturas de una zona industrial o urbana y el de su entorno.
- *Noches de viento suave.* En esta situación es frecuente que se forme una capa de mezcla sobre la zona urbanizada, mientras que en su entorno la situación es estable.

La desviación máxima de temperaturas entre la zona urbanizada y su entorno se puede obtener de:

$$\Delta\theta = \left(\frac{HD \frac{\partial q}{\partial z}}{\rho c_p \bar{v}} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ siendo:}$$

$\Delta\theta$ = Desviación máxima de la temperatura.

H = Flujo de calor.

D = Dimensión o constante propia de la zona urbanizada.

$\frac{\partial \theta}{\partial z}$ = Gradiente de temperatura en el entorno de la zona urbanizada.

ρ = Densidad del aire.

C_p = Capacidad térmica.

- *Noches de calma.* Es relativamente frecuente que se forme una célula de convección como consecuencia de la constitución de una isla de calor, tema que se trata en otros apartados de esta obra.

40.4.4. Fuentes emisoras y difusión

En las zonas industriales o urbanas las fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos se pueden clasificar en cuatro grupos básicos, a saber:

- Fuentes aisladas de gran altura: Chimeneas de grandes industrias, etc.
- Fuentes aisladas de baja altura: Emisiones de pequeñas industrias locales, etcétera.
- Fuentes múltiples de baja potencia: Calefacciones domésticas, etc.
- Fuentes móviles: Automóviles, camiones, autobuses, etc.

Estas fuentes están sometidas a fenómenos de difusión que dependen de las características propias de cada emisor: Las grandes chimeneas transportan y distribuyen los contaminantes a grandes distancias. Las chimeneas bajas pueden generar el abatimiento del penacho en sus inmediaciones como consecuencia de una baja velocidad de salida de los gases, o por el efecto de las construcciones próximas. Las fuentes múltiples plantean problemas de difusión más en consonancia con la superfi-

cie urbanizada, y las fuentes móviles provocan tanto la emisión de contaminantes como su difusión parcial, al desplazarse y mover las masas de aire inmediatas.

En este último caso, las fórmulas más eficaces que han obtenido diversos investigadores son:

$$C = C_b + \Delta C$$

$$\Delta C = \frac{0,07 N}{(v + 0,5)[(x^2 + z^2)^{1/2} + z]}$$

(zona bajo el viento)

$$\Delta C = \frac{0,07 N}{l(-v + 0,5)}$$

(zona contra el viento)

siendo:

C = Concentración del contaminante.

C_b = Concentración de fondo.

ΔC = Aumento de la concentración debido al tráfico.

N = Densidad horaria de tráfico.

v = Velocidad del viento en la parte más alta de las edificaciones.

l = Anchura de la calle.

SEXTA PARTE

El cambio climático. La capa de ozono. Indicadores.

CAPÍTULO 41

EL CLIMA Y SU VARIABILIDAD NATURAL

41.1. BASES GENERALES

El clima es un sistema formado por la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la litosfera y la biosfera, y una serie de factores complementarios como la radiación solar, la rotación de la Tierra alrededor del Sol, las corrientes oceánicas, etc.

Tradicionalmente ha sido descrito en función de un conjunto de parámetros meteorológicos (temperatura, precipitaciones, humedad del aire, etc...) tomados durante un período de tiempo lo suficientemente grande como para poder obtener unos valores medios independientes del tiempo. Estos valores son relativamente constantes a escala humana, y las desviaciones respecto a ciertos márgenes son consideradas como sucesos anormales.

En realidad, el clima está formado por un gran conjunto de estados posibles en los que se pueden encontrar los distintos elementos que lo componen en un

lugar y en un período de tiempo determinado, que normalmente se considera de unos 30 años. La climatología se ocupa del estudio de estos estados, y trata de establecer la probabilidad de que tenga lugar cada uno de ellos en función de unas coordenadas geográficas y temporales concretas. Las oscilaciones climáticas forman parte del funcionamiento natural del clima, y el hecho de que durante períodos de tiempo más o menos largos permanezca constante, obedece a circunstancias puntuales.

41.2. CONCEPTOS HISTÓRICOS

El hombre ha conocido algunos cambios climáticos en el pasado que influyeron de forma decisiva en la evolución de distintas civilizaciones. Un claro ejemplo es la dependencia de la civilización egipcia del río Nilo. Debido a la gran importancia de las crecidas anuales del río, de las que dependía la productividad de su agricultura, se dispone de un regis-

tro histórico de más de 1.000 años de antigüedad sobre su caudal. Contrariamente a lo que se piensa, las inundaciones del Nilo no han sido regulares a lo largo de la historia de Egipto. Una de cada cinco crecidas causaba grandes daños, ya fuera porque llegaba demasiado pronto o demasiado tarde, porque fuera de una magnitud excesiva o insuficiente, o porque durara más o menos de lo adecuado. Las épocas en que se sucedían crecidas demasiado bajas, reflejo de las sequías en la región del Sahel, se caracterizaban por hambrunas, epidemias y revueltas sociales. Incluso se puede encontrar un paralelismo entre la evolución de las crecidas del Nilo y la sucesión de las diferentes dinastías de faraones.

Fenómenos regionales que son considerados como anormales pueden ser el resultado de las conexiones mundiales del clima, como ocurre con el fenómeno del El Niño. Los períodos de crecidas anuales altas del Nilo se correlacionan estrechamente con veranos excepcionalmente cálidos en Europa, y los de inundaciones bajas se corresponden con veranos más fríos. Estas fluctuaciones se corresponden también, como ya hemos indicado, con las oscilaciones climáticas de la región del Sahel, cuyas sequías coinciden con disminuciones en el caudal del Nilo e incluso en el río Senegal, en el otro extremo de África. Por lo tanto, las fluctuaciones observadas en el registro del Nilo parecen corresponderse con cambios climáticos a una escala mayor.

Las modificaciones en la distribución de las tierras emergidas debido a la deri-

va de los continentes explican los grandes cambios climáticos de la historia de la Tierra. El ser humano ha conocido unas condiciones climáticas relativamente estables durante unos 5 millones de años, que han permitido su evolución como especie y el desarrollo de sus sociedades. Sin embargo, esta situación es en realidad anormal dentro de la historia geológica del planeta, ya que las fuerzas internas actúan continuamente, modificando su geografía y alterando las condiciones climáticas. Se suceden períodos glaciales fríos, con una duración de unos 100.000 años, con otros interglaciales algo más cálidos, de unos 10.000 años, como en el que nos encontramos. La propia existencia de dos casquetes helados en los polos del planeta es un hecho extraordinario que nunca antes se había producido, puesto que los océanos son eficaces conductores de calor y las corrientes cálidas procedentes de los trópicos normalmente impiden la congelación de los polos. En la actualidad, la presencia de la Antártida impide el paso de las corrientes cálidas a través del Polo Sur, creando las condiciones adecuadas para la formación de una enorme masa de hielo. La formación del casquete de hielo del Polo Norte es el resultado de un hecho aún más casual. La deriva continental ha hecho que varios continentes se encuentren rodeando el océano Ártico. Groenlandia e Islandia impiden la llegada de la corriente cálida del Golfo, y propician la congelación de las aguas del Ártico. La congelación de los dos polos del planeta determina así, en gran parte, las condiciones climáticas actuales de la Tierra.

41.3. EL SOL Y LA TIERRA EN RELACIÓN CON LA VARIABILIDAD DEL CLIMA

41.3.1. El Sol como factor condicionante

Los fenómenos de deriva continental no pueden explicar otro tipo de cambios en el clima que se han producido durante períodos de tiempo más cortos, de entre 100 y 1.000 años. Los cambios en los factores internos o externos del clima provocan variaciones a nivel global o regional, al romperse el equilibrio existente entre sus distintos componentes. Los factores externos de los que depende el clima son la actividad solar y la llegada de la radiación hasta la Tierra. El Sol es la única fuente energética significativa de que dispone el planeta aparte de su energía interna, y sus variaciones de actividad van a modificar la cantidad de radiación que llega a las capas externas de la atmósfera. Parece existir una relación entre la presencia de manchas solares y las variaciones de la temperatura de la superficie del Sol, cuyo valor medio es de unos 6.000 °K. Cuando se aprecian manchas oscuras en la superficie del Sol, la temperatura es mayor y emite más radiación que cuando no aparecen, aunque se desconoce la causa. Las dos situaciones se alternan en ciclos que pueden ser entre 9 y 14 años. Entre los años 1976 y 1979 se inició una fase de mayor actividad de las manchas solares, y la energía proporcionada por el Sol aumentó en un 0,4%.

41.3.2. Parámetros orbitales incidentes

La cantidad de energía emitida por el Sol sufre pequeñas variaciones, pero existe otro conjunto de fenómenos que permiten elevar la temperatura de la Tierra lo suficiente como para que se den las condiciones adecuadas para que ahora se encuentre en un período interglacial. Los cambios en distintos parámetros de la órbita terrestre pueden condicionar la cantidad de radiación solar que llega a distintas latitudes en cada estación, como son las variaciones de la inclinación del eje de rotación de la Tierra, la dirección a la que apunta el eje y la excentricidad de la órbita terrestre. Estos parámetros varían en ciclos de distinta duración, influyendo en el clima de la siguiente manera:

1. La excentricidad de la órbita terrestre. Su discrepancia respecto a una circunferencia varía en períodos de tiempo entre 100.000 y 400.000 años. Cuando la órbita tiende a ser circular, el calor se distribuye uniformemente a lo largo del año, y al hacerse elíptica, en ciertos momentos del año la Tierra se encuentra más cerca del Sol. Esta cercanía podría en principio intensificar el calor de los veranos y paliar el frío de los inviernos, pero hay que tener también en cuenta los demás factores orbitales.
2. La inclinación media del eje de rotación de la Tierra sobre el plano de la órbita es de unos 23°30', pero oscila alrededor de este valor $\pm 1^\circ 30'$ con una periodicidad de 40.000 años.

Cuando aumenta la inclinación, las variaciones estacionales se acentúan, y en latitudes altas se recibe más energía en verano y menos en invierno. Por el contrario, cuando disminuye la inclinación, el contraste estacional es menos pronunciado. Si la inclinación de la Tierra fuera nula no existirían variaciones estacionales, ya que cada región del planeta recibiría la misma radiación a lo largo de todo el año.

3. La atracción que ejercen el Sol y la Luna sobre la zona ecuatorial del planeta hace que se tambalee, describiendo un cono en períodos de 26.000 años. La dirección hacia la que apunta el eje determina si durante la época del año en que la Tierra se encuentra más cerca del Sol es verano en el Hemisferio Norte o en el Hemisferio Sur. Actualmente, durante el perihelio o época del año en que la Tierra está más cerca del Sol, en el Hemisferio Norte es verano y en el Sur es invierno, debido a que el eje de la Tierra se encuentra orientado hacia el Sol. Hace unos 10.000 años la situación era la opuesta.

Los cambios cíclicos de los distintos parámetros orbitales son conocidos como variaciones de *Milankovitch*, en honor al científico yugoslavo que realizó estos cálculos entre 1920 y 1930. La evolución de estos parámetros influye muy poco en la radiación total que llega a la Tierra y determina variaciones anuales de tan sólo un 0,1%. El efecto realmente importante de los cambios en la configuración de la órbita reside en la

distribución latitudinal de la radiación. La energía recibida en las altas latitudes del Hemisferio Norte puede llegar a ser un 10% superior o inferior al valor medio. Estas diferencias son lo suficientemente importantes como para hacer que el clima de la Tierra siga un patrón de épocas glaciales frías de 100.000 años de duración, en que se forman casquetes glaciales en el norte de Europa y América, separadas por períodos interglaciales de 10.000 años, en los que se funden.

Las variaciones de los parámetros orbitales tienen tal efecto sobre el clima terrestre debido a los fenómenos climáticos internos que desencadenan a escala mundial, y que actúan como procesos de retroalimentación que ayudan a que se produzcan los cambios climáticos. El avance de los hielos glaciales aumenta el albedo de la superficie terrestre, que va a reflejar una mayor cantidad de la radiación solar que llega hasta ella, y va a producir un enfriamiento del clima a nivel mundial. Al disminuir la temperatura de los océanos, estos van a ser capaces de diluir una mayor cantidad de dióxido de carbono, y en los continentes la disminución de la temperatura reducirá la velocidad de descomposición de la materia orgánica por parte de los microorganismos de suelo, emitiéndose menos metano a la atmósfera. Al disminuir el dióxido de carbono y el metano en la atmósfera, dos de los principales responsables del efecto invernadero natural que contribuye al aumento de la temperatura media de la Tierra, se va a reforzar el proceso de enfriamiento. Como resultado de la combinación de todos estos fenómenos, la temperatura media de la

Tierra llega a descender del orden de 4 a 5° C durante los períodos glaciales.

41.3.3. Procesos planetarios internos

Los fenómenos que se producen dentro del propio planeta se pueden agrupar en los tres siguientes: las *transferencias de energía*, la *modificación de las propiedades reflectoras del suelo* y la *alteración de las características de la atmósfera* (forzamientos radiativos).

Los procesos de *transferencia de energía* dentro del planeta se deben a las corrientes de aguas profundas de los océanos, que son las causantes de las principales variaciones interanuales del clima. Su importancia ha quedado ya ejemplificada en el proceso de formación de los casquetes polares.

La *modificación de las propiedades del suelo* de reflejar la radiación solar, supone una alteración del balance energético de la atmósfera. Las superficies cubiertas de hielo o de nieve son capaces de reflejar una gran cantidad de la radiación que incide sobre ellas, y tienen un efecto de enfriamiento. Otro factor del que dependen las propiedades reflectoras de la superficie terrestre es la presencia de vegetación. La importancia del albedo es tal, que la superficie del planeta podría mantenerse constante solamente modificando este parámetro. El albedo puede alterarse por cambios naturales de vegetación, pero en la actualidad también está siendo modificado de forma artificial debido a la deforestación, a la desertificación y a los cambios de uso del suelo.

Los procesos de *forzamiento radiativo* consisten en la alteración del balance entre la energía que entra y la que sale de la atmósfera. El clima responde a estas modificaciones tratando de restaurar de nuevo el equilibrio energético a través de mecanismos internos de reajuste, resultando un calentamiento o un enfriamiento neto en función de que el forzamiento sea positivo o negativo. Un ejemplo de forzamiento radiativo negativo es el efecto de las partículas sólidas o los aerosoles presentes en el aire, que actúan bloqueando la llegada de la radiación solar y provocan el enfriamiento del planeta. También ejercen un efecto indirecto sobre el clima al modificar las características de las nubes. Al actuar como núcleos de condensación del vapor de agua del aire, aumentan el número de las pequeñas gotas contenidas en las nubes y modifican sus propiedades radiativas y de formación de precipitaciones.

41.3.4. Incidencias sobre la contaminación atmosférica

Aunque este tema se trata ampliamente en varios capítulos de esta obra, a continuación comentamos algunos aspectos relacionados con la contaminación atmosférica.

Las emisiones de aerosoles y partículas sólidas a la atmósfera pueden ser tanto de origen antrópico como artificial. Entre las fuentes naturales destacan las erupciones volcánicas, que pueden modificar la temperatura del planeta durante uno o dos años, al poner

en suspensión en el aire grandes cantidades de cenizas. La capacidad de modificar la transparencia de la atmósfera de las erupciones depende directamente de la cantidad de materia emitida, la altura del volcán, que puede condicionar la distancia a la que se dispersen la nube de partículas, y la proximidad del volcán al ecuador. Cuando la erupción tiene lugar cerca del ecuador los efectos pueden afectar a los dos hemisferios, debido a la circulación atmosférica del aire. Los cambios climáticos provocados por las erupciones volcánicas suelen ser bastante cortos, ya que las partículas acaban por sedimentar. Sin embargo, una sucesión de fuertes erupciones volcánicas puede causar un enfriamiento de la magnitud suficiente para que se desencadene una era glacial. Otro suceso que puede modificar la transparencia de la atmósfera es el impacto de meteoritos contra la Tierra, que puede poner una gran cantidad de materia en suspensión en la atmósfera en función de su diámetro. El hombre también tiene la capacidad de alterar la transparencia de la atmósfera a través de las emisiones de diferentes compuestos, como el dióxido de azufre, que reflejan la radiación solar que llega a la atmósfera.

El forzamiento radiativo positivo más importante es el efecto de determinados gases de la atmósfera que no interceptan la radiación solar, pero que absorben la energía emitida por la superficie de la Tierra, aumentando la retención de calor en la atmósfera. Este proceso, conocido como *efecto invernadero*, está siendo potenciado de forma

artificial por las emisiones antrópicas de dióxido de carbono, metano, y otros gases de efecto invernadero.

No existe ninguna posibilidad de que el hombre sea capaz de alterar los factores externos que determinan la radiación solar que recibe el planeta, pero sí puede modificar el balance energético de la Tierra alterando las propiedades reflectoras del suelo o la composición de la atmósfera.

Resulta difícil poder detectar un cambio climático, ya que, como hemos visto, el clima no es un sistema estático. Los cambios en los distintos parámetros del clima se superponen a su variabilidad natural, de tal forma que tan sólo consideramos significativas estas modificaciones cuando estadísticamente no resultan ser habituales. Mucho más complicado es poder atribuir las causas de un cambio climático, ya que es imposible actuar sobre cada una de ellas de forma independiente para conocer sus efectos sobre el sistema. La única solución es recurrir a modelos matemáticos que simulan el clima global del planeta, lo que nos permite poder modificar diferentes parámetros para conocer sus efectos. Como tampoco se conocen todas las causas naturales que pueden originar un cambio climático, lo que se hace es plantear posibles hipótesis y tratar de valorarlas dentro de un determinado rango de significación estadística, comparando el grado de ajuste de las predicciones de los modelos matemáticos y el comportamiento real del sistema climático.

41.4. EVIDENCIAS ACTUALES DE CAMBIO CLIMÁTICO. LOS INFORMES DEL IPCC

41.4.1. Los cambios significativos básicos

A lo largo del siglo XX se apreciaron cambios significativos en diferentes parámetros climáticos, como se recoge en el último informe del IPCC (The Third Assessment Report of Working Group I). Algunas de las modificaciones detectadas son las que se describen a continuación, en una tabla en la que los términos se emplean para expresar los márgenes de confianza estadística de los cambios observados:

- *Prácticamente cierto*: más del 99%
 - *Muy probable*: 90 – 99%
 - *Probable*: 60 – 90%
 - *Medianamente probable*: 33 – 60%
 - *Improbable*: 10 – 33%
 - *Muy improbable*: 1 – 10%
 - *Excepcionalmente improbable*: menos de un 1%
- La temperatura media global de la Tierra (la media de la temperatura del aire cercano a la superficie terrestre y la temperatura superficial de los océanos) ha aumentado en el siglo XX unos 0,6° C, con un margen de $\pm 0,2^\circ$ C.
 - El siglo XX ha sido *muy probablemente* el más caluroso del Hemisferio Norte, con un margen de con-

fianza del 66 al 90%. También es *probable* que la década de los 90 haya sido la más caliente dentro del registro instrumental de temperaturas que se dispone desde el año 1861, siendo el año 1998 aquel en que se han obtenido los valores más altos.

- Desde 1950, año a partir del cual se dispone de medidas adecuadas tomadas con globos sonda, la temperatura de los primeros 8 km de atmósfera se ha incrementado debido a la destrucción de la capa de ozono, al aumento de aerosoles atmosféricos y al fenómeno de El Niño.
- La extensión de la cubierta de nieve ha disminuido *muy probablemente* en un 10%, y se ha reducido en dos semanas la duración anual de la cubierta de hielo que se forma en la superficie de los lagos y los ríos de las latitudes altas del Hemisferio Norte.
- Se ha producido una retirada de los glaciares de montaña en las regiones no polares durante el siglo XX.
- La extensión de agua de mar congelada en el Polo Norte se ha reducido entre un 10 y 15% durante las primaveras y los veranos del Hemisferio Norte desde el año 1950. Entre el final del verano y el principio del otoño el espesor de la capa de hielo del Ártico ha disminuido *muy probablemente* en un 40% en las últimas décadas, y también ha disminuido durante el invierno, aunque en menor grado.

- El nivel medio de los océanos ha subido entre 0,1 y 0,2 m durante el siglo XX, y el contenido global de calor de los océanos ha aumentado desde el año 1950, fecha desde la que se empieza a disponer de medidas adecuadas de la temperatura de las aguas profundas.
- Las precipitaciones han aumentado *muy probablemente* entre un 0,5 y un 1% en latitudes medias y altas del Hemisferio Norte en el siglo XX. Es *probable* que las tormentas hayan aumentado entre el 0,2 y el 0,3% en las zonas tropicales (entre los 10 °N y los 10 °S) y hayan disminuidos en las zonas subtropicales (entre los 10 °N y los 30 °N) en un 0,3% cada década del siglo XX. En el Hemisferio Sur no se han detectado cambios significativos, y no se dispone de datos suficientes sobre las precipitaciones que se producen sobre los océanos.
- La frecuencia de sucesos de precipitaciones fuertes en las latitudes medias y altas del Hemisferio Norte ha aumentado probablemente entre un 2 y un 4% en el siglo XX.
- Es *probable* que la cobertura nubosa de latitudes medias y altas del Hemisferio Norte haya aumentado en un 2%.
- Desde el año 1950 se ha reducido *muy probablemente* la frecuencia de registro de temperaturas extremadamente frías, y ha aumentado ligeramente la frecuencia de las temperaturas extremadamente altas.

- El fenómeno de El Niño se ha hecho más frecuente, intenso y persistente desde el año 1970 en comparación con los 100 años anteriores.

En contraste con todos estos cambios, existen otros aspectos climáticos que no han sufrido ninguna modificación en los últimos tiempos:

- Determinadas regiones no se ha vuelto más calientes, principalmente en ciertas zonas de los océanos del Hemisferio Sur y en el Antártico.
- Desde el año 1978, en que se empieza a disponer de datos tomados por satélite, no se ha observado una modificación de la extensión de océano Antártico congelada.
- Los cambios globales en la intensidad y frecuencia de las tormentas tropicales siguen estando dominados por las variaciones entre décadas, y no se aprecian modificaciones significativas durante el último siglo.
- En las áreas estudiadas no se ha observado un aumento de frecuencia de tornados, rayos o granizo.

41.4.2. Cambios en la concentración de gases

Por otra parte, se ha producido un incremento notable en la concentración de determinados gases en la atmósfera, con la consiguiente aparición de forzamiento

tos radiativos, tanto positivos como negativos:

- La concentración atmosférica de dióxido de carbono se ha incrementado en un 31% desde el año 1750. La tasa de acumulación actual de CO₂ en la atmósfera *probablemente* no tiene precedentes en más de 20.000 años. Durante las décadas de los años 70 y 80, el incremento ha sido de un 0,4% (1,5 ppm) anual. En la década de los 90 el incremento varía entre el 0,2 (0,9 ppm) y el 0,8% (2,8 ppm) anual, debido a los cambios en el intercambio de CO₂ entre la atmósfera y los continentes y los océanos.
- La concentración atmosférica de metano ha aumentado en un 151% (1,06 ppb) desde el año 1750. Su concentración había permanecido constante anteriormente durante unos 420.000 años.
- La concentración atmosférica de óxido nitroso ha aumentado el 17% (0,046 ppb) desde 1750.
- El forzamiento radiativo para el incremento del conjunto de gases de efecto invernadero entre los años 1750 y 2000 se estima en 2,43 W/m² (1,46 W/m² para el CO₂; 0,48 W/m² para el CH₄; 0,34 W/m² para los halocarburos; 0,15 W/m² para el N₂O).
- Se calcula que debido a la destrucción de la capa de ozono estratosférico durante los años 1979 a 2000, ha tenido lugar un forza-

miento radiativo negativo de -0,15 W/m².

- El ozono troposférico ha aumentado en un 35% desde el año 1750 debido las emisiones antrópicas de gases precursores del O₃, lo que ha causado un forzamiento radiativo de 0,35 W/m². Estos datos varían enormemente de unas regiones a otras debido a que el O₃ es un gas bastante inestable, y a que su distribución en las capas bajas de la atmósfera es heterogénea.
- El forzamiento radiativo de los aerosoles se estima en -0,4 W/m² para los sulfatos, -0,2 W/m² para los aerosoles procedentes de la combustión de biomasa, -0,1 W/m² para el carbono orgánico de los combustibles fósiles y +0,2 W/m² para el carbono mineral. Al igual que ocurre con el ozono troposférico, la concentración atmosférica varía entre regiones, y responde rápidamente a los cambios en las emisiones.

41.4.3. Otras alteraciones

También han tenido lugar forzamientos radiativos de origen natural que deben tenerse en cuenta a la hora de analizar el grado de influencia del hombre en el cambio del clima, como son los siguientes:

- Los cambios de actividad solar han supuesto, desde 1750, un forzamiento radiativo de +0,3 W/m², y desde 1970, las observaciones por

- satélite han mostrado pequeñas variaciones debidas a los ciclos solares de 11 años.
- Los aerosoles procedentes de las erupciones volcánicas también pueden causar un forzamiento radiativo durante unos años. Los períodos de mayor actividad volcánica han tenido lugar en los años 1880-1920 y 1960-1990.
 - El resultado final de la combinación de los dos factores naturales anteriores es un forzamiento radiativo negativo para las dos últimas décadas, y seguramente también para las otras dos anteriores.

41.4.4. El cambio climático y la incidencia de la contaminación atmosférica

Todas estas variaciones parecen ser lo suficientemente significativas como para poder afirmar que está teniendo lugar un nuevo cambio climático cuya magnitud no se puede precisar exactamente, aunque todo parece indicar que será mucho más intenso que los precedentes en la historia de la humanidad. Aunque no se ha demostrado suficientemente que estos cambios estén provocados por las actividades humanas, la caracterización espacial de los cambios provocados por las emisiones de aerosoles y de gases invernadero difícilmente podría deberse a causas naturales. Por otra parte, las simulaciones realizadas, tomando como base el forzamiento radiativo de aerosoles y gases invernade-

ro, se ajustan bastante bien a los cambios que después se han ido observando en el clima. Si bien el cambio climático puede tener también causas naturales, cada vez parece más claro que el hombre también está contribuyendo con sus actividades, ya que su influencia en el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera es un hecho comprobado. La acumulación de compuestos como el dióxido de carbono puede tener por sí misma importantes consecuencias en los ecosistemas, como se verá más adelante, lo que constituye motivo suficiente para justificar la necesidad de adoptar medidas.

41.4.5. Las evidencias del IPCC

Según el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (Intergovernmental Panel of Climate Change, IPCC), las evidencias son suficientes para poder apreciar una influencia del hombre en el calentamiento observado durante los últimos 50 años, afirmando que existen cambios antropogénicos que destacan sobre la variabilidad natural del clima. Aunque aún persisten numerosas incertidumbres, se ha avanzado mucho durante los últimos años en la identificación de las causas externas que modifican el sistema climático y en la cuantificación de su influencia.

El IPCC se basa en las siguientes razones para defender la influencia actual del hombre sobre el clima:

- *Es muy improbable* que el calentamiento observado durante el siglo

- XX se pueda deber exclusivamente a la variabilidad climática interna, como parecen indicar de los modelos de simulación. A partir del análisis del registro de temperatura de los últimos 1.000 años, se deduce que es *improbable* que el calentamiento se deba exclusivamente a causas naturales.
- El desarrollo de nuevas técnicas de detección, con las que se consigue identificar y distinguir la responsabilidad de las causas naturales y la de las antropogénicas, permite conocer evidencias de la influencia del hombre en la temperatura de al menos los últimos 50 años del siglo XX. Según las simulaciones realizadas, los factores naturales, como las variaciones en la actividad solar y las erupciones volcánicas, parece que han contribuido al calentamiento de la primera mitad del siglo, pero no son suficientes para explicar el de la segunda mitad.
 - La magnitud del calentamiento previsto por los modelos ha sido comparable a la observada durante la segunda mitad de siglo XX, y la mayor parte de los modelos confirman que hay que tener en cuenta tanto el aumento de los gases invernadero como el de los aerosoles de sulfatos.
 - La correlación más significativa entre los modelos de simulación y los datos reales observados, se obtiene cuando se tienen en cuenta al mismo tiempo factores naturales y factores antrópicos. Los factores incluidos son suficientes para explicar los cambios observados, aunque también pueden existir otros que son desconocidos y que también estén actuando.
- Por todas estas razones, en el Tercer Informe Asesor del IPCC se concluye que es *probable* que el calentamiento observado durante la segunda mitad del siglo XX se deba al incremento artificial de gases de efecto invernadero. Por otra parte, es *muy probable* que el calentamiento global del planeta haya contribuido significativamente al incremento del nivel del mar, a la expansión térmica del agua y a la disminución de la extensión de los hielos continentales.

CAPÍTULO 42

EL EFECTO INVERNADERO Y EL CALENTAMIENTO GLOBAL

42.1. EL EFECTO INVERNADERO NATURAL COMO REGULADOR TÉRMICO DEL PLANETA. EL PAPEL DEL VAPOR DE AGUA Y DEL CO₂

42.1.1. Efecto invernadero

La presencia de agua líquida en la superficie del planeta, requisito fundamental para la aparición y el desarrollo de la vida, es posible gracias a que la temperatura media es de 15 °C. Esta temperatura es 33 grados superior a la que realmente tendría la Tierra de no existir una atmósfera capaz de retener el calor en ella, evitando que escape hacia el espacio. En tal caso, la temperatura media que le correspondería a la Tierra en función de su distancia al Sol sería de -18 °C, inferior al punto de fusión del hielo, y no existiría en ella agua en estado líquido. La radiación solar que atraviesa la atmósfera es absorbida por la superfi-

cie del planeta y ésta la reemite de nuevo hacia el espacio en forma de radiación infrarroja de onda larga, de alto poder calorífico. El fenómeno que permite retener esta radiación es el *efecto invernadero*, llamado así por el comportamiento de ciertos gases que permiten el paso de la luz pero impiden la pérdida de calor. Los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera no obstaculizan el paso de la radiación solar, pero son capaces de absorber eficazmente la radiación infrarroja que emite la superficie terrestre. Esta radiación es reemitida de nuevo hacia la superficie, escapando tan sólo un 5% al espacio por la llamada *ventana atmosférica*. El resto queda retenido, permitiendo la elevación de la temperatura media de la Tierra.

42.1.2. Los responsables del efecto invernadero

Los principales responsables del efecto invernadero son el vapor de agua,

el dióxido de carbono y el metano. El vapor de agua es responsable del 60% del efecto, ya que existe un mecanismo de retroalimentación positiva entre el calentamiento de la atmósfera y su contenido en vapor de agua. Según se calienta la atmósfera aumentan la evaporación y la capacidad de la atmósfera de contener agua, y por lo tanto aumenta también el efecto invernadero, causante del calentamiento. El dióxido de carbono es responsable del 30% del efecto invernadero y el resto se debe a la presencia de otros gases que se encuentran en menor concentración en la atmósfera, como son el metano, los clorofluorocarbonos, el óxido nitroso, el ozono troposférico y ciertos halocarburos.

En la tabla adjunta se indican los gases básicos de efecto invernadero.

GASES BÁSICOS DE EFECTO INVERNADERO

Vapor de agua	O ₃
CO ₂	NO _x
CH ₄	CO
N ₂ O	COV
Organohalogenados	HCFC
CFC	

El CO₂ tiene un papel especialmente importante en el clima como regulador de la temperatura media del planeta. Es un compuesto que abunda en la Tierra, y su principal reservorio se encuentra en las rocas carbonatadas, en las que existe una cantidad tal de CO₂, que si se liberara por completo a la atmósfera alcanzaría una presión parcial de este gas de 60 bares. En la atmósfera actual la presión

parcial del CO₂ es de 0,0003 bares. Es fácil pensar que en tiempos en los que la radiación solar era menos intensa que la actual, una mayor concentración en la atmósfera permitiera un calentamiento que evitara la congelación del planeta. A medida que el Sol ganaba intensidad en su radiación, su concentración en la atmósfera se fué reduciendo, de forma que la temperatura no aumentara de forma excesiva y se mantuvieran en todo momento unas condiciones de habitabilidad adecuadas para la presencia de vida.

Una forma de conocer la composición de la atmósfera en tiempos pasados es la toma de muestras del aire retenido en los hielos antárticos. En la base de Vostok (Rusia) se extrajo un testigo de hielo de unos 2.000 m de longitud, del que se obtuvieron datos de la composición de la atmósfera en los últimos 160.000 años. A partir de la relación entre dos isótopos de hidrógeno del hielo, también fue posible conocer la temperatura de la zona durante ese mismo período de tiempo. Los datos obtenidos muestran variaciones de temperatura de 10 grados de diferencia, existiendo una estrecha correlación entre estas variaciones y las concentraciones de CO₂ del aire, especialmente durante los períodos de deshielo.

A diferencia de lo que ocurre en los planetas más próximos, como Marte y Venus, la Tierra siempre ha tenido un clima de temperaturas moderadas gracias a un mecanismo cíclico de regulación que aumenta la concentración de CO₂ en la atmósfera si la superficie se calienta, o que la disminuye si se enfría.

Este mecanismo no existe en otros planetas que tienen una posición respecto al Sol similar a la Tierra. En Marte no existe suficiente CO_2 en la atmósfera para elevar su temperatura, que es de $-50\text{ }^\circ\text{C}$, permaneciendo el agua congelada. En Venus, por el contrario, el CO_2 es muy abundante en la atmósfera, y la temperatura media es tremendamente alta, unos $400\text{ }^\circ\text{C}$, debido al efecto invernadero. En planetas como Mercurio, en los que no hay atmósfera, la temperatura sólo depende de la radiación solar.

42.1.3. Regulación de la concentración de CO_2

El mecanismo que permite regular la concentración de CO_2 atmosférico para adecuar el efecto invernadero a las condiciones de radiación solar es el ciclo del carbonato-silicato. El CO_2 es extraído de la atmósfera y almacenado en las rocas carbonatadas, regresando posteriormente al aire en un ciclo que se cierra en un tiempo de 500.000 años. La extracción del CO_2 tiene lugar al disolverse y ser arrastrado por el agua de las precipitaciones. Al llegar a las superficies continentales, reacciona con las rocas silíceas, que son erosionadas por el agua de lluvia y por otros factores, liberándose iones calcio y bicarbonato al agua del suelo. Los iones son transportados por los ríos hasta los océanos, donde el plancton y otros organismos los utilizan en la construcción de sus caparazones de carbonato cálcico. Cuando mueren estos organismos, los caparazones acaban en los sedimentos marinos, que por fenó-

menos de subducción se van a ir deslizando bajo el lecho de los continentes. Allí, el sedimento se encuentra sometido a condiciones de temperatura y presión crecientes que van a hacer que se forme CO_2 en forma gaseosa. Durante las erupciones volcánicas, el CO_2 es emitido a la atmósfera y se cierra el ciclo.

La temperatura superficial del planeta actúa regulando el ciclo del carbonato-silicato de la siguiente manera: Al disminuir la temperatura de la superficie terrestre, también lo hace la temperatura de las capas superiores de los océanos, evaporándose menos agua. Al disminuir el contenido en agua de la atmósfera, se forman menos precipitaciones y se frena la velocidad de extracción del CO_2 de la atmósfera y la erosión de rocas silíceas. Sin embargo, la velocidad a la que se desprende CO_2 a la atmósfera permanece sin alterarse. El resultado es una acumulación de CO_2 en la atmósfera y un aumento del efecto invernadero, que eleva la temperatura media del planeta. Si la temperatura del planeta es demasiado alta se produce el efecto contrario: Aumentan la evaporación, las precipitaciones y la erosión de rocas silíceas, con lo que se acelera la velocidad de extracción del CO_2 de la atmósfera y disminuyen el efecto invernadero y la temperatura.

En el intercambio de CO_2 con la atmósfera, los organismos marinos desempeñan la importante función de incorporar los iones a los sedimentos marinos a través de la formación de caparazones de carbonato cálcico. También las plantas tienen un papel importante, ya que un 20% del CO_2 que no

entra en el ciclo anterior es extraído de la atmósfera por la fotosíntesis. Al morir las plantas y descomponerse, aumenta la concentración de CO_2 del suelo, y se acelera la transformación de los silicatos minerales en sedimentos carbonatados. Los procesos tectónicos elevan las rocas sedimentarias y exponen el carbono, que reacciona con el O_2 atmosférico y el agua de lluvia. Estos dos ejemplos guardan relación con la *hipótesis Gaia*, de J.E. Lovelock, según la cual son los seres vivos los responsables de la regulación del clima de la Tierra.

Hay investigadores que dan mayor importancia a los procesos físicos que a los biológicos en la regulación del CO_2 atmosférico. Si no existieran los organismos con concha que intervienen en el ciclo del carbonato-silicato, la concentración de iones calcio y bicarbonato aumentaría en el agua de los océanos. Una vez que llegara a determinados niveles críticos, los iones reaccionarían y se formaría carbonato cálcico, al igual que ocurrió seguramente antes que los seres vivos aparecieran. Por otra parte, si en algún momento desaparecieran las plantas, tendría lugar una disminución en la descomposición de los silicatos, que se podría compensar con un incremento de la temperatura de unos 10 grados gracias al ciclo de carbonato-silicato. El clima resultante sería muy similar al del cretácico medio. Por lo tanto, según estos autores, la Tierra sería habitable a pesar de que nunca hubiera aparecido en ella la vida. Sin embargo, el papel regulador que desarrollan actualmente los seres vivos dentro del ciclo del CO_2 es innegable. La cantidad de carbono que se en-

cuentra fijado en forma de biomasa y humus se calcula en torno a 2.100 gigatoneladas, y los procesos de descomposición, respiración y fotosíntesis suponen un flujo anual de 100 gigatoneladas de carbono.

A pesar de que la mayor parte del efecto invernadero se debe al vapor de agua presente en la atmósfera, no puede desempeñar el papel amortiguador de las variaciones de la temperatura superficial, ya que, al contrario que el CO_2 , contribuye a incrementar estas variaciones. Si se produce un incremento de la temperatura, aumenta la evaporación, y por lo tanto se acumula vapor de agua en la atmósfera, cuyo efecto invernadero refuerza dicho incremento. Si, por el contrario, disminuye la temperatura, también disminuye el contenido de vapor de agua de la atmósfera, y su contribución al efecto invernadero es menor. La adaptación del clima de la Tierra a las variaciones de luminosidad del Sol, es sólo atribuible al CO_2 o a otros gases invernadero, como el metano, cuya presencia en la atmósfera pudo ser muy superior en el pasado.

42.2. AUMENTO DEL EFECTO INVERNADERO POR LA ACCIÓN HUMANA

42.2.1. Bases generales

Los gases de la atmósfera realizan una importante función al absorber las radiaciones de onda larga emitidas por la superficie del planeta mediante el efecto

invernadero, ya que así permiten que la temperatura media de la Tierra sea la adecuada para la presencia de agua líquida en su superficie y que haya podido surgir en ella la vida.

Con el desarrollo de las sociedades humanas van apareciendo progresivamente una serie de emisiones de gases a la atmósfera producto de sus diferentes actividades. A partir de la revolución industrial, estas emisiones empiezan a ser tan elevadas que sobrepasan la capacidad natural de absorción de los mecanismos naturales que regulan los ciclos de la materia, y la concentración atmosférica de diferentes gases empieza a crecer.

La acumulación de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono o el metano, tiene como consecuencia directa el aumento de la capacidad de retención de calor de la atmósfera debido a la intensificación de ese efecto, y se empieza a observar un aumento continuado de la temperatura media del planeta. Los efectos, tanto positivos como negativos, que puede tener este calentamiento global sobre los seres vivos, son difíciles de precisar con exactitud, ya que el clima es un sistema muy complejo, en el que pequeños fenómenos pueden tener grandes consecuencias.

El hombre tiene escasa influencia en la concentración atmosférica del vapor de agua, principal responsable del efecto invernadero. Sin embargo, las actividades humanas tienen un impacto muy importante en el ciclo del CO_2 , al que se debe el 30% del efecto invernadero. Su concentración actual en la atmósfera, el 0,03% en volumen, es un 30% mayor

que antes de la revolución industrial. La acumulación del CO_2 en la atmósfera es especialmente importante por las características químicas de este gas, que no se descompone fácilmente con la radiación solar y del que sus moléculas pueden permanecer en el aire más de 100 años.

Como hemos indicado en otros capítulos, no sólo la concentración atmosférica de CO_2 está alcanzando unos niveles preocupantes; otros gases invernadero como el metano, los clorofluorocarbonos, el óxido nitroso, el ozono troposférico y los halocarburos, se han ido acumulando en el aire debido a las actividades humanas. La importancia de estos gases reside en que a pesar de ser mucho más escasos en la atmósfera, su capacidad de absorber la radiación terrestre y emitirla hacia la superficie es mucho mayor que la del propio CO_2 . Es conveniente matizar que en este contexto estos gases no son considerados contaminantes, como ocurre en la atmósfera urbana o en el aire de las zonas industriales, pues en nuestro caso forman parte de la composición normal del aire, a excepción de los CFCs. El problema medioambiental, en este caso, consiste en la alteración de sus respectivas concentraciones.

42.2.2. El Potencial de Calentamiento Global

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) recomienda expresar la contribución de cada gas a la modificación de la temperatura media terrestre en *Potencial de Calentamiento Global* (PCG) o *Global Warming Poten-*

tial (GWP). El PCG o GWP se define como el efecto acumulado del forzamiento radiativo causado por unidad de masa de un gas emitido a la atmósfera, en función de otro tomado como referencia, que normalmente es el dióxido de carbono. El PCG tiene en cuenta los efectos acumulados de cada gas a lo largo del tiempo, en función de su ciclo de vida. Dentro de estos efectos se incluyen tanto su capacidad de calentamiento de la atmósfera (forzamiento radiativo positivo), como la de enfriamiento (forzamiento radiativo negativo). En el caso de los gases de efecto invernadero, su contribución neta resulta positiva, ya que favorecen la retención de calor, y el GWP va a expresar su capacidad de absorción de radiación infrarroja en comparación con el CO₂. Se debe tener en cuenta que el GWP tan sólo se puede aplicar a gases cuya distribución espacial sea lo suficientemente uniforme, puesto que se van a valorar sus efectos a nivel global.

42.2.3. Importancia de cada gas

La contribución al efecto invernadero de un gas *j* en un subsistema *i*, viene dada por la siguiente ecuación:

$$I_i = \sum_j m_j^i \times GWP_j = \sum_j m_j^i \times \frac{\int_0^T A_j[t] \times C_j[t] \times dt}{\int_0^T A_{CO_2}[t] \times C_{CO_2}[t] \times dt}$$

siendo:

I_i = Indicador de la contribución al efecto invernadero del sistema *i* (en kg equivalentes de CO₂)

m_jⁱ = Masa de sustancia gaseosa *j* al efecto invernadero emitido por el sistema *i* (en kg)

GWP_j = *Global Warming Potential* de la sustancia *j* (es adimensional)

A_j[t] = Fuerza radiativa instantánea de un aumento de una unidad de la concentración del gas *j* (en W)

C_j[t] = Concentración de un gas *j* respecto de *t* (en mg/m³)

C_{CO₂}^[t] = Concentración de CO₂ respecto de *t* (en mg/m³)

Los efectos del gas elegido se comparan con los del CO₂ para un determinado período de tiempo, que debe ser el adecuado para el fenómeno que se quiere estudiar. En el estudio de procesos relativamente lentos, como ocurre con el incremento del nivel del mar, se deben considerar períodos de tiempo de 100 o más años, pero en el caso de los efectos que se producen a corto plazo, el tiempo de estudio debe ser menor. Para este tipo de fenómenos se recomienda un período de análisis de unos 20 años, por dos razones de peso. En primer lugar, se tiene en cuenta que los efectos climáticos de un forzamiento radiativo breve pero intenso, son mayores que los de uno más débil que tenga lugar a en un plazo más dilatado de tiempo. Por otra parte, las incertidumbres sobre el fenómeno del

GWP DE LOS GASES RESPONSABLES DEL EFECTO INVERNADERO

Compuesto	GWP directo (T=20 años)	GWP directo (T=100 años)	GWP directo (T=500 años)	GWP indirecto
CO ₂	1	1	1	0
CH ₄	35	11	4	>0
N ₂ O	260	270	170	?
CO	0	0	0	>0
NO _x	0	0	0	?
Hidrocarburos no metánicos	0	0	0	>0

cambio climático son mayores cuando se trata de conocer su evolución a largo plazo, lo que limita el uso del GWP a pequeñas variaciones alrededor de los valores actuales de la composición de la atmósfera.

Los gases de efecto invernadero tienen un efecto directo en el balance energético de la atmósfera al absorber la radiación infrarroja que emite la superficie terrestre. Pero la contribución de un gas al calentamiento global puede ser también ser también de tipo indirecto, si facilita la acumulación de gases de efecto invernadero al alargar su tiempo de permanencia en el aire. El IPCC indica que se deben diferenciar el GWP directo e indirecto de los gases. Sin embargo, el efecto indirecto es muy difícil de calcular, y sólo se suele indicar si su valor es mayor que 0.

En la tabla adjunta se muestran los GWP de los gases que más contribuyen al incremento del efecto invernadero.

El cálculo del GWP es de gran utilidad para conocer las consecuencias de la reducción de las emisiones de diferentes gases, y ofrece además un criterio objetivo para poder decidir sobre qué com-

puestos se debe actuar de forma prioritaria. Los esfuerzos se pueden centrar en los gases que más se emiten a la atmósfera, o en aquellos cuya concentración atmosférica es más elevada, pero el GWP permite escoger los gases que más influencia tienen en el cambio climático.

La mayor capacidad de absorción de radiación infrarroja, hace que el efecto combinado del resto de los gases de efecto invernadero pueda ser de una magnitud comparable a la del CO₂. La contribución relativa de cada gas al efecto invernadero adicional depende tanto de la cantidad presente en la atmósfera como de la energía que es capaz de absorber del espectro de radiación emitido por la superficie terrestre, quedando repartida en la forma que se indica en la tabla adjunta.

La concentración actual de metano en la atmósfera es del 0,000125% en volumen, unos dos órdenes de magnitud menor que la del CO₂, pero debido a sus propiedades químicas, su capacidad de absorción de la radiación terrestre es 32 veces mayor. Su concentración ha ido aumentando en la atmósfera a medida que ha ido creciendo la población mun-

**CONTRIBUCIÓN RELATIVA
ADICIONAL DE LOS GASES AL
EFECTO INVERNADERO**

Compuesto	Contribución relativa al efecto invernadero adicional (%)	Incremento anual (%)
CO ₂	55	0,5
CH ₄	15	0,9
CFC ₁₂	12	4
CFC ₁₁	7	4
N ₂ O	4	0,25
O ₃ (Troposférico)	2	-
Otros CFCs	2	-
Otros compuestos	3	-

dial, especialmente debido al desarrollo de la agricultura. En la actualidad, la cantidad de CH₄ presente en el aire es el doble de la que existía antes de la revolución industrial, y cada año es un 1% mayor. Su concentración muestra también una clara correlación con el aumento global de la temperatura, y se le atribuye el 15% del efecto invernadero.

Las fuentes de emisión del CH₄ son los procesos anaerobios de fermentación de la materia orgánica vegetal en el campo y en el tránsito digestivo de los rumiantes, la descomposición de la materia orgánica de los residuos urbanos, la combustión de la biomasa y la combustión de carbón, petróleo y gas natural. El tiempo de permanencia del CH₄ en la atmósfera es de 10 años, por lo que una reducción de las emisiones podría repercutir rápidamente en la velocidad de acumulación del gas.

El óxido nitroso es un gas cuyas emisiones se deben principalmente a la acti-

vidad ganadera, resultando de los procesos de desnitrificación de los microorganismos que actúan sobre los compuestos nitrogenados del suelo. La actividad agrícola es por lo tanto responsable de cerca del 19% de efecto invernadero adicional, al contribuir a él con la emisión de metano y de óxido nitroso.

**42.3. INFLUENCIA DEL HOMBRE
EN EL AUMENTO DE LA
CONCENTRACIÓN DE
DIÓXIDO DE CARBONO EN
LA ATMÓSFERA Y SU
RELACIÓN CON EL
CALENTAMIENTO GLOBAL**

42.3.1. Evolución histórica

La preocupación por la acumulación de los gases invernadero en la atmósfera no es exclusiva de nuestros días. En el siglo XIX, el químico sueco *Svante Arrhenius* y el geólogo americano *Thomas C. Chamberlin*, coincidían ya en señalar que las variaciones del contenido en CO₂ de la atmósfera pueden afectar a la temperatura media del planeta. Según *Arrhenius*, la duplicación del CO₂ presente en la atmósfera causaría un calentamiento que incrementaría la temperatura entre 4 y 6 grados. Diferentes investigadores comienzan a advertir desde entonces las posibles consecuencias de una acumulación de este gas en el aire, pero no se les presta demasiada atención debido a la poca fiabilidad de los datos de temperatura de que se disponía entonces. No existía un muestreo regular, y la variabilidad espacial de las me-

didada era demasiado grande para poder extraer conclusiones a escala global.

En el Programa del Año Geofísico Internacional 1957–58 se puso en marcha un proyecto para medir la concentración del CO₂ atmosférico, consistente en la instalación de dos estaciones de muestreo: una localizada en el observatorio meteorológico de Mauna Loa (Hawai), a 3.300 m de altitud, y la otra en la estación del Polo Sur del Programa Antártico de los Estados Unidos. Se eligen así dos puntos de muestreo para poder disponer de datos de los dos hemisferios, y su ubicación responde a la necesidad de que el aire analizado se encuentre suficientemente mezclado y sin contaminación de origen local. De los resultados de las mediciones de 20 años, llama la atención la variabilidad anual del contenido en CO₂ de la atmósfera, reflejo de los cambios estacionales de actividad de las plantas. Durante la estación de crecimiento se observa una disminución del CO₂ en el aire debido a su fijación por la fotosíntesis en forma de estructuras orgánicas, mientras que en el resto del tiempo se aprecia un incremento causado por la emisión de CO₂ procedente de la oxidación de los tejidos vegetales. Al eliminar estos ciclos de variación estacional se observa un aumento neto del CO₂ cercano al exponencial. En un intervalo de tiempo de tan sólo 20 años, el CO₂ presente en la atmósfera aumentó un 6%. Los valores más altos se localizaron en el Hemisferio Norte, donde existe un mayor consumo de combustibles fósiles y una mayor variación estacional de productividad de las plantas. En el Hemisferio Sur también se había

producido también un aumento del CO₂ atmosférico, aunque de menor magnitud que el del Hemisferio Norte debido al tiempo necesario para que se realice la mezcla de aire a través del ecuador.

Hansen y sus colaboradores analizaron por su parte la temperatura media global de la Tierra entre los años 1880 y 1980, observando un incremento continuado, a excepción del período de 1940 a 1980, en el que la temperatura media disminuye ligeramente debido al enfriamiento que se produjo en el Hemisferio Norte. En los 100 años estudiados, el aumento neto de la temperatura fue de unos 0,4 °C. La variación de temperatura muestra una correlación significativa con el correspondiente incremento de CO₂ de 43 partes por millón que se produjo durante esos mismos años. El ajuste aumenta significativamente si además se tienen en cuenta otros factores, como la absorción de calor por los océanos y la emisión de aerosoles volcánicos.

A pesar de los resultados anteriores, no es fácil llegar a la conclusión de que el incremento del CO₂ y de los demás gases invernadero sean la única causa del calentamiento del planeta, dada la naturaleza variable del clima. Resulta complicado poder diferenciar qué cambios se producen de forma natural y cuáles son atribuibles a las actividades humanas. El calentamiento que se viene observando podría formar parte de las oscilaciones naturales de temperatura debidas a variaciones periódicas de la cantidad e intensidad de radiación solar que recibe el planeta. El registro de temperaturas del que se dispone es demasia-

do corto, y no es posible conocer el contexto histórico dentro del cual se está produciendo el aumento de la temperatura. Si bien es cierto que no disponemos de pruebas suficientes para responsabilizar totalmente a la acumulación de gases invernadero en la atmósfera del calentamiento climático, parece evidente que al menos han contribuido al incremento de la temperatura. Por otra parte, los valores reales que se vienen observando entran dentro de los márgenes de confianza de las predicciones realizadas por los modelos matemáticos, lo que parece verificar las hipótesis de partida.

Según el IPCC, el aumento de las emisiones de CO₂ es la causa del 60% del calentamiento que se viene produciendo desde el año 1850 en el planeta. También reconoce que existe una serie de fenómenos que están amortiguando el cambio, y que han hecho que el incremento real de la temperatura haya sido algo inferior a lo que se pensaba. El propio período de enfriamiento observado a partir del año 1980 evidencia la necesidad de tener en cuenta éstos otros factores que también influyen en la temperatura.

42.3.2. Efectos y origen de las emisiones de dióxido de carbono

El problema de las emisiones de CO₂ y de los demás gases invernadero, se considera generalmente como la combinación de tres cuestiones distintas, a saber: por una parte, quisiéramos conocer qué cantidad de CO₂ se va a emitir de

forma artificial a la atmósfera durante los próximos años. Por otra parte, es muy importante saber en qué medida pueden modificar estas emisiones la concentración atmosférica de CO₂, teniendo en cuenta los mecanismos naturales de absorción. Finalmente, es fundamental conocer y prever el impacto que puede tener la acumulación del CO₂ sobre la temperatura media y sobre el clima del planeta, y cómo pueden afectar estos cambios a las sociedades humanas.

Las dos principales fuentes de emisión artificial de CO₂ a la atmósfera son el consumo de combustibles fósiles y la deforestación, causantes del 80 y del 20% de las emisiones antrópicas, respectivamente. El consumo global de combustibles fósiles depende de gran número de factores, como son el aumento de la población, la utilización de otras fuentes de energía, el estado de la economía mundial, etc... Hay que tener en cuenta que al menos un 70% de la población mundial vive en países en vías de desarrollo, y su consumo, incluyendo sobre todo los hidrocarburos fósiles, debería aumentar considerablemente con el progreso de su economía. Suponiendo un avance moderado de la economía de estos países, el consumo futuro de estos combustibles continuará siendo similar al de la tendencia actual, aumentando entre un 2 y un 3% anual. En cuanto a la deforestación, según la FAO, cada año desaparecen unos 17 millones de hectáreas de selva tropical. Comparativamente la superficie forestal que se destruye en las zonas templadas es despreciable. El problema de la deforestación es doblemente importante porque no sólo se libera dióxido de car-

bono retenido en la biomasa cuando se utiliza para obtener energía, sino que además se destruye uno de los principales sumideros del CO₂ atmosférico.

42.3.3. Absorción y consumo del dióxido de carbono

Cada año se emiten a la atmósfera alrededor de 6 gigatoneladas de carbono por el uso de combustibles fósiles (carbón e hidrocarburos), y 2 por la deforestación. De estas cantidades emitidas, tan sólo van a permanecer en la atmósfera alrededor de 3,4 gigatoneladas, que se suman a las 760 que ya se encuentran en ella. Existen por lo tanto una serie de mecanismos que van a amortiguar la acumulación de CO₂, siendo los principales *sumideros de las emisiones de CO₂* la absorción de las plantas y la de los océanos. De las 8 gigatoneladas que se emiten cada año a la atmósfera por las actividades humanas, las plantas van a fijar en forma de biomasa entre 1,7 y 3,2 gigatoneladas de carbono, y los océanos van a absorber entre 1,0 y 2,5, amortiguando el incremento del CO₂ en la atmósfera. Comparativamente, los flujos naturales del carbono son muy superiores a los que tienen un origen artificial, ya que el intercambio con la atmósfera debido a la actividad de los seres vivos y a la de los océanos es de 100 y de 93 gigatoneladas al año, respectivamente. Sin embargo, las emisiones antrópicas son lo suficientemente grandes como para desequilibrar el ciclo del carbono.

El otro gran sumidero de las emisiones antrópicas de CO₂ es la fijación de

carbono en los vegetales mediante la fotosíntesis. En los océanos no solamente se absorbe CO₂ de la atmósfera mediante fenómenos de disolución, puesto que también van a contribuir los organismos que componen el fitoplancton. A pesar de que la biomasa vegetal oceánica (3 gigatoneladas de carbono) es unas 200 veces inferior a la continental (560 gigatonelada de carbono), la cantidad de CO₂ fijada por la fotosíntesis en uno y otro medio son comparables. La biomasa vegetal de los océanos fija una gigatonelada de carbono al año, y la continental 55. Esto es posible gracias a la tasa de renovación tan alta que tiene el fitoplancton, que es capaz de mantener una biomasa de herbívoros muy superior a la suya propia. En los continentes, la fotosíntesis de las plantas es el principal mecanismo de absorción del CO₂, que es almacenado en forma de biomasa y de humus.

La fotosíntesis es un proceso complejo, en el que intervienen más de 50 reacciones distintas, y que es capaz de adaptarse a condiciones ambientales muy variables. La tasa de fotosíntesis depende directamente de factores como la luz, la temperatura, la humedad del aire, la disponibilidad de agua en el suelo, los nutrientes minerales, o la propia presencia de CO₂ en el aire. Ante los cambios climáticos que se aproximan, el metabolismo de las plantas tratará de acomodarse a las nuevas condiciones de concentración de CO₂, de temperatura y de disponibilidad hídrica. La mayor disponibilidad de CO₂ en el aire que rodea a las hojas es un factor que estimula la tasa de fotosíntesis de la planta, ya que se

trata de la principal fuente de carbono para la formación de compuestos orgánicos, y la capacidad de las plantas de fijar CO_2 mediante la fotosíntesis es muy superior a la que realmente desarrollan actualmente. Otro efecto importante es la reducción del ritmo respiratorio respecto a la biomasa que se produce en las hojas. No ocurre lo mismo en otras partes de la planta ricas en CO_2 , como en los frutos, en el tallo o en las raíces. Un incremento de la presencia de CO_2 en el aire puede aumentar de forma considerable la tasa de fotosíntesis de las plantas, siempre que los demás factores de los que depende no sean limitantes. En las plantas que crecen en una atmósfera enriquecida con este gas, se observa un mayor crecimiento y desarrollo de sus estructuras, y son capaces de almacenar mayor cantidad de CO_2 en forma de materia orgánica. Este fenómeno, conocido como *efecto de fertilización aérea*, es utilizado por algunos invernaderos, que emplean una atmósfera con una concentración de CO_2 tres veces superior a la atmosférica para aumentar su productividad. Hay que tener en cuenta que el efecto del CO_2 no es el mismo sobre plantas con distinto tipo de metabolismo. En las plantas conocidas como C3, entre las que se encuentran casi todas las especies cultivadas, como trigo, remolacha, patata, tabaco, etc., la fotosíntesis aumenta con la concentración. En el caso de las plantas C4, la mayor parte de ellas tropicales como el maíz, el sorgo, la caña de azúcar, y otras, la fotosíntesis se estabiliza para niveles más bajos, siendo ya prácticamente máxima para la actual concentración atmosférica de CO_2 .

Aunque el incremento de CO_2 produce un aumento inmediato de la fotosíntesis, con el tiempo se produce una aclimatación del metabolismo de la planta, que impide que este efecto tenga una continuidad a lo largo del tiempo. En las hojas que crecen en estas condiciones se observa una acumulación de carbohidratos y una disminución de la concentración de ciertas enzimas de la fotosíntesis. Estas hojas suelen presentar entre un 15 y un 20% menos de nitrógeno de lo normal, y un aumento de la relación C/N, especialmente cuando los nutrientes son limitantes o cuando existe una asimilación insuficiente del exceso de carbohidratos sintetizados en la fotosíntesis. El fenómeno de aclimatación se explica por la incapacidad de las plantas de asimilar todos los carbohidratos producidos, y porque se necesitan menores cantidades de la enzima *rubisco* en presencia de alta concentración de CO_2 para alcanzar la misma tasa de fotosíntesis que en la atmósfera normal, y su síntesis se va reduciendo. Se cree que durante el proceso de aclimatación se produce un incremento de carbohidratos no estructurales que afecta de un modo desconocido a los genes que codifican para determinadas proteínas de la fotosíntesis, como la propia rubisco.

La máxima actividad de fotosíntesis sólo se puede mantener cuando la presencia de nutrientes no es limitante, y cuando existen suficientes sumideros de los carbohidratos producidos. Estas condiciones son muy difíciles de encontrar en ambientes naturales, de manera que el proceso de aclimatación impide que se mantengan las altas tasas de fotosínte-

sis en una atmósfera con alto contenido en CO_2 . Sin embargo, el proceso de fertilización aérea podría ser muy beneficioso en los cultivos agrícolas, en los que se suministran los nutrientes que la planta necesita y se realiza una extracción continua de la producción vegetal. También es esperable un incremento de la actividad fotosintética de la vegetación natural, aunque no tan alto como el que existiría sin el proceso de aclimatación. Los vegetales pueden considerarse por lo tanto como importantes sumideros del CO_2 , desempeñando un papel fundamental como amortiguadores de la acumulación artificial de este gas en la atmósfera.

42.3.4. El equilibrio

Las aguas superficiales oceánicas mantienen un equilibrio entre su concentración de CO_2 y la de la atmósfera, y absorben mediante diferentes procesos químicos y biológicos entre el 30 y el 50% de las emisiones antrópicas. La solubilidad del CO_2 en el agua aumenta con la disminución de la temperatura del agua, de manera que las aguas marinas liberan CO_2 a la atmósfera en los trópicos y lo absorben en las latitudes altas. Hay que tener en cuenta que los océanos tan sólo son efectivos en la disolución del CO_2 atmosférico en su superficie, en una capa de una profundidad no superior a 80 metros. Su capacidad de absorción es por lo tanto limitada, ya que el intercambio de gases entre las aguas superficiales y las profundas tiene lugar de forma muy lenta. Este intercambio puede

ser facilitado por la existencia de corrientes oceánicas que realicen una mezcla eficaz de unas aguas y otras.

No sólo existen mecanismos de amortiguación de la acumulación de CO_2 en la atmósfera. El incremento de la concentración de CO_2 y del efecto invernadero, pueden desencadenar también retroalimentaciones positivas que contribuyan a reforzar estos cambios. El calentamiento podría acelerar el metabolismo respiratorio de las plantas, aumentando la degradación de la materia orgánica y la producción de CO_2 . Una elevación de la temperatura de tan sólo un grado puede suponer un incremento del 10 al 30% de la respiración. Por esta razón, normalmente la capacidad de absorción de CO_2 de la vegetación se suele referir a la fotosíntesis neta o diferencia entre el carbono fijado por la fotosíntesis y el que regresa a la atmósfera a través de los procesos respiratorios. Por otra parte, el cambio acelerado del clima podría alterar el equilibrio de los ecosistemas forestales y su capacidad de fijación de CO_2 , o causar extinciones masivas de especies que no sean capaces de adaptarse a las nuevas condiciones. El calentamiento también puede hacer que se libere el CO_2 que se encuentra contenido en el suelo en forma de materia orgánica muerta, lo que supone un volumen casi el doble del que se encuentra en la atmósfera. El aumento de las temperaturas actuaría estimulando la actividad de los microorganismos edáficos que descomponen continuamente la materia orgánica del suelo, a partir de la cual producen dióxido de carbono y metano.

Las características específicas de cada tipo de ecosistema son las que determinan su intercambio de CO_2 con la atmósfera, de manera que su comportamiento futuro al cambiar las condiciones climáticas será también distinto. Para conocer como es la contribución de un determinado ecosistema al ciclo del CO_2 se debe realizar el balance de los siguientes flujos de materia:

- Extracción de CO_2 de la atmósfera por la fotosíntesis, y almacenamiento en forma de biomasa y humus.
- Emisión de CO_2 a la atmósfera por la respiración de la vegetación y de los demás organismos.
- Emisión de CO_2 en la descomposición de la materia orgánica.

Aproximadamente la mitad del carbono fijado por la fotosíntesis, en forma de producción primaria bruta, abandona la planta en un corto espacio de tiempo debido a su respiración, y se libera CO_2 . El resto queda retenido y es utilizado en el crecimiento y en el desarrollo de sus estructuras, y queda fijado en forma de producción primaria neta. Esta biomasa pasa a disposición de los animales herbívoros, que van a desviar parte del carbono almacenado en la planta a la cadena trófica del ecosistema. Cuando alguna parte de la planta, o toda ella, muere y cae al suelo, empieza a ser descompuesta por la acción de la fauna edáfica y la de los microorganismos descomponedores, proceso en el que parte del carbono va a regresar a la atmósfera por la respiración de estos organismos. El resto pasa a formar parte del complejo arcillo-húmico del suelo.

Hemos de indicar, por otra parte, que no sólo es importante la cantidad de CO_2 que absorben los ecosistemas de la atmósfera, sino también la forma en que va a quedar almacenado. El carbono que queda retenido en forma de carbón o en el humus del suelo regresa a la atmósfera mucho más lentamente que el almacenado en la biomasa, que puede ser emitido de nuevo al aire en procesos de combustión o de descomposición. En este sentido, tienen gran importancia los bosques templados, que no sólo almacenan carbono en forma de madera y estructuras vegetales, sino que también almacenan grandes cantidades en forma de humus.

A pesar de que la absorción de CO_2 de las plantas y los océanos pueden frenar el proceso, el CO_2 ha ido aumentando en la atmósfera un 0,4% cada año durante las últimas dos décadas. Se espera que entre los años 2030 y 2080 la concentración del CO_2 atmosférico sea el doble de la que existía en el año 1900, y que a finales del siglo XXI sea de cuatro veces más.

42.3.5. El CO_2 y la temperatura

Para saber como repercutirá la acumulación atmosférica de CO_2 en el clima, se elaboran modelos de circulación general (MCG). Aunque parece claro que el aumento de la concentración de CO_2 influye en el calentamiento de la superficie terrestre por el incremento del efecto invernadero, no es fácil saber con qué intensidad, pues existe un gran número de fenómenos climáticos que pue-

den afectar al cambio de temperatura, reforzándolo o atenuándolo.

Entre los fenómenos que pueden influir en la temperatura, se debe prestar especial atención a las nubes y los aerosoles. El calentamiento superficial de los océanos supone un aumento de la evaporación de agua y de la formación de nubes, que tienen la capacidad de reflejar la radiación de la luz solar y de absorber la radiación infrarroja emitida por la superficie del planeta. Dependiendo de que domine uno u otro fenómeno, las nubes pueden contribuir de forma positiva o negativa al calentamiento global, lo que depende de su reflectividad, altura, distribución y extensión. Según los cálculos realizados a partir de datos tomados por satélites, en la actualidad el efecto de enfriamiento de las nubes es mayor que el efecto de calentamiento, lo que hace previsible que actúen amortiguando el incremento de la temperatura media. Sin embargo, el aumento de la evaporación también supondría un incremento de la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera, principal responsable del efecto invernadero, con lo que la atmósfera tendría una capacidad todavía mayor de retener calor en ella. Se estima que por cada grado de temperatura que aumente la temperatura media el contenido de vapor de agua en la atmósfera podría crecer en un 6%. El progresivo calentamiento del clima podría repercutir también en la concentración atmosférica de otros compuestos, como el metano. Existe gran cantidad de este gas retenido en los sedimentos de las plataformas continentales y bajo el *permafrost* del ártico en forma de clatratos (retículo molecular formado por CH_4 y agua), y podría libe-

rarse por el aumento de la temperatura de las aguas someras y por la subsiguiente descongelación de los hielos.

Las partículas sólidas suspendidas en el aire, tanto de origen natural (volcánico) como artificial, tienen la capacidad de bloquear la llegada de la radiación solar a la superficie terrestre. Las cenizas emitidas a la atmósfera durante la erupción del volcán Pinatubo (Filipinas) en 1991 redujeron la radiación que llegaba a la superficie de la Tierra de tal forma, que la temperatura media del planeta sufrió un descenso durante dos años seguidos. Los aerosoles y otros contaminantes emitidos por el hombre también pueden modificar los balances energéticos del planeta por su capacidad de absorción de la radiación solar y por ser capaces de reducir la visibilidad de la atmósfera. Según la Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA), la presencia de aerosoles en la atmósfera ha supuesto una reducción del 20% del calentamiento observado durante el siglo XX respecto al que podría haber tenido lugar.

Las partículas de azufre tienen especial importancia como atenuadores de la radiación solar que llega a la superficie del planeta. La combustión de petróleo y carbón ricos en azufre supone la emisión de dióxido de azufre a la atmósfera, donde se transforma en partículas de sulfato. Estas partículas pueden actuar como núcleos de condensación de gotas de agua, con lo que aumenta el radio de las mismas y también su capacidad de absorción de la radiación solar. El enfriamiento temporal del clima que se produjo en el

Hemisferio Norte entre los años 1940 y 1980 coincidió con un gran aumento de las emisiones de azufre a la atmósfera por fábricas y centrales térmicas que utilizaban combustibles fósiles, y ésta pudo ser la causa del descenso de las temperaturas.

Debido a la gran cantidad de factores de los que depende la temperatura, la fiabilidad de los MCG para realizar predicciones para el futuro es limitada. Para poder incluir en las simulaciones fenómenos que pueden tener gran repercusión en el clima mundial por procesos de retroalimentación, se emplean técnicas de parametrización. Estas técnicas consisten en incluir en el modelo coeficientes de proporcionalidad que estiman la relación entre el valor puntual de determinados parámetros, como la temperatura, con su valor medio. La precisión de los modelos climáticos se estima comparando sus predicciones con otros modelos a menor escala, o con datos reales. En el caso del efecto invernadero, tan sólo se dispone de datos reales tomados de forma sistemática para algo más de 100 años de antigüedad. En general, el incremento real de la temperatura ha sido algo menor que el pronosticado por la mayor parte de los modelos climáticos. Sin embargo, coincide bastante con el menor de los valores dados para el calentamiento por estos modelos, lo que indica que aunque han existido mecanismos de amortiguación que no se han tenido en cuenta las predicciones no iban del todo desencaminadas. En cualquier caso los modelos matemáticos son un instrumento insustituible a la hora de estudiar los mecanismos que regulan el clima global del planeta.

Todos los MCG coinciden al predecir que continuará el aumento de la temperatura durante los próximos años, pero debido a sus limitaciones, tan sólo pueden dar un intervalo para la magnitud del calentamiento. Según el IPCC, una duplicación del CO_2 en los próximos 100 años podría suponer un incremento de la temperatura media de la Tierra de entre 1 y 3,5 grados. Este aumento de temperatura sería comparable al que tuvo lugar desde el último período glaciario hasta nuestros días (hace unos 12.000 años), pero tendría lugar entre 10 y 100 veces más rápido. También hay que tener en cuenta que el aumento de la temperatura media no se distribuye de una forma regular en toda la superficie del planeta, ya que la mayor parte del calentamiento observado desde el año 1900 se ha producido en el Hemisferio Norte. A partir de los 40° de latitud norte, donde se localizan los valores más altos de CO_2 debido al gran consumo de combustibles fósiles y por la productividad de la vegetación, el calentamiento puede ser superior al de la temperatura media. En el Hemisferio Sur será algo menor, entre otras causas porque existe una menor superficie continental.

A la hora de calcular el efecto del CO_2 sobre la temperatura, es importante tener en cuenta que las variaciones debidas al efecto invernadero nunca pueden exceder los límites marcados por la latitud y las variaciones estacionales. El calentamiento del planeta no es fenómeno que se pueda producir de forma descontrolada, ya que la temperatura que puede alcanzar el planeta viene limitada por la radiación solar recibida. Debido al efecto invernadero actualmente sólo escapa al espacio un 5%

de la radiación terrestre de onda larga por la denominada *ventana atmosférica*. Una vez que el incremento de gases invernadero permitiera retener el 100%, y si se cerrara la ventana por completo, la temperatura de la Tierra alcanzaría su máximo y dejaría de aumentar. El valor de esta temperatura es difícil de precisar, pero según los cálculos tradicionales del balance energético tierra-atmósfera, no podría ser superior a los 4 °C. Sin embargo, debido a la irregularidad de las bandas de absorción del espectro de la radiación terrestre, se puede pensar que la ventana atmosférica no se cerrará nunca completamente, y que dejará escapar siempre un cierto porcentaje de radiación. Algunos investigadores valoran esta cantidad en un 2% de la radiación emitida por la superficie de la Tierra, en cuyo caso el calentamiento no superaría los 2,5 °C de media. En cualquier caso, es un valor suficiente para tener en cuenta, ya que una disminución de tan sólo un grado de temperatura fue la causante de la Pequeña Edad de Hielo que tuvo lugar en Europa entre los años 1400 y 1800 y que supuso grandes problemas económicos y sociales.

42.4. EFECTOS CLIMÁTICOS, ECOLÓGICOS Y SOCIOECONÓMICOS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

42.4.1. Efectos generales y modelos. Balances

Aunque los modelos coinciden al señalar la continuidad del aumento de la temperatura, no permiten la realización

de predicciones fiables en regiones concretas debido a la imposibilidad de simular con el suficiente detalle el comportamiento de los océanos y de la atmósfera, ya sea por desconocimiento o bien por simplificar el cálculo matemático. Tampoco se contemplan con el suficiente detalle la evapotranspiración, el albedo o el comportamiento de las nubes ante el cambio de las condiciones climáticas.

En los modelos de circulación general (MCG), la atmósfera se representa como una malla tridimensional con trazados horizontales y verticales separados por varios centenares de kilómetros. Los cálculos se realizan para los nudos de la red, de los que cada uno representa una superficie cuadrada de unos 325 km de lado. Sin embargo, esta resolución espacial no es suficiente para contemplar fenómenos como las precipitaciones, que se producen a escalas mucho más pequeñas.

Para cubrir las deficiencias de los MCG, resulta de gran utilidad el estudio de los cambios climáticos que se han producido en el pasado, con el objetivo de conocer con antelación los efectos del que tendrá lugar en los próximos años. El estudio de las analogías paleoclimáticas presenta grandes limitaciones, de forma que lo más recomendado es el análisis de las tendencias climáticas recientes. A partir del estudio de los últimos períodos cálidos que ha sufrido el clima del planeta, se deduce que una de las principales consecuencias del aumento de las temperaturas será la redistribución de las precipitaciones, extre-

mándose las condiciones hídricas en prácticamente toda la superficie del planeta. En principio se espera un aumento generalizado de la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, ya que el aire caliente es capaz de retener mayor cantidad de agua, y el calentamiento implica un aumento de la evaporación. Sin embargo, el reparto de las lluvias será muy desigual. Las zonas áridas serán aún más secas, y allí las sequías serán cada vez más intensas. Por el contrario: en las zonas húmedas la mayor intensidad de las precipitaciones aumentará la escorrentía superficial, responsable de inundaciones y pérdidas de tierras cultivables por erosión. Se espera que aumente la frecuencia de las precipitaciones durante el invierno en las latitudes altas, y en casi todas las latitudes medias.

En otro orden de cosas, el transporte del CO_2 desde el aire hasta las células tiene lugar principalmente por difusión del aire a través de los estomas, por lo que estos deben permanecer abiertos. Esto hace que queden expuestas las partes húmedas de los tejidos de las hojas y que se pierda una gran cantidad de vapor de agua por transpiración. Se calcula que por cada molécula de CO_2 que es absorbida, las hojas pierden entre 100 y 1.000 moléculas de agua, aunque normalmente son alrededor de 240. Cuando existe mayor disponibilidad de CO_2 , la difusión se ve favorecida, y los estomas se cierran parcialmente, minimizándose las pérdidas de vapor de agua por transpiración.

La disminución de la evapotranspiración de los vegetales supondría una re-

ducción de la humedad del aire y de las precipitaciones, pero podrían aumentar la humedad del suelo y la escorrentía superficial. Sin embargo, hay que tener también en cuenta que el CO_2 estimula el aumento de la superficie foliar y la longitud de las raíces. Así, el consumo de agua tiende a ser mayor, y el aumento de la superficie de las hojas supone una mayor intercepción de energía. En el balance global, los efectos de la disminución de la conductividad estomática y de la estimulación del crecimiento de la planta tienden a compensarse, de forma que la evapotranspiración de las plantas varía muy poco en una atmósfera con alto contenido en CO_2 .

En caso de que se vaya confirmando el proceso de cambio climático durante los próximos años, las repercusiones en el balance hídrico de la Península Ibérica serán especialmente importantes. Según las conclusiones de estudios realizados en nuestro territorio expuestas en el III Congreso Nacional de Medio Ambiente del año 1996, el cambio climático introducirá en las cuencas una irregularidad temporal de los recursos hídricos muy superior a la del resto de los países de la Unión Europea, lo que supone la necesidad de realizar grandes inversiones en obras hidráulicas para su gestión.

Al igual que en otras regiones, la disminución de las precipitaciones en la Península Ibérica va unida a un aumento de la variabilidad de las mismas, lo que supone una mayor irregularidad en las aportaciones de agua que reciben los cauces naturales. Al disminuir la cuantía de las aportaciones y al aumentar a la

vez su variabilidad, la capacidad de dilución de los contaminantes que se vierten a los ríos se verá seriamente alterada, y estos serán mucho más vulnerables a la contaminación, y sobre todo a la de tipo químico. Por otra parte, el aumento de la temperatura y la disminución de la velocidad del agua disminuye la capacidad autodepuradora de los cursos de agua ante los vertidos de contaminantes de naturaleza orgánica.

Todo esto ocurrirá a no ser que se tomen las medidas oportunas ya, y más ante las actuales sanciones diarias de la Unión Europea a España para el estado de sus ríos, que demuestran una mala gestión en los últimos 40 años debida, en nuestro concepto, a corporativismos y a falta de conocimientos, fundamentalmente.

Debido a los cambios en la humedad del aire y al aumento de las temperaturas, se prevé un incremento de la evaporación directa de agua en los embalses y en los humedales, lo que supondrá una disminución en la capacidad de almacenamiento de agua. En las cuencas de menos de 100 Hm³ la disminución del agua retenida puede llegar a ser del 10%. El efecto de la evaporación puede provocar así importantes problemas en los ecosistemas naturales, pudiendo desaparecer aquellos que son más vulnerables a los cambios de las condiciones ambientales.

Las reducciones en el balance hídrico, unidas a la menor capacidad de retención de agua, pueden suponer una disminución en el año 2060 del 17% de los recursos hídricos disponibles, es decir, una pérdida de alrededor de 20.115 Hm³/año de las cifras actuales. Esta can-

tividad es comparable al volumen anual medio de agua almacenada en la totalidad de los embalses y humedales del territorio español, lo que da una idea de la magnitud del problema en un país en el que el agua es ya un recurso bastante limitado en la mayor parte de su territorio. Aunque la reducción será generalizada, se prevé que sea mayor en las cuencas de los ríos Duero, Segura, Júcar, Guadiana, Guadalquivir y Sur, siendo precisamente estas últimas algunas de las más necesitadas.

42.4.2. Efectos básicos en sectores concretos: Impactos

Líneas generales

La disminución de los recursos hídricos podría poner en cuestión la amortización de algunas de las grandes obras hidráulicas previstas, o que ya se están realizando en la actualidad, ya que la utilidad de estas infraestructuras se plantea para períodos de unos 100 años. A este respecto, pueden ser de gran utilidad las ecuaciones de *Coutage* y *Turc*, ya que el funcionamiento real de las cuencas de España de tamaño grande y medio se adapta bastante bien a estos modelos matemáticos en la realización de predicciones con márgenes de unos 30 años. Siendo calibradas de la forma adecuada en cada caso, pueden servir como instrumento de estudio para conocer la evolución de los recursos hídricos en la Península Ibérica bajo distintos supuestos de cambio climático. En cualquier caso, siempre hay que tener en cuenta que es-

tos resultados deben ir siendo verificados a lo largo de los próximos años, y es muy posible que haya que hacer varias revisiones a medida que se observe la evolución real del clima. En el caso de que se cumplan las predicciones, el cambio climático aumentará el precio del agua, tanto en España como en Portugal, donde los precios son ya de los más altos de la Unión Europea. En el resto de los países de Europa, que gozan de un clima atlántico, las reducciones de los recursos hídricos no parece que vayan a ser tan graves como en la Península Ibérica.

Al margen de la alteración de los recursos hídricos, el cambio climático puede tener otras repercusiones sobre los ecosistemas terrestres, sobre los sistemas socioeconómicos y en la salud humana, aunque tan sólo se trata de un factor añadido al conjunto de presiones que las actividades humanas ejercen sobre los recursos naturales. En la identificación de los impactos de los cambios del clima se debe tener en cuenta que este problema se enmarca dentro de otro de mayor envergadura, y que la vulnerabilidad de los ecosistemas y de los sistemas socioeconómicos va a depender de las circunstancias específicas de cada región del planeta.

Metodologías de identificación de impactos

Para identificar estos impactos se pueden utilizar tres métodos distintos, en función de su grado de complejidad:

- *Método de Impactos (causa-efecto)*: Es el más sencillo de los tres. Se basa

en relacionar una serie de causas con sus efectos, considerando que cuando se produce un determinado suceso climático, este lleva asociada una serie de consecuencias.

- *Método de interacciones*: Según este método, el clima es solo un factor más de los que depende la gestión de los recursos naturales, y se toman en consideración las interacciones que existen entre todos ellos.
- *Método integrado*: Es el más complejo de todos, ya que engloba de forma jerarquizada las interacciones entre todos los sectores implicados, así como la repercusión de las medidas que se vayan adoptando.

Impactos identificados

En función de los estudios realizados, se han identificado una serie de impactos generales del cambio climático sobre ciertos sectores, que se comentan a continuación:

- *Ecosistemas forestales*: Grandes extensiones forestales sufrirán cambios en su composición de especies, que serán máximos en latitudes altas y mínimos en las zonas tropicales. Algunos tipos de formaciones boscosas corren el riesgo de desaparecer completamente, y probablemente otras especies mejor adaptadas ocuparán su lugar.
- *Ecosistemas montañosos*: Los tipos altitudinales de vegetación sufrirán un desplazamiento hacia las zonas altas,

de forma que las especies que se encuentran adaptadas a un piso bioclimático determinado pueden extinguirse, al desaparecer las condiciones adecuadas para su desarrollo.

- *Regiones áridas*: Las condiciones climáticas de las regiones desérticas y semidesérticas serán más extremas que en la actualidad, al volverse más calientes, pero no más húmedas. Al sobrepasarse sus límites de tolerancia térmica, las especies que habitan estos ecosistemas pueden desaparecer.
- *Ecosistemas acuáticos*: La productividad de los ecosistemas acuáticos de latitudes altas puede aumentar, pero muchos otros pueden verse en peligro por la elevación del nivel del mar.

Algunos de los efectos del calentamiento se pueden percibir ya con toda claridad, como ocurre ahora con el progresivo emblanquecimiento de los corales. Cuando la temperatura superficial del agua aumenta por encima de 29 °C, el agua cargada de nutrientes que asciende desde las profundidades no se estabiliza en el nivel en el que se encuentran los pólipos del coral. Ante esa falta de nutrientes, los pólipos expulsan sus algas, se vuelven blancos y mueren.

- *Recursos hídricos*: El aumento de la temperatura lleva asociada una aceleración del ciclo del agua que supondrá una redistribución espacial y temporal de las precipitaciones. La frecuencia e intensidad de las sequías y de las inundaciones se verán modificadas, al igual que la escorrentía superficial y

la capacidad de retención de agua de las cuencas.

- *Humedad del suelo*: Las predicciones de la evolución de la humedad edáfica son bastante poco fiables, aunque parece existir una tendencia en el Hemisferio Norte a aumentar en latitudes altas durante el invierno y a disminuir durante el verano, especialmente en el norte de Europa y de América.
- *Sistemas agrícolas*: La productividad de los cultivos agrícolas sufrirá profundas modificaciones en función de las variaciones de la temperatura y de la humedad que se produzcan en cada región. En algunas regiones del planeta, las pérdidas pueden ser enormes por falta de agua, mientras que en otras puede aumentar la productividad de determinados cultivos, como el arroz, el trigo y la soja, debido al incremento de la fotosíntesis y a la optimización en el uso del agua por la planta en presencia de una mayor concentración de CO₂. En el caso de los cultivos de secano, su extensión puede aumentar hacia latitudes más altas como consecuencia del alargamiento del período de crecimiento.
- *Elevación del nivel del mar*: El efecto de dilatación térmica de los océanos unido a la fusión de los glaciares de montaña y de los casquetes polares, puede suponer una elevación del nivel del mar entre 15 y 95 cm, aunque el valor más probable es de 50 cm para el año 2100. Si no se toman medidas de precaución, esta elevación de 50 cm puede afectar a más de 92 millones de personas, sin tener en cuenta el

crecimiento demográfico. Con las actuales medidas de protección, la retirada de las tierras emergidas puede ser del 0,05% en Uruguay, del 1% en Egipto, del 6% en los Países Bajos y del 17% en Bangladesh.

- *Salud humana*: Entre los efectos directos del cambio climático en la salud humana, destaca el aumento de problemas de tipo cardiorrespiratorio debido a un aumento de la duración y de la intensidad de las olas de calor. En las regiones frías el calentamiento del clima puede provocar una disminución de las muertes debidas al frío. Entre los efectos indirectos se incluyen una mayor dispersión geográfica y temporal de las enfermedades infecciosas, y la expansión de las enfermedades parasitarias como consecuencia del aumento de la temperatura.

Los efectos del cambio climático en las sociedades humanas dependerán directamente de la velocidad con que se produzca dicho cambio. Si es lo suficientemente lento como para permitir la adaptación social y económica a las nuevas condiciones, las consecuencias pueden no ser tan negativas. A este respecto existen todo tipo de predicciones, desde las más pesimistas, que afirman que el cambio climático amenaza la habitabilidad del planeta, hasta las más optimistas, que mantienen la opinión de que no existe el suficiente fundamento científico. Los países en vías de desarrollo serán con toda seguridad los que sufran las peores consecuencias, ante su falta de recursos para hacer frente a estos cambios. Sin embargo, los efectos de la modificación del clima preocupan a todos los países, que no pueden conocer con exactitud los cambios que van a afectar a sus territorios y el efecto que éstos puedan tener sobre su economía.

CAPÍTULO 43

POLÍTICAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

43.1. POLÍTICA INTERNACIONAL ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

A pesar de la incertidumbre que aún existe sobre el grado de influencia del hombre sobre el clima, y ante la falta de conocimientos acerca de la evolución y magnitud del cambio climático, la preocupación de los científicos que dieron la alarma se ha ido contagiando a la sociedad y a los gobiernos de todos los países. Los modelos y los estudios climáticos predicen una serie de graves consecuencias del cambio climático, como el aumento del nivel del mar, tormentas más frecuentes e intensas, riadas y avenidas de agua, períodos de sequía, cambios de productividad agrícola y la proliferación de enfermedades. Ante el peligro potencial que suponen estos fenómenos, y poniendo en práctica el principio de cautela que debe tenerse presente ante cualquier problema medioambiental, la comunidad internacional coincide en la necesidad de tomar

medidas destinadas a evitar el cambio artificial del clima, o al menos retrasarlo hasta que se pueda hacer frente a todos estos cambios.

Se debe tener en cuenta, además, que parte de estos cambios están en relación muy directa con la contaminación atmosférica en muchas zonas del planeta.

El IPCC y la Primera Conferencia Mundial sobre el Clima

En el año 1988 se crea el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) con el objetivo de evaluar científicamente ese fenómeno, para conocer sus consecuencias ecológicas y socioeconómicas, y para identificar las medidas que se deben llevar cabo para evitar el impacto de las actividades humanas sobre el clima. En ese mismo año se celebra la Primera Conferencia Mundial sobre el Clima en Toronto, en la que se fija el objetivo de conseguir en 2005 una reducción del 20% de las emisiones

de gases invernadero respecto al año 1988. Este objetivo, conocido como el Mandato de Toronto, no llega nunca a ser vinculante.

La Segunda Conferencia Mundial sobre el Clima

En la Segunda Conferencia Mundial sobre el Clima del año 1990, la asamblea de las Naciones Unidas aprueba la resolución sobre la Protección del Clima Global para las Generaciones Presentes y Futuras. En esta resolución se incluye la creación de un Comité de Negociación Intergubernamental con el objetivo de preparar un convenio marco que pueda ser ratificado en la siguiente Conferencia Mundial.

La Cumbre de la Tierra

En el año 1992, durante la Conferencia Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo de Río de Janeiro, conocida como la Cumbre de la Tierra, 150 países firman el Convenio Marco sobre Cambio Climático. En el convenio, que entra en vigor el 21 de marzo de 1994, se establece la necesidad de estabilizar las emisiones de gases invernadero en unos niveles que no supongan una interferencia artificial sobre el clima. Aunque no se fijan plazos concretos, este objetivo debería alcanzarse en un espacio de tiempo suficiente como para permitir la adaptación de los ecosistemas naturales, para asegurar la producción de alimentos y para permitir el desarrollo sostenible.

La Cumbre de Kioto

En la III Conferencia de las Partes de 1997, conocida como la Cumbre de Kioto, se adopta por fin un protocolo de reducción de las emisiones de dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorcarbonos, perfluorcarbonos y hexafluoruro de azufre. En el Protocolo de Kioto los países firmantes se comprometen a reducir en un 5,2% las emisiones del conjunto de los 6 gases anteriores en equivalentes de CO₂ respecto a las emisiones de 1990. El horizonte que se marca para alcanzar esta reducción son los años 2008 al 2012.

Se trata de un acuerdo histórico, ya que por primera se cuantifica el compromiso de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y se pone una fecha máxima para alcanzar dicho objetivo. Sin embargo, recibe numerosas críticas por dejar pasar la oportunidad de adquirir un compromiso mayor, y porque los compromisos no son de obligado cumplimiento. Japón, como país anfitrión, se compromete a una reducción del 6%, los Estados Unidos al 7%, y los países de la Unión Europea al 8%. El acuerdo permite que dentro de la UE los países que menos gases emiten a la atmósfera, como España, Irlanda, Grecia o Portugal, continúen aumentando sus emisiones.

Al margen de las reducciones, los países firmantes también aceptan los siguientes compromisos:

- Elaboración de inventarios de gases de efecto invernadero emitidos por cada país, y de la absorción

llevada a cabo por los diferentes sumideros.

- Creación de programas nacionales dirigidos a la mitigación del cambio climático y a la adaptación socioeconómica de los países a las nuevas condiciones ambientales.
- Intercambio de información sobre nuevas tecnologías destinadas a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los países desarrollados se comprometen por su parte a cumplir los siguientes puntos:

- Adoptar políticas que impulsen la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y que potencien la actividad de los sumideros de estos gases.
- Informar de forma periódica sobre las políticas y medidas puestas en práctica y sobre la proyección de emisiones y la absorción de los sumideros.
- Destinar los fondos necesarios para cubrir las inversiones que realicen los países en vías de desarrollo para alcanzar los objetivos acordados. La administración de estos recursos económicos queda a cargo del Fondo para el Medio Ambiente Mundial.

En el Convenio se recomienda una serie de medidas dirigidas a la disminución del impacto de las actividades humanas en el clima, entre las que destacan las siguientes:

- Aumentar la eficiencia energética.
- Proteger aquellos depósitos y sumideros de gases de efecto invernadero que no están incluidos en el Protocolo de Montreal.
- Promover la investigación y el desarrollo de sistemas agrícola sostenibles.
- Promover la investigación, el desarrollo y el uso de energías renovables.
- Reducir de forma progresiva los incentivos de actividades que vayan en contra de los objetivos del Convenio Marco.
- Fomentar la reforma de los sectores oportunos para permitir la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero no controladas por el Protocolo de Montreal.
- Reducir las emisiones de metano en ganadería, vertederos, extracción de gas natural y transporte.
- Reducir la producción de estiércol y el consumo de fertilizantes minerales a través de la reforma de la Política Agraria Comunitaria (PAC), con el objetivo de reducir las emisiones de metano en este sector.

La entrada en vigor del Protocolo de Kioto exige la ratificación de al menos 55 países, cuyas emisiones de CO₂ sumen como mínimo el 50% del total para el año 1990. La ratificación de los Estados Unidos y de la Federación Rusa, responsables del 36,1% y del 17,4% de las

emisiones totales respectivamente, es esencial para la puesta en marcha del Protocolo, que se ha visto frenado por la actual posición negativa de países como Estados Unidos, Australia y otros.

Conferencia de las Partes, de Buenos Aires

En la IV Conferencia de las Partes de 1998 en Buenos Aires no se consiguen superar las diferencias que separan a los diferentes grupos de países. Se establece un Plan de Acción, en el que se indica la necesidad de iniciar las discusiones acerca de la creación de un Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) para los países en vías de desarrollo, llamando la atención sobre la cooperación en información y tecnología que se les debe prestar. También se hace referencia a la necesidad de debatir sobre la limitación del mercado de las cuotas de emisión.

Conferencia de las Partes, de Bonn

En la V Conferencia de las Partes de 1999, en Bonn, continúan las discrepancias, aunque todos los países coinciden en la necesidad de ratificar cuanto antes el Protocolo de Kioto para su puesta en práctica.

Conferencia de las Partes, de La Haya

En el año 2000 se celebra la VI Conferencia de las Partes en La Haya, que

reúne a 150 países con el importante objetivo de establecer las normas de aplicación del Protocolo. Uno de los principales objetivos de la Conferencia era la negociación de la regulación de los mecanismos de flexibilidad contemplados en el Protocolo de Kioto. Estos mecanismos son ideados con el fin de poder reducir el coste económico que supone para los países desarrollados, responsables del 50% de las emisiones, la aplicación de medidas encaminadas a cumplir los compromisos acordados. Para ello se articulan tres mecanismos de flexibilidad que permitan la cooperación con otros países, en los que resulta más fácil reducir las emisiones, teniendo en cuenta que el cambio climático es un problema transfronterizo. Los mecanismos contemplados son los siguientes:

- *Mecanismos para un desarrollo limpio*: Consisten en favorecer el desarrollo sostenible en los países en vías de desarrollo mediante la financiación, por parte de gobiernos y empresas privadas, de los proyectos que se lleven a cabo encaminados a reducir las emisiones. A cambio de este apoyo, los países desarrollados pueden recibir bonificaciones que ayuden a cumplir sus objetivos. Este mecanismo tiene la particularidad de que las ayudas deben estar destinadas a países que no están sometidos a los acuerdos de Kioto, y que normalmente no disponen de un registro riguroso de sus emisiones. Por lo tanto, se debe poner especial atención para que las medi-

das que se lleven a cabo estén convenientemente justificadas desde el punto de vista medioambiental.

- *Aplicación conjunta:* Consiste en la concesión de créditos destinados a la aplicación de proyectos encaminados a reducir las emisiones en países que ya hayan especificado sus objetivos nacionales.
- *Comercio de emisiones:* Se trata de un mecanismo que permita a los países desarrollados que reduzcan las emisiones por encima de sus compromisos, a vender cuotas de emisión a otros países desarrollados, en los que las reducciones les supongan un mayor problema. Este comercio supone el peligro de que ciertos países, como la Federación Rusa o Ucrania, alcancen sus objetivos sin realizar grandes esfuerzos, y que se reduzcan los incentivos de los países que más contribuyen al cambio climático a la adopción de medidas internas encaminadas a reducir sus emisiones.

Conferencias de Bonn y de Marruecos

Ante las posturas irreconciliables de la UE y los EEUU, la Conferencia de la Haya se suspendió antes de tiempo, quedando aplazadas las negociaciones hasta la reunión de Bonn en mayo de 2001, y hasta la VII Conferencia de las Partes, que se celebrará en Marruecos. La UE

propone que al menos el 50% de la reducción se deba a medidas internas nacionales, con la intención de evitar que los países que más contaminan cumplan los compromisos del Protocolo de Kioto a base de comprar las cuotas de emisión de otros países, sin tomar medidas para disminuir sus propias emisiones. Los Estados Unidos, por el contrario, quieren disponer de la libertad de poder hacer uso de todos los mecanismos de flexibilidad sin ningún tipo de restricción. La UE también se niega a aceptar la pretensión de los EE UU de incluir, dentro del balance de reducción de emisiones, el CO₂ absorbido por bosques y cultivos. Tampoco se pudo alcanzar un acuerdo sobre la posibilidad de imponer sanciones a los países que incumplan los compromisos adoptados en Kioto, ante la negativa de los EEUU.

Situación actual

A finales de marzo de 2001 las negociaciones sufren otro duro golpe ante el anuncio de los EE UU de su intención de no cumplir el Protocolo de Kioto, alegando que puede ser una amenaza para el desarrollo de su economía.

Al término de la preparación de este libro, el proceso se encuentra en uno de sus peores momentos, pues hasta ahora el Protocolo de Kioto ha sido firmado por 84 países, pero tan sólo ha sido ratificado por 33, entre los que no se encuentra ninguno desarrollado, y muchos de estos ya se niegan en rotundo a su cumplimiento.

43.2. ACTUACIONES DE LA UNIÓN EUROPEA Y DE ESPAÑA CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO

Acciones de la Unión Europea

Según las conclusiones del Informe ACACIA presentadas en el año 2000 sobre el impacto del cambio climático, en Europa se viene produciendo un aumento de la temperatura de 0,1 a 0,4° C en cada década. El proceso de calentamiento, que es en el sur dos veces mayor que en el norte, podría tener graves consecuencias, como la llegada de olas de calor más frecuentes e intensas, sequías, inundaciones, etc.

La preocupación de la Unión Europea por la necesidad de tomar medidas en contra del cambio climático originado por las actividades humanas queda patente en el V Programa de Acción y Actuación Comunitaria en Materia de Medio Ambiente: Hacia un Desarrollo Sostenible. En él se plantea como objetivo fundamental no superar la capacidad natural de absorción de los gases invernadero, y dejar de emitir gases que destruyan la capa de ozono, fijándose las siguientes metas:

- Estabilizar en el año 2000 las emisiones de CO₂ respecto a las de 1990, si bien no se llega a hacer un reparto de las cuotas de emisión para cada uno de los países, y se deja libertad a cada uno de crear sus propios programas de actuación.
- Tomar medidas en contra de las emisiones de CH₄ y N₂O.

- Eliminar la producción de CFCs antes del año 1996, limitando su uso para funciones fundamentales.
- Limitar el uso de HCFCs a un 5% de los niveles de CFC de 1990.

Según el balance realizado para el período de 1992 a 1995, tan sólo en el caso de los CFCs se había realizado un avance significativo, ya que el resto de las emisiones seguían aumentando. Se hace evidente así la necesidad de intensificar los esfuerzos y de adoptar una estrategia común de cara a las negociaciones internacionales del protocolo mundial, indicado por el Mandato de Berlín. Con este objetivo, el Grupo Ad Hoc para el Clima de la UE se dedicó a recopilar información de ámbito nacional sobre las medidas previstas o puestas en marcha por cada uno de los países. Esta información aparece reunida en un documento en el que se incluye el registro histórico de emisiones de cada estado miembro desde los años 60, y su proyección para el futuro. En el Consejo de Ministros de Medio Ambiente celebrado en 1996 en Luxemburgo, se reconoce que es posible regresar en el año 2010 a los niveles de emisión de 1990 si se aplican políticas y medidas adecuadas en el ámbito nacional y comunitario.

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta la Unión Europea es el reparto entre los distintos países de los objetivos comunes planteados. Resulta realmente difícil dar con una fórmula justa en la que basarse para atribuir una serie de cuotas de emisión, por lo que se busca un sistema alternativo a la limitación nacional de la cuantía de las

emisiones. Para el reparto equitativo de las responsabilidades se opta por la aplicación de una serie de medidas comunes, o en el ámbito nacional con la coordinación entre distintos gobiernos, en cuya aplicación se tengan en cuenta las circunstancias socioeconómicas particulares de cada miembro de la Unión Europea y la situación de partida de cada uno. Con este fin se impulsan proyectos encaminados a identificar los sectores más implicados en el problema y las medidas más efectivas que se pueden aplicar en cada caso.

En 1997 se propone una línea política de actuación para conseguir los objetivos comunitarios, y con la intención de reducir las emisiones de CO₂, se proponen las siguientes medidas:

- Plantear una política común en el sector energético, adoptar medidas coordinadas dirigidas a aumentar la eficiencia en el consumo de energía, y conseguir un cambio en los hábitos de consumo mediante el desarrollo de las energías renovables y con la reducción del consumo de combustibles fósiles.
- Realizar estudios técnicos encaminados a la planificación del consumo y de la demanda real de energía.
- Establecer una estrategia de actuación en el sector del transporte, cuyas emisiones se prevé que sean comparables en los próximos años a las del sector energético. Para ello se recomienda un aumento del rendimiento en el consumo de combustible en los vehículos de

nueva fabricación de al menos el 30%, la eliminación de barreras en el transporte intermodal, y la revitalización del uso de los ferrocarriles.

En el caso del metano se plantean medidas dirigidas a los principales sectores implicados, como son la agricultura, los residuos y la energía, destacando entre esas medidas las siguientes:

- Fomentar la digestión anaerobia o las fosas cubiertas en el tratamiento de los residuos.
- Implantar la recogida selectiva de los residuos orgánicos para evitar que sean almacenados al aire libre en vertederos.
- Reducir las emisiones en las explotaciones mineras e implantar normas de fugas mínimas de gas natural.

La Unión Europea se compromete en el Protocolo de Kioto a reducir un 8% las emisiones de seis gases de efecto invernadero en equivalentes de CO₂ para los años 2008-2012. Se toman como referencia las emisiones del año 1990 en los casos del dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, y la opción de elegir entre el año 1990 y el 1995 para los hidrofluorcarbonos, los perfluorcarbonos y el hexafluoruro de azufre. Las emisiones de estos tres últimos crecerán a la fuerza al no existir ningún compuesto químico alternativo, lo que obliga a alcanzar una reducción del 12-13% de los demás para cumplir los compromisos de Kioto.

En el Consejo de Ministros de Medio Ambiente de 1998 en Luxemburgo se consigue llegar a un acuerdo sobre el reparto de los esfuerzos entre los países miembros. Los 8 países más contaminantes, como son Austria, Bélgica, Dinamarca, Alemania, Italia, Luxemburgo, Países Bajos y Reino Unido, tienen la obligación de reducir sus emisiones. Los 4 países de la UE que están por debajo de la media, entre los que está España, deben colaborar también, realizando un esfuerzo para que el incremento de sus emisiones sea menor del previsto.

El continuo aumento de las emisiones que se viene observando en la UE pone de manifiesto la necesidad de endurecer las medidas políticas para conseguir el cumplir los compromisos adoptados en Kioto. Con esta intención se anuncia en octubre de 1999 ante el Parlamento Europeo la creación del Programa Europeo del Cambio climático (PECC). En este plan se incluye la creación de grupos de investigación en las áreas de la energía, los transportes y la industria, con el objetivo de realizar propuestas que sean llevadas ante la Comisión y ante el Consejo de Ministros para su aprobación. Entre otras medidas, se plantea la creación de un mercado interno de los derechos de emisión en el ámbito de la propia UE.

Uno de los principales sectores en los que se deben realizar mayores esfuerzos es el energético, ya que es el que más impacto tiene sobre el cambio climático. En este sentido, se elabora en 1998 el Libro Blanco sobre las energías renovables, en el que se especifica la necesidad

de que al menos un 12% de la energía de la UE proceda en el año 2010 de este tipo de energías. Igualmente es de gran importancia el Programa ALTANER de fomento de las energías renovables para el período 1998-2002, aprobado por el Parlamento y por el Consejo Europeo en febrero de 2000.

Otra importante línea de actuación es la mejora de la eficiencia energética, ya que en la Unión Europea se podría conseguir una mejora superior al 18%. La energía que se podría ahorrar sería comparable a la demanda conjunta de Austria, Bélgica, Finlandia, Dinamarca, Grecia y Países Bajos. También se están realizando grandes esfuerzos en el sector del transporte para disminuir las emisiones de CO₂ y fomentar el ahorro de combustible para conseguir rebajar la media de emisiones a 120 gramos de CO₂ por km entre los años 2005 y 2010.

Actuaciones de España

España forma parte del grupo de países que en 1992, durante la Cumbre de Río, firmaron la Convención Marco sobre Cambio Climático de Naciones Unidas, y participa activamente en los informes del IPCC.

Dentro del Plan de Ahorro y Eficiencia Energética (PAEE) del MINER para el período 1991-2000 se planteó la necesidad de minimizar el impacto del sector energético en el medio ambiente. En este plan se describían los siguientes objetivos para los cuatro principales gases de efecto invernadero:

- Limitar el crecimiento de las emisiones de CO₂ en el sector energético entre un 16 y un 20% en el año 2000 respecto a 1990.
- Limitar el crecimiento de las emisiones totales de CH₄ entre el 13 y el 15% en el año 2000 respecto a las emisiones de 1990.
- Reducir las emisiones de SO₂ en el sector energético entre un 33% y un 37% en el año 2000 respecto a 1990.
- Reducir las emisiones de NO_x en el sector energético entre un 27 y un 29% en el año 2000 respecto a 1990.

Para conseguir estos objetivos se plantearon 4 programas de actuación, a saber:

- Programa de ahorro energético para la reducción del consumo final de energía, sin que suponga un lastre para el desarrollo económico.
- Programa de sustitución de energía, para fomentar el uso del gas natural como fuente alternativa de energía.
- Programa de cogeneración de producción combinada de energía y calor.
- Programa de desarrollo de energías renovables.

En 1995 el grado de aplicación era alto para los programas de energías renovables y de cogeneración, pero bastante bajo en los de ahorro y sustitución.

En mayo de 1998 España firma el Protocolo de Kioto. En un principio el compromiso adoptado por la Unión Europea,

de reducir en un 8% sus emisiones, permitía a España continuar aumentando sus emisiones en un 17% para el año 2000. En junio de ese mismo año, en el Consejo de Luxemburgo se realiza el reparto de responsabilidades entre los países miembros, y, según lo acordado, España tendrá que limitar el incremento de sus emisiones a un 14%. En 1998 se crea también el Consejo Nacional del Clima, formado por 9 Ministerios, con la presidencia de la ministra de Medio Ambiente, y queda encargado de elaborar una Estrategia Nacional frente al Cambio Climático. El objetivo fundamental de esta Estrategia es la aplicación de medidas destinadas a frenar el incremento de las emisiones en España, consiguiendo la implicación de todas las Administraciones y del sector privado. En noviembre de 1998 el Consejo presenta un conjunto de medidas aplicables en cada uno de los sectores implicados, reunidas en el documento marco de *Políticas y medidas de lucha frente al cambio climático*.

Recogiendo los objetivos planteados en el antiguo Plan de Ahorro y Eficiencia Energética, en diciembre de 1999 se aprueba el Plan de Fomento de las Energías Renovables para el período 2000-2001, mediante el cual se pretende que en 2010 el 12% del consumo de energía proceda de fuentes renovables (biomasa, eólica, hidráulica, solar y valorización energética de los residuos urbanos).

El Centro de Investigación de Energías Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) se encarga de realizar la investigación de tecnologías relacionadas con estas energías, al margen de lo que hacen las Universidades y el sector privado.

CAPÍTULO 44

SISTEMAS DE INDICADORES PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO

44.1. NECESIDADES

Al igual que en cualquier otro tipo de problema medioambiental, el correcto análisis del cambio climático requiere una serie de indicadores que proporcionen información precisa y de calidad sobre los distintos procesos o elementos implicados. Disponer de esta información es esencial, tanto para tomar decisiones sobre las medidas adecuadas que se deben poner en práctica, como para evaluar la eficacia de las mismas a través de la observación de los efectos que van teniendo en el sistema climático.

Los sistemas de indicadores permiten reunir en un número reducido de parámetros gran cantidad de información, facilitando su análisis científico y su entendimiento en todos los ámbitos sociales.

Estos sistemas surgen ante una triple necesidad:

– Disponer de información adecuada para la toma de decisiones políticas

adecuadas ante los problemas ambientales.

- Realizar un seguimiento de las actuaciones que se realizan.
- Satisfacer la demanda de información de la sociedad.

Los sistemas de indicadores deben ser capaces de informar sobre la integridad de los ecosistemas, la salud y el bienestar humano y el uso sostenible de los recursos. El sistema propuesto por la OCDE, y que siguen tanto la Agencia Europea para el Medio Ambiente como el Sistema Español de Indicadores, utiliza el esquema de causalidad conocido como *sistema de presión-estado-respuesta*.

Las actividades humanas ejercen una presión sobre los ecosistemas y sobre los recursos naturales, alterando su cantidad y su calidad. Ante estas alteraciones, se adoptan medidas ambientales y socioeconómicas cuyo grado de efectividad se pretende evaluar, con la intención de restaurar el estado original de los recursos.

Los *indicadores de estado* nos informan sobre la situación en que se encuentra el recurso considerado, los *indicadores de presión* agrupan una información muy heterogénea, cuyo análisis requiere el desarrollo de nuevos indicadores en el futuro, y los *indicadores de respuesta* relacionan las medidas puestas en práctica con el estado del recurso.

En el análisis de los distintos indicadores se presta especial atención a los de estado, al ser los que muestran la situación real de los sistemas en cada instante y que permiten evaluar la efectividad de las políticas y de las actuaciones. Por otra parte, los indicadores de presión y de respuesta sirven para poder establecer las relaciones causa-efecto entre las actuaciones humanas y el estado de los diferentes parámetros medioambientales.

44.2. INDICADORES AMBIENTALES DE EUROSTAT PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO

En Diciembre de 1997 el Consejo Europeo de Ministros de Medio Ambiente recoge la iniciativa propuesta por la Comisión Europea, apoyada por el Parlamento Europeo en el año 1995, de crear un sistema de información ambiental y económica que marque la línea a seguir por la política ambiental comunitaria, y que sirva para evaluar las medidas que se van poniendo en práctica. Dentro de este sistema integrado de información, la oficina de estadística de la Comisión Europea (EUROSTAT) dirige, en colaboración con la AEMA, la crea-

ción de un Sistema de Indicadores de Presión, a causa de la gran cantidad de información de que dispone sobre producción de residuos, contaminación atmosférica y cambio climático. Esta información, que ya aparece reunida y organizada en la 3ª edición de estadísticas ambientales de la Unión Europea de 1997, constituye una herramienta fundamental en la identificación de indicadores ambientales en los que poder basar la elaboración de una política comunitaria adecuada a las necesidades reales del medio ambiente. En el informe se recoge información periódica de gran calidad sobre parámetros relacionados directamente con el cambio climático, como son las emisiones totales y por sectores de CO₂, la producción, comercio y consumo de CFCs y las emisiones, totales y por sector, del metano.

El objetivo del sistema del EUROS-TAT es la identificación de las actividades humanas que más impacto tienen sobre el medio ambiente en general, y sobre el cambio climático en particular. A partir de la colaboración de más de 2.000 investigadores pertenecientes a todos los países miembros de la Unión Europea, se identificaron una serie de indicadores de presión, sin tener en cuenta la existencia de información disponible sobre los mismos, cuyos datos se reúnen en un grupo de 10 índices para su mejor comprensión. Un buen número de estos indicadores hace referencia a emisiones de gases a la atmósfera, y son de gran utilidad para conocer los sectores industriales que más influencia tienen en los cambios del clima. Estos indicadores son los siguientes:

- Emisiones totales de CO₂ por sector.
- Emisiones totales de CH₄ por sector.
- Emisiones antropogénicas de N₂O por sector.
- Emisiones de CFCs, expresadas en Potenciales de Calentamiento Global.
- Emisiones de NO_x por sector.
- Emisiones de SO_x.
- Emisiones totales de aerosoles (primarios y secundarios).
- Eliminación de CO₂ por depósitos antropogénicos (reforestación).
- Emisiones de compuestos orgánicos volátiles por sector.
- Emisiones de clorofluorocarbonos (PFCs, HFCs)

44.3. INDICADORES AMBIENTALES DE LA AEMA PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO

Una de las funciones esenciales de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) es la de ofrecer información ambiental fiable y de calidad para poder evaluar correctamente el efecto de las acciones propuestas para hacer frente a los distintos problemas ambientales, entre los que preocupa especialmente el cambio climático. Para cumplir con este objetivo, la AEMA publica en 1995 el: *Europe's Environment: The Dobris Assessment*, primer informe sobre el estado del medio ambiente en Europa.

En el segundo informe, el *Europe's Environment: The Second Assessment*, que sirve de base para la conferencia ministerial del *Medio Ambiente en Europa* de 1998, se organiza la información según la clasificación del sistema nacional de indicadores realizada por el Ministerio de Medio Ambiente de España (MI-MAM) en 1996, con el objetivo de ofrecer la información demandada por la sociedad y por los responsables políticos de forma clara y sencilla.

El análisis de la información utilizado es una variante del sistema empleado por la OCDE, basado en el modelo de presión-estado-respuesta. Este modelo trata de mostrar a la sociedad y a los responsables políticos, de forma clara y fiable, las complejas relaciones existentes entre los sistemas ecológicos y las actividades humanas, así como los efectos de las medidas económicas y políticas. Por otra parte, el sistema de indicadores de la AEMA trata de avanzar en la calidad y comparabilidad de la información, requisito indispensable para que sea útil en la toma de decisiones políticas o económicas. Uno de los problemas más importantes en el ámbito europeo es precisamente la limitación de la utilidad de alguno de los indicadores, por la falta de información.

En la guía para la recogida de información nacional de la AEMA se incluyen los siguientes indicadores de cambio climático:

- Temperatura media global del aire.
- Precipitación media anual en relación con dos años de referencia.

- Superficie máxima anual cubierta por hielo.
- Concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero (CO_2 , N_2O , CH_4 y CFC_{11}).
- Emisiones de CO_2 totales y por sector.
- Emisiones de CH_4 totales y por sector.
- Emisiones de N_2O totales y por sector.
- Emisiones de gases de efecto invernadero de acuerdo con los potenciales de calentamiento global (GWPs).
- Consumo de energía total y por sector.
- Suministro de energía primaria (Producción interna + importada – exportada – depósitos marinos internacionales \pm cambios en los stocks)
- Estructura del suministro de energía (combustibles sólidos, petróleo, gas, energía nuclear, energía hidráulica, geotérmica y solar).
- Precio de la energía.
- Intensidad energética (consumo interior bruto per capita).
- Eficiencia energética (consumo de energía por unidad de producción).

44.4. SISTEMA ESPAÑOL DE INDICADORES AMBIENTALES PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO

Con la publicación del libro *Indicadores Ambientales. Una propuesta para España*, en 1996, se sientan las primeras

bases para la creación de un sistema español de información ambiental. El sistema se subdivide en distintas áreas específicas, como son atmósfera, residuos, suelo, agua, biodiversidad, bosques, costas, medio marino y medio ambiente urbano. Dentro de la sección de atmósfera se incluyen indicadores útiles para el estudio del cambio climático.

El Sistema Español de trata de cubrir las distintas preocupaciones ambientales utilizando un pequeño número de indicadores. La razón es que no todos los indicadores cumplen los requerimientos necesarios, como son una definición clara de los parámetros o la calidad de las estadísticas, y además es importante que no presenten excesivas dificultades técnicas o metodológicas. Por otra parte, se cumplen así las recomendaciones internacionales de que los sistemas cuenten con un número reducido de parámetros, con el objetivo de que se ofrezca una información de calidad y de fácil comprensión. Los indicadores son tanto de estado, para conocer la situación del aspecto ambiental considerado, como de presión y respuesta, para conocer cual es el impacto real de cada sector y la aplicación de medidas dirigidas a solucionar cada uno de los problemas ambientales. El sistema nacional cumple así el doble objetivo de ser un instrumento útil en la gestión del medio ambiente y de divulgar una información de forma clara y comprensible. Los datos de los indicadores deben ser revisados continuamente y deben llevar asociada una discusión sobre su interpretación, para evitar que las cuestiones ambientales queden demasiado simplificadas o que lleven a conclusiones erróneas.

En el área de la atmósfera, el Sistema Español comprende 19 indicadores, de los cuales 7 se refieren al calentamiento global. Estos indicadores, y sus códigos correspondientes, son los que aparecen a continuación:

– *Indicadores de estado*

- At1. Concentración global de CO₂.
- At2. Variación de la temperatura hemisférica.

– *Indicadores de presión*

- At3. Emisiones anuales de CO₂ por sector.
- At4. Emisiones totales de CH₄ por sector.
- At5. Emisiones de N₂O por sector.

– *Indicadores de respuesta*

- At6. Intensidad energética.
- At7. Participación de las energías renovables y de la cogeneración.

Los indicadores At1 y At2 informan sobre el estado del calentamiento global, que es un fenómeno de ámbito planetario, y la minimización del mismo supone la reducción de las emisiones de CO₂, de CH₄ y de N₂O, sobre las que nos informan los indicadores de presión At3, At4 y At5. Esta reducción requiere la aplicación de una serie de medidas en el sector energético, como son el ahorro, la eficacia en el uso de la energía y el impulso de las energías renovables, que debe refle-

jarse en los indicadores de respuesta At6 y At7.

En el caso de la reducción de la capa de ozono, el sistema español proporciona información, tanto sobre el estado global de la cuestión como sobre la repercusión específica del problema en el país, con los indicadores At8 y At9.

En la interpretación de la información aportada, tanto para el cambio climático como para las variaciones de la capa de ozono, se debe tener en cuenta que se trata de fenómenos globales que implican al conjunto de los países del planeta, y que los valores de los indicadores de presión responderán a las soluciones que se tomen en el ámbito internacional. Hay que tener también en cuenta que las respuestas del clima a las actuaciones humanas no se producen de forma inmediata, y por lo tanto existe un desfase temporal entre la puesta en práctica de soluciones y la obtención de una respuesta positiva en los indicadores de estado.

Según los datos publicados por el Ministerio de Medio Ambiente en el año 1999, a partir de los valores de los indicadores se deduce la continuidad del fenómeno del calentamiento global. Los datos de emisión de CO₂ tomados de las mediciones de la estación meteorológica del Mauna Loa en Hawaii muestran el incremento de las emisiones de CO₂, especialmente en el sector energético, y concretamente en la producción de energía destinada al transporte. Las emisiones de CH₄ siguen aumentando también, debido principalmente a las actividades rela-

cionadas con el tratamiento de los residuos en el sector agrícola. En el caso del N_2O existe una reducción de las emisiones en los sectores agrícola e industrial, pero un aumento en el de los transportes. Los indicadores de res-

puesta muestran una tendencia favorable al aumentar la producción de energías renovables y la cogeneración, aunque el consumo energético continúa aumentando debido principalmente al sector residencial y al de transportes.

CAPÍTULO 45

EL OZONO EN LA NATURALEZA. LA CAPA DE OZONO

45.1. EL OZONO EN LA NATURALEZA

45.1.1. Variaciones del ozono en el tiempo y en el espacio

El ozono, O_3 , es un gas incoloro. Es un estado alotrópico del oxígeno, en el que su molécula está formada por tres átomos de oxígeno. Su contenido en la atmósfera es muy bajo, del orden del $6 \times 10^{-5} \%$ en volumen. El O_3 no se encuentra distribuido uniformemente, sino que se encuentra en su mayor parte en la estratosfera, capa atmosférica que presenta un aumento de la temperatura respecto de las inferiores inmediatas debido a que el O_3 absorbe las radiaciones ultravioletas solares. La radiación ultravioleta rompe con gran facilidad la molécula de oxígeno, dejando los átomos libres, que al no poder permanecer en solitario tienden a combinarse inmediatamente con otras moléculas de oxígeno, dando lugar al ozono.

El ozono se encuentra en la atmósfera básicamente en dos formas:

- Como ozono estratosférico, en la capa de ozono. Esta capa se denomina *ozonósfera*, y nos protege de las radiaciones ultravioletas del Sol.
- Como ozono troposférico o superficial, en la troposfera. Este ozono procede de los NO_x y de los compuestos orgánicos biogénicos (COV), y por intrusiones del ozono estratosférico.

La descomposición química del ozono se realiza al entrar en acción varios factores, a saber:

- La superficie terrestre.
- Las nubes.
- Trazas de gases y partículas sólidas. A esta categoría pertenecen algunas de las reacciones asociadas con la niebla fotoquímica.

Además, existe un ozono de origen artificial que se produce en la troposfera

por las reacciones fotoquímicas de gases contaminantes. Por esta causa, en determinados lugares y a nivel local se pueden alcanzar valores hasta de 2 mg / kg.

En principio, el ozono sólo se puede encontrar en zonas con una luminosidad elevada, pero datos recientes indican que durante los meses de verano, en algunos distritos rurales de Gran Bretaña los índices de ozono pueden alcanzar valores de 0,1 mg/kg.

Se han realizado medidas de la concentración de ozono en zonas contaminadas, lo que junto con las zonas limpias observadas indica que los dos tipos de ozono cohabitan en la troposfera.

45.1.2. Localización

Como hemos indicado, el ozono se encuentra concentrado en capas superiores de la atmósfera, principalmente entre los 15 y los 35 km de altitud, con una densidad máxima en la zona de los 20-25 km.

El contenido de la atmósfera en ozono varía en función de la latitud, siendo en el ecuador muy bajo y más elevado en latitudes por encima de los 50 °. También presenta una variación estacional, con un máximo en primavera y un mínimo en otoño. En Europa, en el NW, se presentan valores elevados de ozono tras el paso de los frentes fríos, y cuando hay masas de aire polar. En cambio, las masas tropicales de aire asociadas a frentes tropicales contienen bajas concentraciones de ozono.

Los estudios realizados permiten indicar dos hechos:

- En el polo, la tropopausa está más baja, siendo más viable el descenso de O₃ estratosférico.
- La existencia de un transporte de ozono de las latitudes bajas a las altas durante los meses de invierno, apareciendo allí una capa rica en ozono en primavera.

El espectro de luz ultravioleta se divide en tres zonas:

- A. Longitudes de onda comprendidas entre 320 y 380 nm, que son las más cercanas al espectro visible.
- B. Longitudes de onda entre 280 y 320 nm.
- C. Longitudes de onda por debajo de los 280 nm.

El comportamiento de cada una de estas zonas ante la evolución de la capa de ozono es diferente. El ozono no absorbe casi nada de la radiación UV-A. Sin embargo, la radiación UV-B es muy sensible a los cambios en el contenido de ozono, y como consecuencia experimentará un incremento si se reduce la capa de ozono; así, una disminución del 1% de la capa de ozono implicaría un incremento del 2% en la radiación UV-B. Si aumenta la capa de ozono, el efecto será de una reducción en la radiación UV-B.

45.2. HISTORIA DE LA CAPA DE OZONO

- 1845: El químico *Schombein* descubre el ozono.

- 1921: *Farby y Buisson* afirman que el ozono se localiza en las capas altas de la atmósfera.
- 1922: *Kindenmann y Dobson* descubren la capa crada, zona originada por la transformación de la energía solar interceptada por el ozono estratosférico.
- 1923-1931: *Duckert, Gutemberg y Whipple* determinan la distribución de la temperatura con la altura en la estratosfera.
- 1974: *Rowland* publica el mecanismo de formación del ozono.
- 1985: Se descubre un adelgazamiento de la capa de ozono.
- 1991: *Rowland* afirma que la destrucción de la capa de ozono desde 1969 es de un 10%.

45.3. IMPORTANCIA DE LA CAPA DE OZONO

La importancia del ozono radica en su gran poder absorbente de las longitudes de onda corta de la radiación solar, de las que la mayoría son muy nocivas para los organismos vivos, y el O₃ absorbe toda longitud de onda inferior a 0,28 μm . Además, el ozono atenúa la intensidad de la radiación ultravioleta comprendida entre 0,28 y 0,39 μm .

La radiación UVA del Sol produce la rotura de las moléculas de O₂, y los átomos de oxígeno que quedan pueden combinarse con moléculas de oxígeno, dando lugar al ozono. Esta disociación

tiene lugar a unos 80 km de altura, pero a esta altitud resultan muy raros los choques necesarios entre los átomos para que se forme el ozono, debido a la baja densidad del aire. Mientras, por debajo de los 35 km, gran parte de la radiación ultravioleta ha sido absorbida por los niveles superiores de la atmósfera, y de ahí que la formación del ozono se verifique en niveles comprendidos entre los 30 y los 60 km.

En la capa del ozono existe un equilibrio que mantiene constante su concentración, debido a una serie de reacciones fotoquímicas.

Como se ha visto en otra parte de esta obra, a medio y a largo plazo el aumento de la radiación ultravioleta que penetra en el planeta puede afectar al sistema climático global. Las reacciones de descomposición química que se producen cuando el ozono intercepta los rayos ultravioletas, provocan el calentamiento de las zonas donde abunda el gas, y esto da lugar a corrientes de aire que alteran las pautas de circulación de los vientos, entre otras cosas.

Debemos indicar, además, que el nitrógeno y el oxígeno del aire en contacto con superficies muy calientes, como ocurre en el caso de los motores de los aviones, hace que se desprenda NO, que junto con el desprendido por la acción bacteriana en el proceso de la desnitrificación, reacciona en la estratosfera con el O₃ bajo la acción de radiaciones de longitud de onda inferiores a 0,31 μm , dando lugar a una reducción de la capa de ozono.

Por otra parte, los compuestos cloro-fluorcarbonados (CFCs) que se emplean en los sprays y en los fluidos refrigerantes como el freón, también reducen la capa de ozono por reacciones fotoquímicas en la estratosfera.

Se puede admitir que los causantes de la presencia del cloro libre en la atmósfera son los CFCs, con lo cual son responsables parciales de la destrucción de la capa de ozono y del consiguiente aumento de la radiación ultravioleta.

45.4. EL AGUJERO DE OZONO

El agujero de ozono se produce en el Polo Sur y no en el Polo Norte. Las causas de esta asimetría son fundamentalmente geográficas. La Antártida está formada por tierra firme rodeada de océanos, lo que favorece la estabilidad del torbellino polar. En cambio, el Ártico es un océano rodeado por tierras irregulares y asimétricas. Aquí el torbellino es poco estable, su temperatura es de unos 10° superior a la Antártida y se desplaza rápidamente por el océano, lo que favorece la mezcla de aire ártico pobre en ozono, con masas de aires tropicales. Más que un agujero en el Ártico, se producen miniagujeros, y las pérdidas registradas hasta ahora son del 1,5 al 2%.

En latitudes intermedias también disminuye el ozono, en una reducción que en los últimos 10 años se cifra en un 6%.

La formación y desaparición del agujero de ozono es cíclica, pero cada año su superficie es mayor. Aparece en agosto al finalizar el invierno antártico, y el

máximo deterioro se registra en el mes de noviembre. Al aumentar en verano las temperaturas, el torbellino se hace inestable y desaparece, el aire del polo se mezcla con el procedente de las regiones tropicales y el agujero se achica.

45.5. MEDICIONES REALIZADAS EN LA CAPA DE OZONO Y PREVISIONES

Debido a la preocupación por la destrucción de la capa de ozono, se han realizado congresos, programas, cumbres y diferentes eventos sobre este tema. Actualmente existe un Sistema Mundial de Observación del Ozono que está constituido por unos 60 países, los cuales aportan datos que permiten conocer el estado y la evolución de la capa de ozono.

Históricamente, desde principios de siglo los científicos se preocupan de la capa de ozono:

- 1924: Se estudiaban las variaciones diarias y estacionales de la capa de ozono estratosférico.
- Década de los años 50: Se empezaron a tomar medidas del ozono, sistemáticamente.
- 1966: Se empiezan a tomar datos de satélites para realizar predicciones del estado de la capa de ozono.
- Años 70: Se reconstruyó la historia de la capa de ozono ante el efecto que causaba el hombre.
- 1920-1979: Se han obtenido datos de períodos diarios, estacionales y ciclos

cuasibienales, observando una variación en la capa de ozono.

- 1980: Se observó que existía una pérdida de la capa de ozono en la zona Antártica durante los meses de agosto y septiembre.
- Hasta 1987 no se demostraron los efectos del cloro sobre el ozono, y se vio que la relación existente entre el cloro activo de la estratosfera antártica y la disminución de la concentración de ozono, iba en aumento.

Como resumen, se puede afirmar que a partir de los años 60, en latitudes medias y polares los niveles globales del ozono habían descendido de forma alarmante. Las causa de este descenso era de origen antropogénico, debida fundamentalmente a las emisiones de halocarburos.

A partir de 1992 y hasta 1993, los datos correspondientes al hemisferio Norte fueron muy bajos, entre un 3 y 6 % por debajo de los valores medios de ozono. Este descenso fue debido a las emanaciones de 2 GTm de SO₂ procedentes de los volcanes *Pinatubo* y *Hudson*. Los efectos térmicos y las perturbaciones en la fase gaseosa por la presencia de altas concentraciones de SO₂ contribuyeron a la disminución de la formación del ozono.

Para determinar los efectos relativos de los distintos gases sobre el agotamiento del ozono estratosférico, se utiliza el parámetro EESC (Equivalent Effective Stratospheric Chlorine). Este parámetro representa la concentración de cloro y bromo en la estratosfera. Además, considera que en cuanto a la destrucción de la capa de ozono, el bromo

es 40 veces más activo que el cloro. El valor del EESC depende de las emisiones de hidrocarburos clorados y bromados, los CFCs, HCFCs, HBFCs y los halones, el CCl₄, el metil cloroformo y el bromuro de metilo. Su determinación es clave para calcular la evolución y la predicción de la capa de ozono.

El EESC ha ido aumentando desde 1930 debido al incremento de emisiones de halocarburos de uso antropogénico, cuyas concentraciones se incrementan de forma constante entre 43 y 48 ppbv/año.

En los últimos 50 años el EESC ha aumentado desde 900 ppbv hasta 3.200 ppbv.

El futuro de la capa de ozono depende de los acuerdos internacionales en los cuales se determine la prohibición del uso de los halocarburos que contribuyen al EESC.

La evolución prevista del EESC es la indicada en la tabla adjunta:

EVOLUCIÓN PREVISTA DEL EESC PARA LOS PRÓXIMOS 45 AÑOS

Año	EESC (ppbv/año)
1995	3.200
2000	3.150
2010	2.800
2020	2.550
2030	2.350
2040	2.050
2045	2.000

El EESC debido a los HCFCs presentará, entre los años 2010 y 2030, un valor máximo de 100 a 150 ppbv/año. En el año 2015 se espera la eliminación de estos compuestos en los países desarrollados y para el año 2040 su eliminación total.

El bromuro de metilo es otra sustancia que requiere el desarrollo de un plan estratégico de eliminación. Su concentración representa un 45 % del total, siendo su principal fuente las emisiones naturales oceánicas. La concentración natural de bromuro de metilo de origen natural permanece más o menos constante en la atmósfera, y es del orden de 10 ppbv/año. Con el aumento del uso antropogénico, esta tasa ha aumentado unas 0,3 ppbv/año. Este incremento del EESC debido al aumento de emisiones de origen humano, se estima en 170 ppbv/año.

La reducción de emisiones de CFCs, la eliminación de los bancos de halones y la destrucción del bromuro de metilo, permitirán acelerar la recuperación de la capa de ozono. En cambio, permitir el uso de este producto retrasaría esta recuperación entre 10 y 12 años.

45.6. INDICADORES AMBIENTALES SOBRE LA DESTRUCCIÓN DE LA CAPA DE OZONO

Los indicadores ambientales que nos permiten observar el estado actual de la capa de ozono mediante el sistema EUROSTAT son:

- Emisiones de halones
- Emisiones de CFCs

- Emisiones de HCFCs
- Emisiones de CO₂ por sector
- Emisiones de NO_x procedente de aviones subsónicos y supersónicos
- Emisiones de tetracloruro de carbono y cloruro de metilo
- Emisiones de bromuro de metilo
- Emisiones de metano por sector
- Emisiones de N₂O por sector

En la valoración de parámetros se toman en consideración 6 sectores distintos: Energía, procesos industriales, uso de disolventes, agricultura, cambios en los usos del suelo y el aprovechamiento forestal y residuos.

El sistema de índices de presión del EUROSTAT se enmarca dentro del sistema de análisis internacional basado en el modelo de presión-estado-respuesta empleado por la AEMA y la OCDE, lo que permite conocer la sensibilidad del medio ambiente a las distintas actuaciones humanas y establecer relaciones de causalidad. En este sistema se encuentran incluidos todos los indicadores de información ambiental utilizados a nivel internacional, a excepción de aquellos que presentan limitaciones por su dificultad de cálculo.

Los indicadores ambientales que nos permiten observar el estado actual de la capa de ozono mediante el sistema AEMA, son:

- Niveles de ozono estratosférico
- Concentración media de cloro en la atmósfera

- Radiación media de UV-B
- Producción y venta de CFCs
- Producción y venta de HCFCs
- Producción y venta de metil clorofor-
mo
- Producción y venta de tetracloruro de
carbono
- Producción y venta de bromuro de
metilo

Según la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), la contribución a la destrucción de la capa del ozono estratosférico por sustancias gaseosas emitidas, viene dada por la siguiente fórmula:

$$I^i = \sum_j m_j^i \times ODP_j =$$

$$= \sum_j m_j^i \times \frac{\partial (O_3)_j}{\partial (O_3)_{CFC\ II}}$$

donde:

j = Sustancia gaseosa emitida

i = Subsistema que emite

I^i = Indicador de la contribución a la destrucción del ozono estratosférico desde un subsistema i .

m_j^i = Masa de la sustancia gaseosa j emitida por el subsistema i .

ODP_j = *Ozone depletion potential* de la sustancia j .

$\partial (O_3)$ = Disociación del ozono en equilibrio causada por un flujo anual de la sustancia gaseosa emitida j .

El Sistema Español de Indicadores Ambientales para la Destrucción de la Capa de Ozono tiene como objetivo fundamental el empleo de un número reducido de indicadores.

Los problemas con los que han encontrado para la determinación de esos indicadores son:

- La indefinición de los parámetros
- La incertidumbre sobre la calidad de las estadísticas y las dificultades técnicas y metodológicas que se presentan en su elaboración.

Los indicadores básicos son los que se indican en la tabla adjunta.

INDICADORES DEL ESTADO DE LA CAPA DE OZONO

Indicadores de estado
At 8. Espesor medio de la capa de ozono At 9. Índice medio anual de la radiación ultravioleta B
Indicadores de presión
At 10. Producción y consumo de las sustancias que agotan la capa de ozono
Indicadores de respuesta
At 11. Tasa de reducción de los CFCs

45.7. CONSECUENCIAS DE LA REDUCCIÓN DE LA CAPA DE OZONO PARA LOS SERES HUMANOS

Existe una relación entre la dosis de radiación UV-B recibida y la presencia de lesiones cutáneas. Por otra parte, ciertas características fenotípicas, como por ejemplo el color de la piel, pueden modificar la cantidad de radiación UV-B absorbida por las personas. Así, los individuos que tengan la piel más clara son más susceptibles de absorber esas radiaciones que los que tengan la piel más oscura, para la misma cantidad de radiación recibida. Actualmente se ha visto que ciertos tipos de cáncer están relacionados con la exposición a la radiación UV-B, como el cáncer de labio, que normalmente se incluye en el cáncer de piel sin melanoma, y el cáncer de las glándulas salivales.

También existe una relación entre el incremento de radiación de UV-B y las lesiones oculares. Así, una disminución del 1% de la capa de ozono supondría un incremento del 0,06% de casos de cataratas oculares.

La exposición a la radiación UV-B puede implicar una depresión del sistema inmunitario, lo que implicaría un aumento de las infecciones y más gravedad.

Últimamente se ha observado que existen ciertos virus, entre los que se encuentra el HIV-1, que es el de la inmunodeficiencia humana, o el virus del papiloma, asociado al epitelio escamoso, que pueden activarse en presencia de radiación UV.

45.8. CONSECUENCIAS DE LA REDUCCIÓN DE LA CAPA DE OZONO PARA LOS ORGANISMOS MARINOS

La radiación UV-B, que llega a la superficie terrestre con más intensidad como consecuencia del adelgazamiento o desaparición de la capa de ozono, afecta a los organismos marinos de la siguiente forma:

- Incidiendo en sus estrategias adaptativas, como la movilidad, la orientación, etc.
- Deteriorando las funciones fisiológicas principales, como la fotosíntesis, reacciones enzimáticas, etc.,
- Alterando las fases de desarrollo de los diferentes organismos, y entre ellas los estadios larvarios y juveniles.

Por otra parte, las funciones de descomposición y reciclaje de los nutrientes se ven afectadas por el incremento de radiación UV-B, ya que las bacterias pueden destruirse o dañarse en presencia de dicha radiación. Al verse dañado este eslabón de la cadena trófica, se verán afectados el resto de los componentes del ecosistema.

Aproximadamente un 50% del CO₂ ambiental es fijado por el fitoplancton, y una pérdida del 10% de este impediría que 5 GTm de dióxido de carbono fueran eliminadas, por lo que si en presencia de esa radiación UV-B creciente el fitoplancton desaparece, aumentará considerablemente el efecto invernadero sobre nuestro planeta.

El zooplancton es más resistente a la radiación, y casi el único daño de las radiaciones UV-B se produce en las formas larvarias.

Especies como espongiarios, corales y tunicados son muy sensibles a la radiación UV-B, convirtiéndose ésta en un factor limitante para su crecimiento y para la biodiversidad.

45.9. CONSECUENCIAS DE LA REDUCCIÓN DE LA CAPA DE OZONO SOBRE LA VEGETACIÓN

Desde hace bastante tiempo se conocen los efectos de la radiación UV-B sobre los vegetales. Los efectos registrados implican daños en el DNA, en el crecimiento, en el metabolismo, en la fotosíntesis y en la reproducción. Por lo general, la radiación UV-B causa una inhibición neta de la fotosíntesis, por su acción en la segunda fase de esta sobre el CO₂ reducido. También se dañan los pigmentos fotosintéticos, como la clorofila A y la B, y en menor

medida los carotenoides. Recientemente se ha visto que las proteínas y los lípidos de las semillas pueden alterarse a causa del aumento de esas radiaciones UV-B.

Otros efectos son:

- Retraso en el crecimiento
- Cambios morfológicos en especies monocotiledóneas y dicotiledóneas
- Reducciones en el tubo polínico de algunas especies

Dentro de las especies económicamente interesantes, se pueden ver afectadas por la radiación UV-B:

- Diversas especies de grano
- Varias leguminosas, como la judía y el guisante
- Muchos frutales
- Múltiples especies hortícolas, como brócoli, patata, col, calabaza o espinaca
- Muchas especies forestales

Por otra parte, se cree que hasta mediados de este siglo los niveles de cloro en la atmósfera no serán aceptables.

SÉPTIMA PARTE

La contaminación atmosférica y los materiales

CAPÍTULO 46

EFFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LAS CONSTRUCCIONES

46.1. LÍNEAS GENERALES

En la actualidad es muy frecuente observar en las ciudades y en las zonas industriales, fachadas y monumentos degradados como consecuencia de la acción (conjunta casi siempre) de diversos factores, que suelen ser los siguientes:

- Composición de la roca
- Climatología
- Ataques químicos
- Ataques bacteriológicos y de plantas inferiores
- Contaminación atmosférica

En principio, la contaminación atmosférica actúa directamente por acción mecánica y/o química, e indirectamente, y como antes hemos indicado, en conjunción con los fenómenos meteorológicos y con la vegetación.

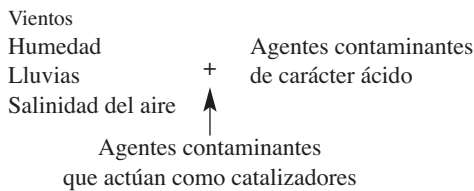
46.2. ACCIÓN MECÁNICA

La acción mecánica que provoca la contaminación atmosférica es principalmente de los tipos siguientes:

- Abrasión por impacto de polvo, humos y cenizas, junto con la acción de lluvias y vientos.
- Ennegrecimiento por depósitos sobre cubiertas y fachadas.
- Formación de aerosoles al constituir el polvo núcleos de condensación del vapor de agua del aire, que crean nieblas muy favorables a las reacciones químicas, que además pueden ser catalizadas por partículas metálicas si estas aparecen como contaminantes atmosféricos, como es el caso de muchas zonas con industria siderúrgica o metalmecánica.
- El agua provoca:
 - Dilataciones, rupturas y contracciones, por su acción como hielo o como agua líquida.

- Solubilización de sales.
- Migración de sustancias disueltas.
- Migración de sustancias en suspensión.
- Fenómenos de tipo galvánico.
- Desarrollo de flora física y químicamente activa.

La acción mecánica se puede combinar con acciones químicas, que a su vez pueden ser potenciadas por catálisis, como se indica a continuación.



46.3. ACCIONES FÍSICOQUÍMICAS Y QUÍMICAS

En principio, la humedad, la temperatura y los vientos son los principales factores climatológicos incidentes.

La humedad facilita enormemente la acción química, la de la contaminación atmosférica y los ataques bacteriológicos.

Las heladas y el hielo actúan por la vía de la erosión y de las fisuras por los fenómenos físicos de dilatación y contracción que provocan.

Evidentemente, la composición de la roca es fundamental a la hora de ser atacada por los elementos que estamos tratando.

En principio, las rocas calizas son mucho más sensibles a estos fenómenos a causa de su capacidad de reaccionar y de responder a estos ataques, y dentro de las rocas calizas, su reacción varía en función de las características que tenga cada una de ellas en cuanto al grano, la dureza y el origen (conchas marinas, etc.).

Desde el punto de vista físicoquímico, existen dos tipos básicos de degradación de la roca:

- Alveolización o daños en geoda
- Enfermedad en placas

En la alveolización, la piedra muestra un aspecto cavernoso, con superficie de polvo. Las cavernas pueden alcanzar los 10 cm de profundidad, y la conductividad de piedra dañada es generalmente baja.

Los alveolos pueden presentarse en todos los niveles, pero sobre todo en las zonas de poca humedad sometidas a vientos frecuentes, siendo la nitrificación el proceso más frecuente.

La enfermedad en placas surge en forma de hinchazón de superficie limitada (hasta de varios dm²), que levanta costras calcáreas en la parte superior de la roca. Estas costras o placas son más duras en su parte interna, desmenuzándose y despegándose con facilidad.

Las placas pueden alcanzar hasta 4 o 6 cm de profundidad, y tienen una alta conductividad eléctrica.

Se suelen ubicar en zonas con humedad permanente, y presentan con fre-

cuencia cristales y eflorescencias salinas.

Una acción química frecuente es:

$H_2SO_4 + CO_3Ca \rightarrow SO_4Ca + CO_2 + H_2O$,
provieniendo el H_2SO_4 de reacciones provocadas por las bacterias.

Además también puede ocurrir que: $CO_3Ca + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca(CO_3H)_2$, es decir, el carbónico se disuelve en el agua y ataca al carbonato cálcico y lo solubiliza como bicarbonato.

El carbonato cálcico, principal componente de las rocas calizas y de los gres de tipo calizo, es una sal muy lábil, que es atacada o solubilizada con bastante facilidad por los ácidos.

Si el medio ambiente atmosférico contiene ácidos, estos actuarán sobre estas rocas.

El yeso que se forma en la alteración de la roca puede ser solubilizado por la lluvia, pero en las zonas en que esté protegido del agua, formará depósitos y costras del tipo de los alveolos y placas ya citados anteriormente, en los que se acumularán los contaminantes,.

Si aparecen sinergismos, los ataques se potencian, tanto en ambiente seco como en ambiente húmedo.

La madera de construcción puede absorber SO_2 , que puede degradarse al entrar en contacto con los componentes de la madera y sobre todo con la lignina.

El ozono actúa como el smog oxidante y las nieblas fotoquímicas.

El $CaSO_4$ se lava más que el $CaCO_3$ por ser más soluble, y además, al ser su volumen mayor, crea tensiones mecánicas a nivel molecular, deshaciendo los materiales calizos.

Las pinturas de fachadas, si estas son caliza pigmentada (pinturas al fresco y de otros tipos) y si hay SO_2 en la atmósfera, sufrirán las transformaciones a $CaSO_4$ y la acción correspondiente, ya citada.

Si el material de construcción utilizado contiene magnesio, como son los casos de las dolomías o de los morteros con $(OH)_2Mg$, el agua lo lavará, pues el SO_2 provoca la formación de $SO_4Mg \cdot 7H_2O$, que es muy soluble, por lo que será desgastado y arrastrado.

Por otra parte, se ha observado que las juntas cerca de las rocas enfermas contienen proporciones elevadas de nitratos cuando la degradación es por formación de alveolos, pero si esta degradación es por placas, los sulfatos suben considerablemente.

Finalmente indicamos que es frecuente la aparición de potasio en las juntas y en la salmuera de las rocas, pues el elemento asciende por capilaridad desde subsuelos con aguas contaminadas a lo largo y ancho de los muros.

Las construcciones y los monumentos sufren en general procesos de hidratación, carbonatación, sulfatación y lavado, que además de la abrasión y de los depósitos (sedimentación), constituyen en conjunto la acción más notable de la contaminación atmosférica, unido todo ello a la acción meteorológica, a la acción biológica, a los sinergismos y a la catálisis, ya citados.

En general, los materiales de construcción tienen los siguientes problemas ante la contaminación atmosférica:

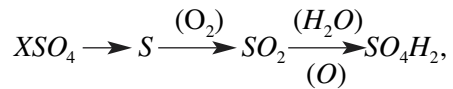
- Si son muy porosos, la agresión es muy superior.
- La humedad en los poros potencia la agresión.
- Los poros transportan la humedad o la solución, y son fundamentales en la absorción y en la adsorción de los contaminantes.
- CO₂, SO₂, SO₃, y ozono son los gases más activos, junto con las partículas que se adhieren o que son químicamente activas.
- El SO₂ generalmente ataca más a las rocas menos densas.

46.4. ACCIONES BACTERIANAS Y DE ALGAS, HONGOS, LÍQUENES Y MUSGOS

En principio, la intensidad de las acciones observadas se indica en la tabla adjunta.

Los hongos, y sobre todo las algas y los líquenes que se van fijando en la piedra y atacándola, aportan en su soporte sustancias orgánicas como esteroides, lípidos, monoglicéridos y diglicéridos que retienen el polvo y los hollines, provocando un ennegrecimiento de la piedra típico en muchas fachadas urbanas.

La acción bacteriana ocurre así:



y esto se explica porque los tiobacilos provocan las siguientes reacciones:

- Disolución de los sulfatos en zonas inferiores con humedad
- Reducción a azufre
- Ascensión de ese azufre por arrastre de la humedad
- Ascensión por capilaridad y por acción de campos eléctricos estáticos
- Se alcanzan niveles en que las bacterias oxidantes transforman de nuevo el azufre puro obtenido, en sulfatos.

INTENSIDAD DE LAS ACCIONES BIOLÓGICAS SOBRE LA PIEDRA ORNAMENTAL

Acción biológica	Alveolización	Enfermedad en placas
Actividad biológica	Mínima	Fuerte
Microflora presente	Muy poca	Abundante
Tiobacilos	Transformación del S	
Bacterias oxidantes	Muy pocas	Muy abundantes
Nitrificación, amonificación	Similar a las de las zonas urbanas	

CAPÍTULO 47

LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y LOS MATERIALES

47.1. BASES GENERALES

En el capítulo anterior se han indicado los procesos físicos, químicos y biológicos que los agentes contaminantes, junto con la acción climática y otros factores (sinergismos, etc.), ejercen sobre las rocas ornamentales y demás materiales que constituyen la parte externa de los edificios.

Evidentemente, cualquier material que esté expuesto a la acción de esos agentes sólidos, líquidos o gaseosos sufrirá sus efectos en la medida de su resistencia al ataque y de su reactividad.

En principio, los ataques a los materiales pueden ser de tipo físico, de tipo químico o de tipo biológico.

El ataque físico puede ser por transporte, por abrasión o por depósito inerte.

El ataque químico puede ser por reacción de los agentes contaminantes con el receptor, o bien por procesos electro-

químicos, en los que la humedad es un partícipe imprescindible.

El ataque de tipo biológico es la acción de bacterias, algas, hongos, líquenes y musgos sobre los materiales, que antes o durante el ataque han estado sometidos a la contaminación atmosférica y están «*preparados*» para la acción de estos seres vivos especializados, o bien puede ocurrir que los propios agentes contaminantes atacantes sean de tipo biológico.

En la tabla adjunta se indican los tipos de ataque y los factores incidentes más importantes.

47.2. METALES

La mayoría de los metales sufren los daños provocados por la contaminación atmosférica en función de los factores indicados en la tabla adjunta:

Sobre los metales actúan, en principio, el SO_2 y sus derivados ácidos, los gases ácidos, las lluvias ácidas y todos

ATAQUES BÁSICOS DE LOS CONTAMINANTES Y FACTORES INCIDENTES

Tipo de ataque	Ataque	Factores incidentes
Físico-mecánico	Depósitos inertes Formación de aerosoles Transporte Abrasión Ennegrecimiento	Temperatura Viento Humedad Luz Sinergismos con otros contaminantes o con otros factores
Químico	Reacciones químicas directas: Hidratación, carbonatación, corrosión, sulfatación, oxidación, etc. Reacciones químicas con derivados Procesos electroquímicos o de tipo galvánico Solubilización de sales Migración de sustancias disueltas	Catálisis Exposición Concentración de contaminantes
Biológico	Nitrificación Amonificación Microflora Tiobacilos Bacterias Algas, hongos, líquenes, musgos	Duración del ataque Características del receptor

aque aquellos ambientes que provoquen acidez atmosférica.

En la tabla adjunta se indican las agresiones más frecuentes.

FACTORES DETERMINANTES DE LOS EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LOS METALES

- Agresividad de los agentes contaminantes presentes
- Metal receptor
- Humedad
- Temperatura
- Concentración del contaminante
- Duración de la agresión
- Luz
- Forma de exposición del metal
- Vientos

El efecto más común de los medios atmosféricos ácidos sobre los metales es el de la corrosión, y sobre todo la corrosión electroquímica, provocada por los ambientes ácidos al contactar con los metales en presencia de humedad.

Este efecto puede agravarse además por una acción de catálisis.

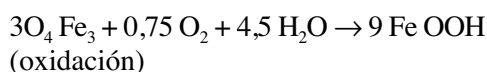
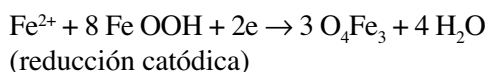
El proceso en el hierro o en el acero, de tipo electroquímico y en ambiente húmedo o ligeramente húmedo, con gases como el SO₂, es el siguiente:

- Fe
- El metal esta cubierto siempre por una capa de O₄Fe
- Otra capa de Fe OOH recubre a la anterior.
- En el metal puro se verifica:
Fe → Fe²⁺ + 2e (ánodo).

AGENTES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS Y METALES SENSIBLES

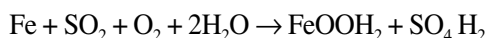
Agente contaminante	Metal sensible
SO ₂	Fe y metales férricos, Al, Cu, Ni, Zn
SH ₂	Pb, Ag, Cu
Partículas inertes	Aceleran la corrosión que realizan los gases ácidos, y más si hay humedad
NO ₂	Ni, Pb
Partículas químicamente activas	Muchos metales y aleaciones (Ni-latón es sensible a los nitratos)

– En la interfase O₄Fe₃/Fe OOH se verifica:



Así, poco a poco el hierro del metal va pasando a las capas superficiales.

El SO₂, al evolucionar hacia la acidez aporta al ser absorbido y oxidarse sobre el metal:



Para que el efecto sea fuerte es necesaria la humedad, pues es la forma de que el Fe SO₄ esté disuelto en la capa de O₄Fe₃.

Así, en ambiente muy seco la corrosión será mínima.

En otros metales, como el Al, el SO₂ actúa con intensidad, pues es absorbido en la superficie formándose SO₄H₂, que ataca al óxido, por lo que el metal debe ir aportando más óxido para su protección, y así continuar la corrosión .

En el Zn ocurre algo parecido: el SO₄H₂ ataca a la película de protección de carbonato de cinc, por lo que deberá oxi-

darse más metal para mantener la película, y así continua la corrosión.

Los nitratos en forma de partículas atacan a las aleaciones del tipo niquel-latón.

47.3. ELASTÓMEROS

Las industrias del caucho y similares tienen problemas en estos materiales si en el ambiente atmosférico existe contaminación por ozono o por otros oxidantes.

La acción es de rupturas y fisuras del material, como consecuencia de la acción del oxidante sobre los dobles enlaces del carbono.

Si existe luz solar los ataques se intensifican, y esto se ha observado desde hace muchos años en los neumáticos en uso en zonas con ambiente oxidante, como es el caso típico de Los Angeles, en EEUU.

Los cauchos sintéticos, como el butadieno-estireno o el butadieno-acronitrilo, sufren igualmente los ataques de los contaminantes atmosféricos oxidantes.

Los cauchos indicados, cuando están sometidos a tensión, se resquebrajan si

la concentración de ozono es superior a 20 o 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

El policloropreno (neopreno), el caucho butílico (butilo) y en general los polímeros con siliconas, no son sensibles a la contaminación atmosférica.

Los NO_x dañan y amarillean el expandex (fibra de elastómero sintético).

47.4. TEXTILES

El ozono ataca con intensidad decreciente a las fibras siguientes:

- Poliester
- Nylon
- Acetatos
- Algodón

Los SO_x atacan a muchas fibras textiles naturales y sintéticas, como las siguientes:

- Lana
- Algodón
- Nylon

El ataque es más intenso si las fibras son finas.

En principio, las fibras textiles se hacen más frágiles, pues baja su tensión de ruptura, y en algún caso se colorean.

Los tintes son generalmente bastante sensibles a los oxidantes y sobre todo al O_3 y a los NO_x , perdiendo color.

47.5. PAPEL

El SO_2 actúa sobre el papel, y lo hace con intensidad si el ambiente es húmedo.

Si el ambiente se acidifica (evolución del SO_2 hacia otros compuestos y finalmente a H_2SO_4) en medio húmedo, aumenta la adsorción del gas.

Se produce una hidrólisis ácida de la celulosa, y además, al reaccionar el SO_2 y la lignina, se forman ácidos lignosulfónicos en la superficie húmeda del papel.

Si el papel contiene algunas partículas metálicas, en el entorno de estas la concentración de SO_2 es más alta. Si este papel está algo húmedo, el SO_2 acaba oxidándose a H_2SO_4 , y se desarrolla el mismo proceso hidrolítico que hemos indicado antes para ambientes ácidos.

El papel amarillea, se torna más frágil, pierde resistencia mecánica y se abomba.

Los gases ácidos producen efectos similares, y la luz potencia esos efectos.

47.6. CUERO

Algún autor indica que Faraday señaló en 1843 que el cuero de los sillones de su club en Londres se deterioraba por acción del SO_2 .

El SO_2 ataca a muebles, encuadernaciones de libros y a todo material de cuero, y lo hace al presentarse una oxidación del gas en la superficie y la aparición de H_2SO_4 , que provoca, al igual que ocurre con el papel, una hidrólisis ácida,

que en este caso se realiza sobre las proteínas del cuero, mientras que en el papel es sobre la celulosa.

La intensidad de los ataques del SO_2 depende de su velocidad de difusión.

Los daños generales son los siguientes:

- Fragilidad
- Desmenuzamiento superficial
- Grietas
- Pérdida de flexibilidad
- Pérdida de resistencia mecánica

Los gases ácidos producen los mismos efectos.

47.7. PINTURAS

Las pinturas, en general, son una mezcla uniformemente dispersada, con una viscosidad entre líquido delgado y pasta semisólida.

Están formadas por una parte por unos *ligantes* (aceite secante, resina sintética o unos componentes que forman película) y por un *disolvente* (o diluyente), que en conjunto constituyen el *vehículo* o porción líquida, y por un *pigmento* orgánico o inorgánico.

Las pinturas básicamente pueden ser:

- Acuosas o de emulsión o de látex (con 2 dispersiones)
- Asfálticas (con o sin aceites secantes, resinas y pigmentos)
- Gelificadas o tixotrópicas

La presencia de contaminantes en el aire puede afectar al vehículo, al pigmento o a sus funciones.

Muchos aerosoles, el SH_2 , el SO_2 , el amoníaco, las esporas de las filicíneas y otros agentes, atacan a las pinturas, provocando decoloraciones, ablandamientos, resquebrajamientos, desprendimientos y oscurecimientos.

Las pinturas con plomo, al ser atacadas por el SH_2 , forman los sulfuros correspondientes, de color oscuro.

El SO_2 ataca algunos tipos de pintura verde (Paris, Brusnswick, etc.), que pasan a un color azulado.

El amoníaco provoca la aparición de cristales de sulfato amónico.

Las esporas encuentran un medio favorable para su germinación en los componentes orgánicos de las pinturas, utilizándolos como sustrato y como nutrientes y absorbiéndolos, provocando decoloraciones e incluso nuevos colores (por su presencia).

OCTAVA PARTE

La contaminación atmosférica y los ecosistemas. Aspectos ecológicos

LA BIOSFERA Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA. LOS PROBLEMAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA DE LOS ECOSISTEMAS

48.1. LA BIOSFERA Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La biosfera es un conjunto de grandes complejos que envuelven la Tierra y que tienen una composición, una estructura y unos flujos de energía condicionados por los organismos vivos.

Se considera como biosfera toda zona del planeta bajo la influencia de los seres vivos, por lo que está constituida por la parte superior de la litosfera, por la hidrosfera y por la troposfera.

La biosfera es recorrida por flujos de energía que aseguran la circulación cíclica de los elementos básicos que la componen (C, N, H₂O, S, etc.).

La contaminación atmosférica participa en estos ciclos por las relaciones siguientes:

- Se pueden producir interacciones entre diferentes ciclos durante la dispersión de los agentes contaminantes (vientos, etc.).
 - Se pueden producir interacciones entre diferentes ciclos durante la transformación de los contaminantes (con las reacciones fotoquímicas, etc.).
 - Pueden aparecer efectos sobre los ecosistemas y sobre los ciclos en que participan, después de recibir inmisiónes y depósitos contaminantes.
 - Los sinergismos entre contaminantes atmosféricos pueden afectar gravemente a los ecosistemas.
- Cuando se emite un contaminante atmosférico se debe tener en cuenta que al incorporarse al aire va a participar en la dinámica de este, y sobre ese agente van a actuar factores externos como la luz, la temperatura, la humedad, los vientos u otros agentes, de forma que sufrirá transformaciones y tendrán, el o sus transformados, tiempos de residencia
- Las emisiones artificiales se unen a los flujos naturales.

que dependen de las condiciones de cada caso.

Así, el tiempo de residencia del SO_2 en el aire puede ser de días a meses; el del CO_2 es de varios años, y así ocurre con cada agente contaminante. Después pueden pasar a otro gran elemento de la biosfera, como pueden ser el suelo, el agua, la flora o la fauna.

Al entrar en los ecosistemas, estos reaccionan ampliando la perturbación o amortiguándola, en función de su intensidad y de otros factores; si la perturbación es baja, la Ley de Amortiguación de la Naturaleza hace que se minimice y sea asimilable; si es alta, los efectos pueden llegar a ser irreversibles.

Por otra parte, sabemos que los ecosistemas son organizaciones muy complejas, con unas características dinámicas y de estabilidad que dan respuesta a cada situación en el tiempo.

Para definir estas características se utilizan varios términos que servirán después para establecer las relaciones entre una perturbación como la contaminación atmosférica, y un receptor de la biosfera, como puede ser un ecosistema. Estos términos resumidamente se definen así:

Inercia: Resistencia a un cambio.

Resiliencia: Capacidad de asimilar una perturbación.

Elasticidad: Rapidez de recuperación después de una perturbación.

Amplitud: Zona o margen de alteración, dentro de la cual el ecosistema puede volver al estado inicial.

Histéresis: Grado o nivel en que ante una contaminación crónica la vía de la recuperación, cuando cesa la perturbación, es la inversa que la de la degradación.

Maleabilidad: Grado en que después de una perturbación, la nueva situación se parece a la anterior a la perturbación.

La biosfera reacciona en función de estos conceptos, y a ellos debemos atendernos cuando queramos analizar los efectos de la contaminación atmosférica sobre los ecosistemas.

En la tabla adjunta se indican algunos de los efectos generales.

48.2. LA CONTAMINACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS POR LA INDUSTRIA

48.2.1. Ecosistemas naturales y ecosistemas industriales

Como ya sabemos por haberse escrito en múltiples publicaciones y por la realidad cotidiana, el desarrollo industrial es para gran parte de la población sinónimo de contaminación, residuos, empleo y riesgos.

Al mismo tiempo, la noción de ecosistema es, para esa misma población, un concepto exclusivo referente al medio natural.

Si hablamos entonces de ecosistemas industriales, como indica *J. Vigneron*, estamos a primera vista ante una parado-

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES BÁSICOS EN LA BIOSFERA

Agente	Efectos en la biosfera
SO ₂	Oxidación y acidificación a H ₂ SO ₄ , daños a la vegetación
SO ₄ ²⁻	Se potencia en ambiente húmedo y origina, con otros, lluvias ácidas, daños a la vegetación
Oxidantes	Provocan smog y reducen la visibilidad, afectan a la capa de ozono, daños a la vegetación
NO _x	Lluvias ácidas, colorean la atmósfera
Partículas	Reducen la visibilidad, reducen la radiación solar, provocan enfriamiento de la atmósfera, daños a la vegetación. Transporte y depósito
F	Afecta a la capa de ozono, fluorosis en los mamíferos, daños a la vegetación
HC	Daños al hombre y a la vegetación
CO	Daños al hombre y a la vegetación
Metales pesados	Daños al hombre y a los ecosistemas (transporte y depósito)

ja, ya que aparentemente la Naturaleza y la Industria son términos prácticamente opuestos.

Sin embargo, si analizamos el ámbito de la contaminación medioambiental, vemos que sus fuentes son múltiples: las actividades industriales, la minería, las aglomeraciones urbanas, y como una de sus causas más importantes, las actividades agrícolas y ganaderas. Su efectos son también múltiples y alcanzan a casi todo el medio ambiente.

A partir de esta constatación, vemos que la intervención humana se desarrolla prácticamente en casi todas las áreas del medio, encontrándonos sectores con intervención antrópica nula –ecosistemas naturales–, sectores con intervención baja o media –ecosistemas agroforestales–, y sectores totalmente intervenidos por el hombre como son los ecosistemas industriales, los ecosistemas urbanos y otros muchos.

Ph. Esquissaud, en sus análisis ambientales económico-industriales, englobó, por lógica, dentro del concepto de ecosistema, todo aquello que es susceptible de una organización y un equilibrio, es decir, consideró tanto el medio natural como el medio artificializado.

Las leyes ecológicas, aplicables al medio natural, son aplicables también dentro de la ciencia de los sistemas. Únicamente habrá que adaptar los sistemas de análisis ecológico y desarrollarlos como análisis de sistemas (urbanos, industriales, etc.).

Así, la ecología como tal, aplicada exclusivamente al medio natural, se incorpora a las ciencias medioambientales para tratar a su vez, dentro de ellas, todos los entornos creados por el hombre. Aparecen entonces los ecosistemas urbanos, los ecosistemas industriales, los ecosistemas agrícolas y otros muchos, que deben ser tratados mediante análisis con base ecológica.

Está claro que no se pueden limitar los campos de aplicación de la ecología, y tanto valen como áreas ambientales los bosques, los lagos o el mar, como una aglomeración urbana, una fábrica, un cultivo o una explotación ganadera.

Una vez aclaradas la necesidad y la viabilidad de aplicación de la ciencia ecológica al mundo antropizado, hemos de confirmar la validez de las leyes y principios científicos en las consideraciones medioambientales de esos ecosistemas humanizados o artificiales.

Un sistema termodinámico abierto implica intercambios de materia y de energía entre el interior y el exterior de ese sistema, concepto equivalente al del funcionamiento de un ecosistema. Así vemos el paralelismo existente entre la industria (intercambios de materia y energía de un sistema con el exterior, en el concepto físico del sistema termodinámico abierto) y los ecosistemas (unidad ambiental que intercambia materia y energía con el exterior, en el concepto ecológico).

Los dos principios básicos de la termodinámica (referentes al intercambio y a la transformación de la energía y de la materia) y la estructuración y la producción de entropía, participan directamente en el análisis termodinámico del medio, constituido por las biocenosis y los biotopos. La aproximación, es pues, un hecho, y la ecología industrial es un concepto claro que admite el análisis con las leyes propias de la ecología del medio natural.

48.2.2. Ecosistemas e industria

La industria actúa sobre el medio ambiente como cualquier otra actividad humana, modificando el equilibrio de los ecosistemas. La actividad industrial, sea cual sea su naturaleza, ejerce un conjunto de perturbaciones medioambientales que denominamos impacto ambiental.

Así, vemos en la tabla adjunta una serie de impactos y perturbaciones del medio ambiente provocados por las actividades industriales.

La contaminación atmosférica es, sin duda, uno de los factores perturbadores más graves. Las actividades industriales implican invariablemente la transformación de materias primas en productos semielaborados o elaborados, pero esta transformación nunca es total, generándose unos residuos, en forma de energía o de materia, que si no son recuperados y reutilizados, se convierten en contaminantes susceptibles de producir daños sobre la Naturaleza, alterando la abundancia y los tipos de especies vivas, perturbando los sistemas físicos y biológicos y modificando los niveles de radiación y de reparto de energía.

La autodepuración o capacidad de un ecosistema para asimilar los contaminantes depende de sus propias características y de la naturaleza, tipo y concentración de dichos contaminantes.

Sin embargo, la nocividad de la contaminación atmosférica sobre los ecosistemas y sobre la vida que en ellos se desarrolla, depende, además, de otros parámetros, como son la facilidad de

dispersión de los contaminantes, desplazándose a grandes distancias debido a la gran complejidad biogeoquímica de la biosfera y alterando ecosistemas lejanos a la instalación que es fuente de contaminación, la posibilidad de transformación de los contaminantes en otras sustancias más peligrosas o dañinas o, finalmente, la acción conjunta y simultánea de varios contaminantes o de un contaminante y determinados factores ambientales y sus posibles efectos aditivos, acumulativos o sinérgicos, como ya hemos indicado en otros epígrafes de este capítulo.

48.3. EFECTOS E IMPACTOS POTENCIALES DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LOS ECOSISTEMAS

Cuando se emite una sustancia contaminante a la atmósfera, este hecho tendrá unos efectos sobre el medio físico, como una posible modificación de las características fisicoquímicas; unos efectos sobre los seres vivos, que pueden ser de toxicidad o de ecotoxicidad, como se ha indicado en el capítulo correspondiente, y unos efectos sobre los

IMPACTO AMBIENTAL DE LA INDUSTRIA

- Sobreexplotación de recursos utilizados por la industria, como es la extracción de materias primas.
- Consumo acelerado de agua y energía.
- Ocupación del suelo donde se construye e instala una fábrica y destrucción del ecosistema existente (flora, fauna, medio físico, sistemas biológicos, etc.). Se crea un ecosistema nuevo, el ecosistema industrial.
- En este nuevo ecosistema, la instalación se convierte en el principal elemento perturbador, tanto de ese ecosistema como de otros cercanos.
- Extinción de especies animales y vegetales como consecuencia de las actividades industriales.
- Destrucción de biocenosis completas.
- Modificación de las características del suelo.
- Alteraciones del equilibrio hidrológico y deterioro de la calidad del agua.
- Alteraciones del clima y de la calidad del aire.
- Modificaciones del paisaje por deterioro estético y de la calidad visual del medio.
- Alteración o destrucción de elementos arqueológicos, históricos y culturales del entorno.
- Daños sobre las poblaciones próximas por deterioro de la salud humana (cáncer, enfermedades respiratorias, etc.).
- Riesgos elevados de accidentes y siniestros (incendios, explosiones, fugas, escapes, dispersiones de tóxicos, etc.), con graves consecuencias para los ecosistemas de la zona.
- Ruidos y vibraciones.
- Olores.
- Impactos producidos por el transporte y las vías de acceso a la instalación.
- Contaminación del aire.
- Contaminación del agua.
- Contaminación del suelo.
- Contaminación por residuos peligrosos.
- Contaminación radiactiva.
- Contaminación electromagnética.

ecosistemas, perturbando su equilibrio ecológico.

Una vez emitido el agente contaminante, surge el riesgo de impacto y aparecen, entre otras, unas potencialidades tóxicas, ecotóxicas y ecológicas, combinándose tres conjuntos de factores y parámetros, a saber:

- La acción de la fuente de emisión en cuanto a tipo de contaminante, concentración y duración de la emisión.
- Exposición.
- Sensibilidad de los receptores.

Así, los ecosistemas, al recibir el contaminante en la inmisión o en el depósito (húmedo o seco), sufrirán un impacto que en su fase potencial será función de los siguientes factores:

- Cantidad de contaminante
- Concentración del contaminante
- Tendencia a la dispersión
- Persistencia
- Acumulación
- Sinergismos
- Daños para los biotopos y las biocenosis receptores

Por otra parte, cada caso es específico, pues todo va a depender de los factores indicados en la tabla adjunta.

FACTORES INCIDENTES Y A CONSIDERAR ANTE UNA INMISIÓN O DEPÓSITO EN LOS ECOSISTEMAS Y EN SUS COMPONENTES

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> – Características de las fuentes – Características ambientales de las zonas de emisión <ul style="list-style-type: none"> • Clima • Topografía • Estación – Características ambientales de las zonas de inmisión y depósito <ul style="list-style-type: none"> • Clima • Topografía • Estación – Distancia entre las fuentes y los receptores – Características específicas de los receptores <ul style="list-style-type: none"> • Suelo • Aguas • Flora • Fauna – Características de los ecosistemas receptores (como ecosistemas) <ul style="list-style-type: none"> • Inercia • Resiliencia • Elasticidad • Amplitud • Histéresis • Maleabilidad |
|--|

CAPÍTULO 49

ECOTOXICOLOGÍA

49.1. ECOTOXICOLOGÍA Y CONTAMINACIÓN. TOXICIDAD

Tóxico es todo factor físico, químico o biológico capaz de crear una fuente potencial de contaminación.

En el medio ambiente existe multitud de productos nocivos presentes en el aire, en el agua, en el suelo, en los alimentos o en los materiales, de los que unos actúan y afectan al hombre, a los animales o a los vegetales de forma involuntaria, mientras que otros dañan a los seres vivos con pleno conocimiento del hombre, como ocurre con ciertos materiales de construcción, con los plaguicidas o con múltiples aditivos alimentarios.

Estos productos pueden actuar por alguna o algunas de las tres vías de absorción siguiente:

- Por vía respiratoria: los contaminantes atmosféricos
- Por contacto: algunos contaminantes atmosféricos y otros sólidos o líquidos
- Por vía trófica: los contaminantes ingeridos o absorbidos

En las tablas adjuntas se indican los tipos básicos de toxicidad y sus efectos.

49.2. DOSIS-RESPUESTA ECOTOXICOLÓGICA

Esta cuestión es fundamental en el tema de la contaminación atmosférica de

TIPOS BÁSICOS DE TOXICIDAD

Tipo de toxicidad	Efectos
Aguda	Provoca daños muy graves a corto plazo
Subaguda	Provoca daños graves
A largo plazo (crónica)	Exposición continuada en el tiempo a pequeñas dosis y frecuentemente con efectos acumulables

EFECTOS FISIOTOXICOLÓGICOS DE LOS PRODUCTOS CONTAMINANTES TÓXICOS

Efectos fisiotoxicológicos	Perturbación
Somáticos	Neurotoxicidad Acción sobre el equilibrio endocrino Lesiones en las funciones respiratorias Lesiones en los órganos «depuradores» (hígado, riñones, pulmones)
Germinales	Acciones sobre el potencial biótico Propiedades mutagénicas Efectos teratogénicos <ul style="list-style-type: none"> – Efectos clásicos – Efectos sobre las gónadas

los seres vivos, pues se trata de determinar la relación exacta entre la dosis y el efecto cuando existen situaciones de contaminación durante períodos largos de tiempo, aunque esto es muy complejo, pues depende, entre otros factores, de los siguientes:

- Tipo o tipos de contaminantes
- Organismo receptor
- Órgano receptor
- Concentración
- Duración de la recepción
- Estado sanitario del receptor

Las dosis de un contaminante, si se acumulan en un receptor por absorción continuada durante un período de tiempo prolongado, es posible que puedan inducir efectos genotóxicos tales como carcinogénesis o mutagénesis.

Esta acumulación puede ser completa o total, parcial o marginal, o nula.

Por otra parte, ocurre con frecuencia que exista un umbral de contaminación

por debajo del cual no se manifiesten efectos aparentes, aunque a veces sí haya daños invisibles, o bien que el umbral no exista, en cuyo caso la respuesta siempre aparece por ínfima que sea la contaminación.

Lo que sí está muy claro es lo siguiente:

- Los efectos a largo plazo de una exposición permanente a dosis bajas de contaminación, son casi siempre peores que los de una contaminación corta con la misma dosis acumulada.
- Los efectos irreversibles se suman.
- La acumulación de las dosis absorbidas por unidad de tiempo es casi siempre limitada y parcial a causa de la actuación de detoxificación y recuperación de los organismos o de sus órganos.
- Las sinergias entre contaminantes son muy importantes, pues la contaminación atmosférica en ambientes urbanos o industriales casi siempre está compuesta por varios agentes que pueden actuar en-

tre sí o reaccionan con los compuestos del medio.

En otro orden de cosas, en las dosis-respuesta se han de tener en cuenta las dosis máximas admisibles o tolerables para cada contaminante (incluso si existen sinergismos), siempre que hayan sido muy bien estudiadas y que se confirme que una exposición ininterrumpida durante toda la vida es inofensiva para el hombre o para otras especies controladas. Se debe considerar, en esta situación, que existen productos cuya absorción y acumulación en el cuerpo manifiestan sus efectos 30 o 40 años después de haber comenzado la exposición, y este es el caso de los habitantes de muchas zonas industriales o urbanas, y que los sinergismos y las reacciones de los contaminantes con el medio son frecuentes y complejos, por lo que estas dosis máximas tolerables no deben ser establecidas en base a cada contaminante aislado.

49.3. FACTORES DE TOXICIDAD Y DE ECOTOXICIDAD

Para evaluar una toxicidad debida a contaminación atmosférica se deben considerar los *factores de exposición* y los *factores de efecto* (dosis-respuesta).

Los *factores de exposición* dependen de:

- Cantidad emitida del contaminante
- Concentración del contaminante
- Características del medio receptor
- Difusión y dispersión del contaminante en función de

- Medio en el que se emite
- Medio receptor
- Climatología
- Características del agente contaminante

– Degradación del agente contaminante

- Por vía biológica
- Fotodegradación
- Degradación química

– Vía de exposición

Los *factores de efecto* a su vez, dependen de:

- Toxicidad aguda
- Toxicidad crónica
- Situación carcinogénica (efectos)
- Mutagénesis (efectos)
- Reproducción (efectos)
- Teratogénesis (efectos)
- Alergias (efectos)
- Irritación
- Piel
- Mucosas
- Ojos

Se debe tener en cuenta también que la dosis es lo que convierte un producto en veneno.

49.4. IMPACTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SEGÚN LA ECOTOXICIDAD

Los impactos de la contaminación atmosférica, desde el punto de vista de la

ecotoxicidad, podemos resumirlos en las áreas de la contaminación fotoquímica y en la de la acidificación del medio, según sigue.

Contaminación fotoquímica

- Precusores: COV, NO_x, CO, etc.
- Contaminantes producidos: Ozono, PAN, aldehídos.
- Factores incidentes: Luz, circulación de vehículos, etc.
- Efectos:
 - Ozono: Respiración en sinergias con NO_x y PAN.
 - En conjunto: Efectos graves sobre la vegetación.
 - En conjunto: Degradan los materiales de construcción y los materiales plásticos.
- Dosis admisibles según la OMS para el ozono:
 - Media horaria: 150 µgr/m³.
 - Media en 8 horas: 60 µgr/m³.
 - Nivel medio en atmósfera limpia: 40 µgr/m³.

Acidificación del medio

- Impacto: Depósitos ácidos en el suelo, en el agua y en los receptores.
- Efectos básicos.
 - Disminución del pH.

- Reducción de los nutrientes presentes.
- Aumento de la presencia de elementos potencialmente tóxicos.
- Reducción de la biomasa presente.
- Contaminantes responsables: SO₂, NO_x. Ayudan NH₃ (si hay agua, se transforma en y en HNO₃) y HCl, si existen.
- Factores incidentes:
 - Ambiente seco: Depósito seco ácido.
 - Ambiente húmedo: lluvia ácida.
 - Transformación, al contactar con el agua de las nubes, de la niebla, del rocío, de la nieve o del suelo, en H₂SO₄ o en HNO₃.
- Consecuencias:
 - Agotamiento de los iones básicos del suelo.
 - El exceso de ácidos presente es neutralizado por las sales de Ca y de Mg.
 - La migración de esas sales por lavado hacia las capas más profundas del suelo provoca el desequilibrio de la relación Ca/Al, lo que afecta gravemente a la vegetación.
 - Contaminación de las aguas subterráneas por metales.
 - Mortalidad de organismos de las aguas superficiales por descenso del pH.
 - Degradación de las construcciones (efectos ecotoxicológicos indirectos).

CAPÍTULO 50

LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

50.1. DINÁMICA GENERAL DE LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS EN LA NATURALEZA

De los numerosos elementos necesarios para la vida, seis son considerados como los más importantes: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y fósforo. Los tres primeros se encuentran en los seres vivos formando materiales ricos en energía; el nitrógeno y el azufre son constituyentes fundamentales de las proteínas, y el fósforo es necesario para transferir energía dentro de las células.

Estos elementos también los podemos encontrar formando parte del aire, del agua, y de los seres vivos, desde el punto de vista biogeoquímico.

Dentro de la dinámica de estos ciclos se encuentran involucradas la circulación del agua, la erosión y el levantamiento de nuevas cadenas montañosas, los procesos de respiración y la fotosíntesis.

Los elementos que se encuentran en los ciclos vitales son arrastrados y captados por los animales o por las plantas, los cuales los utilizan para cubrir sus necesidades orgánicas. El equilibrio natural entre las poblaciones animales y vegetales depende rigurosamente de la duración, de la permanencia y de la concentración óptima de estos elementos en los ecosistemas, introducidos por la vía de los ciclos biogeoquímicos.

La circulación normalmente es cíclica, pero esto no involucra sólo a los elementos esenciales de los ciclos, sino que también influye sobre los componentes que pasan de un ser vivo a otro en sus estados moleculares.

Existen dos grandes fenómenos que no cumplen la circulación cíclica:

- *La no circulación*: Esto ocurre con ciertos gases nobles inertes que se encuentran en el aire, como son el Ar, Xe, He, etc., o con ciertos elementos que se localizan en el medio y que no

son capaces de penetrar en los seres vivos, tales como Al, Ti, Si, etc.,.

- *La acumulación*: Está basada en la imposibilidad de deshacerse de determinadas sustancias inertes. Los vegetales, por ejemplo, presentan tejidos especializados para la separación de los cristales de oxalato de calcio, fenómeno que es simplemente una excreción. Existe un equilibrio que no se rompe nunca, y la impresión que ofrece es que la eliminación de estos elementos es como si fuera un rechazo. La acumulación proviene de una inapetencia permanente de los órganos excretorios para expulsar un componente nocivo para el organismo. Se conoce así la catastrófica acumulación de los plaguicidas organoclorados en las rapaces, la acumulación de mercurio en muchos animales, la acumulación del flúor en los mamíferos (fluorosis), etc.

Aparece entonces una pregunta: ¿Quién va a desconcentrar en la pirámide alimentaria, las sustancias nocivas acumuladas, dañinas para los seres vivos, incluido el hombre?

50.2. CICLOS DE LA MATERIA Y FLUJOS DE ENERGÍA

50.2.1. Transferencias de energía

A lo largo de los ecosistemas se produce una transferencia de materia a través de la cadena alimentaria (o cadena trófica), donde cada eslabón recibe el nombre de nivel trófico.

Se llama cadena alimentaria al enlace entre los seres vivos por el cual unos consumen a aquellos que les preceden en la cadena antes de ser consumidos por los que les siguen.

En la Naturaleza no suelen darse situaciones sencillas (cadena lineal), sino situaciones más complicadas, en las que una especie puede alimentarse de varias especies. Por tanto, no debe hablarse de cadenas tróficas sino de redes tróficas.

Existen dos tipos de cadenas:

- a) *Cadenas alimentarias que comienzan por los vegetales vivos.*

En ellas se pueden distinguir:

- **Productores**: Organismos quimio-sintéticos o fotosintéticos, capaces de fabricar materia orgánica a partir de material mineral. Se denominan por ello autótrofos. Los más importantes y abundantes son los vegetales, de los que la mayoría, al poseer clorofila, sintetizan materia orgánica a través de la fotosíntesis.
- **Consumidores**: Son heterótrofos y no pueden fabricar materia orgánica por sí mismos, por lo que para consumirla necesitan tomarla de los productores primarios. Según el lugar que ocupen pueden ser consumidores de primer orden (herbívoros), de segundo orden (carnívoros que se alimentan de herbívoros), de tercer orden (carnívoros de mayor tamaño), etc.

Los consumidores de segundo y tercer orden pueden ser predadores si capturan y luego matan a sus

presas para consumirlas, parásitos si las explotan pero no las matan, o carroñeros, si se alimentan de materia muerta o de cadáveres.

Según esto, dentro de las cadenas que comienzan por los vegetales pueden darse:

– *Cadenas de predadores*: Van desde los productores, pasando por los herbívoros, que a su vez son consumidos por los predadores (de primer orden, de segundo, etc.) carnívoros. En estas cadenas aumenta el tamaño del organismo según se avanza en la cadena.

– *Cadenas de parásitos*: Van desde los productores, seguidos de los parásitos como primeros consumidores. En estos casos el número de individuos aumenta, pero se reduce el tamaño a lo largo de la cadena.

- **Descomponedores**: Forman el final de la cadena trófica. Son fundamentalmente microorganismos que atacan a la materia muerta (vegetal o animal) en forma de cadáveres, excrementos o restos, y los van descomponiendo. Aseguran así el retorno progresivo de todos los elementos contenidos en la materia orgánica al mundo mineral.

b) *Cadenas alimentarias cuyo primer eslabón es la materia muerta.*

A los consumidores primarios que toman la materia muerta se les denomina detritívoros; suelen ser anima-

les pequeños o bacterias. Se inician en la materia orgánica primaria: Hojas, troncos muertos, cadáveres, etc.,

Son importantes en medios donde no llega la luz (profundidades del océano, medio cavernícola). Aquí, los aportes de materia orgánica provienen del exterior (excrementos de murciélagos, u otros habitantes de la cueva, aporte de agua con materia orgánica, etc.).

El nivel trófico es el número de etapas que separa a cada rango de alimentación del correspondiente a los productores primarios.

Dos organismos pertenecen al mismo nivel trófico cuando están separados del primer eslabón de la cadena alimentaria por el mismo número de etapas.

Un mismo organismo puede ocupar distintos niveles tróficos, no sólo en distintos ecosistemas, sino también en el mismo ecosistema (puede ser un omnívoro y alimentarse de hierba, o de un herbívoro, o de un carnívoro).

La forma de representación de la estructura trófica de un ecosistema es mediante las pirámides ecológicas. Son de tres tipos:

- *Pirámides de número de individuos*: No tienen demasiado valor descriptivo, al dar igual importancia a todos los organismos, sea cual sea su tamaño.

Representan el número de individuos por nivel trófico. Como el número de individuos suele decrecer desde el primer nivel trófico hasta

el último (por lo menos en la cadena de predadores), esta pirámide tendrá generalmente forma de triángulo, con la punta hacia arriba.

- *Pirámides de biomasa* (peso de los individuos): Representan la biomasa de los organismos por cada nivel trófico.

Tienen más interés que las anteriores, aunque se pueden hacer dos críticas. La primera es que conceden la misma importancia a los tejidos de todos los animales, que tienen sin embargo distinta composición química, y por tanto valores energéticos diferentes. En segundo lugar, no tienen en cuenta el factor tiempo, ya que las biomásas medidas han podido acumularse en varios días (por ejemplo fitoplácton) o en varios años (por ejemplo un bosque). Tienen forma de triángulo, con la punta en alto.

- *Pirámides de energía*: Es el modo de representación más correcto de las estructuras tróficas, pero la dificultad de conseguir datos necesarios hace difícil su construcción.

Cada nivel trófico está representado por un rectángulo, cuya longitud es proporcional a la cantidad de energía acumulada por unidad de tiempo y por unidad de volumen o de superficie en dicho nivel. Tienen siempre la forma de un triángulo con la punta hacia arriba, ya que de un nivel a otro se pierde energía.

50.2.2. Transferencia de energía a través de los diferentes niveles tróficos

Para los productores primarios la energía proviene de los rayos del Sol. Sólo una pequeña parte de la luz total recibida es absorbida por la clorofila; el resto no se utiliza.

Una parte de la energía absorbida se disipa en forma de calor, y el resto se utiliza en la síntesis de sustancias orgánicas y corresponde a la fotosíntesis bruta o productividad bruta. La productividad neta o fotosíntesis aparente, es la productividad bruta menos la respiración.

Una parte de esta productividad neta sirve de alimento a los herbívoros, así como una cierta cantidad de energía; otra parte de la productividad primaria neta no es utilizada y pasa a formar parte de la materia animal o vegetal que será descompuesta por acción de las bacterias, volviendo al suelo en forma de materia mineral, que podrá ser tomada de nuevo por las plantas. De la cantidad inicial de energía, una parte es utilizada o absorbida, mientras que otra parte es rechazada en forma de excrementos o residuos. La fracción asimilada es la suma de la productividad secundaria o productividad neta en el segundo nivel, y los gastos respiratorios de este segundo nivel.

Un razonamiento similar podría hacerse para el siguiente nivel (carnívoros, consumidores de segundo orden).

El flujo de energía a través de la biosfera se realiza mediante la energía

solar que incide sobre el planeta, que es de $2 \text{ cal/cm}^2/\text{min.}$, pero al atravesar la atmósfera se pierden por reflexión, absorción y difusión las tres cuartas partes de este flujo, incidiendo sobre la superficie de la Tierra y por tanto sobre los organismos fotosintéticos, unas $300.000 \text{ cal/m}^2/\text{hora}$. Entre la clorofila y el resto de los pigmentos se utiliza sólo una pequeña parte de esa radiación, limitada a las longitudes de onda correspondientes al rojo y al azul. Teniendo en cuenta esto, el rendimiento de la máquina fotosintética no suele ser superior al 1 %, considerando la relación entre el flujo de energía recibido por hoja y el utilizado en la fijación del CO_2 . De esta forma, a la vista de estas limitaciones, bastarían alrededor de 300 mg de clorofila/ m^2 para aprovechar eficazmente la radiación solar.

La productividad primaria de la biosfera depende del ecosistema considerado, y es función del tipo de comunidad existente, de la latitud, de la climatología, etc. En el medio terrestre las zonas productivas son las más cercanas al ecuador.

Un ecosistema no solamente necesita energía para desarrollar su actividad, sino también la necesita para manejar un conjunto de materiales que debe disponer, usar, almacenar y devolver al medio para asegurar su posterior utilización. Estos materiales son recursos agotables; por ello debe asegurarse una velocidad de reciclaje suficientemente alta, desde los productores primarios hasta los detritívoros, sin almacenar ni bloquear de forma definitiva los elementos impres-

cindibles. Estos elementos imprescindibles son unos 20 (C, O, N, H, P, Ca, S, K, etc.).

Los problemas de la interferencia humana aparecen cuando las líneas de contaminación, la atmosférica en primer lugar, se introducen al participar con sus aportes dañinos en la presencia de esos elementos.

50.3. CICLO DEL AGUA

El agua es un componente básico del medio, y como tal condiciona la vida.

Los seres vivos están constituidos en gran parte por agua (65% del peso del ser humano).

El agua aparece en la Naturaleza en sus tres estados, sólido, líquido y gaseoso, cumpliendo en cada uno de ellos su función dentro del equilibrio y de sus bioquímicos.

El agua utilizable por el hombre constituye un porcentaje muy pequeño sobre el total existente en la Tierra, pues el 97,4% pertenece a los océanos (agua salada) y el 2% corresponde al estado sólido (hielo) de los casquetes polares (que a su vez contienen el 77,2% del total de agua dulce existente en el mundo).

El agua sufre una serie de ciclos. Si los tomamos a partir de la humedad atmosférica formada por evaporación de las masas de agua superficiales (océanos, lagos, ríos), aquella se condensa en nubes que al enfriarse se convierten en precipitaciones.

De estas, la mayor parte cae sobre los océanos (el 78%), y el resto (22%) cae sobre los continentes.

Al alcanzar el suelo, el agua puede infiltrarse, puede discurrir sobre la superficie como escorrentía superficial, puede evaporarse o puede sufrir una evapotranspiración.

Cuando el agua se infiltra, se incorpora parcialmente al suelo o este lo almacena. Asimismo parte del agua infiltrada se incorpora a las aguas subterráneas y sirve de sustento a los acuíferos y a las fuentes.

La escorrentía surge cuando el suelo es poco permeable o cuando la precipitación es muy intensa y supera la capacidad de infiltración del suelo. En ese momento el agua comienza a acumularse en la superficie y a discurrir por gravedad por los puntos más bajos o por donde ceda más el suelo superficial, formando arroyuelos y arroyos y provocando en muchos casos fenómenos de erosión hídrica.

Parte del agua que alcanza el suelo se evapora pero si el suelo no está desnudo, la vegetación presente aumenta mucho el fenómeno al transpirar mediante su sistema foliar y al extraer las raíces el agua del suelo. La evapotranspiración (agua evaporada por el suelo sumada al agua transpirada por los vegetales) se convierte en muchos casos en un elemento clave en el ciclo del agua en el medio terrestre.

El agua que discurre por escorrentía o las aguas subterráneas que afloran, nutren a los ríos y a los océanos, comple-

tando el ciclo de evaporación la procedente de estas masas de agua, junto con la antes citada de la evaporación del suelo y de la evapotranspiración.

A continuación se muestra el ciclo del agua en la naturaleza.

El agua en su fase atmosférica puede arrastrar o disolver contaminantes gaseosos, líquidos o sólidos, cargándose de esta manera con productos nocivos que afectarán a los receptores terrestres: suelo, vegetación, fauna y aguas superficiales.

El caso típico es el de las lluvias ácidas, que se tratan detalladamente en el capítulo correspondiente, y que suponen una interferencia muy clara de la contaminación atmosférica en el ciclo del agua, si este elemento aporta por vía atmosférica acidez a las aguas superficiales.

50.4. CICLO DEL CARBONO

Este elemento es la base del proceso de fotosíntesis. Es extraído por los vegetales de su medio y transformado en biomasa propia, constituyendo el primer nivel de la cadena trófica.

El ciclo del carbono es principalmente un ciclo de CO_2 (carbono en forma gaseosa). Circula por la red trófica a bastante velocidad. El porcentaje de CO_2 en la atmósfera es del 0,03%, lo que es muy bajo, pero a pesar de ello es a expensas del C que los seres autótrofos (vegetales) pueden asegurar toda la producción primaria de los continentes.

Por una parte está relacionado con el ciclo del oxígeno, y por otra tiene que ver con las transferencias de energía que se realizan a través de moléculas orgánicas.

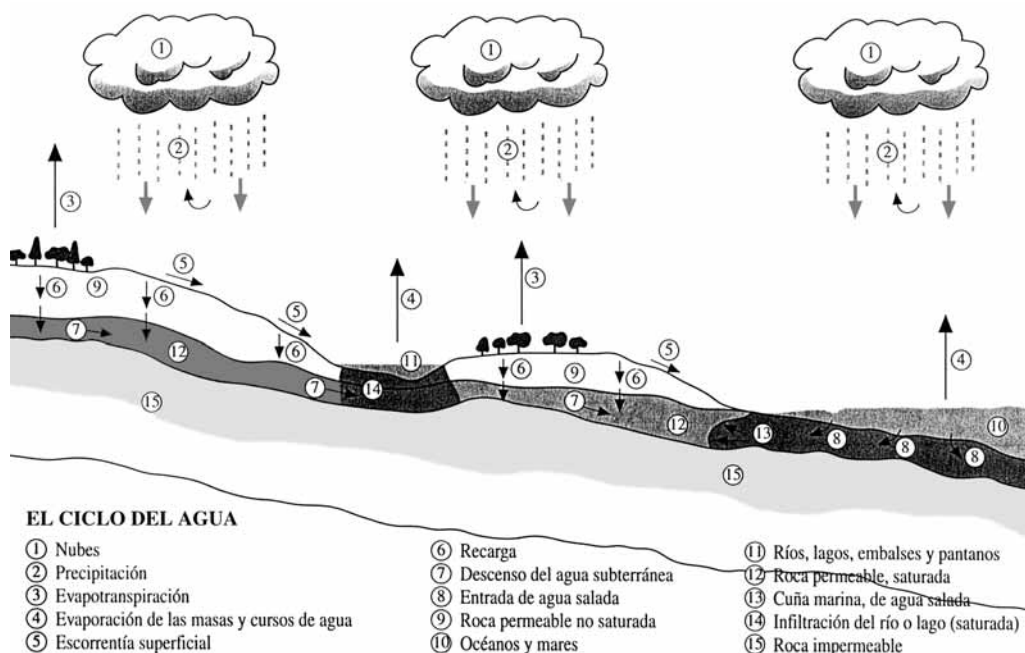
En esencia, el ciclo del carbono comienza por la absorción del CO_2 en el proceso de asimilación de las plantas (durante el día a través de la fotosíntesis), y vuelve a la atmósfera en el proceso de respiración. De la respiración es de donde se obtiene energía a partir de moléculas de hidratos de carbono.

Las reservas de carbono están constituidas por los carbonatos, principalmente por el CO_3Ca , por el CO_3Mg y por el CO_3Na de la hidrosfera y de la biosfera, por el CO_3Ca calcáreo de la litosfera y por los residuos orgánicos de los com-

bustibles fósiles (petróleo, gas natural, lignito, turba, hulla y antracita).

El ciclo del carbono se da de igual manera en los ecosistemas terrestres que en los acuáticos (en este caso el CO_2 se encuentra disuelto en agua). En el medio terrestre el ciclo puede hacerse más lento o bloquearse, si el carbono se acumula bajo formas sedimentarias, como pueden ser el carbón, el petróleo u otros hidrocarburos fósiles.

El hombre interviene en este ciclo y se sirve del carbono como combustible, consumiendo cada día grandes cantidades de materias fósiles; en las industrias se potencian los fenómenos de combustión que desprenden CO_2 a la atmósfera, y por último, cada día es más intensa la deforestación llevada a cabo por el hom-



bre, lo cual implica menor cantidad de organismos vegetales capaces de asimilar el CO_2 y transformarlo en oxígeno. Estos tres factores tienen las mismas consecuencias: el aumento del CO_2 en la atmósfera.

La erosión y el desgaste de los suelos son la forma de compensar la liberación del CO_2 por los ecosistemas acuáticos y el transporte a la atmósfera.

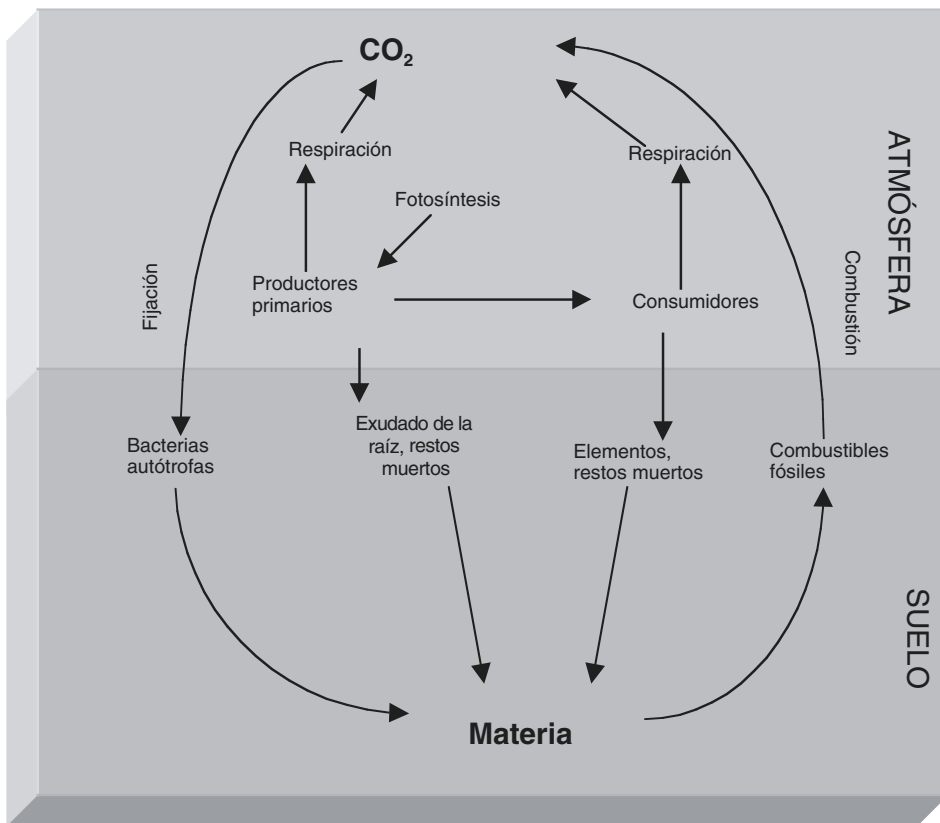
El CO_2 provoca el efecto invernadero (tratado en los capítulos correspondientes), pues este gas, químicamente estable, permite el paso de la radiación solar

de onda corta hacia la Tierra, pero detiene la salida de calor irradiado en medida proporcional a su concentración. Esto implica un aumento de la temperatura.

Los cambios sobre la Tierra están equilibrados en condiciones normales, aunque al abrigo del aire parte del carbono es liberado del ciclo (fossilización).

En resumen, el ciclo del carbono es la circulación de este elemento a través del suelo y su devolución a la atmósfera por los procesos respiratorios vegetales y animales, y por la combustión.

CICLO DEL CARBONO



50.5. CICLO DEL OXÍGENO

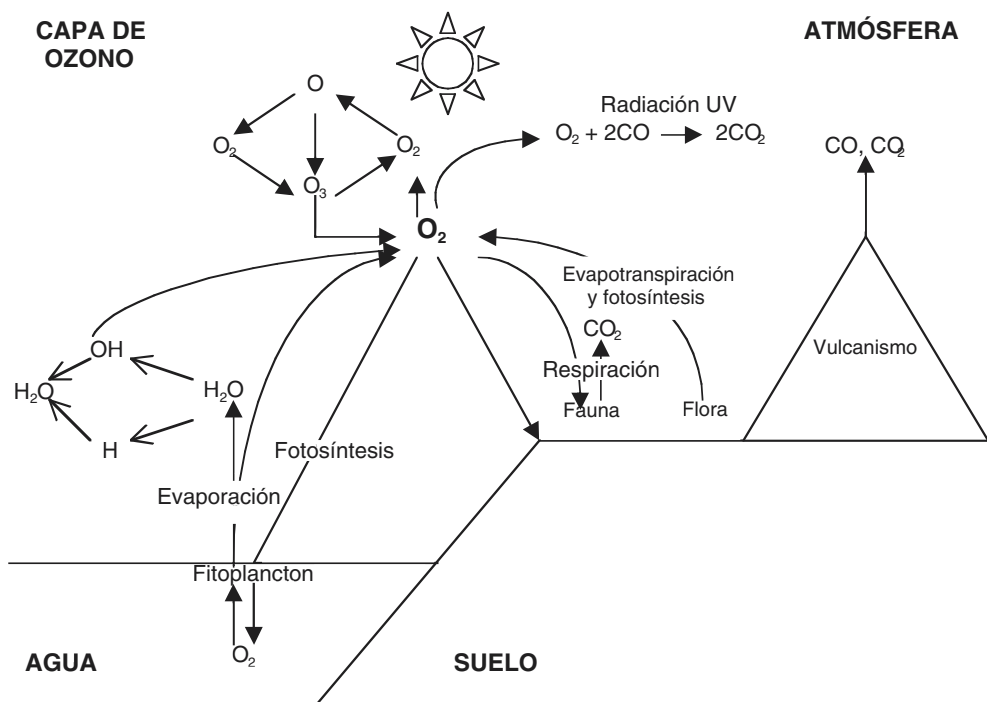
El O_2 es uno de los principales constituyentes de la materia viva. El oxígeno procede del aire, y su origen último es biológico, generándose como consecuencia de la fotosíntesis en los vegetales a través de la fotólisis de la molécula del agua (rotura de la molécula del agua por acción de la luz). El oxígeno del agua es liberado a la atmósfera bajo forma molecular (O_2) como consecuencia de la fotosíntesis llevada a cabo por los vegetales, que en presencia de luz fijan el CO_2 y liberan el O_2 , y, por oposición, este oxígeno se gasta a través de la respiración de los consumidores (heterótrofos). Esto ocurre tanto en los ecosiste-

mas acuáticos como en los terrestres.

El transporte de oxígeno en los ecosistemas se efectúa por la intersección de los ciclos del CO_2 y del agua. El oxígeno juega un papel determinante en los procesos de oxidación y reducción de todos los ciclos. El oxígeno molecular es consumido mediante la oxidación de moléculas orgánicas, sobre todo durante el proceso de la respiración, para la producción de energía en forma de ATP en las mitocondrias.

Se puede afirmar que el ciclo del oxígeno es la imagen inversa, en su mayor parte, del ciclo del carbono, y que por tanto la acción humana sobre uno desequilibrará al otro. Así, las combustiones

CICLO DEL OXÍGENO



y otros procesos que afectan al carbono, afectarán al oxígeno del aire.

Por otra parte, la contaminación atmosférica puede estabilizar algunos procesos de intercambio de gases, con la consiguiente perturbación en lo que corresponde al oxígeno.

50.6. CICLO DEL NITRÓGENO

Es bastante complejo y también bastante perfecto, porque a pesar de que intervienen gran número de organismos, es un ciclo muy rápido.

Aunque el nitrógeno se encuentra en un elevado porcentaje en la atmósfera (79%), la inmensa mayoría de los organismos son incapaces de utilizarlo directamente. Sólo un número restringido de ellos puede hacerlo: Son los fijadores de nitrógeno, entendiéndose por fijación del nitrógeno la incorporación del nitrógeno atmosférico a un componente químico utilizable por las plantas y por los animales. Este proceso implica un gasto elevado de energía.

La circulación del nitrógeno guarda cierta semejanza con la del carbono. Como el C, el nitrógeno atmosférico puede ser fijado directamente por bacterias y hongos; el contenido en el agua de lluvia y en las proteínas de los seres vivos, es devuelto al suelo excretado por la raíces y por los restos vegetales.

El nitrógeno es un componente de los aminoácidos, de las proteínas y como consecuencia, de los ácidos RNA y DNA (soporte químico de los genes), así

como de numerosas moléculas orgánicas y minerales.

Se suele encontrar en la forma de ion nitrato NO_3^{2-} , y penetra en los ecosistemas tomando dos caminos:

- Mediante la transformación fotoquímica del nitrógeno del aire en amoníaco y NO_x por radiación rica en energía, proceso en el que se producen unos 35 $\text{mg/m}^2/\text{año}$.
- Mediante la fijación del nitrógeno por bacterias, que producen unos 140 $\text{mg/m}^2/\text{año}$.

Estos dos procesos enriquecen el ciclo anualmente en un 6,5%, y esta puede ser la razón de la importancia ecológica del reciclaje de los compuestos nitrogenados provenientes de los residuos.

Son fijadores de nitrógeno bacterias como *Azotobacter*, *Clostridium*, *Desulfovibrio*, etc., y también algunas plantas como las leguminosas en simbiosis con bacterias del género *Rhizobium*.

Esquemáticamente el ciclo del nitrógeno se realiza de la siguiente forma: El nitrógeno atmosférico llega hasta las células de los microorganismos fijadores del nitrógeno; una vez fijado pasa al suelo o a las plantas, si éstas están en simbiosis con dichos microorganismos.

Todos ellos al morir devuelven el nitrógeno fijado al suelo.

Este nitrógeno puede seguir dos vías:

- Se recicla a través de una nueva generación de plantas y animales.

- Se rompe en nitrógeno elemental y es devuelto a la atmósfera.

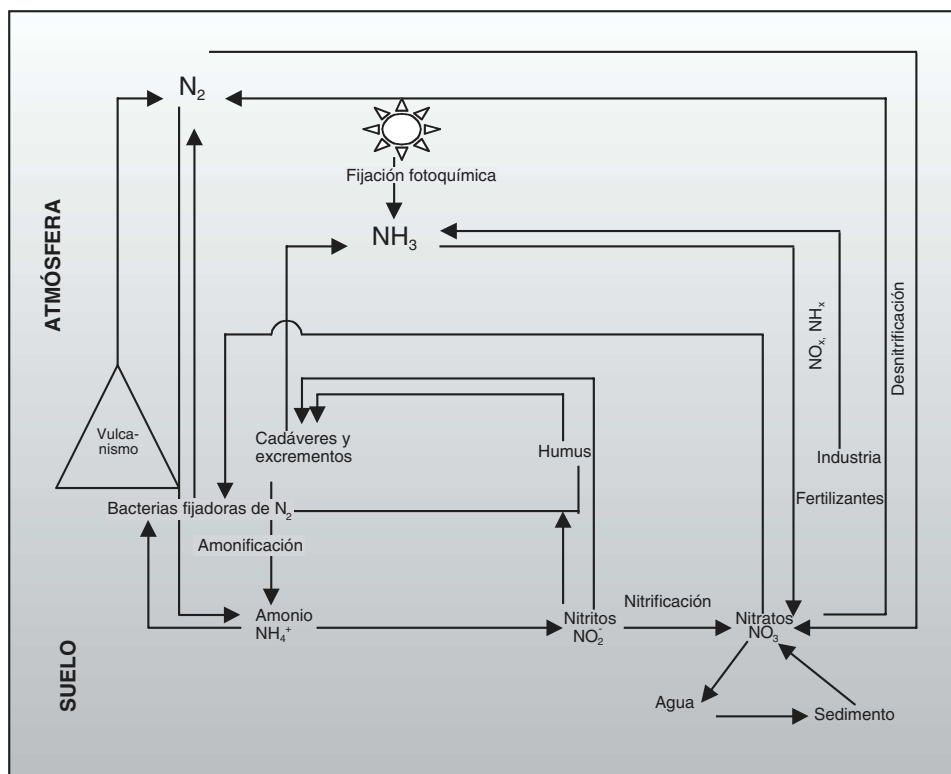
Este sistema de circulación es exactamente igual en medio terrestre que en el medio acuático.

El hombre también interviene en este ciclo y lo desequilibra a través de la fijación industrial del nitrógeno (síntesis de abonos y fertilizantes), y a través de cultivos intensivos de leguminosas, especies fijadoras de nitrógeno. De esta forma aumenta el porcentaje de nitrógeno fijado en perjuicio del nitrógeno atmosférico, aunque por el momento se desconocen las consecuencias de un desequilibrio prolongado de este tipo en nuestros ecosistemas.

El nitrógeno sufre una serie de transformaciones en el suelo:

- *Mineralización.* Paso de compuestos nitrogenados a forma mineral inorgánica.
- *Inmovilización.* Cuando existe una elevada relación C/N, los microorganismos utilizan todo el nitrógeno mineral existente en el suelo.
- *Nitrificación.* Conversión de sales amoniacales en nitritos, y por último en nitratos.

CICLO DEL NITRÓGENO



- *Desnitrificación*. Reducción de los nitratos a nitrógeno libre, gaseoso.

El hombre ha duplicado con su actividad la tasa de fijación de nitrógeno. En los próximos 30 años se espera un aumento de cuatro o cinco veces la tasa de fijación natural de este elemento.

50.7. CICLO DEL FÓSFORO

Es un ciclo sedimentario que carece totalmente de fase gaseosa, menos perfecto y más lento que los demás ciclos, pudiendo incluso producirse en él un estancamiento, permaneciendo el ciclo abierto.

Por otra parte, el fósforo es el elemento que más puede limitar el crecimiento de los ecosistemas.

El fósforo que podemos encontrar en el suelo se presenta en forma inorgánica (ion fosfato PO_4^{3-}), o como compuesto orgánico procedente de restos de animales y vegetales.

Su forma mineral es el ion fosfato PO_4^{3-} . Los fosfatos se separan de la roca madre y pasan a disposición de las plantas. Las principales fuentes de fósforo inorgánico son los depósitos minerales. Como consecuencia del lavado de estos depósitos por el agua de lluvia, el fósforo inorgánico se pone en circulación. Puede ser absorbido por las plantas, pasando posteriormente por los distintos niveles de consumidores animales. Los restos y cadáveres de plantas y animales serán mineralizados por bacterias, pudiendo ser de nuevo reuti-

lizado por los seres vivos, cerrándose así el ciclo.

El fósforo puede ser introducido en los ecosistemas acuáticos arrastrado por las aguas de lluvia o por los ríos. El esquema de utilización del fósforo en el agua será el mismo que el que corresponde al suelo (productores primarios, consumidores, etc.).

El ciclo endógeno del fósforo por parte de los seres vivos puede llegar a ser muy rápido: El fitoplancton absorbe el PO_4^{3-} en cinco minutos, y la restitución se hace en tres días por el zooplankton o en aguas libres.

Una parte del PO_4^{3-} queda en las plantas durante 15 ó 20 días a causa de su participación en ciclos internos.

El PO_4^{3-} juega un papel muy importante en el metabolismo energético de los seres vivos, durante el cual se transfiere un ion PO_4^{3-} sobre una molécula de ADP formándose una molécula de ATP, rica en energía y fácilmente transportable. Los organismos contienen grandes cantidades de PO_4^{3-} , constituyendo los ácidos nucleicos RNA y DNA y también aparece en las membranas como constituyente de los fosfolípidos.

El ciclo puede bloquearse si los restos de animales o vegetales sedimentan en el fondo marino, pues en ese caso el fósforo no puede recuperarse (excepto mediante movimientos orogénicos que transcurren a lo largo de miles y miles de años).

El flujo del fósforo hacia la tierra se realiza a través de los peces por la pesca,

o a través del consumo de peces por parte de las aves acuáticas. Sin embargo, este flujo es pequeño comparado con el aporte de fósforo a los ecosistemas acuáticos.

En lo que se refiere a su relación con la contaminación atmosférica, hemos de indicar que se verifica a través del agua de lluvia, que al precipitarse arrastra contaminantes hacia el suelo y después, además de efectuar los lavados (lixiviación) que hemos indicado, aporta esos contaminantes, que si son químicamente activos atacarán al P o a sus componentes y derivados, con la consiguiente alteración del ciclo.

50.8. CICLO DEL AZUFRE

Es otro ciclo sedimentario cuya mayor parte se realiza en el suelo o en el

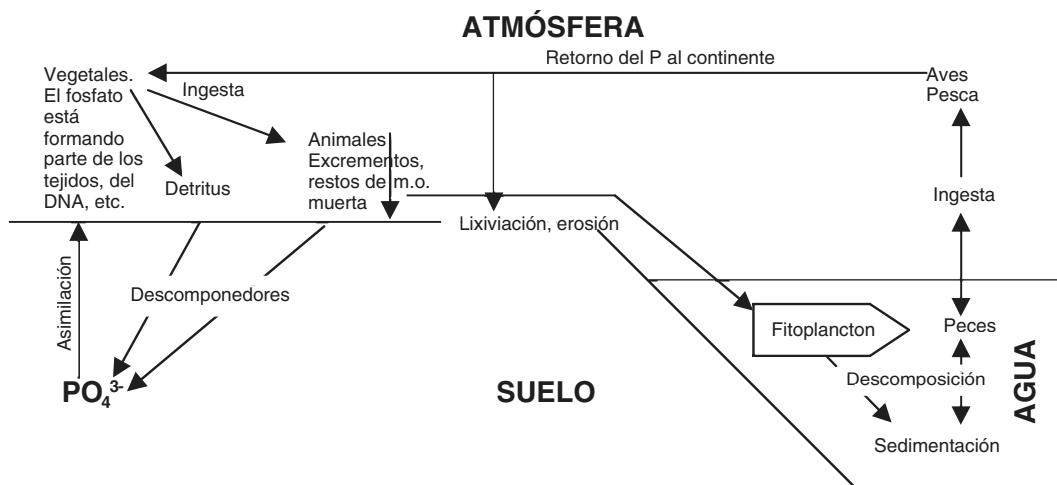
agua, aunque el azufre también existe en forma gaseosa, y hay que tener muy en cuenta los ingentes aportes de origen antrópico por emisiones a la atmósfera debidas a la combustión y a las actividades industriales.

La principal fuente de azufre son los sulfatos mineralizados, solubles en agua, que son absorbidos por las plantas y posteriormente por los animales.

Ambos grupos utilizan el azufre para elaborar sus proteínas, formando parte de los aminoácidos metionina y cisteina. Cuando mueren, la materia orgánica se mineraliza pasando de nuevo al suelo, y así comienza otra vez el ciclo.

El azufre y los enlaces sulfuros son importantes para el metabolismo de numerosos hongos y bacterias ya que, algunos, pueden introducir este elemento

CICLO DEL FÓSFORO



por oxidación en el metabolismo a partir de azufre elemental.

Los sulfatos son directamente absorbidos por las plantas a través de las raíces, transformando el azufre para formar aminoácidos azufrados o enlaces sulfhidrilo (R-SH).

La restitución del azufre se realiza mediante la intervención de la cadena alimentaria (consumidores, etc.) y por la liberación de los residuos descompuestos. Ese reciclado se produce, en gran parte, por bacterias y hongos (*Aspergillus*, *Neurospora*, etc.), que lo transforman en sulfato. En un medio anaerobio, los compuestos orgánicos azufrados son reducidos a sulfuros o a SH_2 por bacterias como *Escherichia* y *Proteus*. Las bacterias anaerobias reductoras del ion sulfato, como las *Desulfovibrio*, lo utilizan como captador de H^+ , lo mismo que hacen las bacterias desnitrificantes con los nitratos y con los nitritos. La reducción del sulfato que por regla general termina en azufre, pueden acabar en forma de sulfuro si intervienen *Aerobacter*. Las bacterias quimioautótrofas sacan la energía de la oxidación del azufre y de los sulfuros inorgánicos, y la utilizan para reducir el CO_2 a sustancias orgánicas.

La formación de sulfuro de hierro (mediante la combinación de H_2S y hierro, en medio anaerobio) es una ventaja para los sistemas ecológicos, ya que así se liberan fosfatos de hierro, activadores del crecimiento.

Ya se ha tratado en los capítulos correspondientes la importancia de los de-

rivados del azufre como contaminantes atmosféricos, y su participación en múltiples procesos medioambientales. El SO_2 , que en ciertas condiciones tiende a la acidificación, y el SH_2 que se origina en los pantanales o el vulcanismo, constituyen fuentes ingentes de azufre que se aporta a la atmósfera y que se agrega al ciclo del elemento, pudiéndolo perturbar en muchos casos con diversos niveles de peligrosidad.

50.9. CICLO DEL CALCIO

El ciclo del calcio es ciclo sedimentario, sin fase gaseosa.

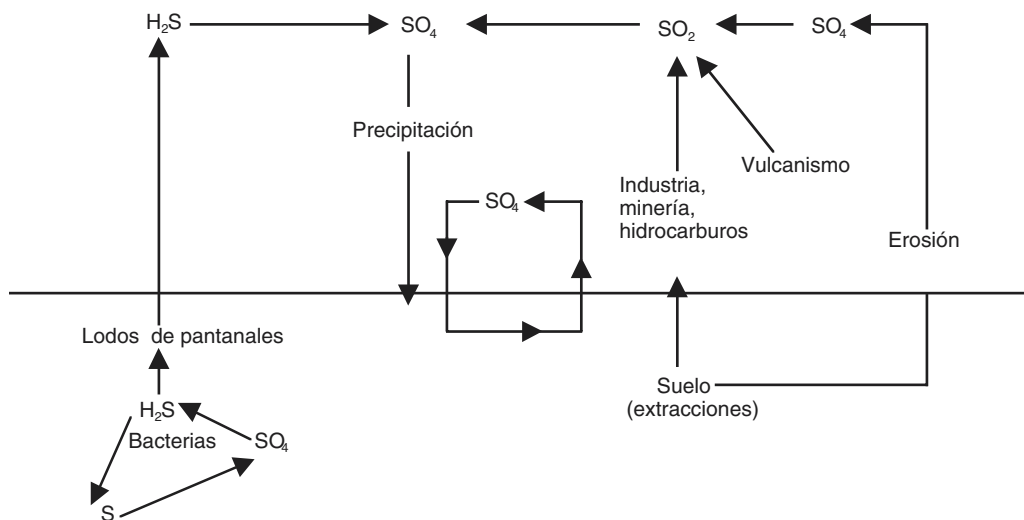
Se encuentra muy relacionado con los ciclos del fósforo y del carbono.

En la Tierra se acumulan unos 7×10^{15} millones de toneladas de calcio, de los cuales 10^{13} toneladas están en la materia viva y 6×10^8 se depositan anualmente como carbonato en los fondos oceánicos. Esta acumulación de material calcáreo no implica la falta de calcio ionizado en el agua de mar, lo que explica los depósitos de yeso en muchas lagunas litorales.

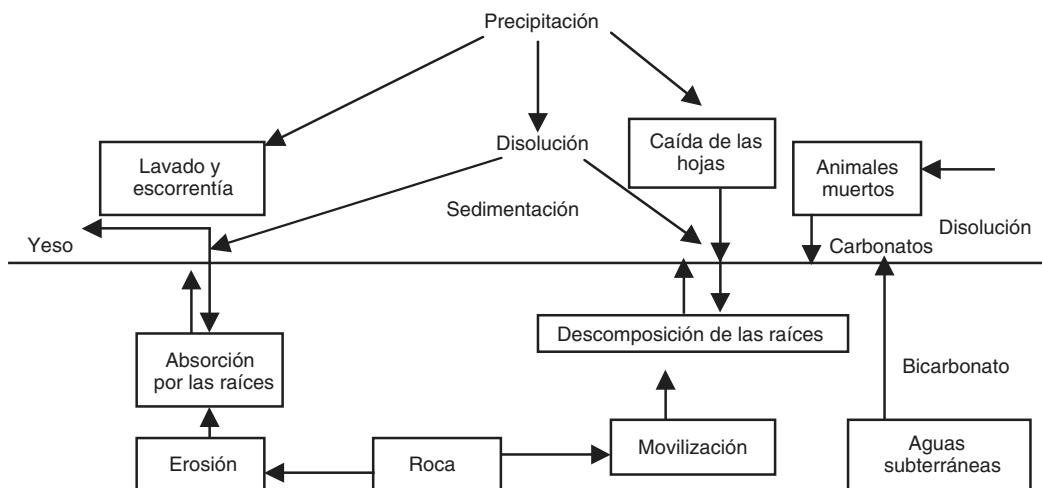
El calcio es desplazado de sus combinaciones con cierta facilidad por otros metales como Fe, Mg, Zn, Mn. El Fe y el Mn se oxidan y liberan CO_2 .

Cuando una precipitación aporta agua de lluvia cargada de CO_2 , el gas transforma el carbonato insoluble en bicarbonato muy soluble, con lo que se libera el Ca aparentemente bloqueado. Las aguas subterráneas suelen ser

CICLO DEL AZUFRE



CICLO DEL CALCIO



así ricas en bicarbonato cálcico, y cuando afloran transforman el compuesto a material insoluble, que se deposita.

El suelo calizo tiene su propia vegetación y unas características generales que todos conocemos.

la relación de este ciclo con la contaminación atmosférica estriba por una parte en el posible aumento del CO_2 aportado con el agua de lluvia como consecuencia de contaminación por ese gas y por otra, en el aporte de agentes que ataquen al calcio de los receptores del suelo y lleguen a sustituir total o parcialmente este ión.

CAPÍTULO 51

INTERACCIONES QUÍMICAS ENTRE LOS ORGANISMOS Y EL MEDIO Y SU RELACIÓN CON LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

51.1. LOS PRECURSORES Y LAS INTERACCIONES EN EL MEDIO

Así como en el mundo antiguo el aire, el agua, la tierra, el fuego, el mar, la vegetación y los animales constituían las bases del medio, la constancia escrita de sus interacciones no se manifestó con claridad hasta *Lavoisier*, quien en ciertas comunicaciones científicas en 1792 indicaba que «La fermentación, la putrefacción y la combustión devuelven a la atmósfera y al reino mineral los principios que los vegetales y los animales han extraído de ellos». Asimismo señalaba que la circulación entre los tres reinos se efectúa al actuar la Naturaleza mediante la putrefacción y la combustión para ceder al reino mineral las materias que ha extraído para formar los animales y los vegetales, y al actuar estos en sentido inverso.

Pasteur profundiza en estas relaciones, siendo así que la mayoría de los autores de las escuelas francesas y muchos

otros consideran a ambos químicos como los precursores de la Ecología.

Oparin hace hincapié en las interacciones entre los seres vivos y su medio exterior.

Actualmente se ha comprobado que las complejas interacciones químicas existentes entre los seres vivos y entre estos y su medio, si se analizan bien, pueden constituir una base de partida para desarrollar posibles sistemas de protección racional del medio ambiente. El uso de masas vegetales para limpiar la atmósfera urbana y otras actuaciones así lo demuestran; el reciclado y la recuperación de materiales de los residuos de las actividades antrópicas así lo requieren.

51.2. LAS INTERACCIONES DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA ECOLOGÍA QUÍMICA

Hace 30 años, diversos autores como *R.H. Whittaker* y *P.P. Fenny* propusieron una sistemática de las interacciones en-

tre los organismos, y establecieron una clasificación con una tímida referencia a los contaminantes.

En la tabla adjunta, con su clasificación, que hemos modificado mucho, hacemos especial énfasis en los contaminantes atmosféricos.

Las interacciones químicas entre las especies animales y vegetales, sobre to-

do en estas últimas, son muy complejas y selectivas, y, en todo caso, participan en las líneas generales del equilibrio general de la Naturaleza.

Al introducirse un contaminante en el medio, puede actuar como si fuera un agente de interacción más, de forma similar a la de cualquier producto metabólico excretado (como si fuera un residuo,

INTERACCIONES QUÍMICAS FUNDAMENTALES ENTRE LOS ORGANISMOS Y EL MEDIO, CON ESPECIAL REFERENCIA A LA INTERVENCIÓN ANTRÓPICA

Efectos químicos interespecíficos

Alomonas

Repulsivos

Ahuyentadores

Supresores

Venenos

Inductores

Antídotos

Atractivos

Kairomonas

Atractivos del alimento

Inductores estimuladores de la adaptación

Avisadores de peligro (contaminación atmosférica)

Avisadores de toxicidad (contaminación atmosférica)

Estimuladores

Residuos: alteran y afectan a sus receptores y el retorno (ciclo) afecta a los productores (contaminación atmosférica)

Contaminantes interespecíficos: los de origen antrópico afectan a la flora, a la fauna y al suelo

Efectos químicos intraespecíficos

Autotoxinas

Autoinhibidores de adaptación

Feromonas

Feromonas sexuales

Feromonas sociales

Feromonas de alarma (contaminación atmosférica)

Feromonas de defensa

Feromonas de delimitación de territorio

Feromonas de orientación

Contaminantes intraespecíficos: afectan directamente al hombre, como la contaminación atmosférica, la de las aguas o la de los alimentos.

como indica *M.Barbier*), y podrá actuar negativamente sobre unas especies, positivamente sobre otras o de modo indiferente, y lo mismo puede ocurrir con sus efectos sobre el medio ambiente restante, es decir, sobre el aire, sobre el suelo, o sobre el agua; todo ello dependerá del tipo de contaminante de que se trate, de su forma de circulación en el medio, de la intensidad de esa circulación y de la capacidad de ese medio de minimizar las perturbaciones que le pueda causar.

Conocidas son por todos las interacciones mineral-vegetal, mineral-animal a través de los vegetales, o mineral-mineral presentes en la Naturaleza.

Cada complejo *gestiona* los productos y los elementos presentes, y los trata independientemente de que sean naturales o bien agentes contaminantes añadidos; en todo caso, los contaminantes perturbarán el funcionamiento y el equilibrio de los ciclos al tratarse de sustancias extrañas, como hemos indicado en el capítulo anterior.

Así, los vegetales toman y retienen numerosos elementos del aire, aunque algunos de ellos estén presentes en cantidades excesivas (por causas naturales o por contaminación). Esa retención y acumulación podrá alcanzar dosis que al superar el umbral de resistencia de la especie en general y de cada individuo en particular, provocarán daños de mayor o menor entidad que serán función de numerosos factores, entre los que destacan la capacidad agresiva del contaminante, la resistencia de la especie a esta y su capacidad de acumulación.

Los animales actúan de forma similar pero muchísimo más atenuada, ya que, en general, son muy sensibles a cualquier presencia excesiva de ciertas materias (la fluorosis de los mamíferos, el saturnismo, etc., son casos típicos).

El suelo, al contrario y al otro extremo de los animales, tiene una capacidad de resistencia muy superior a la de los vegetales. Puede retener y acumular *de todo*, como inmisiones, depósitos secos, depósitos húmedos, lluvias ácidas, etc., hasta niveles que modifiquen tanto sus características iniciales que lo conviertan en *algo* ajeno a lo que existía antes del aporte de esas materias (por falta de seres vivos que lo transformen de forma natural en la superficie, por alteraciones en la textura, en la estructura o en la permeabilidad, por transformaciones en sus reacciones químicas a causa de una actividad intensa y extraña de intercambio iónico, etc., etc.).

El agua también actúa: como agente de muchos ciclos, como actor al ser el mejor disolvente que existe, o como medio de retención y de transformación de muchos materiales (el agua de lluvia con contaminantes ácidos, por ejemplo).

Al final, todo se reduce a una serie de múltiples interacciones químicas dentro de un numerosísimo grupo de ciclos de elementos interrelacionados y a la búsqueda de un equilibrio, aspecto este último que los contaminantes interfieren a través de las interacciones químicas en que participan o, en algunos casos, por su simple presencia directa, como ocurre con algunos contaminantes atmosféricos inertes.

CAPÍTULO 52

EL RECICLADO MAR-AIRE DEL CO₂, EL CO₂ EN EL MAR Y EL SECUESTRO DEL CARBONO

52.1. EL RECICLADO EN EL MAR

En anteriores capítulos hemos visto los ciclos de la Naturaleza, y la circulación general de las moléculas entre los seres vivos y entre estos y el mundo mineral.

Los ciclos citados del C, N, P, etc., se basan en las entradas, salidas e intercambios entre los elementos.

Así, el nivel del CO₂ atmosférico se mantiene constante mediante el tampón constituido por el sistema carbonato cálcico-bicarbonato cálcico-anhídrido carbónico.

El CO₂ se aporta a la atmósfera básicamente mediante las combustiones, y sobre todo mediante la respiración. La extracción del CO₂ y el aporte de O₂ se realiza mediante la fotosíntesis, cuya máxima actividad corresponde al fitoplancton del mar en el orden de un 85-90%.

Ese ciclo, como muchos otros, se ve alterado por el hombre.

Los residuos ricos en nitrógeno aportados por los ríos y procedentes de actividades antrópicas, acaban provocando eutrofizaciones en zonas donde se acumulen.

En el medio marino los seres vivos establecen sus cadenas tróficas, en las que es frecuente que se vayan acumulando diversos contaminantes. Son los casos típicos de los metales pesados o de los plaguicidas organoclorados.

Al final de estas cadenas tróficas el hombre actúa como último eslabón en muchos casos, al igual que la avifauna marina. Así, tanto el hombre como esta avifauna actúan como eslabones de cadenas del ciclo-reciclado de elementos naturales, que al estar concentrados pasan a ser materias contaminantes, que por sus características se convierten en productos tóxicos.

Cuando aparece un derrame de petróleo en el mar a causa de un accidente en el transporte o por pérdidas en sondeos y perforaciones, el medio actúa

tratando de minimizar el daño, destruyendo el agente causante o transformándolo y reciclándolo, incorporándolo por esta vía a diversos componentes de sus ciclos metabólicos. En este caso actúan así la evaporación a la atmósfera, la dispersión que realiza la dinámica marina de olas y mareas, la oxidación y la destrucción y consumo que efectúan las bacterias.

52.2. EL SECUESTRO DE CARBONO

A partir de 1995 se empezó a investigar sobre el exceso de CO₂ en el aire por aporte de los países industrializados, y a buscar vías de eliminación, de uso o de almacenamiento del gas.

En EEUU se están ultimando diversas investigaciones al respecto, y algunos países europeos ya tienen alguna instalación operativa.

Se trata, en estas líneas, de capturar, de almacenar y de reciclar, si es posible, el gas.

En principio, el CO₂ producido por las industrias deberá ser capturado para ser almacenado posteriormente.

El almacenamiento puede realizarse inyectando el CO₂ en yacimientos de carbón agotados, en yacimientos petrolíferos o en depósitos salinos.

Otra posibilidad es la captura y el uso posterior.

El reciclado se basa no solo en el uso, sino en la inyección en el mar.

La inyección en yacimientos petrolíferos es una práctica bastante común en los procesos de extracción de crudo y de gas. Simplemente se trataría de ampliar esta práctica.

La inyección en yacimientos de carbón es otra posibilidad en estudio.

La inyección en depósitos salinos es una vía que se está utilizando en algunos países europeos, aunque existe algún peligro de que pueda provocar perturbaciones al medio ambiente si por alguna circunstancia el gas escapa del depósito y emigra hacia la superficie, contaminando las aguas, el suelo y la vegetación que encuentre a su paso.

Por lo que se refiere a las aguas marinas, las posibilidades que se plantean de momento son:

- Disolución, por inyección del gas en el mar a través de un emisario.
- Dispersión, por descarga de CO₂ licuado en alta mar.
- Aislamiento, formando masas (lagos) de CO₂ en aguas profundas.
- Inyección en el subsuelo marino.
- Inyección en acuíferos del subsuelo marino.

El problema es, en estos casos, económico por los costos que suponen estos procedimientos, y medioambiental, pues toda alteración de un medio (el mar) conlleva alteraciones y reacciones del receptor previstas y no previstas, con lo que los impactos potenciales de todo tipo que hemos citado en capítulos anteriores tendrían aquí todo su apo-

geo. No es suficiente saber que el mar absorbe y aporta grandes cantidades de CO_2 a la atmósfera; pensar que añadiendo CO_2 el gas se incorporará al ciclo natural, es proceder exactamente lo mismo que se ha hecho en la situación del SO_2 , del ozono o de los NO_x , pero a otra escala superior, y vemos donde hemos llegado.

Una última posibilidad es reciclar el CO_2 a productos de consumo, que en algún caso podría tener resultado, aunque las ingentes cantidades del gas que se emiten anualmente no permitirían que esta vía resolviera el problema por sí sola.

CAPÍTULO 53

ACIDIFICACIÓN DE LA ATMÓSFERA Y DEL MEDIO

53.1. ACIDIFICACIÓN AMBIENTAL

53.1.1. Ácidos y precipitaciones

Entendemos por *ácido* aquella sustancia que cuando se disuelve en agua se disocia en protones (H⁺). La acidez de las sustancias disueltas en agua se suele medir en términos de *pH*, que es el logaritmo negativo de la concentración de protones. Las soluciones con pH inferior a 7 son consideradas ácidas, mientras que las que superan dicho valor son básicas o alcalinas.

Para desarrollar este apartado, se podría comenzar distinguiendo dos términos: Por un lado, *el depósito ácido*, que consiste básicamente en el establecimiento de compuestos acidificantes en forma seca o húmeda sobre la superficie terrestre procedentes de la atmósfera, y por otra parte, *la precipitación o lluvia ácida*, que se refiere únicamente a pro-

cesos asociados con la fase acuosa, como la lluvia, la niebla, la nieve o el vapor de agua.

Las precipitaciones poseen normalmente un pH comprendido entre 5,0 y 5,6, como consecuencia de la interacción entre el agua procedente de la evaporación de la superficie terrestre y la de la evapotranspiración de las plantas, con el CO₂ atmosférico, cuya concentración media es de 330 ppm. Son consideradas como ácidas cuando alcanzan un valor de pH inferior a 5,6.

Las emisiones de NO_x y SO₂ procedentes de las plantas industriales y las de NH₃ procedentes de la ganadería pueden ser transportadas a largas distancias antes de transformarse en sus correspondientes ácidos (H₂SO₄ y HNO_x).

Por otra parte, hemos de indicar que existen zonas que debido a la composición química de sus sustratos geológicos, son más vulnerables a precipitaciones que contengan sustancias químicas capaces de alterar su pH, ya que poseen

una menor capacidad tampón. Esto ocurre con cierta frecuencia en algunas áreas de los países del norte de Europa y de Canadá.

53.1.2. Los depósitos ácidos: Formación

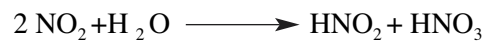
El depósito ácido, que es originado principalmente como consecuencia de las emisiones de SO_2 , de NO_x y de NH_3 , y de su paso y posible transformación en la atmósfera, puede ser el resultado de varios procesos:

- Actuación de contaminantes secundarios (HNO_3 y H_2SO_4) formados a partir de procesos de oxidación y disolución de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y/o dióxido de azufre (SO_2), que son liberados a la atmósfera. Dichos procesos se desarrollan durante un período de tiempo tal, que en muchas ocasiones éstos contaminantes, dependiendo de las condiciones meteorológicas, se desplazan cientos de kilómetros desde la fuente de la que proceden, actuando sobre lugares muy alejados de la misma. Si esto ocurre entre varios países, como es frecuente en Europa, estamos ante la denominada *contaminación atmosférica transfronteriza*, ya que los impactos producidos por estas sustancias se pueden localizar en algunos casos en países que no sean los emisores.
- También se pueden producir procesos de acidificación cuando los contaminantes emitidos (SO_2 , NO_x y NH_3) se fijan directamente sobre la

superficie terrestre e interaccionan con la fase líquida.

- En algunas ocasiones, el ácido clorhídrico es emitido a la atmósfera y se crea así directamente el medio ácido.

En los dos primeros casos, la formación de la fase ácida se suele producir siguiendo las reacciones que a continuación se detallan:



Así pues, podemos distinguir dos tipos de depósito:

- Seco*: El viento desplaza los gases y las partículas hasta que son depositados sobre distintos elementos de la superficie terrestre, sin precipitaciones hídricas.
- Húmedo*: En forma de lluvia, nieve o niebla.

Aunque la acidificación de los ecosistemas se realiza mediante el depósito seco o húmedo de estos ácidos, también el depósito de los precursores y oxidantes puede dar lugar a reacciones de acidificación, tanto en los ecosistemas terrestres como en los acuáticos .

53.1.3. Origen de las sustancias que generan los depósitos ácidos

Entre las principales *fuentes antrópicas de SO_2* se pueden indicar los proce-

de purificación de metales (Zn, Ni, Cu) y los de la combustión del carbón (como el procedente de España, que en general contiene un elevado porcentaje de azufre). Entre las *fuentes naturales*, destacan las procedentes de la descomposición de la materia orgánica y las erupciones volcánicas.

Las fuentes de NO_x originadas como consecuencia de las actividades humanas son fundamentalmente las procedentes de la combustión del petróleo, del gas y del carbón. Las bacterias edáficas, los fuegos y la acción volcánica son sus fuentes naturales más destacadas.

Las fuentes de NH_3 son principalmente las excretas ganaderas, al fermentar con biomasa vegetal (estiércol, etc.).

53.1.4. Las emisiones y el proceso de acidificación

La oxidación de los óxidos de azufre y de nitrógeno, así como la de los compuestos orgánicos, se realiza principalmente mediante H_2O_2 , ozono y peróxidos orgánicos, dando lugar a sus correspondientes ácidos. Dicho proceso depende por tanto de la producción de radicales libres oxidantes, que reaccionan directamente con estos compuestos o que generan los oxidantes moleculares anteriormente mencionados, la mayoría de los cuales solo son altamente reactivos si están en fase acuosa con reductores disueltos, como el SO_2 y el HNO_2 .

Los oxidantes moleculares se generan en una región fotoquímicamente activa, siendo transportados a lo largo de

grandes distancias antes de reaccionar con los reductores disueltos en nubes, nieblas o lluvias, que constituyen la fase acuosa.

Por tanto, las emisiones de compuestos que actúan como reductores (SO_2 , NO_x y COV) determinan la producción de compuestos acidificantes, como el H_2SO_4 y el HNO_3 , lo que significa que una reducción de las emisiones antrópicas de gases como el SO_2 , se traduciría en una disminución de la producción de H_2SO_4 .

53.1.5. Efectos de los depósitos ácidos

Los efectos a que pueden dar lugar dependen de muchos factores, como por ejemplo la acidez del agua, la capacidad tamponadora del suelo, y las características de las especies sobre las que interaccionen.

Los más significativos son:

- La defoliación, que afecta a muchos bosques de las regiones centroeuropeas.
- En los ecosistemas acuáticos, las alteraciones por variación de sus parámetros habituales y por el efecto tóxico de dichos depósitos, que se traduce en una disminución de la cantidad y diversidad de las poblaciones existentes en ellos.
- En los suelos, el efecto acidificante conduce a un empobrecimiento debido a la pérdida de elementos minerales, y una más rápida degradación de éstos. Para la determinación de la acidificación del suelo existen varios

modelos que incluyen una valoración de los parámetros y de los procesos, como son la meteorización de cationes básicos, la absorción neta de nitrógeno y cationes básicos, la disolución del aluminio o la lixiviación de elementos a partir de la zona radicular. Otros, más elaborados, incluyen también procesos de intercambio catiónico, ciclos de nutrientes, etc.

Sin embargo, éstos modelos han sido desarrollados para zonas del norte de Europa, y muchas veces no son válidos para zonas mediterráneas.

53.2. FACTORES METEOROLÓGICOS INCIDENTES SOBRE LOS DEPÓSITOS ÁCIDOS

Tal como se ha indicado anteriormente, diversas reacciones atmosféricas pueden dar lugar a la variación del pH que origina el depósito ácido. Por tanto, los parámetros meteorológicos tienen gran importancia en la composición química de la atmósfera y de la precipitación.

La radiación solar provoca un incremento en la formación de radicales libres, lo que se traduce en un aumento en la oxidación de los compuestos anteriormente mencionados, que dará lugar a los compuestos ácidos.

Resulta importante volver a considerar que los vientos y las masas de aire pueden transportar las sustancias contaminantes a lo largo de grandes distancias, por lo que se van enriqueciendo con variados compuestos.

Se pueden establecer varias relaciones entre los efectos de la composición química de la lluvia, con otros factores como las estaciones y el tipo de precipitación. En el primer caso, y con relación al primer punto expuesto de este apartado, los meses de verano darán lugar a más episodios de acidificación debido a la radiación solar. Esta acidez tendrá, además, un efecto muy significativo sobre las especies vegetales durante su período de máximo crecimiento.

Por otra parte, también se ha observado que el depósito de sulfatos es más frecuente en la mayor parte de los tipos de precipitación, exceptuando los episodios de nieve, en los que predomina el depósito de nitratos. También destacan, entre las precipitaciones húmedas, los episodios de niebla, y especialmente en zonas con gran cantidad de emisiones contaminantes, como ocurre en los centros urbanos e industriales.

Existen por tanto numerosos factores que influyen en el proceso de acidificación, y es por eso por lo que hasta el momento no se dispone de modelos que permitan integrar la totalidad de todos ellos.

53.3. INDICADORES AMBIENTALES DE EUROSTAT SOBRE LA ACIDIFICACIÓN DE LA ATMÓSFERA Y DEL MEDIO

La Oficina de Estadística de la Comisión Europea (Eurostat) publicó en 1997 la tercera edición de estadísticas am-

bientales de la UE, de las que muchas de ellas pueden ser utilizadas como indicadores ambientales.

También está recogiendo datos a nivel regional que permitan proporcionar a la Comisión la información necesaria para el desarrollo de determinados proyectos en estos sectores.

La Comisión Europea propuso desarrollar un sistema que permita acceder a información de carácter económico-ambiental. Debido al importante apoyo brindado por parte del Parlamento Europeo y del Consejo de Ministros de Medio Ambiente, se ha desarrollado un proyecto sobre *Índices de Presión Ambiental*, en una colaboración de la Eurostat con la Dirección General XI y la AEMA.

Los Indicadores de Presión de Eurostat relativos a la acidificación incluidos dentro de los atmosféricos, son los siguientes:

- Emisiones de NO_x de todas las actividades económicas
- Emisiones de COV de todas las actividades económicas
- Emisiones de SO₂ de todas las actividades económicas
- Emisiones de partículas en suspensión de todas las actividades económicas
- Consumo de gasolina y diesel por vehículos rodados
- Consumo de energía primaria
- Emisiones de NH₃
- Consumo de electricidad

- Consumo anual de carbón y de productos derivados del petróleo
- Emisiones de CO de todas las actividades económicas

Debemos destacar que existen limitaciones importantes derivadas principalmente de la calidad y contrastabilidad de las estadísticas.

53.4. INDICADORES AMBIENTALES DE LA AEMA SOBRE LA ACIDIFICACIÓN DE LA ATMÓSFERA Y DEL MEDIO

La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) realiza desde 1995 informes periódicos sobre el estado medioambiental de la Unión. Debido a la complejidad de la mayor parte de los principales problemas medioambientales, originada por las numerosas interrelaciones (ecológicas y antrópicas) implicadas en ellos, su último informe se presenta dividido en grandes temas ambientales, de manera que se pueda trasladar a los distintos agentes interesados el efecto que tienen sobre el medio ambiente las distintas acciones antrópicas, explicando la dinámica, mecanismos, relaciones causa-efecto, etc. Entre las grandes cuestiones discutidas, se encuentra la acidificación.

Los sistemas de indicadores ambientales proporcionan una información real sobre la que puedan fundamentarse las decisiones políticas en materia medioambiental, permitiendo

asimismo realizar un seguimiento de la evolución de las variables ambientales consideradas.

Los criterios de selección de indicadores más utilizados en el ámbito internacional, son los establecidos por la OCDE, y son también utilizados por la AEMA. La estructura del sistema propuesto fue la de causalidad:

- *Actividades humanas* → *Ecosistemas*
- *Percepción del problema.*
- *Formulación de una política medioambiental.*
- *Actuación sobre las actividades antrópicas.*
- *Seguimiento y evaluación de la efectividad de las mismas.*

Por tanto, el sistema de indicadores busca la consecución de una información que permita exponer la evolución de la situación ambiental, que sirva de base para decidir las directrices necesarias a seguir en política ambiental, y para realizar un seguimiento de la eficacia de las medidas adoptadas.

En el caso concreto que nos interesa, la acidificación, el marco de análisis apropiado es el temático, es decir, necesitamos un sistema de indicadores que se estructuren en base a este problema concreto.

Los indicadores propuestos por la AEMA para la acidificación son los siguientes:

- Emisiones de SO₂ (totales y por sector).

- Emisiones de NO_x (totales y por sector).
- Emisiones de NH₃ (totales y por sector).
- Contribución del sector producción de energía, transporte e industria a las emisiones totales acidificantes.
- Tasa de corrosión de cobre y bronce.
- Daños en bosques.
- Acidificación de lagos.
- Superación de las cargas críticas para la acidez.
- Depósito de sustancias acidificantes.
- pH, [SO₄] y [NO₃] en precipitación.
- Mercancías y pasajeros por tipo de transporte modal.
- Automóviles per cápita.
- Redes de transporte (carretera y ferrocarril) y densidad de tráfico.
- Precios por modo de transporte.
- Consumo de combustible.

53.5. SISTEMA ESPAÑOL DE INDICADORES AMBIENTALES DE LA ACIDIFICACIÓN DE LA ATMÓSFERA Y DEL MEDIO

La ley de Protección del Ambiente Atmosférico de 1972, tiene como objetivo fundamental fomentar la prevención y el control de la contaminación atmosférica. Entre sus medidas se incluyen normas de emisión de determinados

contaminantes, como los NO_x y el SO_2 , para determinadas actividades.

A partir de ésta fecha, en el marco de la UE se han desarrollado y ampliado muchas normas relacionadas con la protección del ambiente atmosférico, que se han ido incorporando paulatinamente a la normativa española a través de Reales Decretos.

Para la elaboración del sistema español de indicadores ambientales se estudiaron los establecidos a nivel internacional, y los que tradicionalmente se han utilizado en España. Se aplicó para ello la misma base de causalidad explicada anteriormente para la AEMA, dando lugar a un sistema dividido en cuatro áreas fundamentales:

- Atmósfera
- Residuos
- Medio urbano
- Recursos naturales: Se subdivide en varias áreas para enfatizar su importancia:
 - Suelo
 - Agua
 - Bosques
 - Biodiversidad
 - Costas
 - Medio marino

El estudio de este sistema de indicadores se basa principalmente en el desarrollo de indicadores de estado, ya que se busca información que refleje la situación en la que se encuentra el área analizada.

Se calculan los indicadores en base a las series estadísticas disponibles.

El caso concreto de la acidificación puede incluirse dentro del área de atmósfera. Para éste área se han seguido los siguientes pasos:

- Análisis de los indicadores ambientales desarrollados por la OCDE, la AEMA y la Eurostat.
- Constituir la base de la propuesta a partir de los objetivos fundamentales establecidos en la política ambiental de la UE y España. Dentro del análisis se han utilizado indicadores de estado, de presión y de respuesta. En este paso resulta relevante la existencia de datos representativos que permiten observar tendencias de los mismos. En todo caso, se ha perseguido que la información obtenida mediante este sistema de indicadores sea de comprensión fácil y directa, lo que se ha traducido en una reducción o simplificación de la cantidad de indicadores seleccionados.
- También se solicita la colaboración de un conjunto de expertos que aporten su visión de los temas tratados.
- Búsqueda de información estadística y cálculo de indicadores.

Los *indicadores propuestos para la acidificación* fueron los siguientes:

- *Indicador de estado:* pH en precipitación.
- *Indicador de presión :* emisiones de SO_2 y de NO_2 .
- *Indicador de respuesta:*

- Capacidad de tratamiento en fuentes fijas.
- Parque de vehículos con catalizador.

53.6. ACIDIFICACIÓN Y CONTAMINACIÓN DEL SUELO

53.6.1. Bases generales

Los contaminantes atmosféricos son de diferentes tipos, aislados o en mezcla. Las reacciones químicas de los contaminantes que se depositan en el medio junto con los componentes de éste, tanto en el medio acuático como en el medio terrestre, son de muchos tipos, y pueden constituir elementos o compuestos de toxicidad variable para los organismos vivos. Pueden perturbar a la vegetación de manera más o menos intensa, y pueden aparecer en el suelo de forma directa o indirecta, como ocurre, por ejemplo, con los depósitos ácidos o con la presencia de metales pesados. Además, hay que tener en cuenta que pueden existir dificultades al analizar los efectos directos o indirectos de los contaminantes atmosféricos sobre el suelo, puesto que las interrelaciones son muy intensas.

53.6.2. Cambios en la actividad del suelo debidos a las inmisiones de derivados del azufre y de derivados del nitrógeno

Es natural, ante las características de los componentes de los derivados del azufre y del nitrógeno, que existan cam-

bios en la acidez del suelo debidos a las perturbaciones y alteraciones que provocan en el medio, como por ejemplo:

- Las precipitaciones en las zonas industrializadas son muy ácidas con frecuencia, debido a la combustión de diferentes productos.
- Los depósitos secos de los derivados del azufre en el suelo y sobre la vegetación provocan un aumento en la acidez de los ecosistemas.
- A partir de los años 50 en muchas masas de agua de Inglaterra, Suecia, Noruega o Finlandia se encontraron disminuciones en el pH, es decir, un aumento de la acidez, y en muchos casos se observó que esta acidez era debida a la presencia de ácido sulfúrico.
- La acidez en los lagos ha sido comprobada también en Sudbury (Ontario, Canada), y en otros muchos lagos de las zonas que citamos en el norte y centro de Europa.
- El pH de los ríos y de los lagos de las regiones del norte de Europa se observa que está en relación con los depósitos ácidos del invierno, debidos al arrastre de la lluvia, y al suelo por aumento de la acidez de éste.
- Se ha observado también en estas zonas que, a partir de 1925, es decir, en estos últimos ochenta años, los valores del pH han ido descendiendo en los horizontes A, B, y C del suelo, más o menos hasta unos 70 cm. de profundidad, a medida que ha ido pasando el tiempo.

53.6.3. Efectos de la acidificación del suelo en los procesos biológicos

El equilibrio ácido base del suelo como sustrato para el crecimiento de la vegetación y como medio para el desarrollo de microorganismos y animales del suelo, es un factor ambiental de primer orden.

Ya sabemos las preferencias de diferentes especies vegetales por suelos ácidos, neutros o alcalinos, y no vamos a insistir sobre el tema. En general, los suelos fuertemente ácidos son menos productivos que los suavemente ácidos o los que son más o menos neutros comparándolos con lugares de condiciones similares.

Parece ser que una acidificación inicial aumenta la productividad, y esto es un efecto momentáneo que luego, a medio o a largo plazo, provoca una pérdida de productividad como consecuencia de esa misma acidificación. Esto puede ser debido a una pérdida de competitividad para el nitrógeno disponible en el suelo, cosa que se ha demostrado en laboratorio.

Aparentemente, la actividad total de los organismos del suelo disminuye, pero en un camino selectivo en el que la descomposición de las proteínas y la mineralización del nitrógeno están menos afectadas que la inmovilización de ese nitrógeno, que está muy relacionado con el crecimiento.

52.6.4. Efectos directos de la acidificación del suelo

Básicamente ya hemos dicho que la acidificación del suelo por contaminación atmosférica tiene su origen sobre todo en

las emisiones de SO_2 y de NO_x . Las primeras se forman fundamentalmente en las centrales térmicas y en la industria, y las segundas en los escapes de los vehículos.

Los suelos forestales, según la experiencia, sufren una acidificación mucho más intensa que los suelos agrícolas, al tener una cubierta arbórea más espesa y al actuar como filtro. Según algunos autores, los suelos forestales y los pastizales naturales están más amenazados por la acidificación que las zonas cultivadas, entre otras causas ya apuntadas, porque estos no son sometidos a prácticas agrícolas como el encalado o similares.

La acidificación produce por otra parte una reducción de la fertilidad y mal crecimiento vegetal en los suelos no cultivados. Además, se producen daños en la vegetación e incluso su desaparición y la pérdida de especies vegetales y animales.

Si el suelo se acidifica, se produce una movilización de los metales pesados, que pueden llegar a intoxicar las aguas ubicadas a nivel piezométrico (y las de percolación), sobre todo si el pH disminuye a menos de 4.

Si el suelo baja su pH a menos de 3,5, se producen degradaciones irreversibles de ciertos componentes tampón.

53.6.5. El suelo como sistema tampón: procesos y acidificación

El suelo, como la mayoría de los elementos de la Naturaleza, actúa en lo que se refiere a una perturbación ajena a su funcionamiento normal, como un col-

chón, de manera que minimiza el impacto poniendo en marcha los mecanismos de que dispone para ello.

En este sentido, actúa como tampón en los siguientes procesos:

- Intercambio iónico
- Disolución de hidróxidos de Al, Fe y Mn
- Actividad meteorológica
- Aportes de N y de productos tóxicos

A continuación comentamos estos procesos.

53.6.6. Intercambio iónico

En la mayoría de los suelos las partículas tienen normalmente un desequilibrio en lo que se refiere a una mayor carga negativa, y están rodeadas por cationes adsorbidos. Las partículas cargadas a menudo son de tipo orgánico, y sus cargas tienden a concentrarse en sustancias de moléculas grandes con grupos carboxílicos o fenólicos. Las partículas inorgánicas pueden estar también cargadas con restos de minerales y ciertos tipos de silicatos, por ejemplo. Al aparecer estas cargas en la superficie de las partículas minerales, el total de la superficie de partículas va a indicarnos el número de las cargas.

53.6.7. Disolución de hidróxidos de aluminio, hierro y manganeso en el suelo

Como resultado de la formación del suelo y de los procesos que participan en

ella referentes al aluminio, al hierro, al manganeso y al silicio, se observa que a partir de los minerales primarios y de la roca madre por una parte, y por otra por precipitación y por cambios, estos metales aparecen como hidróxidos, y a menudo forman complejos con las sustancias orgánicas.

Cuando el medio se acidifica, estos hidróxidos y sus complejos se hacen menos estables. Primero se disuelve el aluminio en todos sus tipos, y aparece en la solución del suelo cuando el pH baja a 4'5 o 5.

53.6.8. Actividad meteorológica

Gran parte de los minerales se forman inicialmente por actuación de condiciones determinadas de presión, temperatura y humedad que son muy diferentes cuando un suelo no es estable desde el punto de vista termodinámico. El proceso por el cual los factores meteorológicos actúan es muy lento, y parece ser que cuando se liberan cationes metálicos como potasio, magnesio, calcio o sodio, aparece inmediatamente una disminución de la acidificación del suelo. Aparte, se pueden formar productos residuales como ácido silícico que pueden ser relativamente importantes en estas interrelaciones. Además pueden aparecer hidratos de aluminio y óxidos de hierro, que también pueden cumplir un papel importante como sistemas tampón en el tema que estamos considerando.

Es normal que los suelos estén bien tamponados y que sus sistemas tampón funcionen muy bien ante el aporte anual

de iones hidronio, que es muy pequeño comparado con la capacidad de estos sistemas suelo de tamponar. Por otra parte, los sistemas de aguas corrientes tienen su capacidad tampón mucho más pequeña, salvo las aguas ácidas que tienen un contenido fuerte de sustancias húmicas. La acidificación actual del suelo depende mucho de la entrada de ácidos fuertes debida a los depósitos ácidos. El anión sulfato juega un papel dominante como transportador de cationes fuera del suelo. No es importante solamente la presencia de elementos acidificantes, pues también lo es el tiempo de residencia en el suelo y la vía de transporte a través de él.

Es de interés en lo que se refiere al impacto de los depósitos ácidos, saber cual es más importante, si la adición de iones hidrógeno o la adición de aniones estables no neutralizados de ácidos fuertes minerales, como el sulfúrico o el nítrico. Los ecosistemas forestales tienen una fuerte producción propia de iones hidrógeno acompañada por aniones orgánicos, lo que provocará una tendencia hacia la acidez del horizonte orgánico. Ao de los bosques de coníferas, alcanzando con frecuencia un pH inferior a 4, lo que es de características similares a las debidas a una lluvia ácida. Sin embargo, durante el transporte hacia abajo y por la actividad microbiana, se descomponen muchos de los aniones orgánicos a dióxido de carbono y agua, liberando protones.

Los iones sulfato y nitrato tienen una vía diferente y pasan hacia abajo sin cambiar, salvo una adsorción temporal

que sufren, los sulfatos en los hidróxidos de aluminio o de hierro. La neutralidad eléctrica requiere entonces cationes acompañantes para controlar las pérdidas por lavado y la acidificación de los horizontes más profundos.

53.6.9. Efectos ecológicos del aporte de nitrógeno

Parte de los depósitos ácidos se debe a las emisiones de componentes nitrogenados, y a veces incluso más que a los derivados del azufre. La actividad industrial tiene tendencia a aumentar las emisiones de derivados del nitrógeno más que las de los derivados del azufre y por tanto esta acidez se ve incrementada por esta parte al aumentar la relación N/S.

Los efectos en la acidificación del suelo debidos a los derivados del nitrógeno son parecidos a los del azufre, pero la actividad de aquellos, su desarrollo y su funcionamiento desde el punto de vista químico y bioquímico, es mucho más complicado que el de los derivados del azufre. Las plantas necesitan nitrógeno en mucha mayor cantidad que azufre, y por tanto es un elemento limitante de la productividad vegetal. El aporte de nitrógeno de componentes nitrogenados desde la atmósfera puede tener un efecto fertilizante, cosa que se ha observado en muchos casos. Los efectos del pH sobre el suelo son en este caso pequeños, sobre todo si aparecen iones amonio o nitrato. Sin embargo, si se elimina parte o toda la biomasa de una zona, automáticamente aparece una acidificación fuer-

te, como ya hemos indicado en otro epígrafe de este capítulo.

Los iones amonio que se depositan en el suelo que no son asimilados por los organismos, se van a nitrificar a causa de la presencia de bacterias. El exceso de nitrógeno en el sistema va a transformarse en nitrato, aunque estuviera inicialmente en otras formas. El nitrato no es absorbido por los coloides del suelo y se va a perder del sistema por lavado o por desnitrificación, y ambos procesos implican riesgos ambientales potenciales. El lavado de los nitratos puede provocar la aparición de un exceso de nitrógeno en los sistemas acuáticos. El nitrato puede también tener como origen la actividad agrícola, sobre todo si se aplican fertilizantes, pero esto tiene que ubicarse en su dimensión real comparando con el aporte de nitrógeno por contaminación atmosférica, tanto a las aguas continentales como a los ecosistemas terrestres.

Hay que tener en cuenta también, que la pérdida de nitrógeno en los ecosistemas puede deberse a la actividad de productos de la desnitrificación, como el N_2O . El N_2O es un constituyente de la atmósfera poco importante, y parece ser que su origen parte de los procesos de desnitrificación del suelo y de sus horizontes superficiales. Algo del N_2O también se puede formar como producto intermedio en la nitrificación y en la combustión.

53.6.10. Contaminación del suelo por productos tóxicos

La contaminación básica del suelo con productos tóxicos por vía atmosférica

ca tiene como origen una serie de elementos y compuestos minerales, metálicos, no metálicos, compuestos orgánicos y productos radiactivos.

Estos productos, aparte de otros circunstanciales, son fundamentalmente compuestos minerales y compuestos orgánicos.

Por el momento se conocen bastante bien los efectos de los metales pesados (veáanse el epígrafe correspondiente y las citas bibliográficas: Seoáñez 1978, 1991), y se empiezan a saber datos parciales de las relaciones entre la concentración y la toxicidad en el suelo y de las reacciones químicas y bioquímicas en lo que se refiere a los compuestos orgánicos.

Los dos grupos de productos son imposibles de encasillar en cuanto a umbrales de toxicidad, pues existen tantos factores implicados que no se pueden establecer tablas que definan niveles de toxicidad para tales o cuales tipos de suelos o de vegetales.

Como línea general, sobre todo para los metales pesados, se ha comprobado que los suelos forestales sufren mucho más que los cultivados, posiblemente a causa de que el laboreo del suelo homogeneiza estos elementos en los horizontes superiores y facilita su incorporación.

CAPÍTULO 54

CÁLCULOS Y VALORACIONES SOBRE RIESGOS, DAÑOS Y EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN EL MEDIO NATURAL

54.1. EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS DE DEGRADACIÓN QUE PUEDE PROVOCAR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE UNA MASA FORESTAL

Las agresiones que la contaminación atmosférica provoca en las asociaciones forestales, pueden tener gran influencia sobre el nivel de degradación de una masa forestal. Diferentes autores han elaborado métodos de evaluación de esta influencia, mediante los cuales es posible determinar la responsabilidad de diversas industrias en el deterioro de la masa y planificar, al mismo tiempo, la explotación forestal acorde con la agresión.

La evaluación es muy complicada, pues intervienen gran número de parámetros, ya que no se puede tener en cuenta solamente la contaminación atmosférica.

Según estudios experimentales y teóricos, se ha comprobado que la intensidad de la perturbación que sufre una masa forestal es siempre función de dos parámetros: la *intensidad* s y la *duración* t del fenómeno.

Como idea básica se puede admitir que el factor principal lo constituyen los niveles de contaminación acumulada. En una primera aproximación, se deben considerar estos niveles como un producto de la intensidad y la duración de la perturbación.

La duración de la perturbación puede ser introducida libremente en los cálculos, suponiendo que la emisión de contaminantes, a partir de diferentes focos, es constante, y teniendo en cuenta los factores meteorológicos, aunque, para homogeneizar, se debe trabajar con períodos de perturbación lo más extensos posible.

Si el flujo de contaminantes es variable según las estaciones, se deberán realizar los cálculos para cada estación

independientemente, y seguidamente sumar para obtener los valores anuales.

Inda y Palluch realizaron cálculos con el producto s.t, y comprobaron que con esta cifra no se obtienen informaciones precisas sobre la perturbación. Seguidamente, adoptaron una unidad de perturbación en una masa forestal y la llamaron *dosis de materia perturbadora corregida*; consiste en la suma de los productos de la *concentración s* del contaminante (intensidad) y la *duración t*, multiplicada por f (s, t), que es la función correctora de la dosis de materia perturbadora que ha sido determinada una vez, y que es proporcional al grado de perturbación sufrido por la masa.

Así pues, en un punto dado del plano X-Y, la dosis de materia perturbadora corregida será:

$$ds = s_1 \frac{t_1}{T} f(s_1, t_1) + s_2 \frac{t_2}{T} f(s_2, t_2) + \dots + sm \frac{tm}{T} (sm, tm) + \dots$$

que será equivalente a

$$ds = \sum_{i=1}^{i=m} s_i \frac{t_i}{T} f(s_i, t_i)$$

donde $s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_m$ son las concentraciones, en diversas condiciones meteorológicas, durante los períodos $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_m$ en puntos dados, y $T = t_1 + t_2 + \dots + t_m$.

La *dosis media corregida* d_{se} para un sólo foco de emisión y para una superficie forestal dada, representada por puntos «c», será:

$$\bar{d}_{se} = \frac{1}{c} \sum_{j=1}^{j=c} d_{sej}$$

La dosis corregida d_{sn} , para n focos de emisión, es:

$$\bar{d}_{sn} = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^{i=m} \sum_{j=1}^{j=c} s'_{ij} \frac{t_{ij}}{T} f(s'_{ij}, t_{ij})$$

donde

$$s'_{ij} = \sum_{e=1}^{e=n} s_{ije}$$

Para interpretar esta última expresión, se suman primero las concentraciones en todos los focos emisores, y luego se determina la función correctora $f | s_{ij}, t_{ij} |$ para la suma de concentraciones.

Si todos los focos emisores vierten el mismo contaminante, utilizando la fórmula:

$$D_e = \frac{\bar{d}_{se}}{d_{sn}}$$

se puede obtener la influencia de una sola fuente emisora sobre la perturbación sufrida por la masa forestal.

En el caso de que los focos emisores viertan diversos agentes, algunos autores han propuesto la introducción de un factor de corrección a_k inversamente proporcional a la concentración máxima admisible para cada contaminante; si este es el SO_2 , al factor a_k se le da el valor 1.

En los focos de emisión \bar{D}_{se} , la dosis corregida será ahora:

$$\bar{D}_{se} = \sum_{k=1}^{k=g} a_k \bar{d}_{se}$$

Para todos los focos emisores, la expresión se transformará en:

$$\bar{D}_{se} = \sum_{e=1}^{e=n} \sum_{k=1}^{k=g} a_k \bar{d}_{sek}$$

Para obtener la influencia de una sola fuente emisora sobre la perturbación total, utilizaremos la fórmula:

$$H_e = \frac{\bar{D}_{se}}{D_{sn}}$$

similar al caso de un sólo tipo de emisión.

La función $f|s,t|$ todavía no está totalmente desarrollada, pero es posible indicar ciertas condiciones que debe cumplir:

- A baja concentración $f|s,t| = 0$, es decir, se supone que a dosis inferiores a un límite de nocividad, la perturbación es nula, premisa con la que no estamos de acuerdo, pues existen agentes contaminantes, sobre todo los acumulativos, que alteran el estado anatomofisiológico de los vegetales si la duración de la perturbación es prolongada.
- Para valores medios de s (cuando las lesiones se sitúan entre 0 y 100 por 100), se podría admitir $f|s,t| = 1$.
- Para concentraciones elevadas, $f|s,t|$ debería ser superior a 1.
- Para dar más eficacia a la función $f|s,t|$ ésta debería incluir los períodos de actividad vegetativa, debido al aumento de la nocividad de los agentes durante este tiempo, y los períodos

de reposo vegetativo debido al hecho contrario.

En estas condiciones, podría escribirse:

- Actividad vegetativa: $f|s,t| \geq 1$

- Reposo vegetativo: $0 \leq f|s,t| < 1$

- La concentración puede ser calculada en ciertas condiciones meteorológicas en diferentes puntos de la masa forestal, mediante la ecuación de *Sutton*, indicada en anteriores capítulos, aunque con este método la dispersión se calcula sólo bajo el punto de vista cualitativo.
- Para estudiar el fenómeno desde el punto de vista cuantitativo, habrá que tener en cuenta ciertos parámetros meteorológicos, como el factor de difusión turbulenta, la dispersión y el cálculo de los puntos de concentración máxima.
- La utilización de ordenadores simplifica mucho el trabajo, sobre todo en lo que se refiere al cálculo de los coeficientes de difusión.
- *Palluch* y otros, efectuaron el cálculo de los coeficientes de difusión C_y y C_z y obtuvieron:

$$C_y = \alpha (0,108 + 0,013 \bar{u})$$

$$C_z = \beta (0,108 + 0,013 \bar{u})$$
 donde α y β son parámetros numéricos comprendidos entre 0,5 y 2, y \bar{u} es la velocidad media del viento.
- En general, el cálculo mediante este método, permite obtener información en la previsión de perturbaciones ante la implantación de nuevas industrias en una zona forestal dada.

54.2. EVALUACIÓN DE DAÑOS EN LA VEGETACIÓN DEBIDOS A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Cuando se trata de contaminación atmosférica y de sus efectos sobre los vegetales, hay que tener en cuenta los factores externos por una parte, y los factores internos por otra. Entre los primeros son básicamente los factores bióticos y abióticos quienes pueden causar daños, perturbaciones e impactos de todo tipo, todos ellos interrelacionados, de forma que existe una integración total y absoluta que es la causa de la perturbación en el medio, y especialmente en la vegetación.

Ante esta integración, numerosos autores han tratado de valorar y cuantificar las perturbaciones, relacionando casi siempre factores dosis-respuesta.

La *relación dosis-respuesta* es un factor muy importante y difícil de definir para el diagnóstico, e intentamos reducir las diferentes correlaciones a una relación entre los términos de daño y la dosis efectiva de contaminante. Después se tabula el daño causado por una dosis determinada. Al mismo tiempo, las condiciones ambientales deben ser tenidas en cuenta, sobre todo aquellas referentes a ciertos factores climáticos como humedad o temperatura. Así obtendremos las relaciones entre la dosis y la respuesta de forma implícita. A partir de esto se han obtenido diversas fórmulas como por ejemplo la que propuso *O'Gara* en 1922 ya citada en el capítulo correspondiente al SO_2 , que relacionaba la concentra-

ción, el tiempo de exposición y la sensibilidad.

Por otra parte *Thomas y Hill* (1935) determinaron las constantes en la función de *O'Gara* para diferentes efectos y especies vegetales, y *Stratmann* (1960) también estableció que:

$$t = K \cdot \exp [-a (c - c_0)]$$

y simplificando:

$$0 = a \cdot c_0 + \ln K - a \cdot c - \ln t$$

donde:

t = Duración de la exposición

c = Concentración del contaminante

c_0 = Concentración admitida

K = Constante

Zahn (1963), también tuvo en cuenta diferentes grados de perturbación para concentraciones y tiempos diferentes y redactó la fórmula siguiente:

$$t = K \frac{1 + 0,5c}{c(c - c_0)}$$

y simplificando:

$$0 = K + 0,5 K \cdot c - tc^2 + c_0 \cdot tc$$

Larsen y Heck (1976) a su vez desarrollaron la siguiente fórmula:

$$W = K \cdot c^a \cdot t^b$$

y simplificando:

$$Z = K + a \cdot \ln c + b \cdot \ln t$$

(Para más detalles véase la cita bibliográfica correspondiente).

Es relativamente fácil relacionar la intensidad de la percepción con la intensidad del estímulo mediante una función. Si introducimos los términos correspondientes, es fácil establecer las relaciones y las fórmulas siguientes según *Stevens*:

$$W \rightarrow K (D - D_0)^n$$

$$\ln W = \ln K + n \cdot \ln (D - D_0)$$

$$[W] = K + n \cdot \ln D_x, \text{ siendo } D_x = D - D_0,$$

W = intensidad de la percepción

D = intensidad del estímulo

Si además aplicamos la ley de *Weber-Fechner*, se pueden expresar mediante regresiones lineales los efectos de la perturbación mediante los siguientes términos:

$$Y = b_0 + b_1 \ln c + b_2 \ln t + (b_3 \ln c \ln t)$$

Según *Henschler* (1975) y otros autores, en la función antes indicada de $W = K (D - D_0)^n$, la dosis D_0 refleja el valor absoluto del umbral del estímulo necesario para desencadenar un efecto o una respuesta.

Si la dosis supera D_0 aparecen los efectos, por lo que es básico determinar con exactitud esta dosis.

Se ha comprobado por la experiencia, que D_0 no puede ser considerado como una constante, siendo este umbral del estímulo función de la duración de la perturbación:

$D_0 = f(t)$, siendo, por tanto: $D_0 = c_0 t$, donde la misma c (concentración admitida) depende de t .

$$\text{Si } c \rightarrow t, \quad c_0^p t^q = \text{cte.} \quad c_0^p t^{q/p} = K^{1/p} = K$$

Si sustituimos $q/p = n$, nos quedará:

$$c_0 t^n = K \quad c_0 t^{n-1} = K$$

$D_0 = K t^{1-n}$ (Dosis del umbral de estímulo)

y:

$c_0 = K t^{-n}$ (Concentración en el umbral de estímulo)

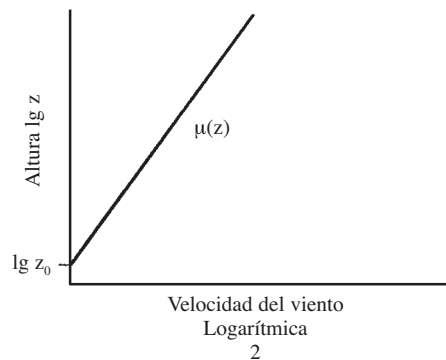
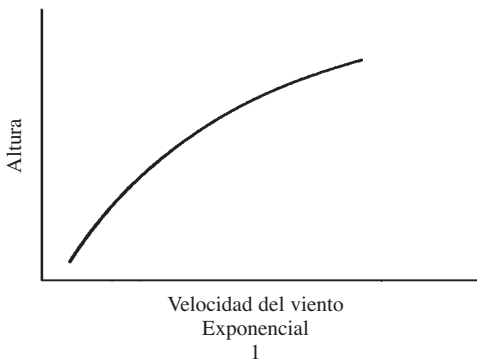
Con estas fórmulas se ha realizado un fuerte avance en el diagnóstico y en la determinación de los daños causados por contaminación atmosférica en masas vegetales, esperando aplicar la informática para establecer cálculos exactos sobre estas perturbaciones que evitarán en el futuro numerosos problemas administrativos e, incluso, judiciales.

54.3. CÁLCULOS SOBRE LOS EFECTOS DE LA DIFUSIÓN Y DE LA RUGOSIDAD EN CASOS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA DE UNA MASA FORESTAL

En una masa forestal, se pueden calcular los efectos de la contaminación atmosférica de forma numérica, aplicando el método de evaluaciones ya indicado, o utilizando cálculos basados en las fórmulas de *Sutton* y en las modificaciones introducidas por *Sequin*.

La rugosidad y ciertos cálculos de la difusión se basan en datos reales obtenidos mediante mástiles de control (de unos 40 m de altura) en los que median-

te anemómetros totalizadores y veletas, se hallan la velocidad y la dirección del viento durante períodos de tiempo determinados y a diferentes alturas. Se obtienen, de este modo, curvas orientativas que se relacionan ya con los cálculos numéricos de *Sutton* y *Seguin*.



Mediante los datos obtenidos, como decimos, se calculan los puntos de la recta $u(z)$, que será de la forma

$$u(z) = \frac{u^*}{K} \lg \frac{z}{z_0}$$

donde:

u^* = Velocidad de rozamiento (viento), proporcional a (*Seguin*).

K = Constante de *Karman* (aprox. 0,4).

z_0 = Parámetro de rugosidad de la superficie.

z = Altura.

A partir de estas relaciones y de la recta $u(z)$, es posible calcular z_0 y u^* , con lo cual se puede hallar la concentración a nivel de la superficie aplicando la fórmula de *Sutton* modificada, de tal forma que, si nos situamos en el eje del foco emisor ($X, 0, 0$),

$$M(X,0,0) = \frac{(1-n)(2-n) q^{1-n}}{2\Pi AB} \cdot \frac{H^2 Q \left(\frac{H}{z_0}\right)^{n-m}}{u^* z_0^n X^{2-n}} \cdot \exp \left[\frac{(1-n)(2-n) q^{2-n} \left(\frac{H}{z_0}\right)^n}{4B^2 (1-n) z_0^n X^{2-n}} \right]$$

donde:

$M(X, 0, 0)$ = Concentración en el punto ($X, 0, 0$)

$$n = \frac{2m}{m+1}$$

m = Parámetro definido por

$$u(z) = qu^* \left(\frac{z}{z_0}\right)^m \text{ Según Calder}$$

$q = Id., id$

$A = 2,4$ (Seguin).

$B = 1,2$ (Seguin, según Panofsky).

$H =$ Altura del foco emisor.

$Q =$ Caudal del foco emisor.

Nota: q y m son función de z_0 , y pueden ser hallados mediante la recta antes indicada, aplicándola a todo el grosor z_0 de la capa de aire afectada por la difusión.

Así, por ejemplo, se dispone de los siguientes datos:

z_0/z_0	m	q
10^2	0,41	1,7
3.10^2	0,33	2,2
10^3	0,29	2,5
10^4	0,25	2,8
10^5	0,21	3,3

H/z_0	N	q
20	0,62	1,7
10^2	0,49	2,3
2.10^2	0,45	2,5
10^3	0,42	2,7
2.10^3	0,40	2,8
10^4	0,35	3,1
2.10^4	0,33	3,3

54.4. DEFINICIONES E INGENIERÍA AMBIENTAL DEL CÁLCULO DE LOS DEPÓSITOS ATMOSFÉRICOS

54.4.1. Definiciones y bases generales

Ya hemos tratado en capítulos anteriores sobre depósitos de origen atmosférico.

En realidad, los depósitos de origen atmosférico son el conjunto de todos aquellos fenómenos que contribuyen a la disminución del contenido de contaminantes del aire. Estos fenómenos básicos pueden ser:

– *Depósito seco.*

Corresponde a la absorción de gases o de aerosoles por la cubierta del suelo, en condiciones secas.

– *Depósito húmedo.*

Corresponde a un aporte de contaminantes arrastrados por lluvias, nieve, nieblas, rocío o granizo. En caso de que dichos contaminantes se aporten en condiciones fotoquímicas adecuadas y en la composición adecuada (véase sinergismos), como suele ser el caso del SO_2 con ciertos derivados del N, se formarán depósitos ácidos, y en caso de lluvias o nieblas, serán lluvias o nieblas ácidas.

– *Sedimentación.*

Es simplemente el depósito por gravedad de las partículas gruesas (de diámetro superior a 50μ).

– *Eliminación o captación seca (dry removal, enlèvement sec).*

En realidad es un proceso de coagulación y de aglomeración de partículas muy finas sobre otras más gruesas.

– *Eliminación o captación húmeda (wet removal, enlèvement humide).*

Es una absorción de gases o de aerosoles por las gotitas de agua de las nubes y de las nieblas. Cuando habla-

mos de depósitos atmosféricos (que no de deposición, término totalmente inadecuado por ser empleado como barbarismo), generalmente nos referimos a los tres primeros casos, en los que se manifiesta una transferencia de materia sólida, líquida o gaseosa, del aire a la vegetación y/o al suelo.

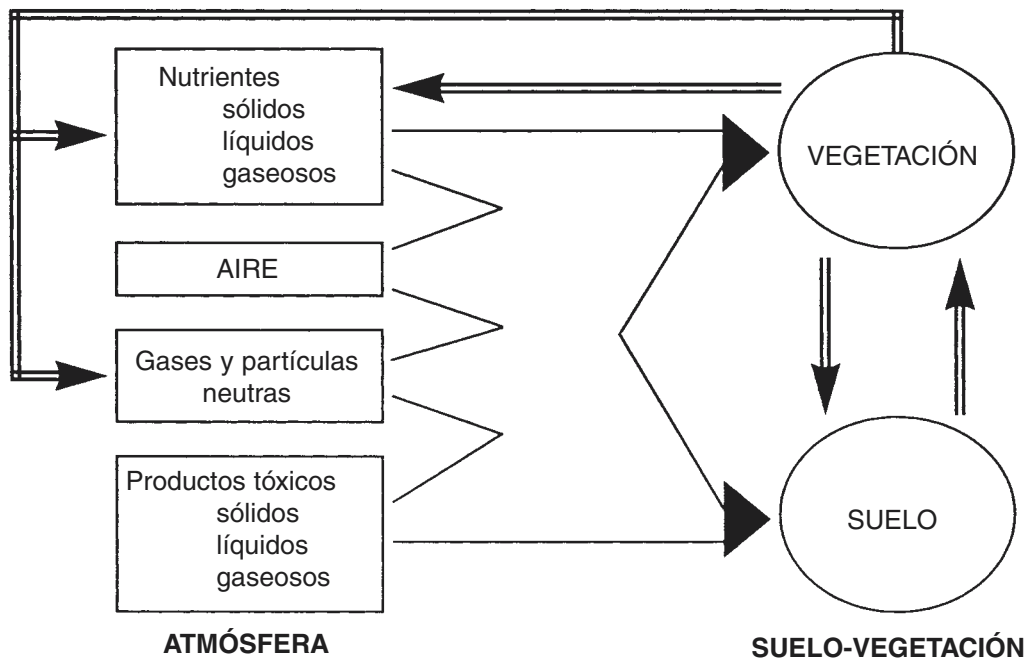
Debemos tener en cuenta que los dos últimos procesos corresponden a la acción del bosque como filtro, actuando como interceptor de los contaminantes con todos los efectos, ya tratados, de filtrado, captación, asimilación, rugosidad (frenado) y sedimentación.

En España los depósitos secos son mucho más frecuentes, salvo en la zona norte, pues el clima, salvo excepciones, es de estación seca acusada, y las lluvias no son muy abundantes.

54.4.2. Cálculo de los depósitos atmosféricos

La determinación de un depósito atmosférico es complicada, y es una labor relativamente lenta, debiéndose resolver el problema específico para cada caso, pues cada situación presenta

TRANSFERENCIAS BÁSICAS DE MATERIA EN EL SISTEMA AIRE-VEGETACIÓN-SUELO, DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA (ORIGINAL)



sus propias características y hay que adaptarse a ellas si se quiere solucionar la cuestión de forma eficaz y realista.

La determinación del depósito se puede efectuar por métodos directos de medida del flujo, o por métodos indirectos de medida de otra magnitud seguida de un cálculo complementario.

Depósito húmedo superficial (método directo)

Paso 1: Medida de la precipitación P, en $l/m^2/mes.$

Paso 2: Medida de la concentración c de productos en el agua de lluvia, en mg/l.

Paso 3: El depósito D será: $D = P.c,$ en $mg/m^2/mes.$

Depósito seco superficial (método directo)

Sistema 1: Lavado de una parte de la cubierta vegetal (normalmente de hojas). Se efectúa con agua destilada, y se identifican y cuantifican las sustancias presentes. En algún caso, y para algún contaminante determinado, se efectúa el lavado mediante un disolvente específico, teniendo en cuenta que no actúe sobre las propias hojas y falsifique los resultados.

Sistema 2: Recogida sobre una superficie artificial conocida. Se trata simplemente de instalar una placa de vidrio, un filtro de nylon de porosidad de 1μ , cápsulas *Petri* o, incluso, hojas arti-

ficiales. Se opera exactamente igual que en el Sistema 1.

Depósitos húmedos y secos superficiales a la vez (sistema mixto, método directo)

Se trata simplemente de instalar dos superficies o recipientes que capten, una de ellas los depósitos húmedos (solamente lluvia), y la otra los depósitos secos. Para ello se instalan los dos recipientes uno al lado del otro, con una tapa en forma de 8 que gire de manera que cuando un recipiente está cubierto el otro está descubierto.

Se instala un sistema eléctrico (mediante batería o conectado a la red) mediante el cual, con una conexión al aire, cuando cae una gota de lluvia sobre ella produce el paso de corriente y el cierre del recipiente del depósito seco, y al evaporarse este agua vuelve a descubrir el otro recipiente. De esta forma, se pueden obtener los datos en ambas situaciones con bastante exactitud.

Depósito húmedo (método indirecto)

Se mide con la misma técnica que el depósito seco, pero en vez de utilizar V_d (velocidad de depósito) se debe utilizar la constante de *Henry*.

Depósito seco (método indirecto)

Paso 1: Medida de la concentración del contaminante en el aire.

Paso 2: $\Phi = \chi \cdot V_d$ donde

Φ = Flujo del depósito (g/seg m²).

χ = Concentración del contaminante a nivel del suelo (g/m³).

V_d = Velocidad del depósito seco (m/seg).

V_d es una magnitud similar a la inversa de una resistencia, más que una velocidad. Su valor es

$$V_d = \frac{1}{r_a + r_b + r_c}$$

donde:

r_a = Resistencia aerodinámica (que depende de la turbulencia).

r_b = Resistencia de la capa límite a la difusión molecular.

r_c = Resistencia de la cubierta vegetal debida a la acción de los factores biológicos.

La magnitud V_d es pues, una representación macroscópica de las causas y factores que influyen sobre los depósitos por vía seca.

Generalmente V_d oscila entre 10⁻² y 10¹ cm/seg para los aerosoles, y entre 4.10⁻² y 7 cm/seg para el SO₂.

Paso 3: El problema mayor de este método es el de la *determinación previa de V_d* , que se puede obtener de las siguientes formas:

– Midiendo directamente Φ y χ

– Midiendo r_a , r_b , y r_c

Desde un punto de vista práctico, se deben tener en cuenta numerosos facto-

res a la hora de realizar mediciones para calcular los depósitos atmosféricos, siendo básicos los siguientes:

– Tipo de colector.

– Forma geométrica del colector.

– Altura a la que está situado el colector (entre 1 y 2 m. en suelo poco cubierto).

– Ubicación del colector.

– Número de colectores en el área.

– Si existen exudaciones que puedan desorientar en el estudio de los escurrimientos.

– Error de las mediciones (incertidumbre del orden de 1 a 3 para distancias de 100 km y 1 año).

54.4.3. Ejemplo

Se trata de calcular el orden de magnitud de un depósito seco y de un depósito húmedo sobre un pastizal.

Estamos en una zona de pastizal natural, y la duración del estudio es de 1 año.

– Hipótesis:

• En aire seco, el S está como SO₂ casi todo.

• En la lluvia está como SO₄ (sulfato), fundamentalmente.

– Observaciones y datos de partida:

– 6 µg/m³ < (Concentración) < 12 µg/m³

– Sobre superficies herbáceas: 0,5 cm/seg < V < 6 cm/seg.

- Una situación media para depósitos húmedos es del orden de $0,82 \text{ g SO}_4 =$
 $= \text{m}^2/\text{año}$ de iones SO_4

Con estos datos obtendremos:

- Depósito seco de S en forma de SO_2 :
 $(S) = (\text{g}/\text{m}^3) \cdot V (\text{m}/\text{año}) = 0'5 \text{ a}$
 $4 \text{ g}/\text{m}^2/\text{año}$
- Depósito humedo de superficie en forma de SO_4 : $D (S) = P (\text{l}/\text{m}^2/\text{año}) \cdot$
 $\cdot c (\text{gr}/\text{l}) = 0'3 \text{ g}/\text{m}^2/\text{año}$

54.4.4. Cálculo de depósitos metálicos (Pb)

D. Dahl y *M.L. Corrin* definen el arrastre de gases y partículas por la lluvia, y calculan la *eficiencia de lavado*, que es función del tamaño de las partículas y de las dimensiones de las gotas de lluvia, según la expresión:

$$WE = \frac{4C_w r}{3C_a L} \text{ donde}$$

WE = Eficiencia de lavado

C_w = Concentración de Pb en la precipitación, en gr/cm^3

r = Radio de la gota de lluvia

C_a = Concentración inicial de Pb en el aire

L = Espacio recorrido en la caída de la lluvia (altitud recorrida por la precipitación)

Si despejamos C_w , obtenemos la concentración en la precipitación

$$C_w = \frac{3C_a LWE}{4r}$$

WE se calcula experimentalmente, por lo que la concentración en la precipitación se puede obtener con facilidad.

CAPÍTULO 55

EL PAPEL DE LA ATMÓSFERA Y DE SU CONTAMINACIÓN EN LA DINÁMICA DE LAS TRANSFERENCIAS Y TRANSFORMACIONES DE LAS EMISIONES Y DE LOS RESIDUOS EN LA NATURALEZA

55.1. TRANSFERENCIAS Y TRANSFORMACIONES

Cuando aparece una emisión o un residuo en el medio ambiente como consecuencia de la fabricación de un producto o de cualquier actividad humana que lo genera (industrias, explotaciones ganaderas, núcleos urbanos, etc.), se presentan los problemas de su propia presencia, de su discurrir durante su ciclo de vida, de su evolución y de su situación final.

Esa emisión o ese residuo aparecen en el aire, en el agua, en el suelo, en la fauna o en la flora, y se desplazan, sufren transformaciones, se degradan, cambian de biotopo, se acumulan, son asimilados, se reciclan y se incorporan, para bien o para mal, al medio que los ha recibido o al que han sido transferidos.

Las transferencias pueden ocurrir en un medio (aire, agua, suelo), dentro del mismo biotopo, dentro de un mismo

ecosistema, entre diferentes biotopos del mismo ecosistema o entre diferentes ecosistemas.

Las formas básicas de transferencia son:

- Dispersión
- Convección
- Volatilización
- Solubilización
- Fusión
- Adsorción
- Concentración
- Absorción
- Condensación

Todas estas formas de transferencia pueden presentarse en la atmósfera a partir de emisiones naturales o artificiales.

A lo largo de estos procesos de transferencia, durante la permanencia en los

receptores y al final de su ciclo de vida, las emisiones y los residuos sufren una serie de transformaciones de las que la mayoría son de degradación, y a veces de aumento de la entropía, al contrario de los procesos de orden que se necesitaron para producir la materia que los generó.

Las transformaciones más frecuentes de los contaminantes, atmosféricos en nuestro caso, son:

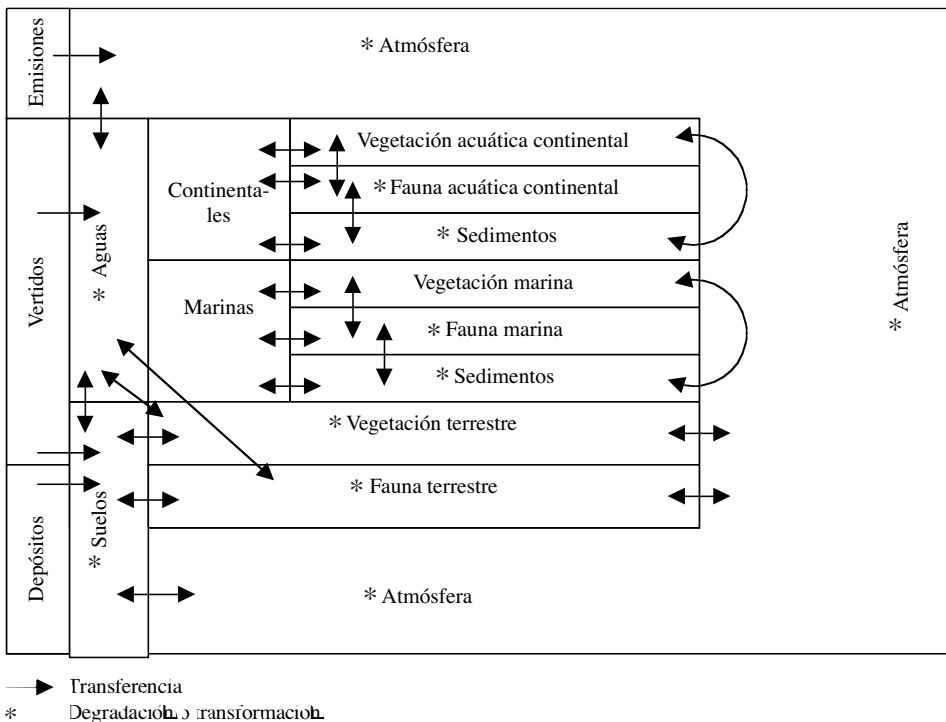
- Hidrólisis
- Oxidación
- Reducción
- Formación de complejos (indirecta)

- Intercambio iónico
- Biodegradación
- Fotodegradación
- Incorporación a los ciclos metabólicos

Además de las indicadas, es evidente que tanto las transferencias como las transformaciones pueden manifestarse por otras múltiples vías y procesos, dentro de la complejidad que tienen los ecosistemas y en la que se basan para mantener la dinámica de su equilibrio en el tiempo.

En la figura adjunta se indica la dinámica de esas transferencias y transformaciones.

DINÁMICA DE LAS TRANSFERENCIAS Y TRANSFORMACIONES DE LAS EMISIONES Y DE LOS RESIDUOS EN LA NATURALEZA (ORIGINAL)

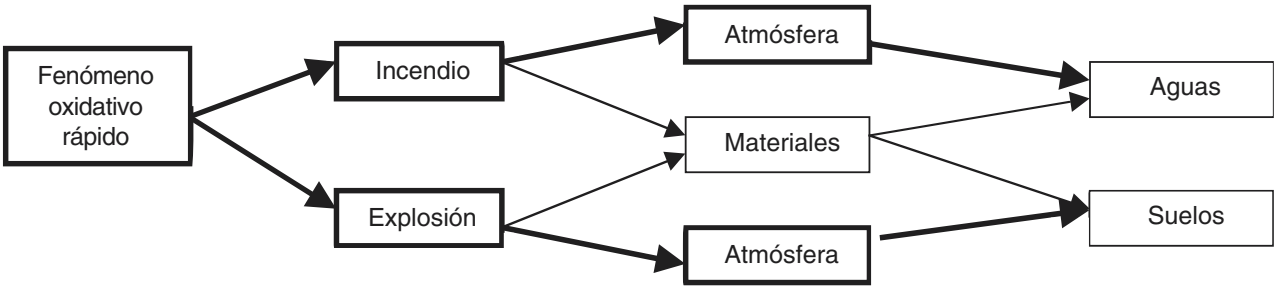
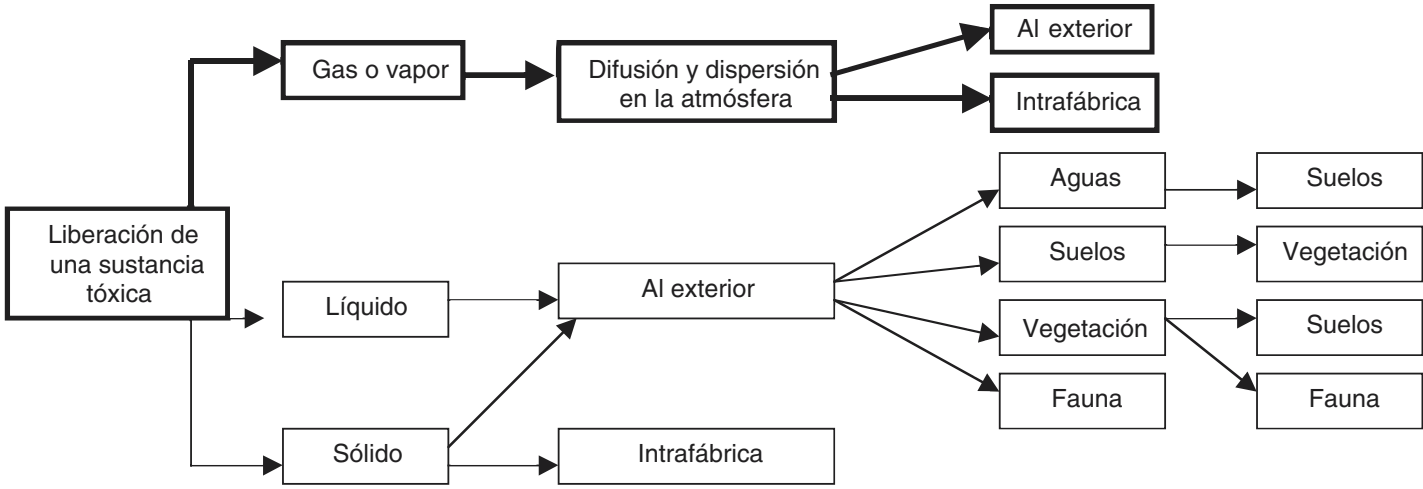


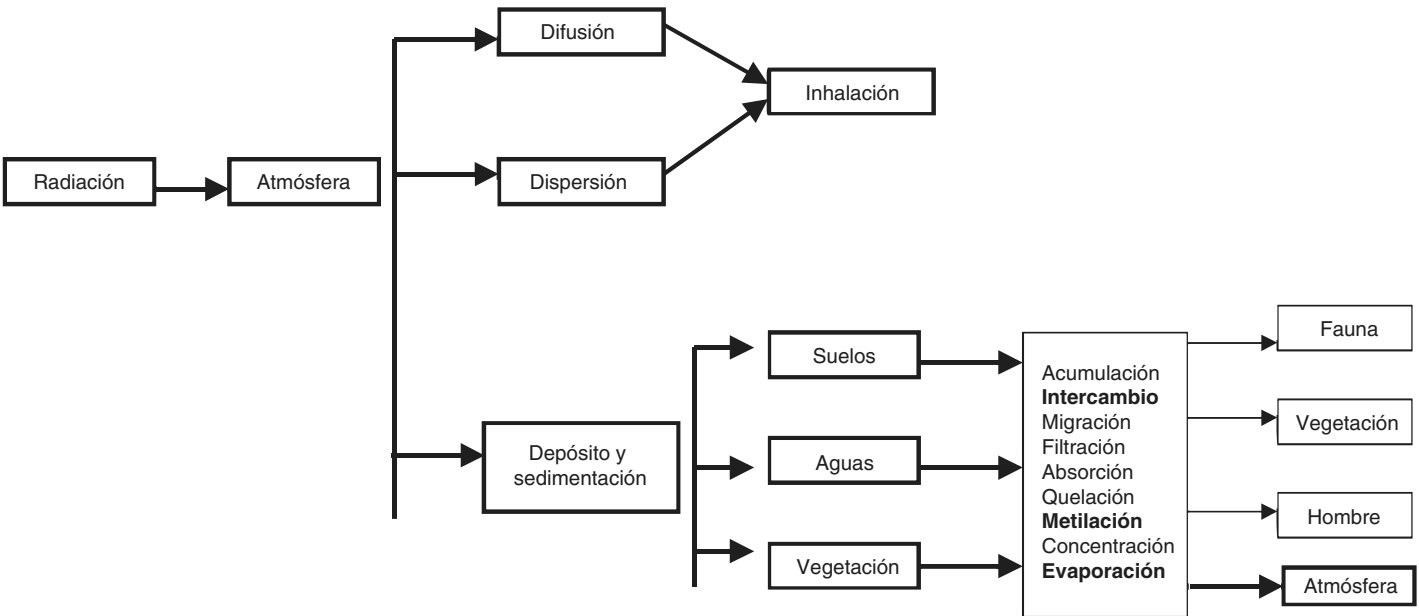
55.2. TRAYECTORIA DE LAS EMISIONES Y DE LOS RESIDUOS EN EL MEDIO NATURAL

Ya hemos indicado en el epígrafe anterior la dinámica de las transferencias y de las transformaciones de las emisiones y de los residuos en el medio ambiente, a partir de la cual intentare-

mos definir las vías y trayectorias que siguen esas emisiones y residuos en el medio en diferentes procesos.

A continuación exponemos unos esquemas generales de la dinámica de las emisiones y de los residuos en el medio, señalando de modo especial lo que concierne a la contaminación atmosférica.





CAPÍTULO 56

LA ATMÓSFERA DEL SUELO. PROCESOS Y RELACIÓN CON LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

56.1. BASES GENERALES

La fase gaseosa de un suelo es la mezcla de gases que ocupa los espacios que la fase líquida deja libres en la porosidad del suelo.

Debido a sus características intrínsecas como fluido, la fase gaseosa de un suelo presenta una marcada similitud con la fase líquida, sobre todo en lo que se refiere a su dinámica, aunque tiene algunas diferencias con respecto a esta.

La atmósfera del suelo está condicionada además por la dinámica de los procesos biológicos que se producen en relación a ella, y que están determinados por el consumo de oxígeno y por la producción de CO₂ que realizan los microorganismos y las plantas durante sus procesos de oxidación.

Los distintos procesos biológicos que se producen en el suelo hacen que la fase gaseosa se encuentre sometida a constantes variaciones en su composición. Como consecuencia del incremento en la

proporción de determinados gases, paralelo al descenso de las proporciones de otros, se produce un desequilibrio entre la composición de la atmósfera del suelo y la del exterior, ambas en contacto directo, compensado por una serie de intercambios entre una y otra que permiten una homogeneización de la composición, y cuya función última es permitir asegurar la vida de los organismos del suelo.

Esa composición, debido al intercambio, puede incluir elementos contaminantes procedentes de la atmósfera externa.

56.2. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS

Al igual que la atmósfera externa, la fase gaseosa del suelo está compuesta por una mezcla de diversos gases, por lo que su comportamiento también se dirige por las leyes de la dinámica que los rige.

Como el resto de los gases, los que componen la atmósfera del suelo sufren una fuerte agitación térmica de sus moléculas, que se desplazan sometidas a fuerzas de atracción y repulsión con elevada energía cinética.

Respecto al volumen que ocupan, es enorme respecto al volumen total de sus moléculas, y su densidad molecular es mínima, lo que permite que, a pesar de la fuerte energía cinética que agita a estas, no se produzcan colisiones entre ellas.

Las características de la fase gaseosa son similares a las de la fase líquida, ya que al igual que las de ésta, derivan de su comportamiento como fluido que puede desplazarse.

Como consecuencia de esto, se pueden clasificar las características propias de la atmósfera del suelo en dos tipos:

- a) Características generales de la fase gaseosa, que derivan de su naturaleza específica y de su importancia volumétrica respecto a los demás componentes del suelo. Dentro de estas pueden definirse:
 - Por una parte las características intrínsecas, que son reflejo de las características de sus componentes, como el volumen, que depende de la masa de sus componentes y varía en función de la presión y de la temperatura. Esta masa es mucho menor que la de las otras dos fases del suelo.
 - Por otra parte, han de definirse

las características relativas, que cuantifican la importancia de la fase gaseosa, que viene expresada por la relación:

$$\text{Volumen de gas} / \text{Volumen total del suelo}$$

Esta importancia relativa está ligada a la importancia de la fase líquida, ya que ambas se reparten el espacio de la porosidad del suelo. Por lo tanto:

$$\text{Fase líquida} + \text{Fase gaseosa} = \\ = \text{Porosidad total}$$

- b) Características representadas por los parámetros que describen su estado energético termodinámico en un punto cuyas variaciones espaciales generan procesos de transferencia. Estas relaciones son análogas a las descritas para la fase líquida del suelo, ya que siguen los mismos principios. Entre los parámetros descritos habría que citar:

- **Potencial de presión.** (ϕ_p). La atmósfera del suelo está sometida a la presión de la atmósfera externa, que determina la existencia de un potencial de presión.

Por analogía con la fase líquida, tomando como referencia la presión atmosférica, este potencial será positivo si la presión es superior a esta, y negativo si es inferior, siempre que lo expresemos, como en la carga hidráulica, en altura de agua equivalente:

$\phi_p = ha$ (m), siendo

ha = Carga de presión

- **Potencial de gravedad.** (ϕ_g). Energía producida por el trabajo de las fuerzas de gravedad. Viene determinado por la altura a la que se encuentra el sistema: por lo general se toma como punto de referencia la superficie del suelo, por lo que este potencial será positivo si el sistema está por encima de la superficie, y negativo si el sistema está por debajo.

Su valor ponderal es mínimo al lado del potencial de presión.

- **Potencial químico.** (ϕ_c). Es la componente que viene expresada por la ecuación:

$$\phi_c = RT \ln V_i, \quad \text{donde:}$$

R = Constante molar de los gases

T = Temperatura

V_i = Fracción volumétrica del componente i

- **Potencial total.** (ϕ_T). Es la suma de los distintos componentes potenciales, que en la mayoría de los casos se reduce a:

$$(\phi_T) = (\phi_p),$$

pues los demás potenciales son despreciables por su influencia al lado del de presión.

56.3. COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA DEL SUELO

56.3.1. Composición general de la atmósfera del suelo

La composición de la atmósfera del suelo presenta variaciones respecto a la del exterior.

El aire del suelo está sometido a la influencia de los procesos de naturaleza bioquímica que plantas y microorganismos realizan dentro de este, y a las influencias del peso del suelo y la presencia de agua.

Los componentes fundamentales de la fase gaseosa son los mismos que los de la atmósfera, aunque en distintas proporciones. Estos son: nitrógeno, oxígeno, gases inertes, anhídrido carbónico y vapor de agua. En caso de aparecer metano e hidrógeno, lo hacen en cantidades despreciables, y lo mismo ocurre con algunos contaminantes atmosféricos, aunque puede ocurrir que la contaminación atmosférica sea tal que también contamine la atmósfera del suelo, con los consiguientes efectos para la flora y la fauna afectadas.

La composición del aire del suelo viene regida por una serie de factores que inciden sobre ella y que determinan la variabilidad de dicha composición. Estos factores son, fundamentalmente:

- La intensidad de la actividad biológica.
- La tasa de intercambio con el aire atmosférico.

- En algún caso, la contaminación de la atmósfera externa.

En los suelos saturados de agua, la composición de la fase gaseosa varía. En este tipo de suelos la fase gaseosa no aparece en el estado habitual como gases libres, sino que sus componentes se localizan disueltos en el agua. El oxígeno se sitúa en la capa superficial del líquido, donde es consumido por los microorganismos; cuando las condiciones del medio se vuelven anaerobias, se empiezan a generar otro tipo de gases, como el metano, el anhídrido carbónico, el hidrógeno, el monóxido de carbono y el óxido nítrico.

En general, las capas superficiales del suelo contienen del 0,2 al 1% de CO_2 , comparando con el 0,03% existente en el aire.

56.3.2. Importancia del oxígeno y del anhídrido carbónico

La diferencia fundamental entre la composición de la atmósfera del suelo y la de la exterior es la proporción de anhídrido carbónico y de oxígeno que contienen, como acabamos de indicar. La proporción de estos gases determina también la posibilidad de existencia de organismos vivos en el suelo, y de ahí que su importancia sea primordial.

El contenido relativo de CO_2 en el suelo es sensiblemente superior al de la atmósfera, mientras que el oxígeno se presenta en proporciones más bajas en el interior que en el exterior, aunque en su caso la diferencia no es tan significativa.

Los orígenes de las variaciones de la concentración de oxígeno y anhídrido carbónico en los suelos son, fundamentalmente, dos:

- **Actividad de los microorganismos.** Los microorganismos que pueblan el suelo son determinantes en la composición de la fase gaseosa de este.

La mayor parte de los microorganismos del suelo requieren oxígeno libre para llevar a cabo su metabolismo. Durante los procesos de oxidación de la materia orgánica, los microorganismos necesitan absorber oxígeno para garantizar la eficacia de su sistema enzimático. Como resultado de estos procesos desprenden agua, CO_2 , y otros productos.

Los microorganismos tienen por lo general un metabolismo aerobio; sin embargo, cuando la presión parcial de oxígeno en el suelo cae por debajo de determinados niveles, utilizan las rutas metabólicas anaerobias.

Respecto al dióxido de carbono, los microorganismos del suelo son mucho más sensibles.

- **Respiración radicular.** La respiración radicular de las plantas es un proceso inverso a la fotosíntesis. Durante la oxidación de los compuestos orgánicos se consume O_2 y se desprende energía química, a la par que se produce CO_2 .

Además de estar determinada por sus orígenes, la producción de CO_2

está limitada por diversos factores que inciden de forma muy directa sobre la actividad microbiana, entre los que destacan:

- **Temperatura:** Durante las épocas frías, el crecimiento de los microorganismos se encuentra restringido, lo que provoca indirectamente una reducción en la producción de CO_2 .
- **Humedad:** Durante la época de lluvias frecuentes, la generación de CO_2 alcanza máximos.

Como se ha explicado antes, el consumo de oxígeno por parte de los organismos vivos del suelo lleva emparejada la producción de CO_2 , lo que provoca que los niveles del gas en la fase gaseosa asciendan siempre en función del grado de actividad biológica, del tiempo y del espacio. Como la cantidad de organismos vivos es mayor en las capas superficiales del suelo, será en estas donde se presente un contenido máximo de anhídrido carbónico, respecto a un mínimo de oxígeno, como ya se ha indicado.

Las diferencias en la proporción de gases entre el interior y el exterior del suelo tienden a ser compensadas por diferentes procesos de intercambio. Sin embargo, tales procesos no pueden igualar el ritmo de producción y consumo impuesto por los organismos, de forma que las proporciones de CO_2 en el suelo siempre son superiores a las del exterior, al contrario de lo que ocurre con el oxígeno. El intercambio entre los gases es mayor en las capas superficiales, por lo

que al descender en profundidad se intensifican las diferencias entre la composición interna y externa.

Por lo que se refiere a la contaminación atmosférica, este intercambio de gases hace que pueda penetrar en el suelo, pero en las capas superficiales sobre todo.

56.3.3. El vapor de agua

La importancia del vapor de agua entre los gases que forman la atmósfera del suelo es fundamental.

Por lo general, la fase gaseosa tiene una concentración de vapor de agua próxima a la saturación, a excepción de la zona más próxima a la superficie, lo que determina tanto el grado de actividad de plantas y microorganismos del suelo, como la mayor o menor facilidad de intercambio con la atmósfera externa.

56.4. INTERCAMBIO GASEOSO

56.4.1. Relaciones con la atmósfera externa.

Como se ha definido en epígrafes anteriores, como consecuencia de la actividad biológica de raíces y microorganismos, la atmósfera del suelo tiene una composición diferente a la del exterior.

Cuando dos mezclas de gases de diferente composición entran en contacto se produce un intercambio entre

ellas; esto es lo que ocurre entre la fase gaseosa del suelo y la atmósfera. El intercambio entre ambas masas de gas favorece la renovación de aire en el suelo, lo que permite la incorporación de oxígeno y con esto la supervivencia de los organismos vivos, aunque, como ya hemos indicado, también pueden incorporarse agentes contaminantes que puedan estar presentes en la atmósfera externa.

Las relaciones de intercambio entre estas dos masas gaseosas pueden ser a través de dos tipos de proceso: mediante *convección* o mediante *difusión*.

Ambos difieren sustancialmente, tanto en las causas que los originan como en el tipo de intercambio a que dan lugar.

En los procesos de convección se produce una sustitución de parte del aire de la fase gaseosa del suelo por un volumen equivalente de aire procedente de la atmósfera.

Los fenómenos de difusión tienen un carácter distinto, pues lo que se produce es una sustitución de parte del CO_2 presente en el suelo por una cantidad de aire atmosférico similar, de forma que la composición de ambas fases tiende a homogeneizarse.

Los intercambios entre el aire del suelo y el del exterior disminuyen al alejarnos de la superficie, por lo que al aumentar en profundidad las proporciones de oxígeno van decreciendo respecto de las de CO_2 .

56.4.2. Procesos de convección

Como se explicó anteriormente, los fenómenos convectivos son procesos durante los cuales se produce una transferencia de masa de aire desde el suelo hacia el exterior, o a la inversa. Durante dichos procesos se produce una evacuación de parte de la mezcla de gases que constituye la fase gaseosa del suelo, que es sustituida por un volumen parecido procedente de la atmósfera.

Estos procesos pueden ser originados por múltiples factores, que se detallan en los siguientes epígrafes.

Variación en la humedad del suelo

La humedad del suelo es directamente dependiente de los aportes externos de agua, de la capacidad de drenaje del suelo y de la evaporación.

Los fenómenos de infiltración y evaporación provocan una entrada y salida de agua en el suelo, lo que implica la posibilidad de que se produzca un desplazamiento de los gases presentes en éste. Cuando se infiltra por drenaje, el agua presente en el suelo se produce un efecto de aspiración del aire exterior por parte de la superficie, penetrando este en el interior.

Este fenómeno es poco significativo por norma general, y su influencia sólo es claramente visible durante los períodos de fuertes lluvias o durante las sequías prolongadas.

Pueden producirse también fenómenos de convección entre los gases disueltos en el agua de lluvia que pasan a la fase gaseosa del suelo, aunque la importancia de tales aportes es mínima.

Alteración de la presión barométrica y de la temperatura del aire

La temperatura del suelo está sometida a constantes variaciones debidas a la diferencia de intensidad de la radiación solar a lo largo del día y a los distintos fenómenos climáticos.

Cuando la radiación solar provoca un incremento de temperatura en la superficie del suelo, se produce una disminución de la presión atmosférica y se genera un flujo de aire desde el interior del suelo hacia la atmósfera.

Si se produce un enfriamiento de la superficie, la presión disminuye, originándose una corriente inversa a la anteriormente citada, que va entonces desde la atmósfera externa hacia el interior del suelo.

Por lo general, este fenómeno tiene una importancia relativa, ya que los gradientes térmicos que se producen en el suelo son bastante débiles, y no aparecen de forma repentina.

Influencia del viento

Los efectos del viento sobre la composición de la fase gaseosa del suelo tienen una doble vertiente.

Por un lado pueden provocar una entrada de aire atmosférico en el suelo cuando se trata de vientos de velocidad considerable y paralelos a la superficie. En ese caso, la alta velocidad del aire se asocia a un descenso en la presión en el suelo, y se produce un fenómeno de aspiración de los gases del suelo.

Por el contrario, cuando los vientos inciden de alguna forma sobre la superficie, la presión en el suelo se eleva, y el efecto producido es el opuesto.

Los efectos del viento sobre la aireación del suelo dependen directamente de la velocidad de dicho viento y de la porosidad del terreno, y sólo revisten cierta importancia cuando ambas condiciones son de elevada magnitud.

Estos efectos, además, sólo son perceptibles en los primeros centímetros de la superficie.

56.4.3. Procesos de difusión

Son fenómenos mediante los cuales se produce una homogeneización de dos mezclas de gases en contacto directo que se encuentran en reposo.

En la fase gaseosa del suelo el desarrollo de este proceso es análogo a los que ocurren en la fase líquida, aunque la intensidad con que se produce es menor, debido a la saturación de los poros del suelo.

Los procesos de difusión se producen de forma continua en presencia de gradientes de concentración, de forma que son los responsables de la semejanza

entre las capas más superficiales del suelo y la atmósfera.

A diferencia de los fenómenos de convección, cuya aparición era puntual y siempre limitada por la concurrencia de determinados fenómenos atmosféricos, la difusión se produce como consecuencia directa del consumo de oxígeno y de la producción de anhídrido carbónico, por lo que, como ya hemos dicho, es constante; este proceso es el auténtico responsable de lo que se denomina la aireación del suelo.

La *Tasa de difusión* aumenta en función de la temperatura, y es prácticamente proporcional al volumen de la porosidad del suelo ocupado por la fase gaseosa. Las variaciones en esta tasa de

difusión vienen directamente determinadas por la textura del suelo: Cuando el camino que ha de recorrer una molécula de gas a través de los poros es más largo, esta tasa es menor. La principal dificultad que encuentran las moléculas dentro del sistema poroso del suelo para la difusión se debe a los choques que se producen entre ellas durante su trayectoria. Por lo general, cuando se trata de suelos secos, son los de textura fina los que cuentan con mayor espacio para la difusión de los gases, mientras que en suelos húmedos son los de textura gruesa los que tienen mayor espacio poroso ocupado por la fase gaseosa, por lo que será en estos donde se produzcan los fenómenos de difusión con mayor facilidad.

NOVENA PARTE

La contaminación atmosférica y la vegetación

CAPÍTULO 57

FISIOLOGÍA, ORGANOGRAFÍA Y BIOQUÍMICA VEGETAL ANTE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

57.1. BIOQUÍMICA Y CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

57.1.1. Las enzimas

Podemos definir las enzimas como biocatalizadores autógenos específicos. Son fundamentales en el funcionamiento de la célula, pues todas las moléculas vivas se forman y se degradan mediante reacciones químicas que en su mayoría son catalizadas por enzimas.

Muchas proteínas tienen un grupo protéico y otras, además, tienen un grupo prostético (aminoácido con un grupo prostético).

Ciertos grupos prostéticos asociados a sustancias orgánicas forman las coenzimas. Algunas de estas últimas son vitaminas, no sintetizables por los mamíferos pero sí por los vegetales.

Apoenzima es la parte proteica de una enzima.

Cofactores minerales son los iones minerales que requieren las enzimas para su funcionamiento, productos relacionados frecuentemente con la contaminación.

Se pueden presentar, en lo que se refiere a las enzimas, las siguientes situaciones:

- Apoenzima.
- Apoenzima + coenzima.
- Apoenzima + cofactor mineral.
- Apoenzima + coenzima + cofactor mineral.

Su estructura se adapta, entre otras cosas, a sus funciones, partiendo de la base de que deben ser catalizadores, lo que depende de su estructura proteica.

La apoenzima en un momento dado puede modificar su actuación, y pasar de una forma inactiva a una forma activa, para lo que necesita una regulación mediante la fijación de ligandos (moléculas del exterior).

Una característica a tener en cuenta en lo que se refiere a la acción de los factores ambientales, es que las reacciones enzimáticas aumentan su velocidad con el calor, pero en un rango de temperaturas muy reducido.

Fuera de ese margen de temperatura (10-50 °C) se presenta una desnaturalización o pérdida de su estructura secundaria, terciaria y cuaternaria (pero no de la primaria). Si existen otras proteínas, pueden proteger algo a la enzima, pero al final se desnaturaliza.

Otros factores, que se pueden considerar en algún caso como de contaminación, pueden ejercer el mismo efecto de desnaturalización. Nos referimos a algunos productos muy ácidos o muy básicos, a la exposición a ciertas soluciones de metales pesados, a algunos detergentes (dodecilsulfato sódico, etc.), a ciertos solventes orgánicos (alcoholes) y a una acción mecánica más o menos violenta que provoque un estiramiento de las moléculas proteicas, como ocurre, por ejemplo, al formarse las espumas, hecho que se utiliza en actividades de depuración de aguas.

Existe también una serie de factores reguladores de la cinética enzimática, es decir, factores que actúan sobre la velocidad de sus reacciones. Entre otros muchos, los que tienen interés desde nuestro punto de vista de la contaminación, son la duración de la reacción, la concentración del sustrato, la concentración de enzima y la presencia de productos activadores o inhibidores.

Además de estos factores existen los efectores, variables capaces también de alterar la cinética enzimática. Nos referimos por ejemplo al pH, que fuera del rango 2-11 provoca la desnaturalización de las proteínas enzimáticas en función de la temperatura y según los inhibidores competitivos o no competitivos, que originan inhibiciones normales o mixtas.

Ciertas enzimas funcionan como activadores, apoyadas a veces por un efector que puede ser un metal. El metal puede actuar como activador, independientemente de que forme parte o no de la enzima. Este hecho es interesante en lo que concierne a la contaminación, y lo mismo ocurre con la posibilidad de que las enzimas con activador o cofactor metálico puedan ser inhibidas por sustancias que fijen sus iones minerales.

Las enzimas funcionan de forma integrada dentro de las necesidades de las células y de los organismos a que pertenecen.

Aunque algunas de ellas actúan en forma independiente de otras, la mayoría participan en procesos complejos como son las vías metabólicas, donde se forman moléculas específicas o metabólitos, que son transformados por enzimas.

La actividad de las enzimas depende, entre otras cosas, de la presencia del sustrato. Cuando la vía metabólica está interrumpida o si el aporte alimentario es insuficiente o desequilibrado, la enzima deja de catalizar. Asimismo, el movimiento a través de las membranas, si por ejemplo, no existe un transportador, se

ve alterado e incluso interrumpido. Por otra parte, si falta una coenzima, como ocurre en las carencias vitamínicas, la enzima correspondiente se inhibe.

Lo anteriormente indicado muestra claramente la íntima relación que tiene la actividad enzimática con muchos aspectos referentes a la contaminación, pues esta última puede generar situaciones de presencia de metales, de carencias, de disfunciones en el aporte alimentario, de temperaturas extrañas, de pH alterado o de aparición de productos muy ácidos o muy básicos, que traen como consecuencia la alteración de las funciones enzimáticas, con todo lo que ello representa en el funcionamiento celular, en el de los tejidos y en el acontecer general de los seres vivos.

57.1.2. Las proteínas

Parte de lo indicado en el epígrafe anterior, referente a las enzimas, es válido para este, añadiéndose que las proteínas son diferentes para cada especie e incluso, a veces, entre individuos de la misma especie.

Están constituídas por cadenas de aminoácidos, con funciones definidas según su estructura. Son macromoléculas no dializables, en las que los aminoácidos que citamos están unidos por enlaces peptídicos.

En la fauna las proteínas son materiales estructurales, y en la flora básicamente estos materiales son polisacáridos.

Las proteínas, aparte de su función de actuar como enzimas catalizando infinidad de reacciones, sirven de transportadores de otras moléculas más pequeñas.

Según su carácter, tienen propiedades que pueden verse afectadas directa o indirectamente por la contaminación atmosférica. Así, las proteínas globulares son anfóteros, tienen diferencias de solubilidad, el pH influye mucho sobre ellas, sus soluciones absorben la luz y tienen propiedades antigénicas, como veremos.

Las especies no dejan penetrar en su ambiente interior o en sus células a macromoléculas de otra especie, y para ello utilizan mecanismos diversos, con barreras como la misma presencia de la piel o la pared del tubo digestivo, o mediante reacciones inmunitarias de puesta en funcionamiento de los linfocitos T, de los macrófagos, o de los linfocitos B. Mediante diversas actuaciones físicas y bioquímicas consumen o destruyen proteínas extrañas o generan otras proteínas (anticuerpos) que se combinan con la molécula extraña e incapacitan su posible actividad nociva.

La contaminación atmosférica, compleja o simple, afectará al funcionamiento de las proteínas en la medida en que su incorporación a la función respiratoria o fotosintética de los seres vivos perturbe a los elementos necesarios para ese funcionamiento, aunque muchas veces no se vean afectados directamente, como ocurre con la presencia de SO₂, CO o NO_x. El F provoca la disminución del RNA de las células vegetales o la inhibi-

ción de la actividad de ciertas enzimas, y otros contaminantes atmosféricos producen efectos similares, como se verá en el capítulo correspondiente.

57.1.3. Los aminoácidos

Los aminoácidos son ácidos carboxílicos portadores de funciones amina.

Como componentes de ellas, su relación con las proteínas es íntima, y, en principio, todo lo que afecte a unos afectará a las otras, lo que debe tenerse en cuenta cuando tratamos de contaminación atmosférica y de sus efectos sobre los seres vivos.

La mayoría de los aminoácidos son solubles en agua y ello depende, en gran parte, del pH. Estas propiedades influyen directamente sobre la estructura de las proteínas, teniendo por otra parte, aquellos carácter hidrófilo o hidrófobo.

Los aminoácidos poseen grupos más o menos disociables, y esta propiedad varía con el pH.

Los aminoácidos pueden sufrir des-carboxilación o pérdida de CO_2 , dando origen a aminas.

Finalmente, muchos aminoácidos se forman en los vegetales, sobre todo en reacciones fotosintéticas de los glúcidos. Otros los forman ciertos microorganismos. Al final los utilizan los animales para incorporarlos a sus proteínas musculares.

Ya hemos indicado que una función básica de los aminoácidos es formar

parte de las proteínas mediante la síntesis proteica. Si los animales o el hombre consumen un exceso de aminoácidos, estos pierden su función amina y son acumulados como reserva, transformados en glúcidos y lípidos. En caso de desnutrición puede llegarse a un catabolismo de las proteínas musculares y proporcionar estas los aminoácidos necesarios.

Varios contaminantes atmosféricos afectan a los aminoácidos como componentes de enzimas-proteínas alterando su funcionamiento.

57.1.4. Ácidos nucleicos

Solamente indicamos que ciertos contaminantes, como el F, actúan provocando disminuciones del RNA en las células vegetales; otros, como el CO , se incorporan a los ciclos metabólicos y participan en la formación de los aminoácidos y del DNA. Otros, en fin, influyen más o menos directamente en el funcionamiento de estos al ser también macromoléculas dentro de los grupos citados en este capítulo.

57.2. FISIOLOGÍA ORGANOGRAFÍA Y CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

57.2.1. Orientación general

La fisiología y la organografía, tanto vegetal como animal, tienen una rela-

ción íntima con las agresiones al medio natural, en cuanto que sus elementos y sus acciones se ven afectados directa o indirectamente por numerosos factores externos.

Si estos factores externos se ven alterados, lógicamente las células, los tejidos, los individuos y sus correspondientes actuaciones específicas y metabólicas se verán alterados.

El pH, la temperatura, la acidez, la presencia de metales pesados, la falta de un transportador, la alteración del aporte alimentario pueden alterar desde algunos aspectos estructurales de las moléculas celulares hasta el funcionamiento de tejidos y sistemas.

Los componentes de los seres vivos, ante las agresiones ambientales, ponen casi siempre en marcha mecanismos muy complejos de minimización de la perturbación, pero a veces se modifican ciertos aspectos bioquímicos y fisiológicos, y el resultado es un mal funcionamiento celular y una degradación parcial o total del ser que sustenta esos componentes.

57.2.2. La célula y la contaminación atmosférica

La célula es un medio heterogéneo, con una compartimentación establecida mediante la membrana plasmática, con la que se separa de otras células o de otros tejidos.

Las células vegetales tienen la pared celular para la misma función.

Cada espacio contiene soluciones acuosas de proteínas, lípidos, glúcidos y sales minerales.

La concentración molar en cada compartimento varía, de forma que esta variación permite cumplir las funciones de cada uno de ellos.

Las moléculas que componen las células están ordenadas y asociadas para realizar las funciones de especialización que efectúa cada componente celular.

La comunidad de propiedades físico-químicas de esas moléculas permite que se asocien y efectúen reacciones muy complicadas, que ante una agresión externa, verán modificada el medio, los compuestos químicos participantes, los orgánulos celulares alterados o, simplemente, la célula contigua muerta, por lo que esas reacciones pueden verse inhibidas, trastocadas, potenciadas, anuladas o transformadas.

Debemos tener en cuenta que los orgánulos de la célula procuran actuar defendiéndose de la agresión sin perder sus funciones.

Básicamente, en lo que nos afecta, estos organismos son:

- *Retículo endoplasmático*: Es un sistema de membranas que puede ser granular o liso. El primero contiene ribosomas y está muy desarrollado en las células secretoras, por lo que participa en la elaboración de los productos a secretar. Está formado por un sistema de membranas fosfolipídicas que limitan unas cisternas o cavidades.

El segundo, que es el retículo endoplasmático liso, es parecido al anterior, pero carece de ribosomas (sin proteína de fijación). Contiene ciertas enzimas y una reserva líquida con iones calcio que pueden ser liberados al citoplasma.

Las cisternas pueden liberar vesículas cerradas con productos de secreción, que así pueden ser llevados a otros destinos o ser alimentados.

- *Ribosomas o microsomas*: Son orgánulos ribonucleoprotéicos procedentes de la asociación de varias proteínas y de algunas moléculas de ARN localizados en el retículo endoplasmático granular, o libres en el citoplasma.

Ejercen una función de síntesis de proteínas.

- *Mitocondrias o condriosomas*: Son orgánulos independientes del resto de la célula, de la que se separan por una doble membrana fosfolípida.

La membrana externa comprende proteínas integrales o canales que permiten el paso de otras proteínas, iones minerales y ácidos grasos. La membrana interna contiene muchas enzimas y actúa como una membrana respiratoria.

Las mitocondrias son las centrales energéticas de la célula, con un alto contenido enzimático, y en ellas se realizan gran parte de los ciclos de Krebs, y se consigue parte de la oxidación de la glucosa a CO_2 y H_2O .

- *Núcleo*: Regula la síntesis de las enzimas que catalizan el metabolismo, y

por lo tanto es un controlador de los mecanismos de la fisiología celular.

- *Cloroplasto*: Es un plastidio de la célula vegetal, con clorofila verde como pigmento fotosintético predominante. Está limitado por dos membranas fundamentales, y en él se realiza la fotosíntesis o anabolismo del dióxido de carbono apoyado por la luz.
- *Vacuola*: Ocupa gran parte del volumen de la célula y es el depósito que regula el movimiento y la turgencia general de la célula. A ella se vierten los residuos celulares y actúa en ocasiones a modo de vertedero.

57.2.3. Los estomas y la contaminación atmosférica

La superficie epidérmica de las hojas de casi todos los vegetales tiene una serie de poros a los que llamamos estomas. Estos poros, de grado variable y regulable de apertura, comunican el espacio exterior con los tejidos y espacios intercelulares de la hoja.

Exteriormente están compuestos por las células oclusivas, que son dos células epidérmicas diferenciadas, casi siempre reniformes, que regulan el movimiento del estoma en su parte externa.

La mayoría de las hojas de los vegetales disponen de gran número de estomas en el envés, y muchas de ellas también los poseen en el haz, aunque en menor cantidad por unidad de superficie.

La posición de la parte externa del estoma respecto de la epidermis es va-

riable; unas veces está al mismo nivel (especies mesofíticas), otras está situado en concavidades (algunas especies xerofíticas), y por último, otras veces, aunque raras, las células oclusivas se encuentran ligeramente elevadas sobre la superficie del resto de la hoja (en ambiente húmedo).

La forma de los estomas es variable, pues depende fundamentalmente del grado de apertura y de su estado de turgencia (según sea su nivel de solubilización del almidón).

Frecuentemente el estoma dispone, junto con las células oclusivas, de otro tipo de células, las anexas, algo diferenciadas, que posibilitan el movimiento de las células oclusivas al tener muy delgada la pared que está en contacto con estas.

Según *Cappelletti* se pueden diferenciar tres tipos de estomas:

- *Tipo amarilidáceas y coníferas.* Las membranas que dan a la abertura son gruesas, mientras que las de la cara interna son muy elásticas; al aumentar la turgencia se modifica la curvatura de la cara rígida y se abre el estoma; en caso contrario se cierra (aparecen tres puntos de unión). Este es un caso común en muchos vegetales.
- *Tipo gramíneas.* En este caso las células oclusivas forman en sus extremos unos ensanchamientos, los sacos polares, que, en caso de turgencia, al ser las membranas que dan al ostíolo rígidas, provocan la apertura, y el cierre en caso contrario.

- *Tipo Mniium.* El mecanismo se basa en que la pared celular que da al ostíolo es delgada. En caso de turgencia, aumenta su radio de curvatura y el estoma se abre.

* * *

Los estomas se componen, en su parte interna, aparte del ostíolo o poro, de una cámara subestomática, que es la que pone el estoma en comunicación con los meatos de los tejidos subyacentes.

Las paredes de las células oclusivas que se enfrentan en un estoma forman entre ellas, según *Haberlandt*, los siguientes espacios:

- Ostíolo.
 - Vestíbulo anterior.
 - Poro central.
 - Vestíbulo posterior.
 - Abertura opistial.
 - Cámara subestomática (la entrada).
 - A veces, antes del ostíolo se forman criptas protectoras, que contienen pelos y otras defensas (caso del *Nerium oleander*).
- El estoma puede ser considerado, por una parte, como el regulador de los intercambios de gases de los vegetales, y por otra, como el regulador de la transpiración, aunque ello no impide que existan otros mecanismos de menor importancia que también actúen en el mismo sentido, como son la misma epidermis y las lenticelas.

Consideraciones sobre el movimiento de los estomas

A finales del siglo XIX y principios del XX, gran cantidad de autores trataron de dilucidar los mecanismos de los intercambios gaseosos de los vegetales; las lenticelas de tallos y frutos y los estomas de las hojas se revelan como las principales vías de paso de los gases de la atmósfera a la hoja y viceversa. En el caso de las hojas, la regulación de dichos intercambios se realiza mediante el movimiento de los estomas.

La permeabilidad de la hoja a la difusión de los gases fue estudiada inicialmente por *Devaux* en 1898, y de ahí que se dé el nombre de *Efecto Devaux* a la alteración de las presiones de las masas gaseosas internas y externas del órgano vegetal provocadas por la introducción de éste en una atmósfera muy rica en CO.

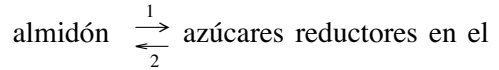
Basándose en este efecto, *Come* en 1960, y más tarde *Louguet*, pusieron a punto un método de estudio del movimiento de los estomas utilizando la difusión del hidrógeno a través de las hojas.

En cuanto al mecanismo del movimiento de los estomas, existen varias hipótesis que tratan de explicarlo.

Hipótesis clásica

Fue formulada por *Sayre* en 1926 y concluida por *Scarth* en 1932. Dice que la luz ejerce un efecto indirecto; al ser consumido el CO₂ presente en los espacios intercelulares durante la actividad

fotosintética, y ser este gas, en solución, un ácido débil, provoca un aumento del pH de las células estomáticas y un desplazamiento del equilibrio reversible



sentido 1, pues el aumento del pH favorece la acción de una fosforilasa.

Al aparecer azúcares solubles aumenta la presión osmótica de las células estomáticas, y, por consiguiente, una entrada de agua en las células, un aumento de la turgencia y la apertura de los estomas.

En la oscuridad el equilibrio se desplazaría en sentido inverso.

Levitt acepta la teoría excepto para pequeñas concentraciones de CO₂, pues dice que éstas no pueden provocar variaciones del pH apreciables mientras que, por el contrario, las diferencias observadas en el líquido de las vacuolas, son del orden de 2 unidades de pH. Sugiere, en cambio, que el CO₂ interviene en carboxilaciones que oxigenarán a ácidos orgánicos y ésto sí explicaría las variaciones del pH.

Esta teoría ha sido, si no desechada, al menos relegada a segundo término, pues la acción de la fosforilasa no se puede razonar con los pH en que actúa el CO₂, y menos aún si interviene una glicosiltransferasa.

Hipótesis sobre la acción del glicolato

Esta hipótesis fue establecida por *Zelitch* en 1963, y se basa en que los (-hidroxisulfonatos (R-CHOH-SO₃-H), inhibido-

res de la glicolatooxidasa, inhiben asimismo el movimiento de apertura de los estomas. El mismo autor completa su teoría en las contradicciones que se presentan con el movimiento en la oscuridad.

Hipótesis sobre la acción directa de la luz

Últimamente se admite que, independientemente del CO_2 , la luz interviene de una forma directa, aunque todavía se ignora el modo de acción y el grado de influencia sobre las condiciones normales de apertura.

Hipótesis sobre la función de los cationes

Fischer y col. demostraron que la apertura de los estomas de la epidermis era favorecida específicamente por la acción del ión K^+ .

Según su teoría, la cantidad de iones K^+ que penetran en las células estomáticas es suficiente como para justificar el aumento de presión osmótica, y, por consiguiente, la apertura de los estomas.

Willmer y *Mansfield* afirman que además del ión K^+ , el Na^+ ejerce el mismo efecto, y por el contrario, el Ca^{++} actúa con una función antagónica.

Otros factores externos

Además de la luz como factor externo, pueden tenerse en cuenta el agua y la

temperatura como parámetros que influyen en el movimiento de los estomas.

Al aparecer un déficit de agua en un vegetal, se producen ciertas transformaciones en las células oclusivas de los estomas, como, por ejemplo, un aumento del contenido en almidón.

El aumento de la temperatura provoca, en condiciones normales, un aumento de la apertura de los estomas.

Conclusiones sobre las diversas teorías

- Ninguna de las hipótesis indicadas explica totalmente el funcionamiento de los estomas.
- Actualmente no se han llegado a aislar todavía epidermis foliares, y seguidamente extraer de ellas células estomáticas en cantidad suficiente como para realizar un estudio biológico.
- Parece imposible, por ahora, aplicar los resultados obtenidos con células parenquimáticas a células estomáticas, debido a que éstas últimas poseen un metabolismo específico.
- Es casi seguro que, además de los factores externos, existen factores endógenos que actúan sobre el estoma.

Intercambios gaseosos respiratorios en los vegetales

En este apartado trataremos solamente algunos aspectos del intercambio gaseoso de los vegetales y el problema de la penetración y difusión de los gases en células y tejidos de los mismos.

Penetración y difusión de los gases en las células y tejidos.

En principio, todas las células vegetales mantienen intercambios gaseosos respiratorios; hasta el momento, muchas de las investigaciones efectuadas afirman que las células situadas en profundidad, es muy posible que se encuentren en anaerobiosis desde el punto de vista respiratorio.

La afirmación anterior se basa en la asimilación de un tejido compacto a un medio líquido, lo cual, naturalmente, no es real, pues como se sabe, las células vegetales no tienen contacto entre ellas en toda su superficie, sino que entre ellas existen meatos, lagunas, etc., cuyo conjunto constituye los espacios intercelulares. Estos espacios contienen aire en su interior, y se comunican con la atmósfera externa mediante los orificios epidérmicos, los estomas y las lenticelas.

El volumen de los espacios intercelulares puede llegar a ocupar, en casos extremos como ocurre con los nenúfares, un 70 por 100 del volumen total de las hojas; en casos normales se puede establecer como media un 20 por 100.

Las células vegetales están, pues, en contacto con la atmósfera de los espacios intercelulares; a partir de 1890, numerosos autores se dedicaron a estudiar la composición de esta atmósfera, y todos están de acuerdo en afirmar que, en los tejidos vegetales correspondientes a órganos de reserva, la atmósfera interna contiene mucho más CO₂ y algo menos oxígeno que la atmósfera externa.

Devaux indica, en 1891, los datos siguientes:

% DE O₂ Y DE CO₂ EN DIVERSOS MEDIOS (DEVAUX, 1891)

Medio	% O ₂	% CO ₂
Tubérculo de patata	14,88	4,74
Raíz de remolacha	12,44	4,68
Fruto de calabaza	18,29	2,55
Atmósfera ordinaria	20,8	0,03

La cantidad de O₂ presente es pues suficiente como para permitir intensidades respiratorias que pueden llegar hasta el máximo.

Difusión de los gases a través de los espacios intercelulares

Las cantidades indicadas en el apartado anterior son consecuencia del equilibrio entre la intensidad de los intercambios respiratorios y la velocidad de difusión en los espacios intercelulares.

Aunque los espacios estén rellenos de gas, la circulación debe cumplir leyes mucho más complejas que las de una simple difusión que está determinada, en parte, por un coeficiente igual al del aire; sin embargo, se puede intentar calcular un coeficiente de difusión aparente a través de un tejido vegetal dado.

Burton realizó tal determinación, hallando la caída de caudal de un flujo de aire que atraviesa un cilindro de tejido de tubérculo de patata, y dedujo las siguientes conclusiones:

- La velocidad del flujo gaseoso es inversamente proporcional a la longitud del cilindro.
- La velocidad de dicho flujo es directamente proporcional a la diferencia de presión entre diversas partes del cilindro.
- En todas las experiencias realizadas el flujo que atraviesa el cilindro de tejido vegetal es equivalente al de un gas que atravesara, en igualdad de condiciones, una sección de 0,4 por 100 de la del cilindro que contiene la materia vegetal.

Este último valor (0,4 por 100) indica que la velocidad de difusión de los gases en los espacios intercelulares es aproximadamente un tercio de la velocidad de difusión en el aire, y esto parece ser debido a que los trayectos siguen direcciones variables.

El pequeño calibre de los conductos facilitaría la difusión.

Influencia de los tejidos de revestimiento sobre la composición de la atmósfera interna.

Las hojas y tallos jóvenes están recubiertos por una epidermis impregnada de una cutícula muy poco permeable a los gases; por lo tanto, los gases sólo podrán entrar o salir por las aberturas de estos revestimientos, es decir, por las lenticelas y los estomas.

Sin profundizar en un estudio sobre los tejidos de las raíces o los tallos viejos y sin citar valores de coeficientes de

difusión, etc., podemos afirmar que, en conjunto, está claro que la anatomía foliar facilita los intercambios gaseosos con la atmósfera externa; como valores más comunes se pueden tomar de 1.000 a 50.000 estomas/cm² de hoja; la superficie del ostiolo abierto es aproximadamente de 10⁻⁶ cm², así pues, la superficie realmente libre para la difusión de los gases estará comprendida entre 5,10⁻³ y 10⁻³ cm²/cm² de hoja.

Influencia de la tensión del oxígeno sobre la intensidad de los intercambios gaseosos respiratorios.

El obstáculo que presentan los tejidos de revestimiento, la relativa lentitud de la difusión en los espacios intercelulares y el consumo debido a la respiración hacen que la tensión interna del oxígeno sea claramente inferior a la tensión externa.

Se sabe desde hace tiempo que la intensidad respiratoria es función de la tensión del oxígeno; como indica el gráfico adjunto, la función es hiperbólica; el crecimiento de la intensidad respiratoria es inicialmente grande y se va haciendo menor hasta anularse para cierta tensión, alcanzando entonces la velocidad de absorción del oxígeno un nivel fijo que ya no es sensible a un aumento de tensión.

La forma hiperbólica de la curva puede demostrarse representando gráficamente la inversa del consumo de O₂ /unidad de tiempo en función de la inversa de la tensión, pareciendo los pun-

tos que se obtienen, alineados según una recta.

Efectos de la contaminación atmosférica sobre los estomas

Como se ha indicado en apartados anteriores, los estomas son la vía principal de los intercambios gaseosos en los vegetales y un medio de transpiración.

Toda alteración de la atmósfera externa, en cuanto a aparición de agentes extraños, producirá perturbaciones, visibles o no visibles, en estos aparatos del vegetal.

La presencia de partículas sólidas se ha estudiado en el capítulo correspondiente; sus efectos sobre los estomas dependen, entre otros factores, de la composición del polvo y de su concentración. Las partículas inertes obturan los estomas disminuyendo la actividad foliar (aparte de perjudicar la actividad fotosintética); las partículas procedentes de los hidrocarburos o de su combustión también los obturan. En el caso de estomas con cripta, la defensa es mejor, pues parte del polvo se detiene a la entrada; los pelos y tricomas detienen asimismo las partículas e impiden su entrada al estoma.

Los alquitranes penetran por el estoma y atacan las zonas próximas (entran a los espacios intercelulares).

Las hojas que sólo disponen de estomas en el envés se defienden mucho mejor de los depósitos de partículas sólidas, pues éstos se forman casi siempre por

sedimentación sobre el haz, a no ser que el polvo tenga propiedades adherentes.

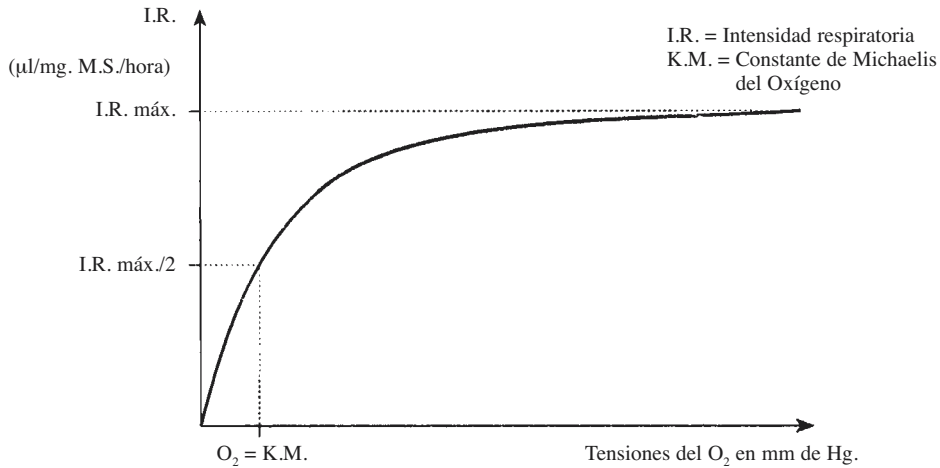
En cuanto a los gases, los principales contaminantes penetran por los estomas (SO₂, CO, F, etc.) y ejercen su acción sobre las zonas inmediatamente próximas; los tejidos lagunar y en empalizada se ven afectados en las células más cercanas a aquéllos.

El grado de apertura de los estomas es un factor limitante de los intercambios gaseosos de las hojas; es por ello por lo que las perturbaciones que pueden provocar los agentes contaminantes atmosféricos dependen en gran parte de la apertura o cierre de estos aparatos foliares.

Debido a lo expuesto, toda alteración del mecanismo del movimiento de los estomas redundará en su capacidad de defensa ante ataques de agentes extraños. Es muy posible que ciertos agentes afecten a este mecanismo, actuando tanto sobre el intercambio de gases como sobre la transpiración, al dañar las células oclusivas o sus paredes y modificar los fenómenos que producen las turgencias celulares que abren o cierran el aparato estomático.

La actividad de cada agente contaminante sobre los estomas ha sido poco estudiada. Creemos que sería de gran interés el desarrollo de investigaciones que orientaran en cuanto a las modificaciones que sufre el mecanismo del movimiento de los estomas, de forma que se pudieran distinguir, por este método, especies que justificaran la resistencia que demuestran ante diferentes contaminantes.

INTENSIDAD RESPIRATORIA EN FUNCIÓN DE LA TENSION DE O₂



57.3. METABOLISMO Y NUTRICIÓN

El metabolismo es el conjunto de todas las actividades químicas y energéticas que realiza un organismo o sus componentes celulares para obtener energía y para formar sustancia propia.

Los tipos básicos de metabolismo son el *anabolismo* (synthetic metabolism) y el *catabolismo* (degradative metabolism). Como su denominación inglesa indica, el primero es un metabolismo constructivo, de síntesis a productos complejos, con procesos endergónicos. El segundo es un metabolismo destructivo, de descomposición a productos sencillos, con producción de energía.

La nutrición es una función metabólica basada en el intercambio con el exterior (sustrato exógeno), en la que se toma materia prima externa (alimento), y

lo mismo ocurre con la respiración, en la que se toma aire del exterior.

La nutrición puede presentarse de diversas formas:

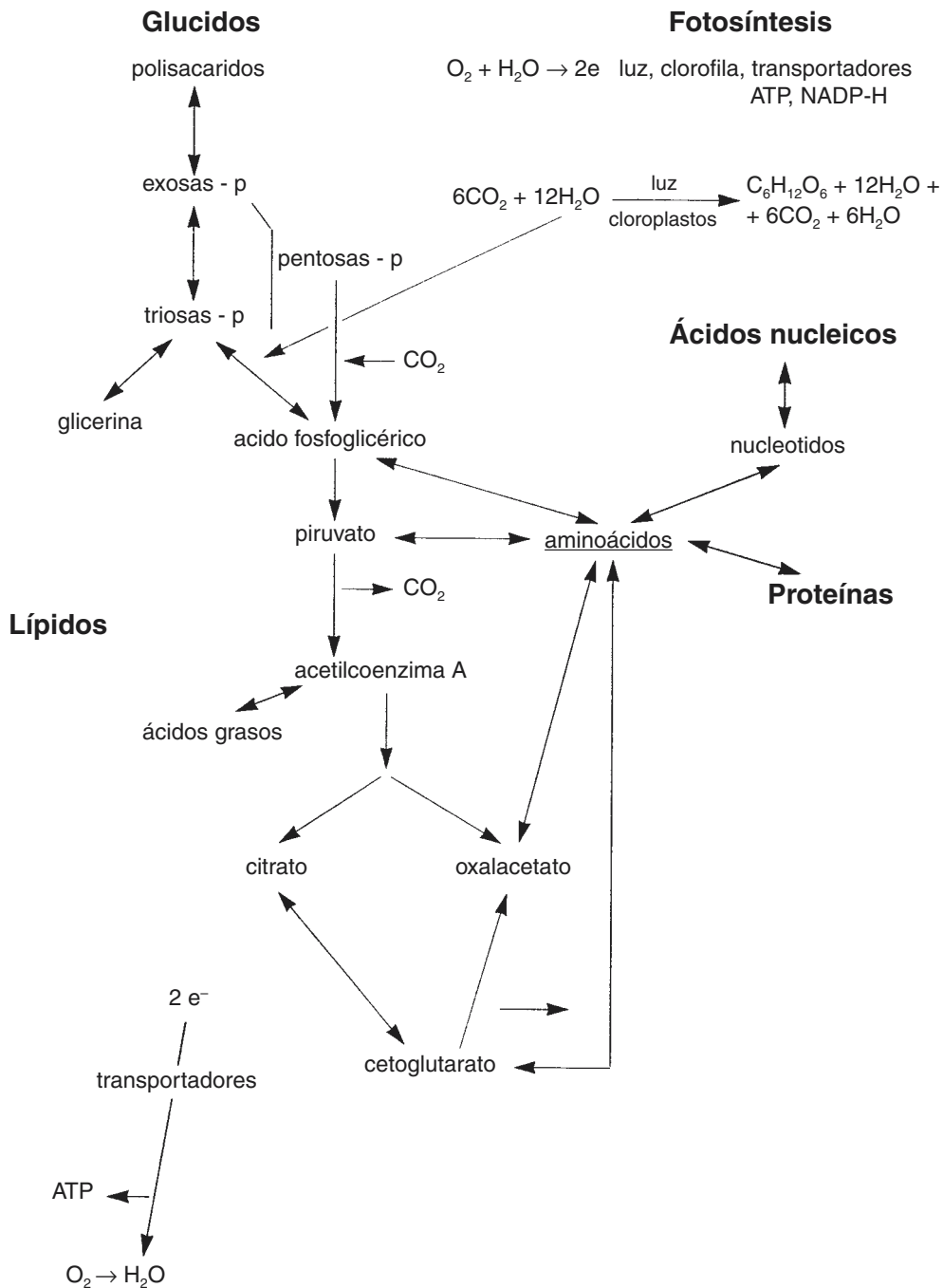
Según la fuente primaria de energía, existen:

- Seres *quimiotrofos*: Obtienen ATP por oxidación de compuestos químicos.
- Seres *fototrofos*: Fijan además la energía luminosa.

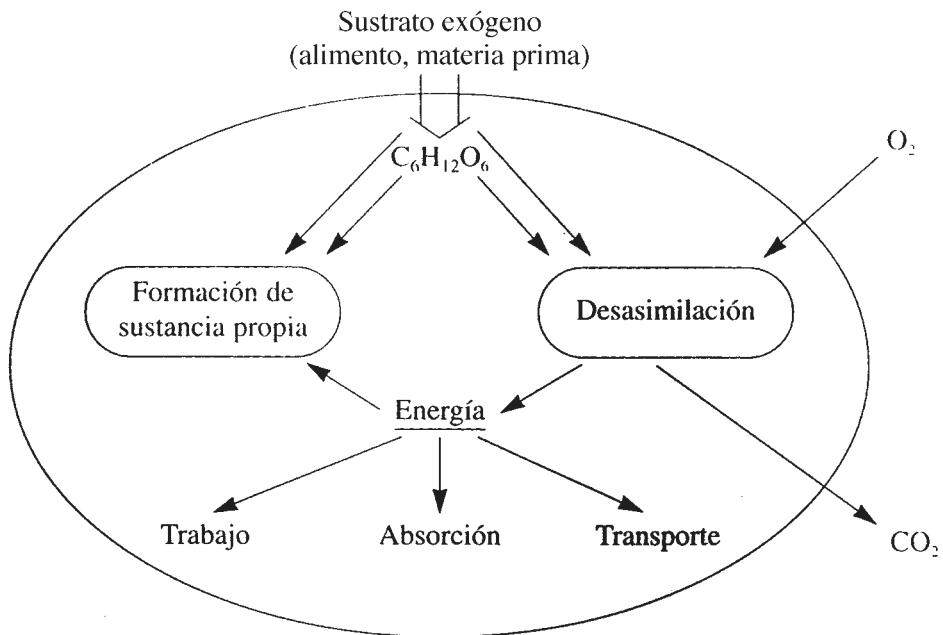
Según la fuente primaria de poder reductor existen:

- Seres *heterotrofos*: Utilizan el poder reductor de compuestos orgánicos.
- *Quimioheterótrofos*: Utilizan moléculas orgánicas del exterior como fuente de poder reductor y de energía y como materia prima para generar sustancia propia.

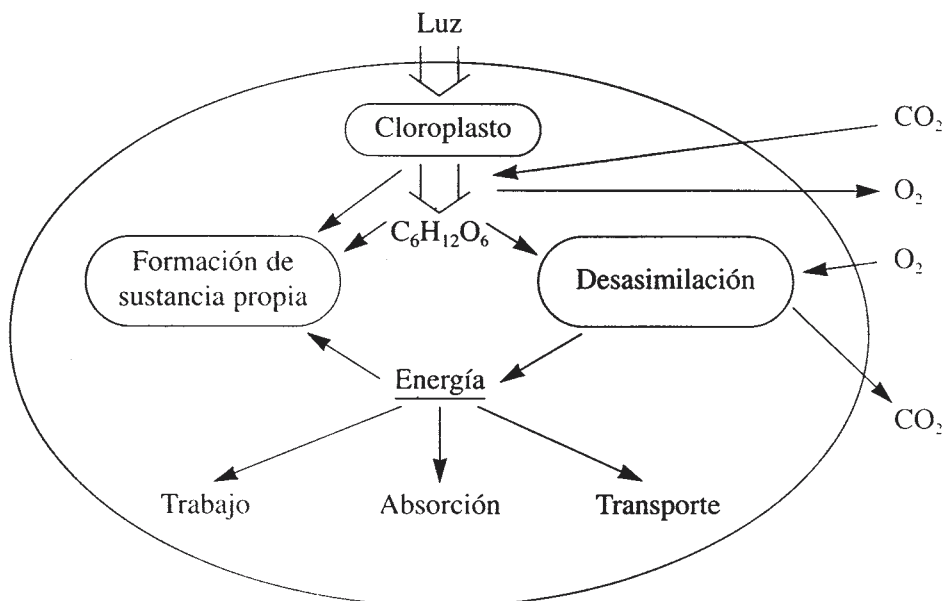
ESQUEMA DEL METABOLISMO CELULAR



METABOLISMO DE LA CÉLULA ANIMAL



METABOLISMO DE LA CÉLULA VEGETAL



- *Fotoheterotrofos*: Utilizan la luz como fuente primaria de energía.
- Seres *autotrofos*: Utilizan el poder reductor de compuestos inorgánicos.
- *Quimioautótrofos*: Utilizan moléculas reducidas sencillas, que oscilan en condiciones aerobias para obtener energía.
- *Fotoautotrofos*: Plantas con pigmentos, en su mayoría plantas verdes, que canalizan la energía solar a través del ATP para constituir materia orgánica partiendo de compuestos minerales sencillos.

En los procesos fotosintéticos se efectúan reacciones luminosas y reacciones oscuras. En las primeras actúan los fotosistemas o pigmentos asociados a la clorofila, que colaboran con ella en el proceso base. Estos fotosistemas se ubican en los tilacoides o membranas especializadas. En las segundas, el NADPH y el ATP procedentes de las reacciones luminosas fijan y reducen el CO₂ del aire, para formar hidratos de carbono.

Desde el punto de vista de la contaminación, estos procesos metabólicos tienen una importancia manifiesta, puesto que numerosos contaminantes influyen directamente en muchas reacciones metabólicas.

El SO₂ y otros derivados (SO₃, SO₄) establecen actividades de competencia con el CO₂ atmosférico en la regulación de las enzimas de la carboxilación, provocando inhibiciones.

El CO y otros contaminantes (SO₂, etc.), en ciertas circunstancias son capaces de incorporarse a los procesos meta-

bólicos del C o del S respectivamente, y pueden ser asimilados en pequeñas concentraciones.

Los metales pesados o el F influyen bloqueando procesos (el F inhibe la fotosíntesis) o perturbando muchas reacciones.

En otro sentido, debemos tener en cuenta que el metabolismo no es un ciclo perfectamente cerrado o equilibrado. Algunas moléculas salen de las células y se pierden, otras sufren transformaciones que las inutilizan y todas ellas deben ser eliminadas de sus células, pues si no, perturbarían al organismo correspondiente.

El desarrollo humano ha generado innumerables productos que contienen moléculas no metabolizables que pueden ser absorbidas en la respiración o en la fotosíntesis, o ingeridas en la nutrición. En ambos casos aportan materias extrañas al organismo (compuestos xenobióticos), perturbando el metabolismo.

Los compuestos xenobióticos se forman por oxidación (hidrocarburos por enzimas), por reducciones (aldehídos o cetonas a alcoholes), por conjugación (combinación con una molécula adecuada), por metilación (piridina sobre su nitrógeno, algunos metales pesados) o por acetilación (genera funciones amida).

Sustancias de desecho del metabolismo:

- Moléculas glucídicas.
- Desechos de los lípidos.

- Desechos de los aminoácidos.
- Desechos de los péptidos.
- Desechos de las proteínas.
- Desechos de los ácidos nucleicos.
- Desechos de los grupos tetrapirrólicos.
- Formación de pigmentos biliares.

Mecanismos de excreción de desechos del metabolismo:

- Eliminación salival.
- Eliminación biliar.
- Eliminación fecal.
- Eliminación renal.
- Eliminación de CO₂.
- Sudación.
- Secreción de resinas.

- Secreción de ceras.
- Transpiración.

Estos compuestos xenobióticos (véase cuadro adjunto) deben ser excretados y sacados al exterior. Erróneamente se habla con insistencia de eliminación, cuando cualquier sustancia residual o de desecho no es eliminada, sino transformada o traspasada a otra fase o lugar, y este es uno de los grandes problemas de la contaminación ambiental.

Una vez fuera de los organismos, podrán generar o no contaminación ambiental en función de las circunstancias de cada caso (básicamente si existe masificación).

De todos modos, hemos de aclarar que por lo que se refiere a la contaminación atmosférica, las perturbaciones se generan fundamentalmente en la entrada y contacto con los agentes contaminantes, y no en la salida.

CAPÍTULO 58

LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS DEL AIRE Y LOS VEGETALES

58.1. BASES Y FACTORES INCIDENTES

58.1.1. Bases generales

En general, la vegetación se ve más o menos afectada por la presencia de partículas sólidas en la atmósfera; para unas especies es motivo de perturbaciones mientras que para otras es una necesidad, pues es el único aporte de materia mineral de que disponen.

Desde el punto de vista de las perturbaciones que provocan, habrá que indicar que los estomas y lenticelas de los vegetales, si están abiertos, pueden verse obturados, pueden sufrir dificultades en el intercambio de gases, pueden penetrar en ellos partículas activas o pueden, en fin, ver dañadas sus células oclusivas, como se ha indicado en el capítulo anterior.

Las partículas contaminantes del aire, aparte de los trastornos que pueden provocar en su acción directa sobre los vegetales, pueden actuar, como ya se ha in-

dicado anteriormente, sobre las condiciones ambientales de la vegetación, produciendo una disminución de la penetración de las radiaciones U.V. (o sea, menos acción germicida y peor metabolismo del calcio al dificultar la síntesis de la vitamina D), menos rayos del espectro visible (azules y rojos principalmente) que provocan la función clorofílica, menor calor al penetrar menos rayos IR, etc., lo que se traduce en cambios completos en la actividad vegetativa en unas ocasiones y en necrosis, muertes o menor período de vida en otras.

Las partículas sólidas sedimentables se depositan sobre las partes aéreas del vegetal, principalmente sobre las hojas. El viento, al mover éstas, hace caer parte del polvo sedimentado, con lo que los depósitos nunca alcanzan el mismo volumen que el que se puede recoger sobre placa.

Sin embargo, el área de la cubierta vegetal sobre una superficie de suelo dada, es generalmente muy superior a la de

esa superficie, pues las hojas están ubicadas a diferentes niveles, con lo que la masa superficial foliar expuesta es mucho mayor que la de su proyección horizontal sobre el suelo. Esto puede tomarse como base para su aplicación en el uso de la vegetación como medio de captación de partículas en el medio urbano.

58.1.2. Factores incidentes

La cantidad de polvo recogida por una superficie foliar es muy variable, pues depende fundamentalmente de tres consideraciones:

Características externas de la hoja

Como es lógico, las hojas con excrescencias, pelos, exudaciones o relieve muy accidentado, pueden retener el polvo mucho mejor que las hojas coriáceas, lisas y sin ceras protectoras. Como ejemplos podemos indicar que las hojas carnosas tipo *Catalpa* o *Pawlonia*, con especiales condiciones de pilosidad, retienen por ello más el polvo que otras, cosa que también ocurre con ciertas jaras (*C. ladanifer*) debido a sus exudaciones de carácter adherente.

El porte de la planta también influye, pues, en ciertos casos, los vegetales de escasa altura reciben mucha más cantidad de polvo, como ocurre con las herbáceas en general y con los arbustos próximos a carreteras.

La posición de la hoja también influye mucho, ya que, cuanto más se aleje

de la horizontal, menor será la superficie expuesta a la sedimentación por gravedad.

Asimismo, los verticilos superiores de un individuo recogerán muchas más partículas que los inferiores, a quienes cubren.

Como es lógico, las plantas de hoja ancha captarán más partículas que las de hoja acicular, y también los vegetales cuyas hojas permanezcan más tiempo en ellos.

Características de la inserción de la hoja

Las especies con pecíolo delgado y largo y hoja relativamente ancha, recogen las partículas en menor cantidad que las de hoja con pecíolo corto y grueso, pues el viento las mueve mejor y, si el polvo no se ha adherido a la superficie foliar, como se indica en el párrafo anterior, caerá a tierra; como ejemplo típico de este caso se puede citar el del chopo temblón (*P. tremula*), que tiene los pecíolos aplanados en la zona de unión con el limbo, lo que hace que, con poco viento, las hojas se muevan mucho.

Climatología

Los vientos mueven las partes aéreas de las plantas y arrastran el polvo depositado o provocan su caída al moverlas.

Las precipitaciones disuelven o arrastran asimismo las partículas sedimentadas. En ciertas condiciones, las

partículas solubles químicamente activas pueden ser mucho más agresivas para el vegetal si están disueltas en agua, pues el contacto y la penetración, en principio, serán mayores.

58.2. PARTÍCULAS INERTES

Se trata de aquellos compuestos sólidos presentes en el aire que no tienen una actividad química directa en condiciones normales. Entre éstos se pueden considerar los compuestos arcillosos o de sílice, las sales (neutras) magnésicas y cálcicas y los óxidos de aluminio y hierro.

La acción del polvo inerte sobre los vegetales no es nociva en cuanto a sus efectos directos, pero si lo es en sus efectos indirectos, pues al acumularse sobre las hojas obtura los estomas y disminuye las superficies foliares expuestas a las radiaciones solares que provocan la función cloroflica.

58.3. ACCIÓN BENEFICIOSA DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS NO TÓXICAS SOBRE CIERTOS VEGETALES

El polvo presente en el aire puede actuar en forma beneficiosa sobre los líquenes, puesto que es una de sus fuentes alimenticias al depositarse sobre el talo y nutrirse la planta de él, debido a su contenido en fosfatos y nitratos. La acción de la lluvia facilita la asimilación.

Ciertas algas microscópicas se alimentan de los elementos (Mg, K, Na,

etc.) del agua de lluvia que aparecen en ésta debido al polvo que se disuelve.

Algunos vegetales más evolucionados, como ciertas farinóseas (algunas bromeliáceas) aéreas, son capaces de tomar el polvo y el agua de lluvia en sus hojas y asimilarlo directamente. Tienen, además, cierto poder de selectividad respecto de algunas sales.

58.4. PARTÍCULAS TÓXICAS DE ORIGEN INDUSTRIAL

Generalmente la toxicidad es mayor en los compuestos solubles como sulfuros, sulfatos, cloruros, etc.

La acción sobre el vegetal se realiza al depositarse el polvo sobre las partes aéreas; si llueve o si las hojas están húmedas, la perturbación aparece y se manifiestan inmediatamente las necrosis y caída de hojas.

Entre los contaminantes más comunes de este tipo podemos citar los siguientes:

- Combustión de lignitos:
 - Sulfuros de calcio y de sodio (decoloración).
 - Sulfato de sosa (decoloración).
- Ácido arsénico (actúa principalmente a través del suelo).
- Sulfuros en general (por facilitar además la formación de SH_2).
- Fábricas de celulosa (de antigua construcción):
 - Carbonato de sosa (depósito blanco).

- Industrias del mercurio.
 - sobre las hojas (caída y necrosis).

58.5. PARTÍCULAS TÓXICAS NO INDUSTRIALES E INDUSTRIALES NO TÓXICAS

Podemos citar las partículas de CINA de zonas próximas al mar; su depósito sobre partes aéreas de especies no halofitas (y en suelos), produce la muerte o perturbaciones graves.

Las sales metálicas insolubles, como el sulfato de plomo, el blanco de zinc, etc., no ejercen una acción directa, pero sus efectos indirectos sobre los intercambios gaseosos por obturación de los estomas, o sobre la función clorofílica por cubrir partes verdes, son reales.

58.6. PARTÍCULAS PROCEDENTES DE LOS HIDROCARBUROS Y DE SU COMBUSTIÓN

Las calefacciones de fuel-oil y los motores de los vehículos automóviles por una parte, y el alquitrán de las carreteras y edificios por otra, vierten a la atmósfera partículas negras y pegajosas que se adhieren a las hojas, obturan sus estomas y dificultan la función clorofílica.

Los componentes volátiles de los alquitranes, una vez que éstos han alcanzado el estoma, penetran en los tejidos foliares y provocan una plasmolisis del protoplasma de las células de

los parénquimas al inducir una exósmosis; finalmente producen la ruptura de las membranas plasmáticas y la muerte.

A veces, el alquitrán o los residuos de combustión, se depositan en la superficie de hojas con protección de ceras, con lo cual la acción nociva se ve disminuida. En otros casos las hojas son carnosas y con mucho contenido en agua; aquí la acción de las partículas procedentes de hidrocarburos atacan la epidermis, penetran en los parénquimas y disuelven el protoplasma.

En el medio natural pueden presentarse problemas en los entornos de plantas asfálticas, en centros de reparto de asfaltos para vías públicas y en centrales térmicas que consuman fuel-oil.

58.7. ESTUDIOS PRÁCTICOS SOBRE LA INCIDENCIA DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS DEL AIRE EN EL MEDIO NATURAL

Además de los métodos y técnicas tratados en otros capítulos de esta obra, indicamos a continuación algunas técnicas de estudio de partículas sólidas en el medio natural que juzgamos interesantes y útiles para cualificar y cuantificar perturbaciones o, cuando menos, para disponer de orientaciones comparativas que permitan conocer el estado de masas vegetales afectadas por la presencia de partículas sólidas contaminantes en el aire.

58.7.1. Partículas gruesas

Una vez delimitada la zona objeto de estudio, según los criterios específicos de cada caso, se instala una red de muestreo de partículas gruesas.

El sistema para cada punto de muestreo puede ser el indicado con separación ante precipitaciones. Las cubiertas de los recipientes pueden llevar espejos en su parte superior con objeto de esparitar a los pájaros.

Otro método, más sencillo, es utilizar pluviómetros (mejor, aforadores *Owen*), recubiertos de tela metálica para evitar interferencias por aves y otros animales. Las partículas recogidas se pueden diferenciar como solubles o insolubles ante el agua de lluvia.

En todos los casos se hará un estudio previo de las emisiones de cada industria de la zona, facilitándose de este modo los análisis.

Un sistema muy práctico es situar en cada punto un poste de unos 2 metros de alto con un travesaño metálico del que se suspenden analizadores (tipo CERCHAR, por ejemplo).

Es conveniente instalar dos sistemas de muestreo en cada punto y comparar resultados.

Las muestras se recogen periódicamente, con la frecuencia que requiera cada caso; esta suele oscilar entre dos días y cuatro semanas.

Las estaciones de muestreo se instalan, parte de ellas, al aire libre, en zonas no arboladas, y otras se colocan debajo

de cubierta arbórea. Así se pueden controlar los efectos de la vegetación arbórea sobre el polvo de la zona objeto de estudio, y viceversa.

Las cubiertas foliares deben ser también analizadas; para ello, lo más sencillo es recoger manualmente las hojas que están a baja altura, y mediante instrumentos de poda, aquellas que estén más elevadas. Una vez recogidas, se estudia el polvo acumulado por ellas y se hallan los índices foliares.

El índice foliar se calcula recogiendo en otoño las hojas caídas en pluviómetros, y midiendo su superficie. El período de recogida debe durar lo que se prolongue la caída de las hojas, y el muestreo debe ser diario. Finalmente, se suma la superficie de todas las hojas recogidas, hasta que no quede ninguna en el vegetal (o vegetales) que cubren la estación; naturalmente, las muestras recogidas deben ser monoespecíficas, y la referencia será siempre a la unidad de superficie (m²).

Para conocer el polvo que recoge la cubierta vegetal, se puede efectuar el sencillo cálculo siguiente:

$$A - B = D$$

siendo:

A = Polvo recogido en las estaciones al aire libre.

B = Polvo recogido bajo la cubierta vegetal.

D = Polvo recogido de las superficies foliares.

Las estaciones que se instalen bajo la cubierta vegetal deberán ser adaptadas a

la altura de las plantas, de forma que haya siempre un espacio libre entre las instalaciones de muestreo y la cubierta foliar.

58.7.2. Partículas finas

El estudio se inicia de igual forma que el anterior, es decir, delimitando la zona objeto de estudio.

Como las partículas finas sedimentan menos que las gruesas, habrá que realizar el estudio a diferentes niveles en cada punto de muestreo.

Por otra parte, el número de estaciones de control deberá ser más reducido por el coste que supone cada una, y debido también a que parece existir más uniformidad en los muestreos de este tipo de partículas.

Cada estación de muestreo se compone de un mástil de altura calculada según necesidades y posibilidades (la altura ideal es la comprendida entre 3 y 50 m), en el que va instalada una serie de instrumentos de control.

Cada 6-8 metros de altura se coloca un captador (tipo CERCHAR) de partículas finas. Asimismo se instalan anemómetros totalizadores cada 8 metros y, en los tramos superiores, cada 4 metros

Los anemómetros nos orientarán sobre los efectos de la rugosidad de la masa vegetal (véase el capítulo correspondiente).

Los captadores nos indicarán los niveles de polvo a lo largo del año a cada

altura; en lo que se refiere a las masas vegetales, se comprobarán las partículas existentes en los niveles estudiados en invierno (sin cubierta foliar en zonas caducifolias), y en primavera y verano (con cubierta foliar), con lo que se pueden comparar resultados, y se podrá obtener así la capacidad de una masa vegetal dada para captar las partículas de pequeño tamaño.

Este tipo de estudios es especialmente útil para masas forestales.

58.8. EJEMPLO PRÁCTICO DE ESTUDIO. CASO DE UNA FUENTE PUNTUAL: FÁBRICA DE CEMENTO

Generalidades

El cemento se fabrica mediante piedra caliza y arcillas, con otros componentes secundarios. Es una mezcla de silicatos y aluminatos de calcio, con cal y yeso.

Existen dos vías de fabricación: la húmeda (pasta líquida) y la seca (polvo).

La materia prima se mezcla, se homogeneiza, se calienta en horno y se pulveriza.

En los diferentes estadios de fabricación, pueden presentarse problemas de contaminación en el entorno de las plantas de fabricación. En la cantera, transporte, pulverización, cocido (hornos), manejo del cemento acabado y otras fases, se desprende polvo que llega a las zonas próximas, dando ese aspecto típi-

co que se observa en los alrededores de una fábrica de cemento.

En España la distribución de las fábricas de cemento se hace según nueve zonas, incluidas las insulares.

En general, muchas de las ellas están ubicadas en zonas agrícolas o forestales de interés o cerca de ellas, de tal manera que, si calculamos como término medio de zonas de influencia de las partículas sólidas círculos de 1.300 metros de radio, la superficie afectada en cada caso será de unas 500 ha. Si se multiplica esta superficie por el número de fábricas (64 plantas), obtendremos un total de 32.000 ha del medio natural afectadas por esta contaminación, de las que una parte no despreciable corresponde a zonas de importante producción agraria.

Efectos de las emisiones sobre el medio natural

Aunque los efectos del polvo de cemento y derivados sobre los vegetales dependen en gran parte de las condiciones de cada caso (especie vegetal, condiciones climatológicas del lugar: vientos, precipitaciones, insolación, etc.), los aspectos generales del problema no varían mucho, sobre todo en algunos parámetros.

En términos muy generales, una factoría de fabricación de cemento puede emitir una 600 Tm de polvo/km²/año.

La alta alcalinidad del polvo produce alteraciones (acciones químicas) sobre los órganos externos de los vegetales y sobre el suelo.

La actividad fotosintética se ve perjudicada en la mayoría de los vegetales. La acción química, combinada con la física, hace que el polvo de cemento destruya los cloroplastos en muchas especies. El polvo se deposita sobre el vegetal, y si por cualquier causa (precipitaciones, riegos, etc.) las partículas son disueltas, la solución puede penetrar en las plantas y llegar a los tejidos, destruyéndolos; los cloroplastos llegan a mezclarse con el resto de la célula.

Numerosos autores citan destrucciones de órganos y muertes de plantas. La causa es la presencia, en abundancia, de CaO, y, en menor cantidad, de SiO₂, K₂O y SO₃. Desde el punto de vista de la vegetación, los compuestos más importantes son: CaO, MgO, K₂O, Na₂O, SiO₂ y las trazas de ciertos elementos, como B, Zn, Cu, Mn, Mo. Además aparecen sesquióxidos de aluminio.

Los vegetales reaccionan de diferente manera ante una contaminación por partículas procedentes de una industria de cemento; en suelos neutros se ha comprobado que ciertas especies calcófilas (remolacha azucarera) no sufren grandes daños. En cambio, las especies acidófilas (patata) resultan perjudicadas en sumo grado. Esto nos indica que es fundamental conocer las características de cada caso particular para aconsejar las posibles soluciones al problema.

Método general de estudio

Un estudio-control de la acción sobre los vegetales de las partículas sólidas

emitidas a la atmósfera por una fábrica de cemento, deberá basarse en el control del mayor número posible de parámetros que nos orienten en el momento de evaluar las perturbaciones que se provocan sobre los diferentes ecosistemas, y particularmente sobre la vegetación. Para ello indicamos el siguiente esquema orientativo, susceptible naturalmente de reformas, para adaptarlo a cada caso concreto.

- *Elección de la zona de estudio.* Se basa en el área de influencia de la factoría; en general, puede ser un círculo de unos 1.300 metros de radio, como ya hemos indicado.
- *Parámetros:*
 - Climatología.
 - Vientos.
 - Precipitaciones.
 - Temperaturas.
 - Insolación.
 - Topografía.
 - Control edáfico.
 - pH del suelo.
 - Textura.
 - Estructura.
 - Principales componentes químicos (análisis).
 - Emisiones de la planta de fabricación.
 - Tipo de emisiones.
 - Volumen de las emisiones.
 - Métodos de filtrado y control de emisiones.
- *Estudio florístico de la zona.*
- *Elección de especies y de individuos a estudiar.*
 - De acuerdo con su interés económico, florístico, etc.
 - Según posibles casos de ataques externos (hongos, insectos, sequía, etcétera).
 - Según la situación.
- *Estudio de cada especie e individuo.*
 - Control, en el tiempo, de la evolución de algunos individuos.
 - Estudio histológico.
 - Estudio anatómico de diferentes tejidos y órganos.
 - Estudio de partes externas (y estomas).
 - Estudio mediante microscopio electrónico.
 - Cloroplastos.
 - Otros órganos.
 - Estudio de las necesidades del suelo del vegetal.
 - Alcalinidad.
 - Acidez.
- *Estudio de las partículas.*
 - Muestreo (por sedimentación).
 - Análisis microquímico.
 - Análisis de silicatos.
 - Análisis por espectrometría.
- *Estudio del volumen de sedimentos por unidad de superficie.*
 - En superficie lisa.
 - Sobre hojas.
- *Cartografía según niveles de contaminación.*
 - De suelos.
 - De vegetales (según especies).

- *Soluciones prácticas.*

- Rotación de cultivos (según la reacción del suelo); cambio de especie.
- En el entorno de factorías antiguas aparecen grandes depósitos en el suelo, lo que hace que el pH sea muy elevado. No se recomiendan especies calcófilas, por producir bajos rendimientos.
- Pueden aplicarse, en ciertos casos, fertilizantes ácidos (orgánicos).
- Los vegetales de hoja ancha sufren daños según sea el volumen de sedimentos (pérdida de cosechas).
- Control del metabolismo.
- Posible adición de fertilizantes orgánicos ácidos y turba ácida.
- Instalación de cortavientos y setos (para provocar sedimentaciones en lugares oportunos).

CAPÍTULO 59

LOS DERIVADOS DEL AZUFRE Y LOS VEGETALES

59.1. BASES GENERALES

A efectos de la contaminación de los vegetales, de los derivados del azufre se consideran el H_2S , que se oxida rápidamente según sea la vía de oxidación a SO_2 , y el SO_2 y sus derivados.

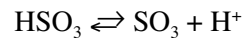
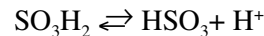
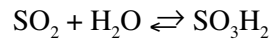
Por lo que se refiere al SO_2 , ya se han indicado en capítulos anteriores algunas de sus características en cuanto a su origen y formación.

El SO_2 es un gas denso, más pesado que el aire. Se puede licuar a 20°C , y 3,3 atm. y es muy soluble en agua: en un litro de agua se pueden disolver 80l. de SO_2 (aunque además de la disolución existan ciertas reacciones químicas).

En cuanto a propiedades químicas de interés, en lo que se refiere a la contaminación atmosférica se pueden citar las siguientes:

- Es un reductor energético y puede oxidarse fácilmente, a velocidades variables.

- En el agua actúa de la siguiente forma, indicada según tres etapas:

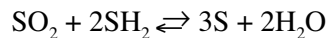


- La combinación dará, pues, un diácido (débil) de constantes de disociación:

$$K_1 = 1,7 \cdot 10^{-2}$$

$$K_2 = 10^{-7}$$

- Como propiedad oxidante útil para la depuración se puede observar:



A continuación se indican una serie de datos, en gran parte de procedencia bibliográfica, que darán una orientación sobre el papel que desempeña el SO_2 como contaminante de la vegetación.

Parece ser que si la humedad relativa es muy alta, al estar los estomas abiertos, la captación de SO_2 es máxima. Esta

captación se puede expresar de la siguiente forma:

$$R = r_g + r_s + r_{mes}, \quad \text{donde:}$$

R = Resistencia al cambio del SO_2 desde la fase gaseosa a la disolución.

r_g = Resistencia al cambio a través de la capa límite de la fase gaseosa.

r_s = Resistencia al cambio a través de los estomas.

r_{mes} = Resistencia al cambio en las superficies de las células afectadas.

Si tomamos el recíproco de R , podemos considerarlo como la velocidad de captación para la intensidad máxima del cambio del SO_2 por las hojas, que dependerá, entre otros factores, del área de la superficie de las hojas, variable con la especie y con la época del año, y que, evidentemente es muy superior a la superficie del suelo cubierta por esas hojas.

59.2. SÍNTOMAS GENERALES EN LOS VEGETALES

Las manifestaciones de la fitotoxicidad del SO_2 son bastante conocidas, tanto en las plantas cultivadas como en las adventicias. Este contaminante es tóxico en pequeñas dosis en la atmósfera. Según *De Cormis*, las plantas más sensibles reaccionan ante una concentración de 1 ppm; según otros autores esa concentración puede descender hasta 0,15 ppm, y se han observado en algunos casos necrosis ante 0,05 ppm, aunque bien es cierto que la permanencia ante la contaminación era más larga.

El SO_2 provoca principalmente necrosis internerviales con una coloración marfil o bien de marrón claro a rojizo, según las especies; en general, es natural que aparezcan más necrosis en las partes de las hojas más ricas en estomas, puesto que es por donde penetra el gas en la planta. Por eso mismo, los intercambios del gas del aire a las hojas y viceversa disminuyen mucho durante la noche y en invierno, cuando los estomas están cerrados. En el caso de la mayoría de las coníferas, las células destruidas se concentran alrededor de la cámara subestomática en las acículas de luz, mientras que en las de sombra están mucho más repartidas.

De Cormis y otros han comprobado que el SO_2 provoca el cierre de los estomas en *Pelargonium* siempre que la concentración esté entre 0,25 y 1 ppm. Sin embargo, otras observaciones indican resultados opuestos; *Bortitz* y *Vogl* señalan que hay un fuerte aumento en la transpiración de las plantas; los estomas permanecen abiertos y el vegetal ya no regula bien los intercambios gaseosos y se deseca rápidamente.

Las necrosis son definitivas, y no se extienden mientras no aparezca de nuevo el gas. Naturalmente, las hojas de más edad son las más afectadas. Las partes que permanecen verdes manifiestan una actividad superior inmediatamente después del ataque, lo cual se puede justificar como una compensación al retraso de vegetación o a la pérdida de superficie foliar.

Después de los ataques suelen aparecer nuevos brotes y nuevas hojas que en-

mascaran en gran parte a las zonas necrosadas, las cuales a su vez acaban por caer, de modo que las manifestaciones del paso del SO_2 desaparecen al cabo de cierto tiempo.

No es frecuente observar muertes de vegetales provocadas por el dióxido de azufre, incluso después de varias defoliaciones totales durante la misma estación. Sin embargo, sí se ha comprobado siempre un debilitamiento general de la planta, que se manifiesta sobre todo en un menor desarrollo, comparando con el testigo correspondiente.

La sensibilidad de las plantas no es constante, y varía con las estaciones: los cereales en foliación sufren muchísimo más, pues el ataque se efectúa después de la floración.

La acción del SO_2 no produce los mismos efectos sobre todas las especies vegetales, y se ha comprobado una gran variación, incluso entre dos cultivares de una misma especie. Las características individuales de cada clon son suficientes como para efectuar reacciones distintas ante la presencia de SO_2 en la atmósfera.

Cuando la planta está en el óptimo de la actividad fotosintética, es decir, cuando las condiciones externas de temperatura, humedad relativa y luz son las mejores, es cuando el vegetal es más sensible al dióxido de azufre.

La humedad es uno de los factores más importantes, debido a la reacción del SO_2 con el vapor de agua, pues puede pasar a SO_3 , como se ha indicado al principio del capítulo.

La influencia del SO_2 sobre el aparato reproductor de los vegetales se manifiesta en el ataque directo a flores y frutos en formación, y en una acción indirecta sobre el crecimiento del fruto, que afecta al poder asimilador de la planta.

Frutos y semillas disminuyen de peso; la formación del polen en las yemas florales presenta anomalías, e incluso se modifica la forma del grano.

En pequeñas concentraciones el SO_2 estimula la germinación del polen, pero provoca una caída prematura, y las flores hembras disminuyen en su porcentaje normal dentro de la población.

59.3. EJEMPLO DE CONTROL Y SEGUIMIENTO DE UNA ESPECIE

Se ha decidido exponer este ejemplo y se eligió la vid porque es una especie de gran interés económico en muchas zonas del mundo, y porque en la zona del Lacq, en Francia, se desarrollaron estudios sobre su contaminación por SO_2 a nivel muy profundo en los años 70, en alguno de los cuales participó el autor.

La *Vitis vinifera* es un vegetal de sensibilidad media al SO_2 de origen atmosférico.

Es un caso típico de grandes diferencias de sensibilidad entre distintos cultivares de la especie.

A menudo se han confundido las quemaduras producidas después de la

utilización del azufre como anticriptogámico con los daños provocados por el gas.

La viña es mucho más sensible al SO_2 en el otoño que en el resto del año debido al envejecimiento y abundancia de hojas.

Las viñas destinadas a caldos son particularmente sensibles desde la maduración de los frutos hasta la vendimia, aunque todo ello suele estar muy influenciado por el complejo suelo-clima. Las carencias del suelo en N, P, K y Mg producen necrosis en las zonas internervias de las hojas viejas. El tipo de tratamiento con insecticidas es asimismo muy importante, puesto que, a veces enmascara una contaminación por SO_2 .

Las experiencias realizadas en la zona de Lacq durante diez años por *De Cormis* y otros, demostraron que la *Vitis vinifera* se recupera rápidamente y consigue un desarrollo normal después de una contaminación continua durante dos años, siendo típico el período de gran debilidad previo a la recuperación. Así pues, se puede afirmar con este autor que la contaminación atmosférica provocada por el SO_2 es casi imposible que produzca la muerte del viñedo, a no ser que se trate de contaminaciones en lugares muy próximos a las fuentes, siempre que estas sean puntuales y no dispongan de chimenea para la difusión por encima de las capas de aire en contacto con el suelo.

Ante ataques fuertes de SO_2 , la viña puede ser considerada como resistente hasta aproximadamente el mes de julio,

siendo después cada vez más sensible a medida que avanza la estación y envejecen las hojas. En los ensayos realizados en Montardon, se recogieron y compararon racimos de viña en diversos estados de defoliación natural o provocada, midiéndose a continuación el grado refractométrico del mosto, y se demostró lo siguiente: el porcentaje de pérdidas expresado en kilo-grado es igual, aproximadamente, a la mitad del porcentaje de superficie foliar destruida. Si la contaminación es anterior a la vernación, las pérdidas son mucho menores. Estas experiencias se realizaron ante una contaminación intensa y en olas o períodos de fumigación.

Los síntomas y el aspecto general de las hojas son los mismos que se han descrito en el apartado anterior para otros vegetales.

59.4. EFECTOS Y EVALUACIONES EN EL MEDIO AGRARIO

59.4.1. Cultivos agrícolas

Se ha estudiado la relación entre el nivel de contaminación y el tiempo de exposición para intentar dar expresiones matemáticas a la fitotoxicidad por SO_2 .

La fórmula de *O'Gara* y *Thomas*:

$$(C - C_r)t = K, \text{ en la que:}$$

C = Concentración ambiental.

C_r = Concentración límite, por debajo de la cual no se producen daños visibles.

t = Tiempo de exposición.

K = Constante.

indica que la concentración ambiental está relacionada con la concentración al nivel de sensibilidad.

A medida que la concentración ambiental se aproxima a la concentración límite, por debajo de la cual no se producen daños, t tenderá a ∞ .

En la fórmula indicada, la concentración ambiental y el tiempo de exposición son proporcionales.

Por su parte, *Thomas y Hill* generalizaron la ecuación para poder calcular la dosis de contaminación que provoca un daño determinado, y así calcularon experimentalmente que:

$(C - 0,24) t = 0,94$. Se producen ligeras necrosis en las hojas.

$(C - 1,40) t = 2,10$. Se producen 50% de necrosis en las hojas.

$(C - 2,60) t = 3,20$. Se producen 100% de necrosis en las hojas.

Stratmann (1964) propuso una ecuación exponencial:

$$t = Ke^{-a(C - C_r)}$$

en la que se observa que cuando C tiende a C_r , t se aproxima al valor finito K .

Para una primera aproximación estas ecuaciones son válidas, puesto que para un mismo valor de $(C - C_r)t$, el grado de daño es prácticamente constante, excepto para grandes concentraciones; el problema se plantea en cuanto que estas re-

laciones dependen en gran parte de factores internos de la planta, por lo que es muy difícil su utilización.

Debido a la creciente implantación de industrias emisoras de SO_2 en el medio ambiente, se ha intentado expresar matemáticamente el daño que se puede causar al agricultor. Así, se indica que la disminución de cosecha es proporcional al porcentaje de superficie foliar destruida, según la ecuación

$$y = a - bx,$$

donde:

y = Rendimiento de la cosecha.

x = Superficie foliar destruida.

a, b = Constantes experimentales.

El problema se sigue planteando en tanto en cuanto que a y b dependen además del estadio vegetativo, de las condiciones de fertilidad y riego del suelo y de las especies de que se trate.

Zahn estableció que:

$$t_R = K_1 P_1 \frac{1 + 0,5 C}{C(C - C_r)}, \quad \text{donde:}$$

C = Concentración ambiental.

C_r = Concentración límite a la que ya no se producen daños.

K_1, P_1 = Factores de resistencia.

t_R = Tiempo de exposición.

Esta función indica muy bien la reacción de la vegetación ante exposiciones de corta duración y con concentraciones elevadas de SO_2 , es decir, ante situaciones de contaminación aguda, aunque en

bajas concentraciones no es válida, pues los daños foliares crecen progresivamente con la concentración bajo exposiciones diferentes y con el mismo producto $C \cdot t$, como se ha demostrado.

Por su parte, *R.Guderian* estableció que:

$$t - t_R = \left[e^{-a(C-C_R)} \right] K, \quad \text{donde:}$$

C = Concentración ambiental.

C_R = Concentración umbral (como en las otras fórmulas).

t = Tiempo de exposición.

t_R = Umbral de tiempo de exposición (tiempo mínimo de exposición para provocar daños).

a = Complejo de factores internos y externos de crecimiento.

K = Tiempo de crecimiento (o factor).

Los cereales pueden sufrir también accidentes, apareciendo disminuciones en el peso del grano, sobre todo en el trigo y en el maíz, pero esto ocurre solamente cuando el nivel de contaminación es muy elevado y cuando el vegetal se encuentra en el estadio de floración.

59.4.2. Pastizales

El problema de la contaminación por SO_2 se plantea sobre todo en praderas. Está comprobado que las gramíneas y las leguminosas forrajeras son muy sensibles a este gas; las praderas blanquean espectacularmente inmediatamente después del paso de una ola de contamina-

ción, apareciendo quemados los limbos en un nivel variable según la intensidad del ataque.

El estadio vegetativo es fundamental para la evaluación de los daños, puesto que una contaminación sobre un vegetal joven sólo afectará a los meristemas apicales y al ápice de las hojas, y se verá frenado el crecimiento de la hierba durante un tiempo más o menos largo.

Si la hierba afectada está sometida a pastoreo, los animales la rechazan, y aquellos que la consumen sufren diarreas y pérdidas en la producción de leche.

Si la pradera es segada no se han comprobado efectos secundarios en el valor alimenticio del heno.

Si la contaminación ocurre en el momento de la siega, al ser consumido el forraje verde los efectos son idénticos a los del forraje pastoreado, mientras que el heno no presenta problemas.

De todos modos, existen algunas especies forrajeras que son bastante resistentes a la contaminación por SO_2 , y en lugares de grandes niveles de contaminación podrían ser utilizadas sin grandes problemas.

59.4.3. Masas forestales

Influencia sobre la reproducción

Según *Pelz*, el SO_2 ataca directamente a flores y frutos en estado de formación y altera el poder asimilador del vegetal, es decir, afecta también, indirectamente, al crecimiento del fruto.

INFLUENCIA DEL SO₂ SOBRE LA FRUCTIFICACIÓN EN *PICEA ABIES* (PELZ, 1963)

Características	0,18-8,85 mg SO ₂ /m ³ de aire	Zona testigo
Peso de las piñas (g)	20,2 ± 2,5	27,4 ± 1,5
Longitud (cm)	10,0 ± 0,8	11,4 ± 0,7
Peso de 1.000 semillas (g)	5,64 ± 1,33	7,89 ± 0,36

El polen también se ve afectado, como ya se ha indicado; en *P. sylvestris*, Shkarlet (1972) encontró gran número de granos de polen no desarrollado en ciertas poblaciones. También se ha observado una suelta prematura en los granos.

Está comprobada asimismo una disminución en el poder reproductor en masas forestales sometidas a SO₂ procedente de industrias. Varios autores han confirmado una proporción mayor de flores femeninas y menor proporción de piñas.

INFLUENCIA DEL SO₂ SOBRE EL PODER REPRODUCTOR DEL *P. SYLVESTRIS* (MAMAJEV Y SHKARLET, 1972)

Características	Zona testigo	Zona contaminada
Pies con piñas hembras (%)	80-100	40
Peso de piñas maduras (g)	3,81-5,91	2,39-3,03
Peso de 1.000 semillas (g)	5,47-6,67	4,85-5,72
Longitud de piñas macho (mm)	22-31	17-21
Longitud de los granos de polen (μ)	76,5-0,38	63,6 ± 0,92
Capacidad de germinación (H ₂ O a 20 °C)	90	72
Energía de germinación (polen 1969, %)	38,4	20,8
Energía de germinación (polen 1970, %)	90,5	68,9

Se puede decir, como norma general, que el SO₂ altera claramente el desarrollo de la reproducción de la vegetación forestal en casi todas sus formas.

Pérdidas en producción

En varios países de Europa Central se ha comprobado desde hace más de 40 años, una disminución en la producción. Las alturas dominantes a una edad dada (índice de fertilidad) bajan.

En ciertos casos (*P. sylvestris*), en distancias que oscilan entre 1,2 y 3,8 km de un foco de SO₂ puntual, se han observado cambios en la fertilidad que afectan a dos o tres clases en las tablas de producción.

Vins y otros autores estudiaron la anchura de los anillos anuales, y comprobaron disminuciones e incluso desapariciones.

Un problema que se presenta es la comparación, pues la localización de testigos sanos en zonas equivalentes es

muy difícil debido a la imposibilidad de identidad en las condiciones ecológicas.

A título de idea señalamos que es posible establecer una cartografía mediante el control de la pérdida de producción leñosa en una masa forestal, aunque es difícil el estudio dasométrico. Un método de control muy útil es el análisis del azufre total en hojas y el posterior establecimiento de controles en individuos-test, con objeto de determinar el contenido en azufre a diferentes distancias del foco, y establecer después curvas de isocontaminación.

Por otra parte, se puede indicar, como orientación, que calculamos en unas 300.000 ha las zonas agrarias afectadas en España por emisiones de SO_2 producidas por centrales térmicas y otros tipos de industrias repartidas por toda la superficie del país.

Efectos indirectos

Ya se ha advertido en otros lugares de esta obra que los pies debilitados por cualquier causa son blanco de ataque de diversos agentes parásitos, tanto animales como vegetales.

Si una planta se encuentra con su sistema foliar débil o si está moribunda, varios autores han comprobado ataques de insectos, que a su vez unas veces son eliminados y otras no, dependiendo de la especie y de la concentración de SO_2 .

Se ha citado el caso de ciertos escolítidos en *Abies alba*, que desaparecen ante la presencia de SO_2 .

La norma es, sin embargo, que un ataque de SO_2 tenga frecuentemente como complemento la acción de diversos parásitos.

Ranft cita el *Adelgas abietis* en *Picea excelsa*, y *Bösener* (1969) constató actividad de ciertos insectos subcorticales en *P. sylvestris* y *Picea excelsa*.

En cuanto a vegetales, en Japón se observaron (*Chiba y Tanaka*, 1968) ataques de *Rhizosphaera kalkhoffii* en *Pinus densiflora*. El hongo era, hasta el año 1965, más o menos inofensivo.

En España, en ciertas zonas forestales de Cataluña y de Aragón, existen casos de actividad de insectos xilófagos en masas debilitadas por la acción del SO_2 .

59.5. ACCIÓN ANATOMO-PATOLÓGICA Y METABÓLICA

Los vegetales necesitan gran cantidad de elementos para su mantenimiento y desarrollo. El azufre se encuentra en muchos compuestos orgánicos activos y en proporción constante en los sistemas foliares. Sin embargo, los sulfatos aparecen en cantidades variables.

Según *De Cormis*, la fitotoxicidad del SO_2 parece ser debida a sus propiedades óxido-reductoras más que a su acidez. Si el vegetal absorbe SO_2 o si se le suministran sulfatos por las raíces, también se ha comprobado que el contenido en azufre permanece constante, lo que indica que, en pequeñas concentraciones, el SO_2 es asimilado por las plantas.

Generalmente el SO_2 es absorbido en cantidad proporcional a su concentración en el aire, y esa absorción provocará un aumento del azufre total del vegetal. Si el contenido en azufre aumenta de forma regular durante el período vegetativo, al aparecer repentinamente una ola de contaminación el nivel sube considerablemente, volviendo a disminuir a cifras normales pocas horas después del ataque.

Puede pensarse, debido a la evolución de los vegetales ante contaminaciones de SO_2 de baja concentración, que el gas produce envejecimientos acelerados. El SO_2 reacciona dentro de las hojas produciendo metabolitos, de los cuales unos son aprovechables y otros no, acumulándose estos últimos y entorpeciendo las actividades orgánicas foliares.

Parece ser que los vegetales mantienen un equilibrio sulfitos-sulfatos, de tal manera que aparece un desplazamiento hacia la forma de sulfitos en presencia de luz y a la forma sulfatos en la oscuridad.

Se ha comprobado que la planta actúa de acuerdo con sus necesidades, es decir, que si no necesita mucho azufre, el SO_2 absorbido aparece en forma de sulfatos, o sea, como reserva en la fracción mineral, mientras que si necesita azufre (por ejemplo, al cabo de unos días del ataque), el elemento aparece en una forma metabolizada en la fracción orgánica activa como proteínas o aminoácidos. Esta explicación puede justificar que el SO_2 no sea acumulativo en dosis subnecróticas, ya que el gas es asimilado en una forma o en otra según sean las necesidades de la planta.

El reparto del SO_2 en las hojas no es uniforme, sobre todo en las acículas de las coníferas, puesto que aparece un pico de acumulación en el extremo apical. Cuando la dosis es muy débil, las hojas presentan un xeromorfismo claro, observándose en ellas una cutícula más espesa y un parénquima en empalizada más grueso.

Muchas coníferas reaccionan mediante un aumento de las secreciones de resinas, ceras y otros productos a medida que aumenta la concentración del SO_2 .

La contaminación por SO_2 estimula la apertura de los estomas en medio húmedo y una reducción en medio seco.

Además de la penetración por vía foliar, en las plantas leñosas el SO_2 puede entrar a través de la corteza por las lenticelas o a través de la corteza misma, como ocurre con la *Picea excelsa*; posteriormente emigra hacia las hojas de primavera.

Algunas especies destruyen el SO_2 cuando el gas entra en contacto con sus hojas, pero no está totalmente demostrado el hecho.

Los glúcidos de las hojas así como los terpenos de algunos vegetales no se alteran ante la presencia del SO_2 . Las clorofilas *a* y *b* se reducen.

Un volumen de SO_2 del 0,005 por 100 inhibe la acción de las glucosidasas, disminuyendo por tanto la buena formación de la lignina. Los diversos esteres ciclopentanónicos de los vegetales asimilan perfectamente el SO_2 .

El ciclo de *Krebs* disminuye, pero la vía de la pentosa-fosfato no presenta alteraciones en las especies resistentes. La mayoría de los vegetales disminuyen la actividad de su catalasa, pero al mismo tiempo aparece una activación de la peroxidasa y de la polifenoloxidasas, lo que reduce la sensibilidad de las hojas.

Ante el SO_2 los cotiledones de algunas especies presentan sus clorofilas transformadas en feofitina, desapareciendo al mismo tiempo el caroteno y parte de la violaxantina.

En el metabolismo, los sulfatos activan la fermentación, mantienen la estructura coloidal del protoplasma y mejoran la capacidad asimiladora.

En todo caso, está claro que el azufre es un nutriente vegetal que no puede ser sustituido por otro elemento.

59.6. DESPRENDIMIENTO DE GASES. SINERGISMOS

Ante la acción del SO_2 la mayoría de los vegetales desprenden SH_2 , como han comprobado numerosos autores; el desprendimiento se produce aproximadamente al cabo de media hora del ataque, y la producción de SH_2 no varía si en vez del SO_2 aparece un aerosol de SO_3 o vapores de FH. Si se suministra a la planta una solución de sulfito o de tiosulfato por vía peciolar, el desprendimiento de SH_2 es el mismo, cosa que no ocurre con una solución de sulfato.

El SH_2 está condicionado en su emisión por la luz: en plantas tratadas a la

luz se desprenden 2 ppm y en plantas de previa oscuridad 0,05 ppm. Al mismo tiempo que se emite SH_2 se observa un pequeño desprendimiento de SO_2 totalmente independiente de la luz, propiedad demostrada por *Pilet* en SO_2 (1968) y por el autor en CO (1973).

Utilizando $^{35}\text{SO}_2$ y $^{35}\text{SO}_4$ se comprobó que el SH_2 provenía del SO_2 atmosférico en el primer caso, y del azufre endógeno de la planta junto con el del SO_2 en el segundo caso.

Por el método de revelado se han observado asimismo las emisiones por los estomas a la luz y en la oscuridad.

Las sinergias del SO_2 están comprobadas con el ozono, y no están totalmente demostradas con FH.

59.7. SELECCIÓN DE ESPECIES RESISTENTES

Desde principios de siglo se ha observado la gran diferencia que existe entre especies, clones e individuos ante una contaminación atmosférica, en este caso la producida por SO_2 .

El estado sanitario y ecológico de un vegetal influye básicamente en su capacidad de adaptación o resistencia a agresiones por contaminantes atmosféricos.

En condiciones normales de salud de las diferentes especies, diversos autores han confeccionado tablas de resistencia ante el SO_2 que, como es lógico, están sujetas a las limitaciones particulares de cada caso, pues individuos y clones, ante diferentes condiciones ecológicas, reac-

cionan de modo diferente. Por todo ello aconsejamos establecer, para cada zona objeto de un estudio, una lista de especies que una vez comprobado su nivel de resistencia (mediante la aparición de necrosis más o menos graves en un tiempo dado y con una concentración dada de SO₂), muestren su reacción ante el SO₂.

En cada una de las zonas, vistas las especies existentes y las peculiares características de aquellas, confeccionaríamos tablas de especies mediante fumigaciones con SO₂ con los análisis y

controles correspondientes. Esta sería, a nuestro modo de ver, la única manera de disponer de especies vegetales fiables para resolver problemas de cambios de cultivo o de masa forestal en zonas contaminadas por SO₂, en las que las circunstancias hayan decidido que es la única salida viable económica, ecológica y políticamente.

Del elevado número de tablas de sensibilidad existentes, como información para casos generales indicamos solamente dos de posible aplicación en ciertas zonas de España.

SENSIBILIDAD DE ALGUNAS ESPECIES FORESTALES AL SO₂
(DASSLER, 1967).

	Dosis de SO ₂ /m ³ de aire	
	0,4 ppm = 1,04 mg	1,7 ppm = 4,43 mg
<i>Pinus sylvestris</i>	**	**
<i>Pinus strobus</i>	**	**
<i>Pinus montana</i>	*	*
<i>Pinus nigra</i>	*	*
<i>Picea alba</i>	**	**
<i>Picea omorica</i>	**	**
<i>Picea sitchensis</i>	*	*
<i>Picea pungens</i>	*	*
<i>Larix leptolepis</i>	*	*
<i>Larix dahurica</i>	*	—
<i>Larix decidua</i>	***	***

	0,77 ppm = 1,82 mg	
<i>Populus trichocarpa</i>	***	***
<i>Populus «robusta»</i>	**	**
<i>Populus «Forndorf»</i>	**	**
<i>Populus euramericana</i>	*	**
<i>Populus «Harff»</i>	*	*

*** árboles muy necrosados.
** árboles necrosados.
* árboles poco necrosados.

**SENSIBILIDAD RELATIVA DE ALGUNOS VEGETALES AL SO₂
(DE CORMIS, 1972).**

Muy sensibles	
<i>Anagallis arvensis</i>	<i>Mespilus germanica</i>
<i>Avena sativa</i>	<i>Oxalis</i> sp.
<i>Beta</i> sp.	<i>Pinus strobus</i>
<i>Cedrus atlantica</i> «Glauca»	<i>Pisum sativum</i>
<i>Cichorium endivia</i>	<i>Plantago lanceolata</i>
<i>Corylus avellana</i>	<i>Prunus domestica</i>
<i>Daucus carota</i>	<i>Pteris aquilina</i>
<i>Dianthus barbatus</i>	<i>Pyrus communis</i>
Gramíneas forrajeras	<i>Raphanus sativus</i>
<i>Lactuca sativa</i>	<i>Salix</i> sp.
<i>Lathyrus odoratus</i>	<i>Sequoia sempervirens</i>
Leguminosas forrajeras	<i>Stellaria media</i>
<i>Malva</i> sp.	<i>Taraxacum dens-leonis</i>
Sensibles	
<i>Allium porrum</i>	<i>Brassica</i> sp.
<i>Allium cepa</i>	<i>Castanea sativa</i>
<i>Allium sativum</i>	<i>Catalpa bignonioides</i>
<i>Ampelopsis veitchii</i>	<i>Cotinus coggygria</i>
<i>Gladiolus</i> sp.	<i>Platanus</i> sp.
<i>Hordeum vulgare</i>	<i>Populus alba</i> «Pyramidalis»
<i>Hypericum perforatum</i>	<i>Populus x Euramericana</i> «Robusta»
<i>Iris</i> sp.	<i>Populus yunnanensis</i>
<i>Larix leptolepis</i>	<i>Robinia pseudo-acacia</i>
<i>Lycopersicum esculentum</i>	<i>Rosa</i> sp.
<i>Paulownia tomentosa</i>	<i>Solanum tuberosum</i>
<i>Petroselinum sativum</i>	<i>Spinacea oleracea</i>
<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Tilia platiphyllos</i>
<i>Picea abies</i>	<i>Tillia cordata</i>
<i>Pinus nigra</i>	<i>Tsuga heterophylla</i>
<i>Pinus pinaster</i>	<i>Triticum sativum</i>
<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Vitis vinifera</i>
<i>Pyrus malus</i>	
Resistentes	
<i>Acer campestre</i>	<i>Liquidambar styraciflua</i>
<i>Betula verrucosa</i>	<i>Lonicera caprifolium</i>
<i>Capsella bursa x pastoris</i>	<i>Picea sitchensis</i>
<i>Chamaecyparis lawsoniana</i> «Glauca»	<i>Picea pungens</i> «Koster» o <i>Picea pun gens</i>
<i>Chamaecyparis lawson.</i> «Flectcheri»	<i>Portulaca oleracea</i>
<i>Cornus sanguinea</i>	<i>Prunus cerasus</i>
<i>Cucumis sativus</i>	<i>Cucurbita pepo</i>
<i>Prunus armeniaca</i>	<i>Prunus persica</i>

C. arizonica var. *bonita*
Cupressus macrocarpa «Lutea»
Deutzia gracilis
Diospyros kaki
Fagus sylvatica
Hibiscus syriacus
Hydrangea macrophylla
Lagerstroemia indica

Pseudotsuga menziesii
Quercus robur
Syringa vulgaris
Thuja plicata «Atrovirens»
Viburnum opulus
Viataria sinensis
Zea mays
Ligustrum ovalifolium

CAPÍTULO 60

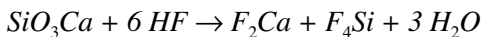
LOS DERIVADOS DEL FLÚOR Y LOS VEGETALES

60.1. GENERALIDADES

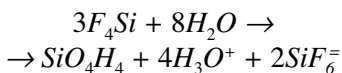
Ya se han indicado en el capítulo correspondiente ciertas características del flúor en cuanto a su origen y compuestos contaminantes del medio ambiente, y se ha advertido también en lo que se refiere a su importancia como agente contaminante de primer orden en lo que se refiere a la vegetación.

El flúor nunca se presenta aislado, sino que lo hace formando los compuestos ya indicados, principalmente el ácido fluosilícico.

En los suelos actúa formando fluoruros, al reaccionar el ácido fluorhídrico con los silicatos:



Si el gas se hidroliza se forman ácidos:



Los compuestos de flúor contaminantes pueden ser partículas sólidas o

gases, siendo los principales, entre las primeras, las criolitas o los fluoruros sódico o de aluminio y, entre los segundos, el ácido fluorhídrico y el ácido fluosilícico.

En todos los países industrializados se plantean problemas con este halógeno, pues la industria del aluminio es su principal fuente.

Las zonas agrarias afectadas surgieron esporádicamente en la prensa en los años 70 y 80, incluido nuestro país, y los problemas económico-sociales provocados llegaron a veces incluso a alterar el orden público.

En España aparecen alteraciones debidas al flúor en varias zonas, en las proximidades de las industrias del aluminio, de derivados de flúor y del vidrio (los efectos sobre éste se observan instantáneamente por formarse cuerpos opacos al reaccionar con el Si), y también en puntos muy localizados de Madrid, Aragón, Andalucía, Cataluña y Levante debido a diversos procesos industriales.

60.2. SÍNTOMAS GENERALES EN LOS VEGETALES

Se deben considerar las acciones del flúor sobre los vegetales en función del papel de estos en el medio, a saber: si son plantas de uso comercial, agrícola, forestal, energético, estético o ecológico. En cada caso, la gravedad de los efectos del F varía notablemente desde un punto de vista global.

La acción del flúor o de sus derivados sobre los vegetales se caracteriza por ser acumulativa.

La sensibilidad es muy variable según las especies y los individuos, como ocurre en el caso del SO₂. Ciertos individuos aparecen con necrosis en sus sistemas foliares y al mismo tiempo tienen un bajo contenido en flúor, y al contrario, otros contienen una elevada concentración de flúor y no presentan alteraciones visibles; es por esto por lo que el método de estudio de la peroxidasa es muy útil para detectar daños no visibles y prever posibles perturbaciones.

Las alteraciones visibles se manifiestan inicialmente como reblandecimientos y fluidez en las zonas afectadas. Seguidamente aparecen necrosis de color marfil, negras o marrón rojizo, siendo estas últimas las que más frecuentemente hemos observado personalmente en España, en casos de clara contaminación por flúor.

En sistemas foliares de frondosas las necrosis son marginales; en resinosas y en vegetales de nerviaduras paralelas (maíz) las necrosis son apicales y marginales.

A medida que la hoja sigue sufriendo la contaminación las necrosis aumentan de tamaño, hasta que los sistemas foliares comienzan a perecer por completo y muere el vegetal.

Los frutales de hueso sufren mucho con la acción del flúor, así como las coníferas en general. Los primeros, en observaciones con microscopio electrónico, manifiestan modificaciones en la estructura celular, aparte de pérdidas de cosecha, como se verá más adelante.

Las masas forestales afectadas por el flúor manifiestan espectacularmente los daños debido a la decoloración de las hojas y a la defoliación, cosa que no ocurre con los pastizales debido a que el tratamiento de estos últimos (siegas y pastoreo) no permite grandes acumulaciones sobre la planta, aunque sí sobre el animal cuando éste consume forraje contaminado de forma continuada.

60.3. ACCIÓN ANATOMO-PATOLÓGICA Y METABÓLICA

El flúor es un elemento extraño al metabolismo de los vegetales, como ya se ha indicado.

Si consideramos el posible acceso del flúor del suelo al vegetal, las experiencias realizadas hasta la fecha no indican claramente relaciones entre el contenido en flúor del suelo y las alteraciones de la planta. En caso de suelos ácidos pueden presentarse problemas debido a la posibilidad de contaminación con flúor soluble; la penetración en el vegetal sería por

la raíz, y ascendería hacia ciertas partes aéreas, pero no a los sistemas foliares, pues diversos autores, como *De Cormis*, han comprobado que el flúor que penetra por la raíz en algunos vegetales (tomate) aparece en muy pequeña concentración en las partes aéreas, comparada ésta con la riqueza en halógeno de las raíces.

Si el flúor penetra por vía foliar, permanece en su mayor parte en las hojas, no pasando al resto de la planta más que una pequeñísima proporción por vía peciolar.

Parece ser, según diversos investigadores, que los vegetales pueden tener un umbral de toxicidad, a nivel de especie y, posiblemente, de individuo, pues se ha comprobado que las necrosis y perturbaciones visibles en ciertas especies (*Genciana* a 40 ppm en su sistema foliar) no aparecen en otras situadas en el mismo lugar (*Quercus*, *Fagus*, a 800 ppm en las hojas).

El período de exposición a la contaminación es un factor primordial en lo que se refiere a los efectos del flúor sobre los vegetales, ocurriendo lo mismo con la concentración, aunque según *De Cormis* aparecen saturaciones si la perturbación persiste durante varios días a elevada concentración.

La penetración y la actividad del flúor en las hojas no están totalmente claras respecto a su conjunción con las funciones clorofílica y respiratoria.

Mc Laughlin dice que la competencia entre una estimulación de la respiración nocturna y una inhibición de la fotosín-

tesis aparente, pueden ser la causa de la reducción del crecimiento en especies forestales que han acumulado ciertos niveles (bajos) de flúor en sus sistemas foliares.

Parece ser que existen fenómenos simultáneos de absorción y adsorción, y últimamente la mayoría de los investigadores se inclina hacia la idea de que el flúor provoca necrosis foliares más rápidamente en la oscuridad. Asimismo admiten que las necrosis se producen cuando la concentración de flúor en la oscuridad es 1/2 de la concentración a la luz.

La humedad relativa es otro factor de gran importancia en las contaminaciones por flúor atmosférico en los vegetales.

El contenido de flúor en las hojas es variable, siendo mínimo, proporcionalmente, en las zonas más próximas al pecíolo (nervios principales).

El estudio en microscopio electrónico revela que en las hojas de frutales aparecen modificaciones en la ultraestructura celular. Por una parte, ante contaminaciones relativamente modestas se modifican las mitocondrias, baja el número de ribosomas y se altera la estructura del retículo endoplasmático, de los cloroplastos y del núcleo.

Por otra, puede aparecer destruido el citoplasma en las proximidades de las necrosis.

Los cloroplastos pueden verse asimismo afectados e incluso destruidos en concentraciones no muy elevadas, como indican *J.P. Quinche et al.* Está compro-

bado el efecto negativo del flúor sobre el contenido en clorofila de las hojas, y una acumulación simultánea de este en los cloroplastos.

En estos últimos casos hay que advertir que los estudios fueron realizados intercalados con controles de la actividad de fluoboratos potásicos (F₄BK) añadidos al suelo.

El flúor altera las hormonas de crecimiento, actuando principalmente sobre las auxinas, produciendo disminuciones en la producción de madera en especies forestales y provocando deformaciones en la formación de las hojas en todos los vegetales afectados.

60.4. EFECTOS SOBRE EL MEDIO NATURAL (VEGETALES)

60.4.1. Advertencias previas

Antes de indicar la acción general de las emisiones de flúor sobre el medio agrario, hemos de advertir que ante la implantación de una industria emisora, deben realizarse estudios previos sobre climatología, suelos, vegetación y riqueza ganadera de la posible zona de influencia del foco contaminante, de forma que si las conclusiones indican suelo ácido, precipitaciones abundantes, pastizales numerosos y riqueza ganadera, sea radicalmente desaconsejada la ubicación de la fábrica en ese lugar.

En casos dudosos, las medidas a tomar se basarán en el cambio de cultivos agrícolas y de especies forestales, y en

una eliminación o traslado de la población ganadera si ésta es lo suficientemente importante. Las zonas de pastizal deberán transformarse y ser repobladas con especies resistentes, ya que su uso como alimento del ganado debe ser descartado.

Debe sopesarse asimismo la justificación de la instalación de la industria ante otros intereses socioeconómicos de la zona objeto de estudio.

60.4.2. Medio agrícola

El flúor afecta, sobre todo, a la viña y a las plantaciones de frutales.

En el primer caso se alteran los sistemas foliares pero no el fruto, mientras que en el segundo se ven perturbados hojas y frutos.

Según trabajos de ciertos investigadores suizos, las acciones sobre los frutales son muy perjudiciales, unas veces por la defoliación que suponen (ciruelo, melocotonero), otras por la actividad sobre el fruto y otras, en fin, por ambas, que pueden llegar a provocar la muerte del vegetal, como ocurre con el albaricquero.

En este último caso se presentan bajas en la producción y en la calidad de los frutos, pues en éstos aparecen necrosis que los destruyen o deprecian.

En árboles frutales, son más sensibles los frutos de hueso, aunque, en ocasiones, los frutos de pepita presenten también alteraciones muy visibles. La resistencia al flúor varía mucho, aparte

de la propia de cada especie, con los cultivares y razas.

Las investigaciones realizadas hasta la fecha indican que en ciertas especies como cerezo, peral, manzano y otras, las necrosis se centran sobre todo en el fruto, mientras que en otros casos son las hojas las más afectadas.

En algunos países de Europa se han presentado problemas de comercialización de producciones agrícolas de fruta, pues en el momento de la recolección los frutos presentan buen aspecto externo, y al llegar a los centros de venta aparecen con necrosis que los deprecian. Creemos que este problema podría preverse en cuanto se realizaran controles mediante el método de la peroxidasa para conocer, aparte de las dosis límite de flúor en las diferentes variedades de frutales, el contenido en cada momento y su evolución.

60.4.2. Medio forestal

Las resinosas son, en general, las especies que más sufren las perturbaciones directas debidas al flúor. En Europa y América se conocen ya muchos casos de zonas forestales afectadas en las cercanías de industrias del aluminio o de derivados del flúor.

En España el problema se plantea también en las mismas dimensiones, y se tienen casos concretos de cientos de hectáreas afectadas.

Las resinosas, al tener en su mayoría hoja perenne y ser acumulativo el haló-

geno, lo van almacenando hasta que se sobrepasan los umbrales de toxicidad y aparecen necrosis, y en casos graves mortalidades de individuos y hasta de masas enteras.

Se han observado, sobre todo en Francia, destrucciones de individuos en plantas adventicias, aunque no desaparición de las especies en las zonas afectadas, mientras que las resinosas (*Picea*, *Pinus sylvestris*, *Abies*, etc.) van desapareciendo paulatinamente, por lo menos mientras dure la contaminación.

En Noruega se han observado desapariciones de *Calluna* y su reemplazamiento progresivo por otras especies como *Empetrum*, etcétera.

Los pies de vegetales de hoja caduca (frondosas y alguna resinosa) parecen ser más resistentes a igualdad de tiempo de exposición, debido posiblemente a los períodos de reposo vegetativo, en los que no hay sistemas foliares que acumulen flúor. Por otra parte, estos sistemas foliares acumulan el elemento durante una parte del año desapareciendo después, lo que hace que la acumulación de flúor no ocurra a lo largo de varios años y sobrepase la tolerancia del vegetal.

La solución inmediata es, tanto para los frutales como para la vegetación forestal, un cambio de especies, de forma que en los lugares muy afectados, ante el dilema de la desaparición de las especies más dominantes (florística o económicamente), se opte por medidas intermedias: la implantación de frutales más resistentes, aunque de

menor rentabilidad, y la repoblación forestal con especies como ciertas cupresoideas o thuyoideas, que si bien no tienen una producción como los *Pinus*, en cambio pueden servir igualmente para la protección y retención de los suelos, con los que los fines buscados con esta actividad pueden conseguirse en parte.

60.5. EVALUACIÓN DE RIESGOS

Para evaluar los riesgos de la contaminación por flúor se pueden seguir dos vías: el control del flúor gas en el aire o la acumulación de flúor en los vegetales.

Esta última vía se utiliza para evitar la fluorosis en el ganado vacuno, considerándose que no se pueden superar las 30 o 40 ppm de flúor en materia seca del forraje que ese ganado vaya a consumir.

Por otra parte se utiliza bastante la relación dosis-tasa de flúor con la fórmula

$$F = KCT, \text{ donde:}$$

F = Incremento del contenido en flúor sobre el nivel normal

K = Conjunto de factores internos y externos de crecimiento que inciden

sobre la absorción de contaminantes (de carácter variable)

C = Concentración de los componentes gaseosos de flúor en la atmósfera

T = Duración de la exposición

La evolución de los riesgos para la vegetación cuando está sometida a concentraciones muy variables de flúor, es complicada, pues los efectos del elemento dependen no solo del nivel de acumulación sino también de la tasa de absorción.

En resumen, se puede considerar la concentración de $0,5 \mu\text{gr HF/m}^3$ de aire como el umbral a partir del cual los daños se manifiestan claramente en la mayoría de las especies vegetales, aunque existen algunas que son sensibles a concentraciones inferiores.

60.6. TABLAS DE SENSIBILIDAD PARA LA SELECCIÓN DE ESPECIES RESISTENTES

A continuación indicamos dos tablas de sensibilidad que pueden servir como orientación general para la posible implantación de especies resistentes al elemento o a sus derivados.

**SENSIBILIDAD RELATIVA DE CIERTOS VEGETALES
AL ÁCIDO FLUORHÍDRICO (THOMAS Y HENDRICKS, 1956, RESUMIDA)**

Muy sensibles	Sensibles		Resistentes
<p>Grupo 1 Gladiolo Pino sp. Albaricoque sp. Azalea sp. Ciruelo sp. Tulipán Manzano sp.</p> <p>Grupo 2 Maíz sp. Patata sp. Albaricoque sp. Ciruelo sp. Melocotonero Fresa Viña Lirio sp.</p>	<p>Grupo 3 Maíz sp. Pimienta sp Franbueso Dalia Petunia Trébol sp. Centeno Lino Avena Cebada Manzano sp. Cerezo Abedul Sauce Sicomoro Moral Arce Serbal Melocotonero sp. Lirio sp. Begonia sp.</p>	<p>Grupo 4 Azalea sp. Begonia sp. Rosal sp. Geranio Coleo Lila sp. Alfalfa sp. Trébol sp. Judía verde Viña Lechuga Guisante Patata sp. Espinaca Ruibardo Remolacha sp. Trigo Siringa Manzano sp. Thuya</p>	<p>Grupo 5 Campanula Lila sp. Petunia sp. Rosal sp. Manzano sp. Encina Pino sp. Tomate sp.</p> <p>Grupo 6 Alfalfa sp. Maíz sp. Algodonero Tabaco Apio Pepino Col Coliflor Cebolla Pimienta sp. Soja Tomate sp. Crisantemo Rododendro Rosal sp. Limonero Laurel Robinia Pino (hojas viejas) Petunia sp.</p>

SENSIBILIDAD RELATIVA DE LOS VEGETALES A LOS COMPUESTOS DE FLÚOR (DE CORMIS, 1972)

Muy sensibles	Sensibles	Semi-resistentes	Resistentes
<i>Abies alba</i>	<i>Acer opalus</i>	<i>Amelanchier rotundifolia</i>	<i>Abelia floribunda</i>
<i>Abies concolor</i>	<i>Acer platanoides nigra</i>	<i>Berberis thunb.</i>	<i>Acer campestre</i>
<i>Acer negundo</i>	<i>Acer platanoides</i>	<i>Atropurpurea</i> sp.	<i>Buddleia</i> sp.
<i>Berberis vulgaris</i>	<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Betula verrucosa</i>	<i>Buxus sempervirens</i>
<i>Carpinus betulus</i>	<i>Asphodelus</i> sp.	<i>Castanea sativa</i>	<i>Chamaecyparis lawsoniana</i>
<i>Colchicum autumnale</i>	<i>Cedrus atlantica</i>	<i>Catalpa bignonioides</i>	<i>Chamaecyparis lawsoniana</i>
<i>Convallaria maialis</i>	<i>Crataegus</i> sp.	<i>Chaenomeles japonica</i>	<i>fletcherii</i>
<i>Corylus avellana</i>	<i>Diabthus barbatus</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Cereales</i>
<i>Crocus albiflorus</i>	<i>Fraxinus communis</i>	<i>Forsytia x intermedia</i>	<i>Chrysanthemum</i> sp.
<i>Epilobium angustifolium</i>	<i>Laburnum anagyroides</i>	<i>Lagerstroemia indica</i>	<i>Cotoneaster franchetti</i>
<i>Fritilaria imperialis</i>	<i>Larix europaea</i>	<i>Populus deltoides</i> picc.	<i>Cotoneaster salicifolia</i>
<i>Gentiana</i> sp.	<i>Liquidambar styraciflua</i>	1214	<i>Cotoneaster horizontalis</i>
<i>Ginkgo biloba</i>	Liliáceas	<i>Populus deltoides robusta</i>	<i>Cupressus glabra arizonica</i>
<i>Gladiolus</i> sp.	<i>Paulownia tomentosa</i>	<i>Prunus laurocerasus</i>	<i>Cupressus macrocarpa lutea</i>
<i>Hypericum perforatum</i>	<i>Pelargonium zonale</i>	<i>Rhus typhina</i>	<i>Deutzia lutea</i>
<i>Iris</i> sp.	<i>Philadelphus</i> sp.	<i>Salix</i> sp.	<i>Eleagnus pungens maculata</i>
<i>Juglans regia</i>	<i>Pirus communis</i>	<i>Spiraea x bumulda</i>	<i>Escallonia</i> sp.
<i>Lilium martagon</i>	<i>Pirus malus</i>	<i>Viburnum tinus</i>	<i>Evonymus japonicus</i>
<i>Maianthemum bifolium</i>	<i>Populus nigra</i>	<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	<i>Ficus</i> sp.
<i>Narcissus</i> sp.	<i>Populus tremula</i>		Gramíneas
<i>Orchis</i> sp.	<i>Prenanthes purpurea</i>		<i>Heianthus</i> sp.
<i>Oxalis</i> sp.	<i>Prunus cerasus</i>		<i>Hybiscus syriacus</i>
<i>Picea excelsa</i>	<i>Prunus persica</i>		<i>Ilex aquifolium</i>
<i>Pinus laricio austriaca</i>	<i>Pyracantha angustifolium</i>		<i>Juniperus</i> sp.
<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Ribes sanguineum</i>		<i>Lathyrus odoratus</i>
<i>Pinus strobus</i>	<i>Rona</i> sp.		Leguminosas
<i>Polygonatum odoratum</i>	<i>Spiraea x billardii</i>		<i>Ligustrum ovalifolium</i>
<i>Populus simonii</i>	<i>Spiraea thunbergii</i>		<i>Lonicera nitida</i>
<i>Prunus domestica</i>	<i>Syringa vulgaris</i>		<i>Lycopersicum esculentum</i>
<i>Pseudotsuga douglasii</i>	<i>Tilia cordata</i>		<i>Nicotiana tabacum</i>
<i>Quercus palustris</i>	<i>Vaccinium myrtillus</i>		<i>Picea pungens Koster</i>
<i>Rumex acetosella</i>	<i>Veratrum album</i>		<i>Picea sitchensis</i>
<i>Silene inflata</i>			<i>Platanus orientalis</i>
<i>Sorbus aucuparia</i>			<i>Populus alba bolleana</i>
<i>Tilia platiphyllos</i>			<i>Populus yunnaensis</i>
<i>Vitis vinifera</i>			<i>Quercus pedunculata</i>
<i>Zantedeschia ethiopiae</i>			<i>Quercus rubra</i>
(<i>Arum</i>)			<i>Ranunculus</i> sp.
			<i>Rhododendron</i> sp.
			<i>Robinia pseudoacacia</i>
			<i>Rudbeckia</i> sp.
			<i>Saxifraga crassifolia</i>
			<i>Solanum tuberosum</i>
			<i>Sorbus aria</i>
			<i>Tamarix gallica</i>
			<i>Taxus baccata</i>
			<i>Tilia americana</i>
			<i>Thuja plicata atrovirens</i>
			<i>Ulmus campestris</i>
			<i>Viburnum opulus</i>
			<i>Weigelia x floribunda</i>
			<i>Wistaria sinensis</i>

60.7. METODOLOGÍA DEL MUESTREO Y ANÁLISIS QUÍMICO

60.7.1. Muestreo

A) *Vegetales*

Se toman partes aéreas de vegetales, en muestreos diarios o semanales.

Las hojas deberán pertenecer a verticilos superiores y, a ser posible, de orientación con la cara frente al foco emisor de la contaminación.

La recogida de las muestras es independiente de la hora del día, pues aunque la luz y la higrometría influyen sobre la perturbación, en la práctica, el instante de recogida es un dato secundario en el momento de controlar una zona relativamente amplia que presenta problemas con este halógeno.

B) *Aire*

Por el momento existen diferentes técnicas que, a falta de otras, pueden ser útiles para realizar estudios y controles.

Los métodos existentes se basan en la retención de los fluoruros sobre un producto que los fije.

Métodos estáticos: Se controla el flúor retenido por una superficie conocida en un tiempo dado. Para ello existen diferentes sistemas, basados casi todos en la utilización de papel de filtro impregnado de diversas sustancias.

Las sustancias impregnantes pueden ser cal, sosa, formiato sódico o CO_3K_2 , y el método de colocación del papel es también variable, según cada Centro de Investigación: cilindros verticales, discos horizontales o superficies verticales.

Estos sistemas no son homogéneos en su concepción, y los sistemas de protección en sus instalaciones al aire libre tampoco son iguales, por lo que los resultados que se obtienen pueden ser orientativos pero no comparativos.

Métodos dinámicos: Muchos se basan en el control del volumen de aire contaminado que se hace pasar a través de un filtro de las características de los estáticos, o en el paso a través de un capilar impregnado anteriormente.

Otros sistemas utilizan los impinger, haciendo pasar la muestra a través de soluciones con reactivos que se colorean.

El método D.T.S. (Dual Tape Sampler), del B.T.I. utiliza dos fajas superpuestas, una impregnada de ácido cítrico y la otra con una solución alcalina. De este modo es posible separar los compuestos sólidos del flúor del flúor gas.

Para conocer de forma más o menos continua el contenido en flúor del aire, se han dispuesto aparatos secuenciales automáticos similares a los utilizados en la captura de partículas sólidas.

Ciertos fabricantes utilizan el paso de la muestra a través de una solución tampón con electrodo específico, y consiguen muestreos cada 30 minutos y sensibilidades de $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de aire.

Cuando se estudia la sensibilidad de los diferentes métodos estáticos o dinámicos, debe tenerse en cuenta la utilidad de cada uno de ellos, pues en el medio agrario, por ejemplo, es mucho más rentable el establecimiento de una red de muestreo estático, que permita disponer de gran número de orientaciones que hagan posible confeccionar cartografías y tomar medidas que sería imposible de aplicar en caso de utilizar muestreos dinámicos, que forzosamente deberán ser mucho más limitados numéricamente.

60.7.2. Análisis

A) Vegetales

Una vez tomadas las muestras, en cantidad tal que proporcionen unos 6 g en calcinación (unas 2 ó 3 hojas de maíz, por ejemplo), se secan 48 horas en estufa a 80 °C.

Se pulveriza en molino de bolas y se toman 3 g, a los que se añaden 2 g de acetato de Mg y 1 g de MgO calcinado. Se colocan, en un crisol de níquel o de platino, en horno mufla a 600 °C durante 2 horas.

Se añaden 300 mg de SiO₂ pulverizado (1 cm³ aproximadamente), y se opera como en el caso del aire (papel filtro) que se indica en C).

B) Suelos

La acción del flúor y derivados de origen atmosférico, sobre el suelo, no

está totalmente estudiada, aunque en principio, las partículas con flúor producen alteraciones en los suelos ácidos, formando fluosilicatos y otros compuestos, siendo parte de ellos absorbidos por la vegetación (por lo menos por ciertas partes de los vegetales).

Si los suelos son calizos, no se presentan problemas.

Si los compuestos de flúor son insolubles tampoco se presentarán problemas, aunque los suelos no sean calizos.

Un encalado del suelo (dosis de 1.500-3.000 kg/ha) en zonas relativamente ácidas reduce la asimilabilidad del flúor soluble.

El análisis químico del flúor del suelo se efectúa según el método siguiente: A partir de la muestra se prepara un extracto (5 partes de agua y 1 de suelo) y se destila en el aparato de *Williard* y *Winter*, llevándose a continuación al electrodo selectivo. Así se puede controlar el flúor soluble que es el de más interés real.

C) Aire

Existen diferentes métodos para el análisis del flúor (fluoruros) atmosférico que son útiles igualmente para vegetales y otros compuestos.

- Colorimetría: Se basa en la formación de una laca coloreada que es alterada por el F⁻, observándose la evolución a simple vista o con un espectrofotómetro. Los compuestos del flúor deben estar ionizados, y se deben evitar in-

terferencias (Al, Fe, etc.). Para ello suele utilizarse nitrato de torio y sulfonato sódico-alizarina como indicador.

- Microdifusión: Es válido también para muestras de papel y para vegetales.
- Activación neutrónica: Puede igualmente utilizarse en vegetales y en papel.

– Electrodo específico de flúor: Una vez tomada la muestra de papel impregnado (de cal), se calcina en crisol a 600 °C durante 5 minutos, y seguidamente se añade 1 cm³ (aproximadamente) de silicio puro.

Se vierte la mezcla en el aparato de *Williard y Winter* y se destila (se añaden a la mezcla 10 c.c. de agua bidestilada y 25 c.c. de SO₄H₂ de 97 por 100; se calienta, y se mantiene a 175 °C. hasta obtener el destilado), operándose seguidamente mediante el electrodo específico.

En el caso de que las muestras sean vegetales, se aplica la misma técnica, una vez pulverizada la mezcla, como se ha indicado en A).

El electrodo selectivo se basa en una potenciometría, calculándose la diferencia de potencial entre el electrodo de referencia y el específico (de fluoruro de lantano) en la solución problema.

Es el método más utilizado, aunque presenta algunos inconvenientes, como las interferencias (Al y Fe se eliminan mediante tampón pH) y la lentitud de estabilización de la tensión a bajas concentraciones.

60.8. CASO PRÁCTICO: INVESTIGACIÓN EN EL ENTORNO DE UNA INDUSTRIA CERÁMICA

60.8.1. Generalidades

Las cerámicas son una de las actividades industriales más antiguas, y consisten fundamentalmente en el cocido de tierra para confeccionar objetos artísticos, elementos para la construcción o componentes para la industria y laboratorios.

Las fábricas de cerámica y derivados emiten a la atmósfera cierta cantidad de componentes de flúor que pueden ejercer acciones sobre las zonas circundantes. Estos componentes pueden perturbar el entorno de la industria debido a causas diversas, como son:

- Dimensiones y volumen de fabricación.
- Situación del punto de emisión.
- Climatología (vientos, precipitaciones, temperatura, etc.).
- Composición química de la materia prima.
- Productos de fabricación.
- Importancia agraria en la zona.
- Existencia de especies muy sensibles.

En España la industria cerámica está bastante desarrollada, siendo la ubicación de las fábricas de una casi total dispersión por todo el país. El problema afectará, pues, a multitud de puntos de

mayor o menor interés, que sumarán una superficie a tener en cuenta entre el grupo de casos de contaminación del medio.

60.8.2. Origen de la contaminación

La materia prima (arcillas) contiene cantidades de flúor que oscilan entre el 0,25 y el 0,090 por 100, en forma de fluosilicatos o de sales cálcicas. Las emisiones son en forma de F_4Si o de FH.

La contaminación así producida puede tener mayor o menor gravedad según sea el método de cocido de la arcilla, interviniendo también:

- Temperatura (800-1.500 °C).
- Humedad (vapor de agua).

En el proceso de calentamiento para conseguir las temperaturas adecuadas aparecen, debido a los combustibles, ciertas emisiones de SO_2 que en sí no son peligrosas para la vegetación, pero que con el flúor producen sinergismos directos e indirectos, pues, por ejemplo, ante ciertas concentraciones de SO_2 , se ha comprobado un aumento de la velocidad de desprendimiento del flúor.

Aproximadamente se emite el 50 por 100 del flúor durante la fase del cocido.

60.8.3. Efectos sobre los vegetales

En general, la acción del flúor emitido por las industrias de elaboración de la

arcilla es similar a la producida por otro tipo de emisoras del halógeno o de sus derivados.

Los síntomas son parecidos en cualquier industria de esta clase, y todo depende de la intensidad de las emisiones, al tratarse de efectos acumulativos.

Normalmente las emisiones de flúor en las cerámicas son débiles, y los efectos se manifestarán sólo al sobrepasar la tasa de admisión límite, que varía para cada especie e individuo; suelen tardar en aparecer necrosis visibles, puesto que, como decimos, la acumulación de flúor es lenta, al ser baja su concentración.

60.8.4. Soluciones prácticas y técnicas de estudio

- Estudio meteorológico.
- Implantación de chimeneas altas que faciliten la difusión, aunque esto no es solución permanente, pues en parte es extender el problema.
- Estudio de la topografía del lugar.
- Análisis e inventario florístico.
- Tablas de especies sensibles y resistentes de la zona.
- Estudio y control micro y macrofotográficos de los sistemas foliares, realizados a ser posible sobre el mismo individuo y periódicamente.
- Análisis químico y control periódico de estas especies, más las que tengan

interés económico. Para ello habrá que muestrear previamente según las técnicas generales indicadas en otros apartados de esta obra.

- Cartografía de los daños, con curvas de isocontaminación en lo que se refiere a vegetales, a revisar periódicamente, de forma que se controlen variaciones del contenido en F en las muestras y avances o retrocesos en la contaminación.
- Control de plagas y enfermedades, con objeto de detectar posibles interacciones.
- Control de posibles sinergismos con SO_2 o SO_3 procedentes de combustiones en la propia fábrica o de otras industrias.

60.8.5. Recomendaciones

El problema de las emisiones de flúor por las industrias elaboradoras de arcilla se plantea, a escala nacional, en multitud de puntos repartidos por toda la geografía del país, como ya se ha dicho.

La solución al problema puede ser el estudio de varios casos típicos e intentar, con los resultados obtenidos, establecer una metodología general de actuación, aunque la cuestión se presenta difícil, como se ha comprobado en diversos países europeos. El cambio de especies o de cultivos, en los casos extremos, es la única orientación que se puede dar por el momento, aunque, repetimos, deberán realizarse estudios, de los que una parte pueda ser extrapolable.

CAPÍTULO 61

LOS DERIVADOS DEL CARBONO Y LOS VEGETALES

61.1. EL CO₂ Y LOS VEGETALES

Este gas está presente en grandes cantidades en la atmósfera, con una dinámica propia ya indicada en el capítulo correspondiente.

Cuando existen masas vegetales acuáticas o terrestres, la cantidad y la concentración de CO₂ no son constantes, pues la fotosíntesis y la respiración influyen al actuar directamente en el consumo y producción del gas.

En la noche no se asimila CO₂, pues cesa la fotosíntesis, por lo que este hecho, unido al proceso de la respiración, hacen que aumente la concentración de CO₂ en el aire de las zonas con vegetación abundante.

Durante el día el efecto es el contrario, pues en la fotosíntesis se consume CO₂ y la respiración es mínima (fotorespiración), por lo que su concentración disminuye.

Hemos de indicar además, que entre la atmósfera y el mar existe un fuerte intercambio de CO₂ que es función de la presión parcial del gas en uno u otro medio, lo que hace que haya un flujo de gas que vaya por difusión de la atmósfera hacia el mar o de este a la atmósfera según sea esa presión parcial superior en la atmósfera o en el mar, respectivamente.

El fenómeno está muy influido por la temperatura, que cuando baja en el agua aumenta la solubilidad del CO₂, y por la fotosíntesis y la respiración de la vegetación marina. Aún así, se debe tener en cuenta la desproporción existente entre las variaciones de la presión parcial en un medio o en otro: Cuando sube un 5% la presión parcial del CO₂ en el aire, la concentración en el mar sube el 0,3%.

En otro orden de cosas, la concentración del CO₂ está en aumento constante como consecuencia de la combustión de toda clase de materiales que provoca casi siempre el hombre.

Los incendios forestales, la combustión de combustibles fósiles y otros procesos muy extendidos originan grandes aportes de CO₂ a la atmósfera.

En este ambiente de creciente concentración del CO₂ en la atmósfera, la influencia que puede tener el proceso sobre los vegetales es mínima, pues no es el caso, ni mucho menos, de la situación de atmósfera artificial rica en CO₂ que se utiliza en algunas tecnologías de producción en invernadero.

61.2. EL CO Y LOS VEGETALES

61.2.1. Generalidades

En el capítulo correspondiente se han indicado las características más importantes del CO, así como su formación y origen.

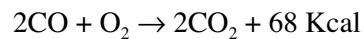
Los vegetales, puede afirmarse que no son sensibles externamente a concentraciones muy bajas, al contrario que los animales, aunque en ciertos casos se presentan efectos secundarios (disminución de la fijación de N en las raíces de *Trifolium sp.* por las bacterias *Rhizobium trifolii*) o pequeñas alteraciones no nocivas en los intercambios de gases, como se verá más adelante.

Si la concentración es elevada, el CO es asimilado por la vegetación, al mismo tiempo que produce alteraciones en las reacciones bioquímicas de los sistemas foliares.

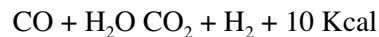
Esta observación es muy interesante en cuanto a la posibilidad de utilización

de especies adecuadas, seleccionadas por su resistencia a otros contaminantes, en la eliminación del CO de las zonas verdes urbanas que manifiesten gran concentración del gas, como se indicó en nuestra tesis doctoral en 1974.

El CO es un gas muy poco soluble en agua y su oxidación se efectúa en presencia de agua:

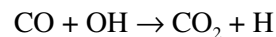


También se verifica:



Está comprobada la permanencia relativamente escasa del CO en la atmósfera (de 0,1 a 2,7 años). Las justificaciones sobre su eliminación son varias: desde las reacciones fotoquímicas hasta la actividad de vegetales y microorganismos.

Ciertos autores indican que la reacción fotoquímica:



justifica que parte del gas desaparezca de la atmósfera.

Otros sugieren que asciende hasta la estratosfera, donde es oxidado por rayos ultravioleta.

Los seres vivos consumen parte del CO, y también lo emiten, aunque en mínimas cantidades.

Ciertos microorganismos lo oxidan y lo transforman en CO₂, o producen metano o ácido láctico.

En principio, se han observado inhibiciones y estimulaciones. En la respira-

ción disminuye la glicolisis (aerobia) durante el crecimiento, y aumenta en la fructificación.

El efecto *Pasteur* se ve inhibido, y a veces se observan aumentos en el consumo de oxígeno.

El CO puede producir la inhibición de algunas oxidasas, en unos casos con dependencia y en otros con independencia de la luz.

En ciertos casos se observan epinastias y formación de raíces adventicias, posiblemente provocadas por una alteración del metabolismo de las auxinas.

Se ha observado asimismo que la actividad del CO sobre el metabolismo depende de la luz, tanto en la respiración como en la fotosíntesis, lo que posiblemente implica cierta relación entre los dos procesos metabólicos.

Hemos de indicar que nuestra tesis doctoral se desarrolló sobre el tema de la asimilación del CO por algunas especies vegetales, y sobre ella tratan los epígrafes que siguen.

61.2.2. Efectos sobre la respiración

En 1913 *Bottomley* y *Jackson* realizaron el que consideramos como el primer trabajo en lo referente a la asimilación e influencia del CO sobre las plantas verdes: investigación sobre vegetales introducidos en campanas herméticas, método que creemos fue el precursor de los *respirómetros de Warburg*, y llegaron a conclusiones que posteriormente fueron confirmadas en parte, pues reafirmaron

la teoría de *Bayer* sobre la fotosíntesis y admitieron como cierta la absorción de parte del CO que suministraron a las plantas (*Hayacinthus*).

Posteriormente el problema fue abandonado, y es a partir de 1939, con los estudios de *Rosemberg*, *Ducet* y otros, cuando se renovaron las investigaciones al respecto.

Hill no encuentra modificaciones en la respiración de hojas jóvenes operando con 0 a 16 pphm, es decir, en ordenes de 0 a 16 partes de CO en 18⁸ de aire.

Por el contrario, en una abundante bibliografía sobre efectos del CO en concentraciones muy elevadas, oscilando entre 90 y 98%, diversos autores nos señalan trastornos transitorios o permanentes ocasionados por el gas en la respiración de hojas jóvenes de varias especies. *Warburg* y *Kaiser*, estudiando los efectos del gas sobre cotiledones verdes, llegaron a la conclusión de que el CO impide la respiración de dichos órganos en la misma medida que impide la fotosíntesis, y que el efecto desaparece si se elimina el CO.

Krall y *Tolbert*, mediante C¹⁴O, demostraron que el CO, en proporción de 95%, se incorpora a las hojas de cebada, y esta incorporación es estimulada por la luz.

Chappelle y *Krall* nos indican que la fijación del CO es superior en la luz que en la oscuridad, sugiriendo que el CO se oxida a CO₂, pero sin afirmar si este nuevo gas es un producto primario o si sólo se trata de un intermedio.

Todos los autores coinciden en indicar que el producto principal de la fijación del CO es la serina; el CO se hidrataría y se transformaría en formiatos y estos podrían convertirse en CO₂ mediante el sistema de deshidrogenasa del formiato, o en serina mediante el sistema activador del formiato.

De todos modos, está plenamente demostrado que el formiato es un precursor de la serina.

Inman e Ingersoll, mediante cromatografía en fase gaseosa, no observaron ninguna absorción del CO ni transformaciones del metabolismo de los vegetales si el gas estaba en pequeñas proporciones, y afirmaron que el gas era absorbido principalmente por el suelo; sin embargo, mediante otras técnicas, comprobaron que la asimilación del CO₂ disminuía en presencia de 5 ó 10 ppm de CO.

Ducet y Rosemberg afirman que en presencia de grandes concentraciones de CO, los vegetales reaccionan mediante una glicolisis aerobia durante la respiración, que se refleja en un desprendimiento excesivo de CO₂; este fenómeno es el correspondiente a una inhibición del *efecto Pasteur*, y parece ser reversible en presencia de luz.

En general todos los autores comprueban una inhibición de la absorción del CO₂ y cierto incremento en el volumen de CO₂ emitido.

La mayoría de las investigaciones sobre respirómetro se realizaron con hojas adultas, habiendo por tanto ciertas diferencias con las nuestras y con las de

otros autores en cuanto a resultados, al ser las condiciones biológicas distintas, pues por ejemplo, en cuanto a los estomas, es bien sabido que las hojas adultas poseen menor número de ellos por unidad de superficie debido al crecimiento de las células, y lo mismo ocurrirá con otras condiciones de las experiencias.

Se comprueba que cuando la concentración de CO es superior a 250 ppm, aparece un retraimiento en la absorción de O₂, más agudo con el tiempo y a medida que aumenta la concentración de CO.

El punto de equilibrio entre la absorción de O₂ y el desprendimiento de CO₂ tiende a adelantarse con el tiempo y con la mayor concentración de CO, es decir, la absorción de O₂ es más afectada que la emisión de CO₂.

En suma, está claro que el CO, a partir de concentraciones mínimas, provoca una inhibición de la respiración.

61.2.3. Efectos sobre la fotosíntesis

Sabemos que la fotorrespiración es un fenómeno estrechamente ligado a la actividad fotosintética (*Hew, Krotkov, Canvin*, 1969), y según las experiencias de *Warburg y Krippahl* (1958), dicho fenómeno se cumple también en lo que se refiere a las inhibiciones provocadas por el CO en la respiración de cotiledones verdes, en cuanto que dichas inhibiciones son producidas también en la fotosíntesis y en igual proporción.

Krall y Tolbert demostraron que el CO, en proporciones del 90 al 95%, era asimilado por las hojas de cebada, y que esta asimilación era estimulada por la luz.

Bidwell y Fraser observaron que, en presencia de luz, las especies *Lycopersicon esculentum* y *Coleus blumei* tienen reacciones totalmente opuestas al ser sometidas a atmósferas con alto contenido en CO. La primera de ellas no asimila el C¹⁴O mientras que la segunda lo hace en alto grado. En ambos casos comprobaron que la asimilación de CO₂ disminuye cuando se suministra CO en pequeñas proporciones (0-10 ppm de CO).

Mentzer y Fatianoff confirmaron los resultados obtenidos por otros autores: el CO en grandes concentraciones (95%) no es letal para los vegetales, aunque puede inhibir fuertemente alguno de los desarrollos metabólicos.

Nosotros sugerimos que el límite de 200-250 ppm de CO divide los efectos del gas sobre hojas jóvenes de vegetales. En cantidades superiores los efectos concuerdan casi siempre con los obtenidos por otros autores sobre otras especies para proporciones de 90-98 ppm de CO: inhibiciones, etc. Si la cantidad es inferior, las divergencias en cuanto a resultados según la especie de que se trate son manifiestas, presentando las hojas jóvenes, en general, mayores o menores reacciones (no digamos resistencias, puesto que los efectos del CO no son letales durante períodos de tiempo relativamente breves, aún en propor-

ciones muy fuertes) según sean sus características fisiológicas.

61.2.4. Fijación fotosintética del CO

La luz, como se ha indicado en anteriores apartados, es un elemento fundamental en el metabolismo del CO.

El CO parece ser que se fija inicialmente en la citocromooxidasa; poco tiempo después, bajo la acción de la luz, se disocia de la oxidasa y origina formiato, que se unirá a la glicocola del vegetal formando serina al utilizar la fosforilación oxidante y el poder reductor de la fotosíntesis.

Bajo la acción del ácido hidroxipirúvico se presentan transformaciones en ácido glicérico, y finalmente se forman los aminoácidos que constituyen las proteínas.

Una parte del CO se transforma en CO₂ por oxidación directa (bajo la acción de una oxidasa), o bien el CO₂ se desprende bajo la acción de una deshidrogenasa.

Diversos investigadores han tratado de explicar las transformaciones del CO mediante el estudio con ¹⁴CO y con ¹⁴CO₂; se han sacado conclusiones sobre algunas especies, mientras que, con otras, los resultados difieren totalmente; unas veces se observa que el CO se transforma en CO₂ directamente, y otras parece ser que el CO inhibe el *ciclo de Calvin*, y el CO₂ que se forma lo hace por una vía metabólica distinta.

De todos modos, las investigaciones al respecto son prácticamente el comienzo de una serie de trabajos que en un futuro más o menos próximo pueden darnos orientaciones sobre los mecanismos de fijación del CO en los vegetales,

abriéndose la posibilidad, que ya hemos repetido varias veces, de tratar las atmósferas contaminadas de CO con la implantación de vegetales que conviertan el gas en materia orgánica durante el día y en CO₂ durante la noche.

CAPÍTULO 62

LOS DERIVADOS DEL NITRÓGENO Y LOS VEGETALES

62.1. BASES GENERALES

Ya se han descrito, con cierto detalle, las características de los óxidos de nitrógeno en lo que se refiere a su constitución como contaminantes del medio natural.

Generalmente los NO_x (NO_2 y NO principalmente) se presentan en ciertos procesos de combustión (motores de explosión y calefacciones) e industriales (fábricas de HNO_3 , procesos de nitración, etc.). Tienen carácter corrosivo y actúan como catalizadores en la formación del smog, al mismo tiempo que producen grandes alteraciones a los vegetales y en la fauna (en esta última atacan los tejidos oculares y las mucosas, y oxidan el Fe de la hemoglobina, impidiendo el transporte de O_2 y causando la muerte).

La concentración admisible en los ambientes industriales se acepta en unas 5 ppm (ó 9 mg/m^3) y en la inmisión en 1 mg/m^3 en media hora.

En zonas urbanas la concentración oscila entre 0,01 y 0,6 ppm.

El análisis de los NO_x se ha automatizado últimamente, pues en muchos casos se necesitan respuestas inmediatas dada su toxicidad.

Los métodos más interesantes son:

- Método *Saltzman* (automatizado y continuo mediante una columna gas-líquido).
- Métodos electroquímicos.
- Espectroscopia de I.R.
- Detectores de quimiluminiscencia.
- Espectroscopía UV.
- Espectrometría de masas.
- Cromatografía:
 - Gaseosa.
 - Gas-sólido.
 - Gas-líquido.
 - Detectores.

En el muestreo suelen presentarse problemas al preparar los patrones y por la humedad, muy frecuente en las muestras.

62.2. EFECTOS SOBRE LA VEGETACIÓN

La acción general de los NO_x sobre los vegetales a concentraciones entre 0,20 y 0,60 ppm en el aire, que son niveles reales en ciudades con alto índice de contaminación, no parece producir perturbaciones graves en su fisiología y anatomía.

Sin embargo, si la exposición a NO_x se prolonga durante cierto período de tiempo, los sistemas foliares se resienten y aparecen alteraciones diversas; se presentan tendencias a defoliaciones y clorosis.

Si la concentración es elevada las perturbaciones se manifiestan más intensamente, aunque esa concentración debe ser del orden de 2 a 10 ppm (4-20 μgr/m³) durante varios días.

Las necrosis que se observan, si aparecen las alteraciones, son similares a las provocadas por el ozono o por el SO₂, es decir, internerviares y de color negro o marrón rojizo, según las especies.

Sensibilidad de los vegetales

Los NO_x han sido poco estudiados hasta el momento en lo que se refiere a su actividad sobre los vegetales.

Ciertos autores como *Mac Cune*, *Middleton* y *De Cormis*, han confeccionado tablas de resistencia que pueden considerarse como orientativas, con las mismas reservas que se han indicado en los anteriores capítulos.

RESUMEN DE LAS TABLAS DE SENSIBILIDAD A LOS NO_x DE MAC CUNE Y MIDDLETON (1968, 1958)

Sensibles	Sensibilidad media	Resistentes
<i>Rhododendron</i> sp.	<i>Malva parviflora</i>	<i>Asparagus officinalis</i>
<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Stellaria media</i>	<i>Poa pratensis</i>
<i>Melaleuca leucadendron</i>	<i>Taraxacum officinalis</i>	<i>Erica</i> sp.
<i>Hibiscus rosasinensis</i>	<i>Poa annua</i>	<i>Chenopodium</i> sp.
<i>Lactuca sativa</i>	<i>Ligustrum lucidum</i>	<i>Juniperus conferta</i>
<i>Brassica</i> sp.	<i>Citrus sinensis</i>	
<i>Helianthus annuus</i>	<i>Gardenia radicans</i>	
<i>Nicotina glurinosa</i>	<i>Pittosporum tobira</i>	
<i>Pyracantha coccinea</i>	<i>Gardenia jasminoides</i>	
<i>Nerium oleander</i>		
<i>Bougainvillea spectabilis</i>		

Efectos sobre la fotosíntesis

Diversos autores han comprobado que en ciertas especies una concentración de NO_x inferior a la que provoca

necrosis ya ejerce una acción inhibidora de la fotosíntesis, como se ha estudiado en alfalfa y avena. La concentración mínima se calcula entre 0,5 y 0,7 ppm de NO o NO₂.

Parece ser que los NO_x actúan independientemente de la acción de los estomas, perturbando directamente la asimilación del CO_2 .

La mayoría de los investigadores coinciden en decir que los NO_x perjudican la fotosíntesis y el crecimiento a partir de concentraciones que raramente se presentan en la realidad y que, si lo hacen, es durante un período muy corto de tiempo; así, por ejemplo, en zonas verdes urbanas con una concentración de 3,90 ppm, la fotosíntesis se reduce en un 25%.

62.3. ACCIÓN DE LOS VEGETALES SOBRE LOS NO_x

Los óxidos de nitrógeno, en su mayoría, terminan su ciclo incorporándose al suelo debido a ciertas reacciones químicas y a la actividad microbiana.

La vegetación, en su acción sobre la difusión y dispersión de contaminantes, como se ha indicado en el capítulo correspondiente, influye mucho en la distribución de los NO_x sobre una zona contaminada.

La luz es un factor básico en la absorción del NO_2 , principalmente debido a la intensificación de la transpiración, hecho que coincide con las horas del día de máxima intensidad luminosa.

El viento influye indirectamente sobre el grado de absorción de los NO_x al provocar una intensificación de la transpiración y de la asimilación del CO_2 .

Los NO_x sufren diversas transformaciones en la atmósfera, y en lo que afecta a

los vegetales, las más interesantes son aquellas que afectan a la solubilidad, pues éste es un factor director de la asimilación, y es por ello por lo que el NO, al ser menos soluble, es menos asimilable, aparte de que probablemente los vegetales también emiten NO (como ocurre con el CO).

Es muy posible que el grado de asimilación del NO_2 dependa del contenido en HNO_3 y en HNO_2 de los tejidos foliares, y que exista un umbral de asimilabilidad.

62.4. ACTIVIDAD SINÉRGICA

La actividad de los NO_x se cifra fundamentalmente en su capacidad de sufrir reacciones fotoquímicas, pues como se ha indicado en el capítulo correspondiente, en lo que se refiere a sinergismos, los NO_x pueden reaccionar con el SO_2 y transformarse entre ellos mismos, debido, entre otras reacciones, a las fotooxidaciones. Los sinergismos NO_2 - SO_2 pueden provocar, a bajas concentraciones (10pphm de cada uno), alteraciones en los vegetales, como las que se observan en muchas zonas verdes urbanas.

Los NO_x , en presencia de luz y de ciertos hidrocarburos, forman los nitratos P.A.N., P.B.N., P.P.N., de los que ya se han indicado sus características como agentes contaminantes y de los que se tratará en lo que se refiere a su toxicidad sobre la vegetación.

Todos ellos acidifican el medio, produciendo en esas situaciones ambientes secos ácidos (depósitos secos) o húmedos (lluvias ácidas), dándose amplia información sobre este tema en el epígrafe

que sigue y en los capítulos correspondientes.

62.5. EFECTOS DE LOS NO_x SOBRE LOS ECOSISTEMAS

Una parte importante de los depósitos ácidos en el medio ambiente tiene su origen en los NO_x , como ya hemos indicado en otros capítulos.

En los tiempos actuales va aumentando la relación NO_x/SO_x en los países desarrollados, pues es mucho más fácil controlar las emisiones de SO_x con la mejora de los combustibles, con mejoras en los sistemas de combustión, con mejoras en el tratamiento de las emisiones, etc., que las de los NO_x , y de hecho, las normativas cada vez más restrictivas que se van estableciendo en cuanto a límites de emisión, avanzan mucho más con los SO_x que con los NO_x .

La acidificación del medio por la parte que corresponde a los NO_x , es por reducción del pH y pérdidas de cationes metálicos por acción de lavado de los nitratos, aunque el conjunto de los efectos de los NO_x en el suelo es mucho más complejo que esto, y desde luego los procesos químicos y bioquímicos que se desarrollan son más complicados que sus equivalentes con los SO_x .

En otros capítulos de esta obra se amplía el tema en lo que se refiere a los efectos de las lluvias ácidas sobre los ecosistemas terrestres y acuáticos.

Los depósitos amoniacales que no consumen los organismos, son nitrificados -oxidados- por las bacterias a nitrifi-

tos y luego a nitratos, forma en que se acumulan estos derivados.

Los nitratos no son absorbidos por los coloides del suelo, y se eliminan del sistema en que se depositan por lavado o por desnitrificación, lo que acarrea riesgos para el medio, pues ambos procesos pueden aumentar o favorecer excesos de N en los ecosistemas acuáticos, con efectos por todos conocidos de proliferación de algas, aumento del consumo de O_2 y procesos de descomposición.

Se debe tener en cuenta que los aportes más importantes de nitratos provienen de las actividades agrícolas (fertilizantes), pero los que vienen de aire contaminado afectan directamente a las aguas y al suelo, que luego eliminará estos compuestos por las vías indicadas y acabarán también en las aguas.

Los procesos de desnitrificación generan N_2O y N_2 . Este último no planteará problemas, pero el primero podría afectar a la capa de ozono de la atmósfera.

En principio, el N_2O es un constituyente muy secundario de la atmósfera, y se forma casi todo en los procesos de desnitrificación. Aún así, también hemos de tener en cuenta que se produce algo de N_2O mientras se reducen las emisiones de NO.

Finalmente hemos de indicar que los depósitos de NO_x afectan a los ecosistemas, y que la tendencia en los países desarrollados es al aumento de dichos depósitos, lo cual puede alterar múltiples equilibrios ecológicos como se ha podido comprobar en investigaciones y estudios en varios países del norte de Europa.

CAPÍTULO 63

CONTAMINANTES SECUNDARIOS DE LA VEGETACIÓN

63.1. OZONO

63.1.1. Efectos fisiológicos y anatómicos

Este agente contaminante parece ser que ataca casi exclusivamente a las células del parénquima en empalizada, por lo menos al principio de la perturbación. Seguidamente ataca a grupos de células debajo de la epidermis. Se presentan plasmolisis por deshidratación y el contenido celular se destruye, apareciendo en algunos casos ciertos pigmentos oscuros.

Si la concentración de ozono es elevada, las necrosis externas son patentes, viéndose daños en los parénquimas lagunares y en casi todos los tejidos internos.

El gas suele actuar por absorción, es decir, penetra por los estomas, y como se ha indicado antes, ataca preferentemente a los parénquimas en empalizada, en caso de que existan, debido posiblemente a que el ozono sufre en ellos una serie de transformaciones químicas que

lo convierten en un agente fitotóxico muy activo.

Los cloroplastos del parénquima en empalizada se disuelven y desaparecen, viéndose alterados por tanto los fenómenos fotosintéticos.

Generalmente los ataques se presentan puntiformes o como necrosis en el haz de las hojas.

Las manchas suelen ser de color rojizo o blanquecino, según sean la especie, el individuo y las condiciones de la perturbación.

Las zonas necrosadas no están delimitadas claramente, sino que el verde de la epidermis va haciéndose más tenue hasta que se hace cada vez más patente el color rojizo o blanquecino.

63.1.2. Sensibilidad

Indicamos las mismas advertencias que en el apartado correspondiente a la sensibilidad ante el P.A.N.

Los niveles para especies sensibles son variables; según unos autores aparecen necrosis con exposiciones a 0,2 ppm durante 4 horas, mientras que otros indican que con 0,02 ppm entre 4 y 8 horas, o 0,05 ppm durante 1-2 horas, es suficiente para que aparezcan síntomas externos de la perturbación.

Las diferencias de sensibilidad son variables entre las especies, pudiéndose establecer tablas, como la que a continuación se expone, que son meramente orientativas.

SENSIBILIDAD RELATIVA DE ALGUNAS ESPECIES AL OZONO

Sensibles	Resistentes
<i>Medicago sativa</i>	<i>Mentha</i> sp.
<i>Trifolium</i> sp.	<i>Pelargonium</i> sp.
<i>Avena sativa</i>	<i>Gladiolus</i> sp.
<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Piper</i> sp.
<i>Cichorium endivia</i>	<i>Acer</i> sp.
<i>Cucumis melo</i>	
<i>Spinacea oleracea</i>	
<i>Petunia hybrida</i>	
<i>Pinus strobus</i>	
<i>Nicotiana tabacum</i>	
<i>Begonia</i> sp.	
<i>Solanum tuberosum</i>	
<i>Solanum lycopersicum</i>	
<i>Spinacia oleracea</i>	

63.1.3. Enmascaramientos y sinergismos

El ozono puede producir efectos externos que fácilmente se confunden con los provocados por el SO₂. La araña roja y algunos otros ácaros producen manchas similares a las del ozono, y en las coníferas, los incendios forestales pue-

den dejar las acículas con una coloración parecida a un ataque de ozono.

La sinergia más clara es con el SO₂, multiplicándose su acción: ciertos autores dicen que 100 ppm de cada uno, por separado, son mucho menos tóxicas que si se presentan en mezcla.

63.2. P.A.N., P.P.N. Y P.B.N.

El P.A.N. y otros componentes de su serie homóloga como el P.P.N. y el P.B.N. son productos fitotóxicos importantes en la contaminación fotoquímica, aunque solamente los dos primeros tienen interés, pues el P.B.N. no suele ser detectado en condiciones normales de contaminación.

63.2.1. Efectos fisiológicos y anatómicos

Las perturbaciones que provoca se fijan sobre todo en los sistemas foliares. Se alteran las células del parénquima lagunar que están más próximas a los estomas por donde penetra el gas, produciéndose mortalidad en ellas. En ciertos casos, las necrosis aparecen en las células próximas a la epidermis inferior.

También se ven afectadas las células oclusivas de los estomas, siendo muy sensibles las células jóvenes, y por tanto las hojas jóvenes.

Los síntomas típicos son la presencia de coloraciones brillantes plateadas, metálicas o bronceadas. Posiblemente estas coloraciones se deban a una deshidrata-

ción y a la correspondiente plasmolisis de las células del mesofilo, que se llenan de aire y con la luz producen efectos de color y reflejos brillantes.

A veces la perturbación alcanza a toda la hoja, como ocurre con ciertas especies (*Nicotiana tabacum*, etc.), que son muy sensibles durante algunos períodos de su desarrollo y presentan unas franjas típicas.

En ciertos casos se han observado envejecimientos prematuros.

Las herbáceas sufren mucho con el P.A.N. o el P.P.N., aunque este último es menos tóxico. Los efectos se agravan debido a la carencia de tejidos en empalizada, que hace que la perturbación alcance a todo el grosor de la hoja. Los síntomas son bastante clásicos, con franjas irregulares blanco-amarillentas o necrosadas, según sea la gravedad de la contaminación.

En otros vegetales, como coníferas o frutales, los síntomas son similares a los anteriores, es decir, aparición de manchas blanquecinas brillantes o de un color metálico.

63.2.2. Sensibilidad

En lo que se refiere a la sensibilidad de las especies ante el P.A.N. los investigadores no están totalmente de acuerdo. Unos incluyen al *Triticum sativum* entre las especies sensibles (*De Cormis*) mientras que otros (*Stern*) lo consideran como especie resistente.

Posiblemente la sensibilidad varía, como en otros tipos de contaminación, según la especie, el cultivar y el individuo.

La concentración de P.A.N. comienza a ser perjudicial, en daños externos, a partir de 0,05 ppm, aunque con 0,01 ppm, o incluso a concentraciones inferiores, aparecen síntomas de envejecimiento de los tejidos. Según *De Cormis*, el período de contaminación para provocar alteraciones, a una concentración de 0,05 ppm, es de 4 horas.

A continuación se indica una tabla de sensibilidad de algunas especies, con los reparos que hemos señalado para las tablas de otros agentes contaminantes.

SENSIBILIDAD RELATIVA DE ALGUNAS ESPECIES AL P.A.N. (DE CORMIS, 1974, MODIFICADA)

Muy sensibles	Sensibles	Resistentes
<i>Phaseolus vulgaris</i> <i>Lactuca sativa</i> <i>Avena sativa</i> <i>Lycopersicum esculentum</i> <i>Stellaria media</i> <i>Dahlia</i> sp. <i>Poa annua</i> <i>Petunia hybrida</i> <i>Medicago sativa</i>	<i>Hordeum vulgare</i> <i>Beta vulgaris</i> <i>Daucus carota</i> <i>Triticum sativum</i> <i>Spinacea oleracea</i> <i>Nicotiana tabacum</i> <i>Rumex crispus</i>	<i>Chenopodium album</i> <i>Brassica</i> sp. <i>Brassica oleracea</i> <i>Viola</i> sp. <i>Zea mays</i> <i>Gossypium hirsutum</i> <i>Cucumis sativus</i> <i>Allium capa</i> <i>Raphanus sativus</i> <i>Sorghum vulgare</i> <i>Rhododendron</i> sp. <i>Begonia</i> sp. <i>Chrysanthemum</i> sp.

63.2.3. Enmascaramientos

Los efectos externos del P.A.N. son relativamente sencillos de distinguir debido a que, frecuentemente, las hojas presentan alteraciones características de color metálico brillante.

Sin embargo, a bajas concentraciones podría haber confusión con daños debidos al SO_2 , aunque con P.A.N. las bandas deben ser más brillantes.

En los vegetales de hoja ancha existen diversos hongos, bacterias y virus que pueden provocar también manchas blancas, y es frecuente que exista duplicación de daños (blanqueamientos) con el P.A.N., aunque no sinergismos.

La sequía o excesos de sales, así como ciertos ácaros, pueden provocar daños similares a los del P.A.N. en las coníferas, aunque el estudio de los tejidos y del medio permite detectar la diferencia de origen del ataque.

63.3. METALES EN GENERAL

63.3.1. Emisiones y líneas generales

Las actividades industriales que manejan y procesan minerales y que realizan combustiones, no solo emiten SO_x , NO_x y otros gases, sino que generan una serie de otros productos que van a la atmósfera y que tienen carácter de contaminantes importantes, y entre estos, los más significados son los metales pesados y similares, aunque a veces, raras, estos productos extraños al aire pueden

ser beneficiosos, como ocurre con algunas partículas (polvo) alcalinas, que contrarrestan los efectos de los productos ácidos o acidificantes que se emiten. Lo normal, desgraciadamente, es que los efectos sean casi siempre negativos.

El manejo de minerales, las fundiciones y la metalurgia en general pueden provocar emisiones de Cr, Ni, Cu, Cd, Fe, etc., por fundición, corte, golpeteo, soldaduras, modelado, torneado, etc.

Las industrias de este estilo especializadas en un metal, lógicamente es muy probable que emitan algo de él a la atmósfera, y este suele ser alguno de los antes citados, o Pb, Hg, Be, Th, Zn, según el tipo de industria de que se trate.

Se debe tener en cuenta por otra parte, que el aumento de los metales tóxicos en la vegetación no tiene por qué coincidir directamente siempre (aunque casi siempre) con las inmisiones de estos elementos, pues la mayoría de ellos son más solubles en suelos ácidos o en los suelos que se acidifican como consecuencia de depósitos (lluvias, etc.) ácidos, y lo mismo ocurre con las aguas superficiales que reciben estos depósitos.

En las zonas con vegetación con contaminación crónica por metales, es posible que esta perturbación se añada a las que provocan el estrés, la contaminación por gases y partículas no metálicas y la acidificación del medio, sumándose a ellas o sinergizándolas en algún caso, como ocurre, por ejemplo, cuando aumenta la concentración de Al o de Cr en la solución del suelo.

63.3.2. Plomo

En el caso concreto del plomo, éste elemento se utiliza en la industria y como antidetonante en combustibles de motores de explosión en algunos países.

Su contenido en la corteza terrestre ha ido aumentando en este siglo según algunos investigadores, aunque los resultados obtenidos son contradictorios según otros.

En el suelo, se puede tomar como contenido medio 16 ppm (8 ppm en las rocas básicas y 20 en las ácidas). En tierras cultivadas se han encontrado desde 13,9 a 95,7 ppm, posiblemente debido a los productos fitosanitarios y a las técnicas de cultivo.

El plomo puede depositarse sobre los vegetales próximos a vías de circulación como consecuencia de las emisiones producidas por los vehículos, aunque esto se va reduciendo mucho al irse eliminando este metal de las nuevas gasolineras.

Generalmente el elemento sedimenta sobre las partes aéreas, y se elimina hasta en un 65% por lavado simple, no habiéndose observado penetraciones a los tejidos foliares internos.

Haar (1970), y nosotros (*Seoáñez*, 1990), estudiando vegetales próximos a autopistas, sacamos la conclusión de que el consumo total humano de plomo, como consecuencia de la ingestión de cereales y hortalizas en esas condiciones, no aumenta más de 1,5 por 100, suponiendo que las plantas estén situadas a muy pocos metros de la vía de circulación.

La concentración de plomo en los vegetales depende de ciertas condiciones meteorológicas, como vientos y precipitaciones. También depende de la intensidad de tráfico y de la distancia al foco emisor (en metros).

El contenido total en plomo se ha observado que aumenta en los forrajes y en ciertas legumbres a distancias inferiores a 50 metros de una autopista, aunque la parte comestible frecuentemente no se vea afectada.

Ciertos vegetales (musgos) como *Pleurozium* e *Hypnum* pueden acumular ligeramente el elemento, como han observado *Rühling et al.*, pero sin sufrir, en principio, perturbaciones graves.

Parece ser que el plomo es mucho más fácilmente absorbido por las raíces que por vía foliar, y los factores ambientales tienen gran influencia, como se indica en la tabla adjunta.

FACTORES AMBIENTALES QUE INFLUYEN SOBRE LA ABSORCIÓN DE PB POR LA VEGETACIÓN

- Edad de la planta: Plantas jóvenes lo asimilan más.
- Especie vegetal.
- Acidez del suelo: A menor pH más absorción.
- Baja capacidad de intercambio de cationes.
- Poca materia orgánica.
- Baja concentración de fosfatos.
- Clima.
- Textura del suelo.
- Topografía.
- Presencia de cloruro o nitrato cálcicos.
- Presencia de silicio soluble.

63.3.3. Cinc

Está plenamente demostrada la toxicidad del polvo de cinc sobre los vegetales.

Entre las especies existe una gran diferencia de sensibilidades, pues en concentraciones elevadas puede modificarse la flora de una zona afectada, desapareciendo unas especies y proliferando otras, típicas, características de suelos con alto contenido en silicatos de cinc.

En general, la vegetación se ve afectada por toxicidad del producto *per se* al ser absorbido parte del cinc, y por asfixia al obturarse los estomas y cubrirse las hojas con las partículas de los óxidos, disminuyendo las actividades respiratorias y fotosintéticas y la transpiración, dando como resultado el envejecimiento prematuro del vegetal y una muerte lenta.

63.3.4. Mercurio

Ya hemos indicado en capítulos anteriores diversas informaciones sobre este metal.

El mercurio fue uno de los principales contaminantes de los años 70. No se considera perjudicial en su forma inorgánica, pero en presencia de microorganismos se transforma químicamente en mercurio orgánico, producto extraordinariamente tóxico.

Este elemento se utiliza en numerosos procesos industriales, y como insecticida y fungicida en la agricultura.

Se calcula que en la fabricación de 100 toneladas de Cl se pierden de 40 a 60 kg. de mercurio inorgánico, y el 3% de esta cantidad pasa a la atmósfera (*UsdheW*, 1971).

El mercurio es poco volátil a temperatura ordinaria, aumentando su volatilidad rápidamente con la temperatura. Aproximadamente, cada 10 °C de aumento de temperatura, se duplica la concentración del mercurio atmosférico (*Stahl*, 1968).

Se conoce la existencia de contaminación de plantas por mercurio desde 1867. Estas tienden a acumular altas concentraciones de Hg. En ensayos en invernadero se han detectado concentraciones de 317 ppm de Hg en hojas de rosas al cuarto día de exposición a bicloruro de mercurio. La concentración en hojas de tomate, a las 51 horas, era de 1.087 ppm, y en las de tabaco era de 3.044 ppm a los siete días. Los órganos florales, seguidos por las hojas más viejas, son las partes más sensibles de las plantas.

* * *

En otro orden de cosas, y tratando de los metales en general, las bacterias son muy resistentes a la contaminación por estos elementos.

La vegetación acuática es sensible a concentraciones elevadas de metales, y sobre todo las plantas fotosintéticas. Pb, Zn y Cu son conocidos metales tóxicos al respecto.

En esa vegetación fotosintética, estos metales inhiben la fijación del CO₂ a partir de concentraciones que dependen

de la especie y en general de los factores que se indica en la tabla antes citada. Esta concentración para el plomo es de 5 mg/litro de agua, aunque en algunas especies de algas se pueden alcanzar mínimos de 20 mg/l.

Muchos metales, como el plomo, afectan a otros procesos vitales, aparte de la fotosíntesis, como ocurre con la mitosis (cariocinesis) o con la absorción de agua. Además, pueden influir e inhibir la absorción de otros metales, como es el caso del Pb, cuya presencia agrava las deficiencias en Cu.

Las plantas terrestres con sistema foliar pubescente pueden acumular de 7 a 10 veces más metales sedimentables que otras plantas con hojas de otro tipo.

63.4. ETILENO

63.4.1. Efectos fisiológicos y anatómicos

Este contaminante generalmente no produce necrosis, sino que provoca epinastias e inhibiciones en ciertos estados vegetativos.

Las defoliaciones son frecuentes, y la vacuolización de algunas células es también una consecuencia de su actividad.

La función respiratoria se ve inhibida, así como el crecimiento en altura, mientras que las raíces y el crecimiento horizontal se desarrollan más intensamente, pareciendo que actúa sobre las auxinas, las giberelinas y otras hormonas de crecimiento.

Las especies muy sensibles pueden llegar a sufrir necrosis, alteraciones en la floración, defoliaciones y otros daños.

En los vegetales de hoja ancha se puede producir una fiebre vegetal debido a la vacuolización antes indicada, apareciendo manchas rojizas y marrón claro al formarse taninos gálicos.

Si la concentración es elevada se puede llegar a producir la muerte de la planta.

En coníferas y herbáceas aparecen problemas de crecimiento: retrasos y pérdidas en el desarrollo de piñas y acículas en las primeras, y retrasos y falta de alteraciones visibles en las segundas.

63.4.2. Sensibilidad

A partir de 0,005 ppm ciertos vegetales son sensibles, aunque se puede considerar que las perturbaciones del crecimiento aparecen con 0,05 ppm.

En general las herbáceas (pastizales) son más resistentes que otras especies.

Se debe tener en cuenta que su concentración media en atmósfera urbana es del orden de 0,03 ppm.

63.5. HIDROCARBUROS NO METÁNICOS

La vegetación emite terpenos, y entre ellos sobre todo isopreno, y también bastantes monoterpenos.

Los mayores productores son los bosques de coníferas, siendo fuertes emisores de isopreno las masas forestales de hoja caduca.

Las emisiones de isopreno dependen de factores ambientales como la radiación solar y sobre todo de la temperatura del aire, siendo efectuadas en su inmensa mayoría durante el día y alcanzando los máximos entre 18 y 32 °C y al final de época vegetativa o después de un estrés.

Los monoterpenos de las plantas se volatilizan en la atmósfera sin relación aparente con el metabolismo vegetal.

Esta volatilización depende de la tasa de difusión y de la presión de vapor del gas.

Los hidrocarburos no metánicos son muy activos en la atmósfera, apareciendo en concentraciones medias de 8-10 ppb los terpenos y el isopreno en lugares cerrados, con máximas de 30 ppb el isopreno y de 27 ppb los monoterpenos. En espacios abiertos estas concentraciones pueden oscilar entre 0,3 y 1 ppb para todos ellos, aunque en general estas cifras dependen mucho de la estación climatológica.

63.6. HIDROCARBUROS HALOGENADOS C₁ – C₄

Los componentes activos derivados de los hidrocarburos halogenados C₁ – C₄ que pueden afectar a la vegetación, se pueden formar por alguna de las vías siguientes:

- En el aire:
 - Por acción de los rayos UV.
 - Por presencia de OH⁻.
 - Por presencia de O₃.
 - Por presencia de NO_x.
 - Por presencia de ROO⁻.
- En la propia vegetación:
 - Por hidrólisis.
 - Por epoxidación.
 - Después de la formación de precursores en el aire.
- Las vías de penetración en las plantas pueden ser:
 - A través de las vías de intercambio de gases, sobre todo de los estomas.
 - Por difusión a través de las cutículas cerúleas.
 - A través del sistema suelo-solución del suelo:
 - Absorción
 - Desorción
 - Por enlace o unión con un transportador

Parece ser que los ataques de estos hidrocarburos, y sobre todo de sus metabolitos, se centran en los sistemas más lipofílicos, como el fotosintético, o en el aparato enzimático.

63.7. CLORO Y DERIVADOS

El cloro se puede presentar en forma de gas o como partículas, mientras que el HCl solo lo hace como gas.

Su origen básico es el natural, a partir de las aguas marinas, que en su evaporación pueden arrastrar ión cloruro disuelto o como sal sólida, como hemos indi-

cado en otro capítulo. Por esta vía se pueden alcanzar concentraciones de 0,5 a $5 \mu\text{gr}/\text{m}^3$.

Las vías antropogénicas tienen otro carácter; la industria provoca pocas emisiones, salvo en las actividades especializadas, mientras que las emisiones de los vehículos a motor constituyen una fuente muy importante de contaminación por cloro y por sus derivados.

Aparte de la producción en las industrias especializadas, el HCl se emite en la combustión de los polímeros orgánicos clorados, como el PVC, que aparecen con mucha frecuencia en los residuos urbanos y en los residuos sanitarios.

El cloro y sus derivados afectan a la vegetación en general a partir de concentraciones de 0,2 ppm.

Los efectos se manifiestan por la interrupción del funcionamiento de los estomas, y posiblemente por paralización de sus mecanismos de apertura y cierre.

El cloro y el ácido clorhídrico provocan lesiones similares a las de las heladas. Las perturbaciones que producen son parecidas a las causadas por el SO_2 , y los niveles de sensibilidad parecen ser los mismos, aunque los compuestos de cloro son mucho más tóxicos.

Aparecen frecuentemente defoliaciones, sin presencia de alteraciones visibles en las hojas, y es posible que se presenten anomalías en el crecimiento si la contaminación es persistente.

De todos modos, este tipo de contaminación no es corriente, y, si existe, se

presenta muy localizada, como ya indicamos.

63.8. OTROS AGENTES

Arsénico

Ya hemos tratado anteriormente algo sobre este elemento.

Al formarse el anhídrido arsénico se producen intoxicaciones en los vegetales, acumulándose el elemento.

Esta perturbación también está muy localizada y no presenta más interés que el de su cita.

Tricloroetileno, benceno y formaldehído

El tricloroetileno (TCE), posible generador de cáncer de hígado, se utiliza sobre todo en la limpieza en seco (ropa) y en el desengrasado de metales, y forma parte, como componente, de tintes, lacas, pinturas y adhesivos.

El benceno, irritante de la piel y de las mucosas, puede originar cefaleas, pérdidas de apetito y aumentar el riesgo de leucemia. Se utiliza como uno de los disolventes más comunes en múltiples productos, como las gasolinas, tintas, pinturas, plásticos, detergentes, etcétera.

El formaldehído se origina en la naturaleza en la degradación del metano. En la actividad humana se forma en la combustión incompleta de los motores

de vehículos automóviles. Asimismo entra en la composición de numerosos productos, como aglomerados de madera (tableros), papel, productos textiles, materiales de aislamiento térmico a base de espuma de urea-formol, plásticos, moquetas, etc.

Estos productos frecuentes en interiores habitados o industriales, son absorbidos intensamente por diversas especies, como se indica en la tabla adjunta, por lo que el uso de éstas puede mitigar fuertemente este tipo de contaminación.

**CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS ESPECIALES
ABSORBIDOS POR DIVERSAS ESPECIES (EN GR/CM²/24H)**

Especie Producto	Hedera helix	Sansevieria sp.	Chamaedorea sp.	Dracaena sp.	Crysanthemum sp.
Formaldehido	9,8	11	5,7	2,9	—
Tricloroetileno	7,3	2,8	1,8	3,85	—
Benceno	10,1	10	—	—	18

CAPÍTULO 64

EL MEDIO FORESTAL Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

64.1. BASES GENERALES

En otros capítulos se han indicado las perturbaciones que ciertos agentes contaminantes producen sobre el medio forestal. En este capítulo se desarrollarán, como complemento, ciertos aspectos que se juzgan de gran interés en el momento de estudiar de un modo amplio las interacciones que se presentan en las masas forestales ante la presencia de agentes contaminantes de la atmósfera.

Si se enfoca el problema de forma global, vemos que en España existen casos de contaminación de masas forestales que justifican el planteamiento de estudios amplios y generales que puedan orientar sobre posibles soluciones de las alteraciones producidas por contaminación atmosférica.

El estudio de la relación bosque-contaminación no es lo mismo que un control de los efectos de ciertos agentes contaminantes sobre un vegetal o una

especie; es el conocimiento de la influencia de un ente vivo, el bosque, sobre una perturbación, y viceversa. Por ello, tratamos a continuación de ciertos conjuntos vegetales alineados (setos, cortinas o pantallas), de sus efectos sobre la contaminación atmosférica y sobre los efectos de cada uno de los componentes de la relación bosque-contaminación sobre el otro.

64.2. ANÁLISIS DE UN ECOSISTEMA FORESTAL CONTAMINADO POR FUENTES EMISORAS ATMOSFÉRICAS FIJAS

64.2.1. Bases generales

En general, en cualquier situación de contaminación atmosférica nos encontramos con un foco emisor, puntual o no puntual, fijo o móvil y con receptor terrestre, agrícola, ganadero, forestal o marino.

En todo caso habrá que obtener datos por una parte del foco emisor, tanto en lo que se refiere a los materiales que emite como sobre la intensidad, frecuencias, volumen, temperatura, periodicidad, etc. Por otra parte habrá de ser preparada una información amplia sobre el medio receptor, sobre las condiciones climáticas, sobre el tipo de receptor, extensión superficial, características del receptor, situación ecológica, etc.

Con todos los datos obtenidos habrá de ser confeccionado un paquete de medidas específico para cada caso, de forma que de un modo u otro se mitiguen los daños hasta su total anulación. Estas medidas pueden comprender desde tecnología industrial para eliminar la contaminación en la fuente, hasta tecnología forestal de cambios de especie, pasando por soluciones jurídicas y administrativas.

64.2.2. El foco emisor

Las emisiones de contaminantes a la atmósfera están determinadas por el tipo de actividad: calefacción, residuos de combustión, partículas sólidas (polvo), cenizas, gases de procesos químicos, etcétera.

Estas emisiones, en nuestro caso, están condicionadas por la circunstancia de tratarse de fuentes fijas, es decir, se trata de vertidos a la atmósfera originados en puntos determinados o en áreas determinadas. Ejemplo del primer caso es una industria del aluminio, una fábrica de cemento o una central térmica, y

ejemplo del segundo caso es la contaminación atmosférica en una ciudad originada en gran parte por las calefacciones y por los vehículos automóviles.

En cualquiera de los casos, la emisión parte de un punto o de un área, y en función de la climatología del lugar, llega a una zona, forestal o no, y esta zona es la que va a sufrir el aporte de los contaminantes correspondientes.

La situación es diferente según se trate de gases o partículas de diámetro inferior a 5μ , o si por el contrario, se trata de aerosoles o partículas gruesas. En el primer caso existen fenómenos específicos ya tratados, y en el segundo aparecen fenómenos de sedimentación y otros, también tratados.

Como es natural, es deseable conocer al máximo la situación y evolución de las emisiones y el grado de contaminación estacional de la zona, datos no siempre disponibles.

64.2.3. Descripción del ecosistema

Climatología. Control de pluviometría, humedad, temperatura y vientos.

Estos factores determinan en gran parte los procesos del ecosistema que se trate. Se ha de disponer de la cartografía climatológica correspondiente con objeto de saber la forma, período, intensidad, y localización de las precipitaciones, y lo mismo ocurre con la información técnica referente a inversiones y temperaturas.

Suelos y topografía. La composición y características geológicas y edáficas

son básicas a la hora de conocer las posibilidades en cambios de especie, y para saber la posible evolución del suelo.

La topografía es un factor primordial en lo que se refiere al efecto rugosidad, al desvío o atenuación de los vientos, a la fijación de emisiones y precipitaciones, etc.

VARIABLES DE IMPORTANCIA EXTREMA SON LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO (CANTIDAD, FORMA, COMPOSICIÓN) Y EL CICLO DE NUTRIENTES, PUES ESTOS DOS FACTORES CASI SIEMPRE SE VEN AFECTADOS DIRECTAMENTE POR LAS INMISIONES CONTAMINANTES.

La microfauna y la microflora del medio son elementos a tener en cuenta (micromamíferos artrópodos y hongos) en su evolución ante los ataques de los contaminantes.

Vegetación. Se debe realizar un modelo basado en las zonas de vegetación y en los tipos de vegetación, realizando un inventario al respecto.

Asimismo se han de establecer parcelas de estudio (y transectos en algunos casos) en las que el conocimiento de la vegetación sea completo.

También se han de conocer los resultados y la evolución de la vegetación después de los incendios que haya habido en la zona.

64.2.4. Definición del ecosistema forestal en función de modelos ecológicos

Se trata de obtener y procesar el mayor número posible de datos para poder

establecer modelos ecológicos mediante análisis de sistemas y simulación, con objeto de conocer la forma y el grado de la perturbación, los efectos sobre las biocenosis, las previsiones futuras y las alternativas posibles.

Se deben analizar los siguientes apartados:

- Sistemas ecológicos sometidos a estrés (cambios en la secuencia histórica de los incendios, cambios del aprovechamiento y tratamiento de la madera, id. de las precipitaciones, id. de las plagas. etc.).
- Situaciones de contaminación reversible.
- Situaciones de contaminación irreversible.
- Deficiencias en las respuestas generales del ecosistema.
- Relaciones entre efectos crónicos y agudos.
- Efectos de bajas en productividad.
- Respuestas del ecosistema a cada estrés.
- Especies sensibles a cada tipo de estrés.
- Respuestas del ecosistema después de eliminar el stress.

64.2.5. Dinámica del subsistema vegetal

Se deben estudiar en cada parcela:

- 1º. Masa arbórea:*
- Área basal.
 - Mapa de localización.
 - Distribución de edades.

- % de composición.

2º. *Matorral*:

- % de cubierta.
- Frecuencia.
- % de composición.
- Densidad.

3º. *Herbáceas*:

- Grado de importancia.
- Densidad.
- Cubierta.
- Frecuencias.

4º. *Incendios*:

- Datos históricos

64.2.6. Respuestas del subsistema forestal a la agresión

Se deben controlar:

- Historial de daños generales.
- Historial de daños especificando especies.
- Las dosis de contaminación recibidas en las parcelas.
- Síntomas específicos de cada contaminante en cada superficie estudiada.
- Problemas secundarios (plagas, etc.).

64.2.7. Control del subsistema arbóreo en crecimiento

Se debe estudiar:

- Comparación del crecimiento con parcelas testigo.
- Comparación radial y vertical.

- Comparación de los daños en sistemas foliares.
- Control histórico de las pérdidas en marcha.

64.2.8. Control del subsistema humedad y microclima

Se debe controlar en las parcelas:

- Temperatura del suelo.
- Humedad del suelo (higrotermógrafos y psicrómetros eléctricos).
- Presión de infiltración estomática (porómetro).
- Control de la evolución del potencial hídrico del xilema.

64.2.9. Control de insectos básicos (subsistema) y de mortalidad de árboles

- Plagas (historial e identificación).
- Evolución histórica y estacional de los ataques.
- Historial de mortalidad de pies arbóreos.

64.2.10. Dinámica del subsistema del epípedon (raíces y patógenos)

- Control de patogenicias.
- Control de hongos.
- Efectos de los contaminantes en los hongos y patogenicias

64.2.11. Control de semilleros

- Control de nutrientes del suelo bajo la masa arbórea.

64.2.12. Control de la reproducción

- Estudio de piñas, frutos, etc. (estudio comparado de frecuencia y abundancia):
 - Peso.
 - Diámetro.
 - Longitud.
 - Características generales.
 - Número.
- Estudio de semillas (estudio comparado de frecuencia y abundancia):
 - Peso.
 - Ala (si tienen).
 - Superficie del ala.
 - Diámetro.
 - Longitud.
 - Número de frutos.

64.2.13. Degradación foliar

- En pie (estudio comparativo):
 - Tipo de hoja.
 - Necrosis.
 - Manchas.
 - % de superficie.
 - Longitud de las hojas o acículas.
 - Diámetro de las acículas.
 - Superficie de las hojas.
 - Defoliación.
- En el suelo (estudio comparativo):
 - Control de hoja caída.
 - Control de la acumulación de hoja caída.
 - Control del contenido en nutrientes.
 - Control de influencia de la humedad.

64.2.14. Degradación de la madera

- Control comparativo de la descomposición de la madera

64.2.15. Dinámica de poblaciones de micromamíferos

- Censos.
- Composición de las especies.
- Alimentación.
- Estado sanitario.

64.2.16. Planificación general y control

- Estudios, trabajos y correcciones en la fuente:
 - Emisiones.
 - Instalaciones.
 - Procesos.
 - Modificaciones.
 - Combustibles.
 - Materias primas.
- Estudio y descripción del ecosistema forestal:
 - Clima.
 - Suelos.
 - Topografía.
 - Vegetación.
- Modelización:
 - Definición de las actividades y áreas de los modelos .

- Factores de análisis:
 - Subsistemas con estrés.
 - Situaciones de contaminación.
 - Productividad.
 - Respuestas del ecosistema al estrés.
- Diseño de los modelos.
- Control de la evolución de los subsistemas y otros componentes, aparatos y factores:
 - Dinámica vegetal.
 - Subsistema forestal.
 - Subsistema arbóreo.
 - Subsistema humedad y microclima.
 - Subsistema entomofauna y mortalidad de pies.
 - Subsistema epípedon y patogenicias.
 - Reproducción (aparatos reproductores).
 - Degradación foliar (aparatos asimiladores).
 - Dinámica de micromamíferos.
- Trabajos y correcciones en el medio receptor:
 - Cambios de técnicas de gestión forestal.
 - Cambio de especies o variedades.
 - Fertilización.
 - Cultivo.
 - Modificaciones en áreas sensibles.
 - Pantallas y setos.
 - Enmiendas.
 - Riegos.
 - Lucha contra plagas.
 - Lucha contra la erosión.
 - Reforestación.
 - Apoyo a los subsistemas que tengan componentes sensibles.
- Seguimiento.

64.3. EFECTOS DE LAS MASAS FORESTALES SOBRE EL MOVIMIENTO, DISPERSIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

64.3.1. Bases del problema

Generalmente la mayoría de las ciudades disponen de vegetación periurbana, parques regionales, etc., donde existe una situación de rugosidad de cierta altura en lo que se refiere a las masas de aire que salen de la ciudad. Los efectos de esas masas, generalmente forestales, son muy variados: Regulan el contenido del CO₂ y del exceso emitido por la industria, filtran, captan, absorben, acumulan, destruyen bacterias, etc., y a la vez sufren la agresión de los contaminantes atmosféricos.

Las masas vegetales actúan como pantallas protectoras que retienen y fijan el polvo y microorganismos nocivos, absorbiendo también gran cantidad de moléculas gaseosas, contribuyendo así a mantener la calidad del aire.

La función protectora y depuradora, eliminando contaminantes del aire, es muy considerable cuando se trata de vegetación arbórea, debido a la mayor superficie foliar que presenta. La superficie total de las hojas de un árbol de tamaño medio puede exceder de 100 m². La capacidad de retención del follaje oscila, generalmente, entre 30 y 80 toneladas/ha, variando según el tipo de árbol o bosque y la densidad de la cubierta foliar. Se cita, para los bosques de *Abies*,

Pinus o Betula, una capacidad de retención de 30, 35 y 70 toneladas/ha, respectivamente.

El polvo retenido temporalmente en las hojas, es posteriormente lavado por la lluvia y arrastrado hasta el suelo forestal o al tapiz herbáceo, donde permanece sin ser arrastrado nuevamente por el viento, debido principalmente a la reducción de la velocidad del mismo en las zonas arboladas. Este efecto de frenado del viento se extiende a un perímetro de aproximadamente 1 km. fuera de los límites del bosque. Las praderas desempeñan también una función fijadora, aunque en mucho menor grado.

Se ha comprobado que la vegetación actúa en la fijación de las lluvias radiactivas; así, la radiactividad medida en el lado abrigado del viento de un bosque, es treinta veces menor que la medida en el lado expuesto al viento (*Aberg, B. y Hungate, Fr.*, 1966).

La vegetación filtra igualmente gases nocivos, siempre que éstos no sean lo suficientemente tóxicos como para provocar la caída de las hojas. Esto es de gran interés en la selección de especies para los espacios verdes urbanos y periurbanos, que deben ser resistentes a los contaminantes. Con la finalidad de facilitar la elección de especies en las zonas verdes urbanas y periurbanas, se han establecido escalas de sensibilidad citadas en otros capítulos de esta obra.

El ruido es una de las formas de contaminación urbana más grave, contra la cual la función protectora de la vegetación, sobre todo de la arbórea, es muy

eficaz. Para reducir el ruido de una vía con intensa circulación a nivel soportable, es necesario alejarse, aproximadamente, de 1 a 2 km. en una superficie desnuda, mientras que con la presencia de una cortina densa de árboles, bastan unos 200 metros.

Sin embargo, no se deben exagerar las posibilidades protectoras de la vegetación, y, sobre todo, no se debe contar con éstas para resolver el problema de la contaminación cuando alcanza niveles graves o importantes. En el caso de la contaminación por flúor, por ejemplo, se ha evaluado la capacidad de fijación de una masa forestal durante el período vegetativo, sólo en algunos kilogramos por hectárea (expresado en flúor puro), y en invierno la fijación es aún menor; mientras, el vertido fluorado alrededor de una fábrica se cifra a menudo en cientos de toneladas anualmente, llegando a detectar, a veces, contenidos considerables de flúor en árboles situados a más de 25 km de las fuentes emisoras (*Seoánez, M.*, 1977).

De gran interés es la función reguladora e intercambiadora de gases de las masas verdes, desde el punto de vista del mantenimiento de la calidad del aire. Por el proceso de fotosíntesis, las plantas verdes expuestas a la luz absorben anhídrido carbónico y desprenden oxígeno.

Una hectárea de bosque, que puede representar entre 50.000 y 150.000 m² de superficie foliar, según las especies, puede fijar de 20 a 30 toneladas de CO₂ por año, y liberar de 12 a 20 toneladas de oxígeno. Cinco o seis árboles grandes

son suficientes para cubrir las necesidades de oxígeno de un hombre.

La función regeneradora de la vegetación no se limita a la fijación del CO_2 y la liberación de O_2 , sino que concierne igualmente a la absorción de gases tóxicos. Estos penetran por los tejidos vegetales al mismo tiempo que el aire, y pueden ser retenidos por diferentes procesos fisiológicos o físico-químicos; algunos gases, incluso, son transformados y metabolizados, de forma que la planta puede acumular sin peligro cierta cantidad, mientras que en el organismo humano presentarían una toxicidad inmediata o retardada (cancerígenos). Estos temas se tratan en profundidad en los capítulos correspondientes.

Por último, señalamos de un modo marginal la función destacada que la vegetación arbórea y otras comunidades vegetales desempeñan en la regulación de la temperatura y de la humedad, y en general de las condiciones climáticas que contribuyen a su vez a mantener una adecuada calidad del aire.

64.3.2. Regulación del CO_2 atmosférico

La función de las masas forestales en la regulación del CO_2 atmosférico se puede analizar a dos escalas:

- Escala planetaria.
- Escala local.

Escala general o planetaria

La fotosíntesis consume el anhídrido carbónico del aire y desprende oxígeno. Inversamente, la respiración y los procesos de degradación biológica consumen oxígeno y producen CO_2 . El ciclo no se cierra por completo, ya que la materia orgánica, después de una serie de procesos complejos, es almacenada en pequeñas cantidades en forma mineralizada.

Durante un largo período de tiempo (tiempo geológico), el aire se ha enriquecido en oxígeno, y el carbono se ha almacenado lentamente (fósiles, petróleo, carbón).

Hay que señalar que una parte importante de la fotosíntesis se efectúa en medio acuático (del 50 al 80% del total), y que los intercambios planta-agua-aire, parecen conducir a un equilibrio. Sin embargo, la función tampón de los océanos es muy lenta.

Entre las plantas terrestres, los bosques desempeñan la principal función fotosintética.

Durante muchos años, los procesos de degradación en los bosques fueron muy lentos, ya que la mayor parte del carbono es fijado en forma de madera, y ésta no se sustraía del bosque en proporciones extraordinarias.

El ciclo descrito se ha comenzado a perturbar gravemente en el siglo pasado. El consumo industrial de combustibles fósiles ha introducido considerables cantidades de CO_2 en la atmósfera. Parece ser que los factores homeostáticos que

mantendrían constante la tasa de CO₂ atmosférico no son capaces de controlar la cantidad creciente de CO₂, esto es, no funcionan con la necesaria velocidad. El aumento es aproximadamente del 0,25% por año, y sólo la mitad de las cantidades suplementarias son absorbidas por los procesos reguladores.

Por estas razones, las plantas terrestres, y sobre todos los bosques, pueden desempeñar un papel regulador muy eficaz a corto plazo; a largo plazo sin embargo, se corre el riesgo de que el ciclo del carbono se restablezca con una tasa de CO₂ atmosférico aumentado, y con consecuencias climáticas y ecológicas difícilmente previsibles.

Aspecto local

La capacidad de la vegetación arbórea de equilibrar localmente las combustiones industriales por una actividad fotosintética creciente, está muy poco estudiada.

Las medidas de las variaciones diurnas del nivel de CO₂ del aire a diferentes alturas en las proximidades y en el interior de una masa arbolada, muestran que el nivel de CO₂ resulta muy modificado por la fotosíntesis.

Por lo tanto, la función de los bosques periurbanos no se debe desechar. Dicha función será tanto más eficaz cuanto mayor sea la productividad del bosque, teniendo la precaución de recolectar y retirar la madera para evitar los procesos de degradación.

Podemos concluir diciendo que el bosque más productivo en términos económicos, es también el más eficaz en la regeneración del oxígeno del aire.

64.3.3. Efecto filtro

El origen de las partículas sólidas es muy diverso, como ya hemos visto en capítulos anteriores, por lo que no insistiremos en el tema.

La acción de filtro sobre las partículas sólidas del aire que ejercen las masas vegetales, ha sido señalada frecuentemente en la bibliografía especializada, en la que se recogen numerosos ensayos realizados en laboratorio y en el medio forestal.

Las partículas sólidas se depositan fundamentalmente en las hojas, que son las que presentan mayor superficie de contacto con el exterior. El poder de captación de las hojas varía según la especie arbórea de que se trate; así, por ejemplo, con la misma superficie foliar, la *Picea sp.* tiene un poder de captación 32 veces mayor que el *Populus sp.* Se han elaborado listas de especies, clasificadas en función del poder de intercepción de las partículas sólidas.

A nivel de poblaciones, se citan cifras del orden de 32 Tm/ha para el abeto, 36,4 Tm/ha para el pino silvestre y 68 Tm/ha para el haya.

Según los estudios de *Bartoli (1972)*, la acción de las masas vegetales sobre las partículas sólidas tiene lugar en dos aspectos:

- El efecto aerodinámico del bosque en la transferencia del contaminante.
- El efecto de captación de las partículas sólidas en las superficies foliares de los árboles.

64.3.4. Efecto aerodinámico

El efecto aerodinámico viene determinado por la modificación de la velocidad del viento cuando entra en contacto con la masa vegetal, modificación debida a la rugosidad de las superficies de intercepción del viento y a las turbulencias que se originan en el choque del viento con dichas superficies.

En los años 60 y 70 se elaboraron modelos teóricos (*Smirnoff, W.A., 1967*) que recogían la influencia de los parámetros rugosidad y turbulencia sobre la dispersión de los contaminantes.

Se ha comprobado que rodeando un foco emisor, por ejemplo una chimenea, por una masa forestal, de rugosidad más elevada que la de una pradera, la exposición del suelo al contaminante queda muy reducida, con lo que se demuestra el poder de captación de las superficies rugosas de la vegetación. El potente freno que supone la masa forestal para el movimiento de las partículas tiene como resultado la acumulación de éstas sobre los árboles. La consideración de esta acción de las masas vegetales sobre los contaminantes es de gran interés en la ordenación de zonas industriales.

La rugosidad del suelo influye mucho sobre el perfil de velocidad del viento y

por consiguiente sobre el estado de las capas bajas atmosféricas, como hemos visto en los capítulos correspondientes. En las superficies lisas dominan las fuerzas de resistencia debidas a la viscosidad (caso de un pastizal). En las superficies rugosas dominan las debidas a la rugosidad (caso de una masa forestal).

Los modelos establecidos son abundantes, partiendo de las fórmulas de *Sutton*. A mayor longitud de rugosidad, más se acerca el punto de concentración máxima a la base del foco emisor, como se observa en la tabla adjunta, en la que:

u_x = Velocidad de rozamiento.

\bar{u} = Velocidad del viento = 5 m/seg.

z_0 = Longitud de rugosidad.

VALOR DE LA LONGITUD DE RUGOSIDAD z_0 Y DE LA VELOCIDAD DE ROZAMIENTO u_x PARA UN VIENTO DE $\bar{u} = 5$ m/seg. Y ALTITUD DE 2 m

Superficie	z_0 (cm)	u_x (cm/seg.)
Hielo, agua lenta	10^{-3}	16
Pradera cortada	0,1	27
Pradera baja	1-2	43
Pradera alta	4-9	60
Matorral y árboles	14	70
Suelo inculdo	1-4	45

Se debe tener en cuenta que el polvo, los aerosoles y las partículas sólidas de diámetro inferior a 5μ se comportan como los gases en su dispersión, difusión y turbulencia.

Si el diámetro es superior a 5μ , se pueden utilizar fórmulas como la de *Bosanquet* y otras, pero este no es el moti-

vo de este capítulo, como no lo es el cálculo de la altura y flujo de chimeneas, sino más bien todo lo que se refiere a la inmisión que se recibe.

El tema se puede consultar en los capítulos específicos en otra Parte de esta obra.

De todos modos, alguna de las fórmulas que citamos es muy útil en ciertos casos, y por ello reflejamos a continuación, por su facilidad de aplicación, la de *Bosanquet*:

$$\bar{Y} = 32 \cdot 10^{-4} \frac{Q_p b}{H^2} F\left(\frac{f}{\bar{u}}, \frac{x}{H}\right)$$

siendo:

H = Altura de la chimenea.

\bar{Y} = Nivel medio de sedimentación.

Q_p = Emisión de partículas por unidad de tiempo.

b = Coeficiente que define el tiempo de soplado del viento en un sector de 45°.

f = Velocidad de la caída de las partículas.

\bar{u} = Velocidad media del viento.

x = Distancia de la fuente de emisión.

Contaminantes gaseosos

La concentración máxima a nivel del suelo a barlovento es independiente de la turbulencia atmosférica.

$C_y/C_z = \text{cte}$, siendo C_y y C_z coeficientes de difusión de *Sutton*.

Aerosoles y partículas sólidas

La concentración es máxima a nivel del suelo para menor C_y/C_z (turbulencia).

Concentración máxima = $\chi_{\max}(x,y,z)$

Contaminantes gaseosos

$$\chi_{\max} = \text{cte}/H^2$$

Aerosoles y partículas sólidas

$$\chi_{\max} = \text{cte}/H$$

En una ciudad, se pueden aplicar las fórmulas de *Sutton* modificadas por *Lucas*.

$$C_x = \frac{W}{\sqrt{\pi} C_z \bar{u}} \left(\text{In} \frac{C^2 z x^2}{H^2} + \frac{H^2}{C^2 z x^2} - \frac{H^4}{C^4 z x^4 \cdot 2 \cdot 2!} + \frac{H^6}{C^6 z x^6 \cdot 3 \cdot 3!} \right)$$

siendo:

C_x = Concentración en el suelo.

W = Volumen de emisión / Unidad de superficie.

\bar{u} = Velocidad media del viento.

H = Altura de emisión.

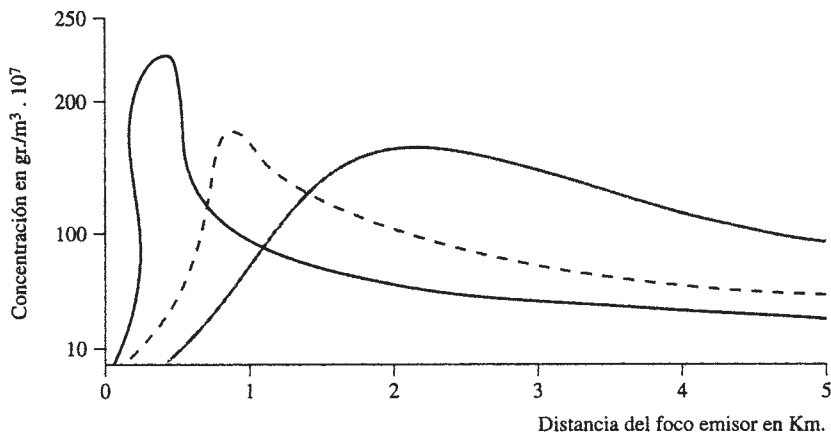
C_z = Coeficiente de difusión vertical.

En las zonas periurbanas de una ciudad de diámetro l, la concentración a una distancia x ($x > l$) es: $C_x - C_{x-1}$.

Los resultados prácticos comparados con estas fórmulas revelan que el decrecimiento de concentración máxima en zonas forestales verdes periur-

banas es superior al calculado en los modelos, y ello se debe a corrientes de convección natural que aportan de arriba aire limpio a la masa verde, y a cierta acción de los gradientes de temperatura.

Gráficamente, para H = 50 m, será:



Z_0 = Longitud de rugosidad
 ——— Z_0 = 1 cm. herbáceas - - - - Z_0 = 10 cm. frutales — · — Z_0 = 100 cm. forestal

64.3.5. Captación

Es el más estudiado actualmente, habiéndose llegado a partir de los resultados obtenidos en numerosas investigaciones a la conclusión de que las cifras de retención que se señalaban antiguamente para algunas especies (*Pinus*, por ejemplo), son probablemente demasiado elevadas. Hay que considerar que se llegó a estas cifras extrapolando los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio. No obstante, el efecto es muy de tener en cuenta.

64.4. CONTAMINANTES ABSORBIDOS Y TRANSFORMADOS

En principio, tratamos los agentes que se asimilan: SO_2 , O_3 , CO_2 , CO y algunas partículas sólidas.

El SO_2 procede sobre todo de la combustión del carbón y del petróleo (fuels). Generalmente es poco abundante en las ciudades si las condiciones atmosféricas son normales, pero puede ser peligroso cuando las condiciones atmosféricas (atmósfera estable) favorecen el desarrollo

del smog ácido, como ya se ha tratado en el capítulo correspondiente.

El SO_2 ataca a la vegetación, cuya sensibilidad difiere según las especies. No obstante, a concentraciones muy pequeñas, es absorbido, almacenado y parcialmente asimilado por las plantas, como ya se ha indicado.

Frente al SO_2 , los vegetales tienen una gran capacidad de recuperación, siempre que los niveles fitotóxicos del contaminante no permanezcan mucho tiempo. Podemos afirmar así que las masas vegetales desempeñan una importante función depuradora.

En un tratado sobre contaminación atmosférica (*Detrie, J.P.*, 1969) se afirmaba que una masa de aire con un contenido en SO_2 de 10 mg/m^3 se depura completamente al atravesar un bosque de hayas de mediana edad, si pasa a una velocidad inferior a 25 km/hora . Las experiencias de laboratorio concuerdan con esta afirmación.

Otras especies arbóreas, como el abedul o el carpe, son capaces de eliminar pequeñas cantidades del SO_2 del aire. Otras especies, como el olmo, el sauce o la robinia, son menos eficaces. Hay que destacar que la eliminación no está unida a la penetración del SO_2 en la hoja, nada más que para el olmo y el haya.

Los estudios realizados por *Lampadius* (1968) en la República Federal Alemana, sobre bosques de hayas, asignaban a los mismos un poder de filtro prácticamente despreciable. Por el contrario, en ese país, las últimas investigaciones realizadas, señalan algunas espe-

cies, como el *Abies alba*, favorecedoras del retorno al suelo del azufre, pero por mecanismos no fisiológicos. El agua de lluvia, al acumularse en las cortezas y ramas muertas permitiría una disolución suplementaria del SO_2 , dando al abeto un eficaz poder de filtro, contrariamente al caso del haya.

Asimismo, el CO es un contaminante asimilable por las plantas, como indican las numerosas experiencias que señala la bibliografía adjunta (*Seoánez, M.*, 1977).

Otro contaminante muy estudiado es el ozono, que puede ser absorbido y reducido por las plantas, según se demuestra en experiencias de laboratorio.

Para ampliación sobre los contaminantes SO_2 y CO en su asimilación por los vegetales, véase lo referente a alteraciones y agresiones, y los capítulos específicos en esta misma obra.

64.5. CONTAMINANTES ABSORBIDOS Y ACUMULADOS

Con criterio similar al epígrafe anterior, tratamos como fundamentales los agentes básicos no asimilables que se acumulan: F y metales pesados.

- **Flúor**

La caída de las hojas o su lavado por el agua de lluvia puede provocar el aporte del contaminante al suelo. El almacenamiento en las hojas no representa más

que algunos kg/ha/año, mientras que las chimeneas emiten a menudo varios cientos de kg/día. El lavado del polvo fluorado presente en las hojas, sería sin duda la cifra más interesante a considerar, pero se disponen de pocos datos sobre el mismo.

De todos modos, este contaminante es tan tóxico para la vegetación, que el primer problema que se plantea ante una contaminación por flúor, es salvarla, antes que buscar un papel útil de la misma como depuradora.

Para un mejor conocimiento véase el capítulo de esta obra referente a alteraciones y agresiones, y los apartados dedicados al flúor.

• Plomo

Es otro contaminante no asimilable, que interviene muy poco en el metabolismo vegetal.

Se acumula en cantidades importantes en las plantas, en general sin efectos tóxicos visibles, pero es muy peligroso para el hombre y para los animales, presentando riesgos de intoxicación por su acumulación en la cadena alimentaria. El consumo de forrajes contaminados ocasiona alteraciones en el ganado (véase el capítulo correspondiente).

La presencia de pantallas vegetales bordeando las carreteras tiene un efecto importante de protección de las zonas vecinas.

64.6. EFECTO ANTIMICROBIANO

La acción antimicrobiana activa de las masas forestales se ha estudiado hace 30 años. Si bien existían muchas citas sobre el diferente número de gérmenes presentes en el aire de distintos lugares (almacenes, parques, bosques, etc.), estos resultados no se relacionaban con el poder antimicrobiano de la vegetación.

Se ha observado que existen cuatro millones de gérmenes/m³ en un gran almacén, 575.000 en una calle o entre 50 y 100 en un bosque.

Fraxinus, *Morus* o *Tilia* son poco antimicrobianos. Sin embargo, el *Liquidambar*, el *Chamaecyparis*, los *Abies*, los *Larix* o los *Pinus* son fuertemente antimicrobianos.

En general, los géneros *Pinus*, *Abies* y *Eucaliptus* son antimicrobianos potentes a causa de diversas sustancias segregadas por sus sistemas foliares. Esto mismo ocurre con mayor o menor intensidad con los sistemas aéreos de la mayoría de las coníferas, salvo en el género *Picea*.

La función antimicrobiana de las masas forestales es de interés en relación con la creación y orientación de los espacios verdes urbanos y periurbanos por toda la mejora sanitaria que ello puede implicar, como se ha puesto de manifiesto en diversos congresos en los últimos años.

64.7. TÉCNICAS DE INGENIERÍA AMBIENTAL APLICADA A LA MINIMIZACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE MASAS FORESTALES

64.7.1. Bases generales

Antes de desarrollar este tema hemos de advertir que los controles legales de las emisiones en los países desarrollados impiden ambientes de contaminación atmosférica muy elevada, pero aún así, existen casos de fuentes y áreas de emisión que provocan situaciones de contaminación que muchas veces justifican las líneas que siguen a continuación.

Los estudios sobre contaminación en grandes áreas del medio natural suelen incluirse en investigaciones sobre sinecología y dinámica de poblaciones. Mediante estas investigaciones se pueden definir los cambios que provoca la contaminación atmosférica en determinados casos sobre relaciones interespecíficas y sobre las relaciones con el medio ambiente, dentro de la complejidad de los ecosistemas.

Es necesario realizar controles y seguimientos sistemáticos en grandes áreas para estudiar la evolución de los ciclos biogeoquímicos, la evolución de las poblaciones vegetales y animales, y la relación de todas ellas con la propia composición de la atmósfera.

En lo que se refiere al medio natural, y dentro de él, al medio forestal, la con-

taminación atmosférica debe ser considerada como un factor local que afecta a elementos como la calidad o la cantidad.

Los daños a la vegetación no se pueden definir y evitar solamente mediante controles urgentes e incompletos, y hace falta tomar medidas eficaces, oportunas y viables que se basen, en parte, en esos controles. Debe tenerse en cuenta que en este tipo de trabajos las labores previas muy completas aseguran mejor el éxito en los resultados, y más cuando tratamos, en muchos casos, de grandes áreas que necesitan tiempo para ser estudiadas con el rigor necesario.

Los responsables del tema deben asumir su responsabilidad y aceptar que estos estudios de grandes territorios son complejos y de cierta duración, y pensar, como decimos, que con buena base de conocimiento del problema es más fácil conseguir resultados útiles y válidos al final de la labor correctora del problema que tratamos.

64.7.2. Cultivo e implantación de especies y variedades resistentes

Una vez realizada la primera fase de estudios previos del medio ambiente que nos definan en qué condiciones se ha de efectuar la labor de atenuación de la perturbación mediante vegetales, comenzaremos la segunda parte actuando con estos vegetales.

Como hemos visto en los capítulos correspondientes, y como indican las numerosas tablas de especies resistentes

reflejadas en la bibliografía, existen grandes diferencias de sensibilidad, resistencia y adaptación de las especies vegetales ante la contaminación atmosférica. Esto nos proporciona un instrumento de primer orden para efectuar las labores de ingeniería ambiental correspondientes, sustituyendo especies o variedades en declive o muy dañadas por la contaminación atmosférica por otras capaces de adaptarse a la situación ambiental concreta del caso en cuestión.

La primera acción a realizar es conocer exactamente el medio atmosférico del área desde el punto de vista de los contaminantes existentes, y en segundo lugar los vientos, precipitaciones y régimen térmico de la zona, incluidos los cambios que esa contaminación puede provocar sobre las características climáticas, como es el caso del régimen de heladas en zonas frías. Los contaminantes han de ser conocidos, identificados y cuantificados con el mayor detalle posible en todo el área.

Cuando se trata de vegetación perenne, los estudios complementarios de clima, suelo y estación son también básicos.

Existen diferentes riesgos de efectos crónicos de los contaminantes del aire, citados con detalle en otros apartados de esta obra, desde los puntos de vista ecológico, económico, estético, o de pérdida de suelo (erosión), que justifican casi siempre las medidas que estamos citando.

Una vez acabadas las primeras fases del proyecto, debemos proceder a la

elección de las especies de sustitución que, aparte de su resistencia a los contaminantes presentes, han de ser de características óptimas frente a los demás factores ecológicos, y aproximarse en lo posible a los óptimos económicos.

En masas forestales, los investigadores centroeuropeos abogan por el cambio de vegetación de hoja perenne a vegetación de hoja caduca, aceptando las pérdidas de rendimiento. Esta acción creemos que es la única viable en casos de contaminación atmosférica crónica relativamente fuerte.

En caso de contaminación crónica suave, creemos personalmente que el cambio debe hacerse hacia especies de las tablas de resistencia que sean próximas a las existentes en cuanto a características ecológicas y económicas, pero con una resistencia notable a los agentes contaminantes presentes.

En todo caso, debe intentarse ir de coníferas a coníferas, de frondosas a frondosas, o de ornamentales a ornamentales similares.

Siempre que se realice esto, la variación de las condiciones ambientales que provoca un cambio de especie en un área de ciertas dimensiones será menor, y con ella las consecuencias ecológicas, estéticas y en muchos casos, económicas.

Es aconsejable, si los condicionantes lo permiten, realizar ensayos en los puntos que la información de las primeras fases nos indiquen como los más afectados, y estudiar en ellos la respuesta de las nuevas especies a las condiciones ambientales y de agresividad de la con-

taminación. Con estos datos se puede emprender la última fase de reforestación con mayor seguridad de éxito.

Aparte de estas actuaciones, es interesante marcar en la cartografía las zonas del área de actuación que sean más sensibles, y realizar en ellas desde labores complementarias (enmiendas, fertilización, labores culturales, instalación de pantallas que protejan de fumigaciones, etc.), a plantaciones de rodales de especies resistentes, con un criterio basado más en la resistencia y menos en el mantenimiento de las condiciones estéticas y económicas.

64.7.3. Fertilización y labores culturales y selvícolas

Se ha comprobado que la fertilización actúa contra los posibles efectos negativos del suelo y de la acción perjudicial de los escurrimientos ácidos o de los depósitos ácidos sobre el suelo, y de las perturbaciones que pueden provocar en los órganos inferiores de la vegetación arbustiva y arbórea.

Ante una acidificación del medio provocada por depósitos ácidos (lluvias ácidas, depósitos secos por gases o sedimentos, etc.), la reactividad del suelo cambia, y con ella la respuesta de la vegetación, al ser total la dependencia de esta en lo que se refiere a dicha reactividad.

Es muy importante, en estas condiciones de acidificación del sustrato, intentar mantener el pH suministrando Ca, lo que servirá además para mantener el

intercambio iónico, la saturación coloidal y la friabilidad del suelo. Además se ha demostrado que el Ca, como nutriente, aumenta la capacidad de resistencia frente a contaminantes como el SO_2 o los derivados del flúor.

La información que estamos citando se refiere básicamente a zonas centroeuropeas, de suelos con pH bajo o ligeramente bajo, es decir, con características ácidas. Si el pH del suelo es alcalino, las condiciones cambian radicalmente, y el aporte ácido puede, incluso, beneficiar al sustrato, aunque no así el medio atmosférico contaminado. En este caso, una medida puede ser el aporte de nitrógeno, cosa válida también para suelos ácidos, pues muchas especies, ante una disponibilidad óptima de N, aumentan su capacidad de resistencia a contaminantes oxidantes y a otros.

El aporte de N debe ser gradual y progresivo, ya que se ha comprobado que un aporte intensivo aumenta la sensibilidad de la mayoría de las especies a la contaminación atmosférica.

Ante una contaminación por SO_2 como contaminante fundamental, la fertilización con potasio mitiga mucho los daños, y se ha comprobado que el aporte de K frena, en un mismo episodio de contaminación, la extensión de aquellos, siempre que se haga en los óptimos que necesita la vegetación.

Cuando existe una contaminación por derivados del flúor, es muy eficaz el aporte de fósforo, pues el P actúa ante los daños con FH de la misma forma que lo hace el K ante contaminación por SO_2 .

Hemos de advertir, y esto ya se comprobó en varios casos, que muchos complejos fertilizantes contienen boro, y este elemento puede provocar, a través de mecanismos de ruptura de la mezcla fosfato-potasio-boro con ácidos (fuertes), un aumento en el contenido de F en el aparato asimilador (hojas) de los vegetales, con los consiguientes efectos negativos.

En líneas generales, los fertilizantes deben utilizarse en cantidades suficientes pero mínimas, de forma que sus componentes no puedan llegar a ser en ningún caso una contaminación añadida. Al mismo tiempo deben estudiarse muy bien las posibles interacciones entre los componentes de los fertilizantes y el medio (tanto el suelo como el aire contaminado), pues puede empeorarse la situación como hemos visto en el caso del boro frente al flúor, o bien puede mejorarse si el fertilizante se aporta en forma química tal que reduzca la absorción de ciertos contaminantes, como ocurre aplicando nitrógeno como nitrato ante una contaminación por ClH (los iones NO_3 suprimen la absorción de Cl), en vez de utilizar nitrógeno en forma amoniacal.

En otro orden de cosas, las labores culturales y selvícolas son muy útiles en determinadas circunstancias.

Sabemos que los pies aislados y aquellos que están situados en los bordes de masas forestales, están más expuestos a sufrir los daños por contaminación. Si se efectúan operaciones tendentes a proteger estos pies mediante cortinas o pantallas, o incluso sustituyéndolos por otros de especies o variedades afines pe-

ro más resistentes, tendremos resuelto el problema.

Por otra parte, las labores selvícolas de puesta en luz, entresaca, podas y limpias y otras, deben suprimirse en la mayoría de los casos, por el simple hecho de que tanto hojas y acículas como ramas y ramillas actúan de filtro ante gases y partículas, y cuanto mayor sea la masa de estas más intensa será su acción depuradora, como hemos visto en otros capítulos de esta obra. Asimismo hemos estudiado el efecto de la rugosidad que actúa sobre los vientos, por los que esto también contribuirá a mitigar la acción contaminante.

Al reforestar en labores de ingeniería ambiental contra la contaminación atmosférica, muchos criterios también han de ser diferentes. Si se reduce la distancia entre pies, se dificultará así la entrada de los contaminantes a la masa vegetal. Cuando se encuentren pies de la masa previa que manifiesten resistencia fenotípica o de otra índole a la contaminación atmosférica, deben ser protegidos a ultranza, y se deben realizar labores de ayuda, como fertilización e incluso riego, pues su presencia puede apoyar la lucha contra la contaminación por muy diversos motivos, que pueden incluso llegar hasta el repoblado natural con pies más resistentes.

Las labores selvícolas deben ser efectuadas también con criterios de ingeniería ambiental contra la contaminación atmosférica, analizando el equilibrio: mejora selvícola, rejuvenecimiento, regeneración, apoyo vegetativo, mayor exposición a la contaminación, y buscando en él la mayor eficacia posible.

En áreas sensibles de bordes o zonas más expuestas ya hemos indicado la posibilidad de uso de especies o variedades resistentes, con objeto de proteger a las demás de la masa.

Finalmente hemos de indicar, y este es un caso frecuente en España, que muchas veces debe primar la función protectora del monte, sobre todo frente a la erosión, por lo que el criterio dominante en caso de muerte de masas por contaminación atmosférica, debe ser tener pies que se mantengan sobre el sustrato y lo fijen. Con esta idea, la reforestación con pies resistentes se efectuará casi sin tener en cuenta los criterios estéticos y económicos, y solamente nos afectarán ciertos factores ecológico-selvícolas, aunque esto, naturalmente, habrá de re-

alizarse con los matices que corresponden a cada caso particular, sobre todo en aquellos en que por alguna circunstancia especial prime algún valor (histórico, estético, cultural, etc.) sobre todos los demás.

64.8. PANTALLAS, CORTINAS VEGETALES Y SEDIMENTACIÓN

64.8.1. Características físicas

Ante las diferencias lingüísticas de calificación de los setos naturales y cortinas vegetales, reproducimos seguidamente las denominaciones indicadas por García Salmerón (1964):

Alineación subarbustiva, recortada, con altura inferior a 0,40 m BORDURA.
Alineación arbórea, recortada, con altura inferior a 4 m. y superior a 2 m CORTINA.
Alineación arbórea no recortada, superior a 2 m PANTALLA.
Alineación vegetal que cumple la definición, sin las características anteriores SETO.

Las cortinas, setos y pantallas vegetales, son alineaciones muy utilizadas en áreas con vientos persistentes para mejorar los rendimientos de los cultivos, al ejercer una protección contra los efectos mecánicos del viento debidos a su propia acción o a las partículas que transporta, y al modificar las condiciones del microclima.

Al mismo tiempo se observan ciertas modificaciones de la velocidad de sedimentación de las partículas sólidas en suspensión, según sean el tipo de seto o

cortaviento, la topografía de la zona y las condiciones meteorológicas.

En general, una masa contaminante se-
dimenta según la relación $F = c \cdot u$, donde:

F = Flujo.

c = concentración en un punto.

u = velocidad de sedimentación.

Cualquier alteración de estos dos últimos parámetros que produzca una disminución del flujo, tendrá como conse-

cuencia una baja en el nivel de contaminación. Esto se puede conseguir mediante obstáculos (cortinas) que provoquen inferiores concentraciones y disminución de la velocidad del viento.

Como afirmaban *Guyot y Elejabeitia* (1970), se puede indicar que $E = n.H$, donde:

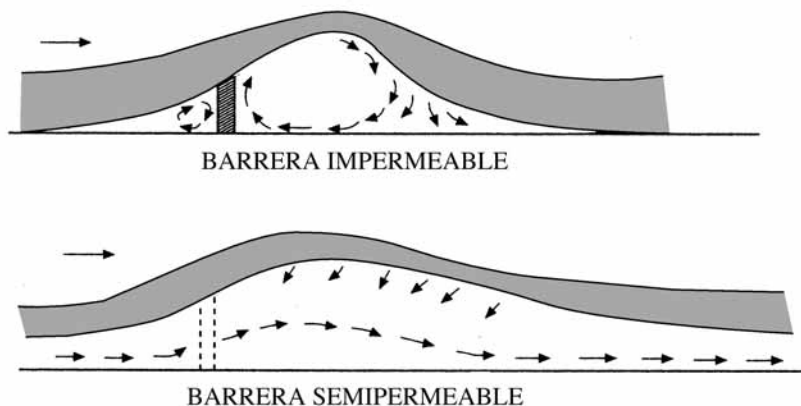
E = Extensión de la zona protegida por el obstáculo (cortavientos).

n = Coeficiente de extensión (prácticamente independiente de la velocidad del viento y dependiente de la permeabilidad de la pantalla).

H = Altura del obstáculo.

En los entornos de las pantallas se verifican diversos fenómenos que dependen, entre otros factores, de la permeabilidad de la cortina, como se indica en los esquemas adjuntos:

EVOLUCIÓN DEL VIENTO ANTE PANTALLAS DE DIFERENTE PERMEABILIDAD (GUYOT Y ELEJABEITIA, MODIFICADO)



Caso 1. El filete de aire se desvía hacia arriba y se comprime, aumentando su velocidad, lo que hace que disminuya la presión estática; aparecen una sucesión y una corriente ascendente. Seguidamente la masa de aire vuelve a ocupar las capas más bajas.

Caso 2. Las curvas no son tan violentas, pues el aire se desvía menos. Desaparece el remolino y el filete vuelve a las condiciones previas a la barrera a mayor distancia del obstáculo.

Si la barrera es impermeable, todo el viento choca con el obstáculo, se eleva, y baja a una distancia comprendida aproximadamente entre seis y ocho veces la altura de la barrera. En la zona en que el torbellino posterior actúa, se ha comprobado un gran aumento de la velocidad de sedimentación de las partículas sólidas, manteniéndose esta velocidad hasta una distancia aproximada del obstáculo unas veinte veces su altura, lugar en que la sedimentación vuelve a ser normal.

Si la barrera es semipermeable, pueden existir dos posibilidades: que la velocidad del viento sea elevada o que sea baja. En el primer caso la barrera se comporta casi como un obstáculo impermeable, efectuándose la mayor sedimentación a una distancia del obstáculo doce veces su altura, mientras que, en el segundo, el fenómeno se atenúa y la sedimentación tiende a aproximarse a la normal.

64.8.2. Aplicaciones prácticas

Mediante estudios realizados por diversos investigadores y con análisis propios, hemos llegado a una serie de conclusiones que pueden ser muy útiles en el momento de limitar las perturbaciones producidas por emisiones a la atmósfera en el medio natural.

- a) Las cortinas vegetales pueden ser utilísimas teniendo en cuenta las características de permeabilidad de la barrera: si esta es impermeable, se provoca una sedimentación intensa a partir de una distancia de seis a ocho veces la altura del obstáculo, y se protege un espacio entre la barrera y una distancia de cuatro veces su altura.
- b) Si la barrera es permeable, la zona protegida llega hasta una distancia de seis veces la altura de aquella, y la zona de sedimentación comienza a partir de una distancia diez o doce veces la altura del obstáculo.
- c) Debido a lo indicado en los párrafos anteriores, es posible *orientar* las sedimentaciones y proteger ciertas zonas de la sedimentación de partículas.
 - Para orientar la sedimentación, es suficiente establecer una barrera impermeable en un lugar tal que provoque el depósito de partículas en una zona previamente establecida que disponga de amplias superficies de recepción, de sistemas de depuración natural (suelos y vegetales) o artificial, etc.
 - Para proteger zonas amplias, se pueden instalar series de barreras semipermeables a distancia tal entre ellas (seis veces su altura), que permitan proteger espacios de un modo similar a los cortavientos utilizados en agricultura para la protección contra vientos persistentes (*Mistral* en el valle del Ródano, *Cierzo* en Aragón, *Tramontana* en Cataluña, etc.).
- d) Las cortinas impermeables y semipermeables vivas deben construirse, lógicamente, con especies que se adapten a las características ecológicas del lugar.
- e) Se deben sopesar las ventajas e inconvenientes típicos de esta clase de barreras, similares a las de los cortavientos:
 - Ventajas:
 - Tratamientos agrarios (riegos, tratamientos fitosanitarios).
 - Disminución de la erosión.
 - Mejoras en la polinización.
 - Mejoras en floración y fructificación.
 - Mejoras en temperaturas y evaporación.

- Inconvenientes:
 - Pérdidas de espacio.
 - Sombras.
 - Competencia radicular.
 - Facilitan las heladas.
 - Facilitan enfermedades y plagas.
- f) Las cortinas deben instalarse realizando estudios previos sobre clima, suelos, superficies a proteger y especies a instalar, así como sobre posibilidad de mantenimiento (podas y repoblaciones).

Si tratamos de proteger plantaciones de frutales, se deberán instalar cortinas semipermeables de árboles de hoja caduca, pues en invierno no es necesaria la protección y en primavera la cubierta progresiva es muy útil.

Si se trata de cultivos hortícolas, los cortavientos deberán ser más densos y de hoja perenne.

- g) La altura y estructura de las cortinas vegetales dependerán de muchos factores, como acabamos de ver, pues el tipo de cultivo, la calidad de las cosechas, el precio del suelo, la climatología, la toxicidad del depósito, el volumen de sedimentos que se deposita por unidad de tiempo y superficie (volumen/mes/m²), la intensidad del viento, etc., han de estudiarse antes de la implantación de protecciones o *sedimentadores* vegetales.
- h) Dentro de la enorme gama de cortinas y setos que se utilizan como cortavientos o en jardinería, son muy útiles las asociaciones *Populus sp.*-

Cupressus sp. como especies de alto y bajo porte, con hoja caediza y perenne, respectivamente.

También pueden servir los setos multiespecíficos, podados o no podados, o los monoespecíficos podados como ejemplos de menor o mayor permeabilidad y protección.

- i) Se deberán tener en cuenta, siempre que sea posible, los puntos de vista estético (color, podas), económico (posible aprovechamiento de las maderas y leñas), protector (en zonas de vías pecuarias o de comunicación utilización de especies espinosas) y de necesidades de las especies utilizadas (austeridad).

64.9. DEGRADACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LOS ECOSISTEMAS FORESTALES POR CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

64.9.1. Introducción

Un ecosistema forestal está compuesto por la masa forestal, por otras plantas verdes (productores primarios) por unos productores secundarios (descomponedores y consumidores), el suelo, y el medio que contiene las raíces y los descomponedores. Otros elementos pueden ser los factores externos, como la climatología, y finalmente los factores indirectos que operan en cualquier ecosistema.

64.9.2. Causas de la degradación de los ecosistema forestales

Cambios del clima desde el punto de vista químico

En los últimos 100 años las emisiones de derivados del azufre y derivados del nitrógeno se han ido incrementando como consecuencia de la actividad industrial. Desde la época anterior preindustrial se ha visto que las emisiones antropogénicas han ido creciendo, y son los partícipes mayores de este tipo de contaminación. Las emisiones de ácido sulfúrico procedente de los derivados del azufre y las de ácido nítrico procedentes de los derivados del nitrógeno, tienen participación fundamental en la acidificación del suelo. La gran acidificación del medio ha surgido en las últimas décadas del siglo pasado. En el caso de Centroeuropa, las nieblas ácidas y las lluvias ácidas son la fuente de acidez del medio, sobre todo en las zonas forestales más remotas como por ejemplo en el Harz, como detallaron ampliamente Ulrich y otros (1976, 1992). Los depósitos ácidos en los ecosistemas forestales del Centro de Europa, se han incrementado con un factor multiplicador comprendido entre 10 y 50 debido fundamentalmente a las emisiones de origen antrópico de productos precursores de los ácidos.

Desestabilización de los ecosistemas forestales

El ciclo de los nutrientes de los ecosistemas forestales estables se completa

casi totalmente dentro del mismo sistema, es decir, se cierra dentro de él. La producción de ácidos y bases está en relación con la transferencia de nutrientes y también está casi en equilibrio. El lavado de sales se limita a una pequeña pérdida de bicarbonato cálcico que aparece en las aguas subterráneas. En este tipo de ecosistemas, esta pérdida se compensa por la acción meteorológica sobre los silicatos, y también está en equilibrio. Sin embargo, este equilibrio se ve afectado gravemente por el impacto de la acidez.

El equilibrio del ecosistema se puede indicar como la diferencia entre el input por depósito y el output por filtración hacia la zona de las raíces.

Parece ser que lo que se ha observado en Europa Central es un cambio drástico en el equilibrio iónico del ecosistema. El sistema, en lo que se refiere a este equilibrio iónico, pasa a un estado de transición, y por tanto a una especie de situación de desequilibrio. Por lo que se ha observado, esta situación comenzó lentamente al principio del siglo pasado y fue en aumento y agravándose a lo largo de las últimas décadas.

Desarrollo de los daños y perturbaciones del crecimiento

Los ecosistemas forestales de la zona del Harz empezaron a degradarse alrededor de 1890, y esto coincidió con el desarrollo y el aumento de las zonas pantanosas. Cuando las precipitaciones alcanzaban niveles de 1,50 metros, el de-

sarrollo de estas zonas pantanosas se hizo mucho más amplio, debido por una parte al daño de los árboles y a la pérdida de raíces del suelo, y por otra al descenso de la transpiración y de la infiltración hacia el interior. Este desarrollo del aumento de las masas de agua superficiales está en relación también con el cambio de clima y con la influencia de la actuación de los componentes químicos del clima debidos a la actuación humana.

Una evolución parecida ha ocurrido a partir de 1971 en el Erzgebirge en Checoslovaquia y en el Reinhardswald, donde existen suelos y aguas relativamente ácidos en el entorno del río Wesser.

El crecimiento forestal ha descendido enormemente, y se ha observado que la regeneración también ha sido muy afectada, como por ejemplo en lo que se refiere a *Fagus sylvatica* o a *Picea abies*, debido al aumento de la acidificación del suelo.

También se ha observado una correlación muy intensa entre la degradación de las masas forestales y el aumento de las emisiones de agentes contaminantes de la atmósfera después de la década de los años 40 del siglo pasado.

64.9.3. Degradaciones de los ecosistemas forestales debidas a fenómenos de estrés

Factores de estrés

Diversos autores propusieron en los años 80 un sistema basado en los factores de estrés para describir la degrada-

ción de los ecosistemas forestales como consecuencia de la influencia de estos factores, extendiendo el concepto desde la acción sobre los organismos a una acción general sobre los ecosistemas.

Factores de predisposición al estrés

El clima y su variabilidad

El clima representa el medio externo del ecosistema. En ecosistemas abiertos, el medio determina su desarrollo y su situación general. La variación natural del clima y sus componentes básicos como radiación, temperatura, precipitación, humedad o viento, y la presencia química de reactivos en los componentes del aire, son factores de estrés del ecosistema. Cuanto menor sea la variabilidad del clima, más fácil será que el ecosistema se ajuste a las modificaciones y a las situaciones del medio ambiente. La variabilidad climática y el estrés aumentan desde una situación húmeda a una situación seca, y desde las zonas frías hacia las zonas cálidas.

Condiciones de emplazamiento

La exposición, la inclinación o el suelo varían la percepción del clima y la resiliencia, en lo que se refiere a los cambios del medio ambiente.

Genotipo y edad

El genotipo y la edad de la masa forestal determinan la capacidad de adap-

tación y susceptibilidad de los pies en lo que se refiere en los efectos directos e indirectos de la variabilidad del clima.

Gestión forestal

La gestión forestal puede influir en la percepción del clima por modificación fuerte de las condiciones del ecosistema.

Acumulación de contaminantes

La presencia de agentes contaminantes del aire puede desequilibrar el balance del ecosistema y lo que puede tener de efectos positivos o negativos sobre los organismos.

Fotosíntesis

La fotosíntesis puede verse perturbada a largo plazo, y reducida por un efecto subletal directo de los contaminantes por cambios en el equilibrio del carbono debido a esta contaminación.

Factores de incitación al estrés

Existen factores a corto plazo que actúan en escala de tiempo referida a semanas o meses, y pueden causar perturbaciones a los organismos, especialmente si éstos tienen una vitalidad reducida. Sin embargo, estos organismos pueden recuperarse de las perturbaciones, y estos factores que incitan al estrés pueden ser los siguientes:

- Factores climáticos extremos, como heladas, sequía, tormentas, humedad.
- Casos extremos de factores químicos que afecten al clima, como por ejemplo, episodios de alta concentración en el aire de derivados del azufre, de derivados del nitrógeno, oxidantes fotoquímicos, acidez, elementos disueltos, o microcontaminantes orgánicos.
- Casos extremos de perturbación del suelo, como alta acidez, gran toxicidad durante una acidificación, deficiencia de oxígeno por saturación en el agua o poca disponibilidad de agua en época de sequías.
- Insectos fitófagos, que pueden actuar sobre toda la masa forestal.

Factores que contribuyen al estrés

Estos factores pueden actuar a medio plazo, a niveles de meses o años. Normalmente, afectan a un organismo, que es perturbado por los factores que incitan al estrés y frecuentemente le provocan la muerte. También la recuperación de los organismos es mucho menos probable que si están afectados solamente por los factores que incitan al estrés. Los factores que contribuyen al estrés pueden ser, por ejemplo, los siguientes:

- Insectos xilófagos, sobre todo los de la corteza, hongos foliares, hongos radiculares, virus, etc.
- Pérdida de nutrientes y consecuente desequilibrio iónico en los organismos.

La actuación contra estos factores puede ser bastante eficaz en lo que se refiere a los patógenos utilizando plaguicidas o lucha biológica, o controlando el equilibrio de nutrientes por fertilización. Sin embargo, si esta situación permanece, existe la predisposición a la perturbación o a la actuación de los agentes de estrés, puesto que las condiciones externas se mantienen y más tarde o más temprano puede volver la misma situación anterior.

El clima como factor de predisposición al estrés

Ya se ha tratado algo el tema en el capítulo correspondiente, y solamente hemos de señalar las modificaciones que causan el calor o el frío y otras actuaciones climáticas sobre el movimiento iónico del suelo y sobre el lavado o modificación de los elementos que dominan la acidificación más o menos intensa de ese suelo.

La relación calcio-aluminio, entre otros factores, puede dominar la actividad y la toxicidad de ese suelo en función de la vegetación. Esta toxicidad ácida afecta, sobre todo, a los microorganismos que actúan sobre el suelo y sobre las raíces, con lo cual la perturbación es doblemente importante.

Esa misma toxicidad demuestra que de esos microorganismos, son más sensibles las bacterias que los hongos. El conjunto de la actuación debida a las modificaciones climáticas pueden perturbar desde las partes aéreas de los vegetales hasta las partes subterráneas, es

decir: las raíces pueden sufrir perturbaciones como factores de predisposición al estrés debido a la presencia de un medio ácido que perturbará toda la actividad química del vegetal, desde la actuación micorrizogena hasta la asimilación de nutrientes.

Condiciones de emplazamiento como determinantes de la situación de elasticidad respecto a la acidificación

El suelo es el medio de las raíces. Su situación química e hidrológica determina la resiliencia del ecosistema en lo que se refiere al estrés debido a los nutrientes (deficiencia), al estrés ácido (toxicidad), al estrés de humedad (sequía) y al estrés de respiración, es decir, a la deficiencia de oxígeno. La acidificación del suelo aumenta el estrés debido a los nutrientes (por lavado de nutrientes) y el estrés debido a la acidez.

Acidificación debida a la gestión forestal

Los efectos acidificantes fundamentalmente debidos a la gestión forestal, se pueden agrupar en tres áreas:

- Exportación de biomasa. Al sacar madera del monte se produce una acidificación del suelo, que en ciertas situaciones puede incluso llegar a 0,5 Kmol H⁺/Ha/año (caso de la zona de Solling, en Alemania), lo que equivale en muchos suelos al nivel de neutralización causada por la acción climática de los silicatos. La explotación

continuada a lo largo de la historia de zonas forestales en suelos ácidos, ha llevado a la pérdida de las masas forestales y a la etapa de sucesión de estepas ácidas de herbáceas, como ha ocurrido en amplias zonas del Noroeste de Alemania.

- Acumulación y formación de las capas L(01) y F(02). La formación de los precursores de los horizontes del suelo con acículas, ramillas y hojarasca caídas, típica en los bosques consolidados, lleva en muchos casos (coníferas) a la acidificación del suelo, y esto ha ocurrido durante muchas décadas. Según ciertos investigadores, es posible que el ecosistema haya ido adaptándose a la nueva situación, poniendo en marcha mecanismos de equilibrio que duran lo que dura el estrés debido a la acidez. Si esta se prolonga, está por ver la capacidad de estos ecosistemas forestales de adaptarse a estos estrés acidificantes, y la respuesta puede ser desde pérdidas en crecimiento hasta la transformación a otras fases de la sucesión, como indicábamos en el epígrafe anterior.
- Lavado de nitratos. La consecuencia inmediata es una acidificación del suelo, y esta se produce en algunas labores selvícolas y forestales, como los aclareos.

Acumulación de contaminantes atmosféricos

Desde un punto de vista ecológico, el aire que utilizan los ecosistemas forestales puede contener:

- Nutrientes (productos captables y asimilables, como N, S, Ca, Mg, CO y elementos traza).
- Gases acidificantes (SO₂ y derivados, NO_x, ozono)
- Productos tóxicos (metales pesados, gases tóxicos).

El tema se trata ampliamente en los capítulos correspondientes. Solamente indicamos que en zonas forestales de suelos muy ácidos, parte de la recuperación puede tener su origen en el aporte atmosférico de nutrientes, y particularmente en el aporte de N.

Se ha observado que en Europa Central muchos bosques en mal estado desde mediados del siglo XIX, comenzaron su recuperación en los años 50 del siglo XX, y se achaca este fenómeno, por una parte, a la paralización o a la limitación de la explotación del bosque, y por otra al aporte de nutrientes de origen atmosférico, y particularmente de nitrógeno.

Pérdidas de crecimiento de las masas forestales

Ya hemos hablado en otros capítulos de esta obra sobre los daños invisibles producidos por contaminantes atmosféricos como el F o el SO₂ o sus derivados, y su control mediante diversas técnicas de ingeniería ambiental como el análisis de la actividad de ciertas enzimas (peroxidasas con flúor, etc.) u otros sistemas.

Una de las manifestaciones previas a los daños visibles (decoloración, defolia-

ciones, muerte de pies débiles o muy afectados, etc.) es la baja en el crecimiento, como se ha comprobado en numerosos casos: Maestrazgo en España, bosques del noroeste de Alemania (Harz, Solling), bosques de ciertas zonas del este de Francia y del norte de Suiza, etc. Esta pérdida puede ser provocada por diversos factores, como son los siguientes:

- Aumento de la respiración.
 - Bajas en la fotosíntesis.
 - Alteración de sectores completos de la actividad metabólica.
 - Acción enzimática sobre ciertos factores del crecimiento.
- Si los daños ya son visibles, las causas de la baja en el crecimiento se amplían:
- Bajas en la actividad fotosintética por decoloración de hojas y acículas.
 - Bajas en la actividad fotosintética por defoliación.
 - Muerte prematura de las raíces más pequeñas.

CAPÍTULO 65

ACCIÓN DE LOS FACTORES EXTERNOS E INTERNOS DE CRECIMIENTO SOBRE LOS EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LA VEGETACIÓN

65.1. BASES GENERALES

Los factores externos de crecimiento como la luz, la temperatura, la humedad, etc., son los que están determinados por las condiciones ambientales, edáficas y climáticas. Los factores internos de crecimiento se expresan según el grado específico de resistencia de la planta, que varía en función de las condiciones medioambientales y del estado de desarrollo de la planta, y son los caracteres biológicos, los de cada ecofase y el estado fisiológico.

Hace tiempo que se ha reconocido la importancia de estos factores en la sensibilidad y reacción de los vegetales frente a la contaminación atmosférica. De cualquier modo, hay poca información para clarificar esos problemas, estando limitada a observaciones y encuestas sobre los efectos en la vegetación de áreas contaminadas.

Con el desarrollo de tecnologías de análisis físico-químicos del aire y con fumigaciones experimentales para contro-

lar las concentraciones de los contaminantes y otros factores de crecimiento, se hizo posible el estudio de la influencia de estos factores a nivel individual.

65.2. INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS

65.2.1. Acción general

Los factores climáticos, antes, durante y después de la exposición, determinan en gran medida el tipo y el nivel de respuesta de la planta frente a un contaminante atmosférico. Ciertas condiciones climáticas en los días precedentes a la exposición aumentan la sensibilidad de las plantas, mientras que otras la reducen. Las condiciones climáticas durante la exposición son más importantes y tienen mayor influencia en la absorción y en el efecto del contaminante; después de la exposición, los factores climáticos tienen menor influencia en la respuesta de las plantas.

65.2.2. Influencia de la temperatura

Muchos procesos de crecimiento y desarrollo, y especialmente las reacciones durante la fase oscura de la fotosíntesis, son reacciones químicas dependientes de la temperatura. Esto explica el hecho de que por encima de los 30 °C, la fotosíntesis de muchas especies tiene una Q_{10} de 2 cuando el aporte de CO_2 y de luz son elevados. La relación entre la asimilación de CO_2 y la temperatura tiene forma de curva de óptimos.

La intensidad de la fotosíntesis influye en el tamaño de los poros de los estomas a través de la presión parcial del CO_2 en los espacios intercelulares, y ese tamaño depende directamente de la temperatura y de la absorción de contaminantes.

La temperatura también puede influir directamente sobre los efectos de los contaminantes absorbidos por las células del mesófilo.

Las temperaturas extremas durante uno o varios días antes de la exposición reducen la sensibilidad de las plantas, mientras que una temperatura normal aumenta esa sensibilidad.

Como consecuencia de la relación existente entre la sensibilidad de las hojas y su contenido en carbohidratos, el aumento de esa sensibilidad debido a altas temperaturas podría ser el resultado del aumento de la tasa de respiración a esas temperaturas.

En los cultivos de larga duración sometidos a diferentes temperaturas, la influencia de determinados estadios del desarrollo no siempre puede separarse

de los efectos directos de la temperatura sobre la sensibilidad de las plantas.

En condiciones de invernadero, y especialmente en el campo, es imposible diferenciar los efectos de la luz intensa de los de la temperatura, por lo que parece que existe una correlación positiva entre los dos factores. La sensibilidad de las plantas aumenta con la temperatura en un amplio rango, entre 4 y 35 °C; sin embargo, en experiencias realizadas en cámaras de crecimiento bajo condiciones constantes de luz, se ha encontrado una relación inversa entre la temperatura y la sensibilidad. Por otra parte, la relación positiva entre la temperatura y la sensibilidad encontrada en los experimentos de campo puede ser el resultado de una influencia dominante de la intensidad de la luz.

Las plantas que crecen a menos de 5 °C son menos sensibles a contaminantes como el SO_2 que las que crecen a temperaturas superiores. A partir de 5 °C, la sensibilidad es más o menos la misma en el rango de temperaturas normales, aunque en general crece al aumentar la temperatura.

La acumulación de flúor y los daños que provoca en la vegetación dependen de la temperatura (y también del individuo y de la especie, como ya se ha indicado).

Las especies anuales de invierno mantienen la asimilación aparente de CO_2 incluso a temperaturas por debajo del punto de congelación.

Por otra parte, hemos de recordar que la respiración se detiene por debajo de los -6 °C.

65.2.3. Influencia de la radiación solar y acciones de los estomas

Los contaminantes gaseosos penetran en mesofilo primario por difusión a través de los estomas. Todos los factores externos que regulan el movimiento de los estomas influirán en la absorción de los contaminantes atmosféricos por las plantas, y uno de los factores más importantes es la radiación (mientras que el resto de los factores se mantengan constantes), pues las reacciones de los estomas hacia la luz pueden interpretarse como fototactismo.

Ya se ha visto en el capítulo correspondiente que los estomas de muchas plantas están cerrados durante la oscuridad, y se pensó que la acción de los contaminantes durante la noche podría tener poco o ningún efecto, cosa que se ha demostrado que no es cierta mediante experiencias con SO_2 .

Aunque la acción de los contaminantes durante la noche tenga un efecto menos severo que durante el día, ambos efectos deben ser considerados conjuntamente, pues la exposición durante la noche puede intensificar los efectos de la exposición a la luz del día.

En experiencias de absorción del SO_2 por las plantas durante los períodos de luz y de oscuridad, se observó que la acumulación de azufre durante la noche puede ser un tercio de la que se produce durante el día. Estos amplios grados de acumulación también explican la respuesta de las plantas ante la exposición durante la oscuridad.

La acumulación de cloro en las plantas, que es la diferencia entre el conteni-

do en cloro procedente de una fumigación y el contenido en cloro en plantas sin contaminar, varía considerablemente en función de la especie.

El nivel de daños que presentan algunas plantas tras una exposición al HCl durante la oscuridad es muy interesante. Se ha descubierto que tanto el cloro como el NO_2 tienen un mayor poder fitotóxico durante la oscuridad que durante el día. En la planta del tomate, la diferencia entre la absorción de cloro en la oscuridad y a la luz del día es pequeña, pues los estomas de las solanáceas también están abiertos de noche.

Se ha estudiado la patología foliar por acumulación de flúor en la oscuridad y a la luz del día. Para determinar el primer síntoma de daño durante la oscuridad, era necesaria una concentración de producto y un tiempo de exposición un 10% mayor que la concentración necesaria para causar daño durante el día. La acumulación de flúor varía mucho de una especie a otra, pero la media necesaria para causar daño es sólo de un 53% de la requerida durante la exposición diurna.

El fuerte efecto del flúor absorbido durante la oscuridad, probablemente sea el resultado de un inusual alargamiento del período sin luz. La acción del flúor durante la noche presenta peligro especial para la vegetación, siendo su absorción mayor que la del SO_2 o la del HCl.

Se ha demostrado que existe una correlación positiva entre el daño foliar y el aumento de la intensidad de luz por encima de los 38.000 lux durante la exposición, por lo que se puede afirmar

que existe una influencia de la intensidad de la luz sobre la sensibilidad de plantas a la contaminación atmosférica. Esto se ha demostrado para el SO₂ y para varios componentes del smog fotoquímico. En algunas especies, la sensibilidad al SO₂ y al ozono aumenta con la intensidad de la luz.

Existe poca información concerniente a las interacciones entre la calidad de la luz y los productos fitotóxicos sobre la sensibilidad de la plantas. Teniendo en cuenta las investigaciones realizadas con otros gases y la relación existente entre la calidad de la luz y el movimiento de los estomas, se podría afirmar que la luz afecta a la sensibilidad de los vegetales a la contaminación atmosférica.

La relación entre la absorción de los contaminantes y el movimiento de los estomas ya se ha tratado en el capítulo correspondiente. En experimentos con lechuga bajo varios campos de luz se ha comprobado que la composición espectral de la radiación electromagnética tiene una gran influencia en el grado de apertura de los estomas y en su ritmo de movimiento.

Se observa un aumento del tamaño de los poros desde la longitud de onda roja a la azul. Está comprobado que la acción del espectro sobre los estomas es similar a la del espectro de absorción sobre la clorofila y al efecto del espectro sobre la fotofosforilación.

En resumen, se puede decir que el equilibrio dinámico entre la apertura en función de la luz y el cierre hidroativo y pasivo, determina el tamaño del poro

de los estomas. La calidad y la intensidad de la radiación juegan un papel importante en el proceso, y por lo tanto en la absorción de los contaminantes a través de las hojas. Dependiendo del tipo de iluminación las plantas reaccionan con diferentes sensibilidades para un determinado contaminante.

El grado de apertura de los estomas nos da una idea de la potencialidad de los daños ante un contaminante particular. No debe olvidarse que no existe una relación lineal entre el tamaño del poro y la permeabilidad de las hojas a los gases.

La difusión de un gas a través de los estomas se puede describir de forma muy simple con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{D \cdot \Delta p}{R_L + R_B}$$

donde:

Q = Tasa de difusión del gas, en $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{seg}$.

D = Coeficiente de difusión del gas.

Δp = Diferencia de la presión parcial entre la atmósfera y el interior de la hoja, en $\mu\text{g}/\text{cm}^3$.

R_L = Resistencia de la hoja o del estoma, en seg/cm .

R_B = Capa límite de resistencia, independiente de las características del estoma.

R_L puede medirse con un higrómetro de resistencia o puede ser calculado cuando el número de estomas, la distancia entre ellos y el tamaño de los poros son conocidos. La única variable

en el valor de R_L de la hoja es el grado de apertura del estoma. R_L varía inversamente al radio del poro, pero no de forma lineal, según la siguiente ecuación:

$$R_L = \frac{1}{n} \left(\frac{l}{\pi r^2} + \frac{1}{r} \right)$$

donde:

l = Longitud del poro.

r = Radio del poro.

n = Número de poros por unidad de superficie.

Los cambios en el grado de apertura de los estomas no implican necesariamente los mismos cambios en la absorción de los gases. Si el radio del poro es pequeño y si la mayor parte de los estomas están cerrados, R_L es elevado, y ocurre lo contrario cuando los estomas están muy abiertos.

El movimiento de los estomas sólo permite hacer una estimación grosera de la absorción de los contaminantes, mientras que los parámetros externos como la presión del aire y la velocidad del viento tienen una gran influencia en los factores D y en R_B indicados en la primera ecuación. La determinación de la respuesta de los estomas por toda la hoja es muy difícil y requiere mucho trabajo experimental. Se ha demostrado que las células oclusivas del haz y del envés de las hojas reaccionan de forma diferente ante los parámetros externos. De todos modos se aconseja al lector acudir al capítulo y a los epígrafes correspondientes de esta misma obra.

Junto con los efectos de la función estomática, la radiación solar durante el

desarrollo de la hoja influye sobre el tamaño y el número de sus estomas. Esto implica que las condiciones de luz durante el desarrollo de la planta determinan en parte su predisposición frente a los contaminantes atmosféricos.

Además de los efectos de la calidad de la luz sobre los estomas, su composición tiene gran influencia sobre la sensibilidad de la vegetación frente a los contaminantes, y especialmente cuando se consideran los efectos de la radiación solar sobre varios procesos fisiológicos que dependen de la luz. Una intensidad lumínica fuerte durante y después de la exposición, puede aumentar la reacción de las plantas a los contaminantes.

La ritmicidad diaria en la acumulación de los contaminantes y en la sensibilidad de los vegetales, son procesos dependientes de la luz. Las plantas responden de diferente forma a la misma concentración de SO_2 según sea la hora del día, y existe un ritmo diario, incluso si las condiciones de intensidad de luz, temperatura y humedad son constantes.

Se ha relacionado la sensibilidad a gases como el SO_2 con el grado de apertura de los estomas, como se ha indicado en el capítulo correspondiente. Todos los factores que inducen a la apertura de los estomas, como la luz, el aporte óptimo de agua, la elevada humedad relativa y la temperatura óptima, aumentan los efectos de los contaminantes; sin embargo, las diferencias en los daños de las hojas no se pueden explicar solamente por las variaciones en la absorción de gases como el SO_2 .

El aumento de la resistencia durante el día parece estar relacionado con el contenido de azúcar en las hojas, sobre todo si se trata de ambientes contaminados por SO_2 .

65.2.4. Influencia de la humedad del aire

La presión de turgencia en las hojas es un factor decisivo para la apertura completa de los estomas, y como consecuencia, para una mayor absorción de las tasas de contaminantes, y depende enormemente de la humedad del aire. A mayor humedad existe mayor riesgo para la vegetación en lo que se refiere a la acción de los agentes atmosféricos.

La curva de sensibilidad al SO_2 asciende lentamente a una humedad relativa entre el 30 y el 60%, y lo hace muy rápidamente por encima del 60%. El punto crítico de sensibilidad es del 70%, y se ha observado que a medida que baja esa humedad relativa hasta llegar al 0%, la sensibilidad a los agentes atmosféricos se reduce a la 10.^a parte.

La importancia del agua libre en forma de rocío o de gotitas de agua sobre las hojas, todavía no está muy clara.

Se han observado quemaduras en la vegetación después de precipitaciones en zonas con altos niveles de concentración de SO_2 , que pueden ser en muchos casos lluvias ácidas. En principio, los contaminantes se disuelven en la película de agua y en las gotas. Después de la evaporación la concentración de contaminantes aumenta, y pueden sobrevenir necrosis, sobre todo en las hojas que son de tipo colgante.

65.3. INFLUENCIA DE LOS FACTORES EDÁFICOS

65.3.1. Influencia de los nutrientes

El aporte de nutrientes o de sustancias indispensables para el crecimiento y el desarrollo, también es un factor determinante para la sensibilidad de las plantas a los contaminantes atmosféricos.

Como ejemplo, podemos señalar que parece ser que la resistencia al ácido fluorhídrico de muchas plantas que hayan sido abonadas con sulfato amónico o con nitrato cálcico, es superior en estas plantas abonadas que en las que están sin abonar, como ya se ha indicado en otro capítulo de esta obra.

65.3.2. Influencia de la humedad del suelo

A medida que las plantas se debilitan reaccionan menos al SO_2 , y así, cuando está próximo el punto de marchitamiento, desciende enormemente la sensibilidad. Los vegetales que reciben un suministro apropiado de agua antes de la contaminación, tienen muchas más necrosis foliares que los que han recibido agua abundante y que han sido desprovistos de ella antes de la contaminación, y esto ocurre incluso cuando la humedad del suelo sea permanente durante el proceso.

Los efectos de la humedad del suelo son similares frente a contaminación por SO_2 o por ozono. La resistencia al ozono sube cuando la humedad del suelo baja, y cuando sube la presión osmótica. Las

plantas desprovistas de agua durante varias semanas antes de la contaminación, solo abren sus estomas durante las horas de la mañana, o cuando existe un suministro óptimo de agua. En realidad, los efectos de la falta o del exceso de agua sobre el grado de resistencia de la planta, solo pueden ser comprobados con un análisis exacto del contenido de contaminante que ésta ha absorbido.

Se puede indicar que el efecto de las diferentes humedades del suelo se puede comparar con el de la humedad del aire. En ambos casos, la variación del tamaño de los poros del estoma y el nivel de absorción de contaminantes, se altera de cualquiera de las formas.

65.4. INFLUENCIA DEL ESTADIO DE DESARROLLO Y DE LA EDAD DE LA HOJA

65.4.1. Influencia del estadio del desarrollo

Durante su desarrollo, las plantas superiores responden de forma diferente a los contaminantes del aire. Las plantas de vida corta (efímeras) tienen mayor grado de resistencia, sobre todo durante los primeros estadios del desarrollo. Las plantas de grano son más resistentes durante los primeros estadios. Justo antes de la aparición de las inflorescencias, las hojas se hacen más sensibles, y son más débiles ante una contaminación con derivados del flúor. La acción de los contaminantes en los estadios críticos de desarrollo en la formación de las semillas, puede provocar daños muy elevados.

La absorción de contaminantes durante los diferentes estadios de desarrollo, parece tener cierto paralelo con la absorción de los contaminantes y la producción metabólica, es decir, con el metabolismo. La acumulación de azufre, así como la de flúor, aumentan al aumentar el crecimiento, y ocurre lo mismo con la acumulación de cloro.

Los daños en forma de necrosis de las hojas o de reducción en el crecimiento, no tienen correlación con la acumulación de azufre. De las fases de desarrollo vegetativo, los estadios más jóvenes parecen ser más resistentes que los otros.

Las plantas perennes presentan muchas diferencias en su resistencia, que es particularmente elevada durante las fases rítmicas de actividad.

Normalmente existe menos riesgo de los agentes contaminantes en los árboles de hoja caduca durante el invierno, ya que pierden sus hojas.

Las plantas de hoja perenne también tienen menos daños durante las fases durmientes que durante la actividad vegetativa y de crecimiento, pues esto es consecuencia de la reducción del intercambio de gases en la época invernal.

65.4.2. Influencia de la edad de la hoja

De todos los órganos vegetales, la hoja es la más sensible, tanto a los agentes contaminantes como a gran número de factores externos. Esto se debe a que la mayoría de los procesos fisiológicos

de la planta se concentran en las hojas, que constituyen un centro de variabilidad y de plasticidad dentro del organismo. Así, la hoja, a lo largo de sus diferentes estadios de desarrollo, es un buen indicador para los contaminantes atmosféricos específicos.

La sensibilidad de la hoja, determinada por su edad, varía con el tipo y concentración de cada contaminante. Como línea general, las hojas jóvenes son más resistentes que las que están totalmente desarrolladas. Las hojas en completo desarrollo sufren mucho más los daños ante concentraciones agudas de contaminantes que las hojas jóvenes o que las hojas viejas. Parece ser que los daños en las hojas que están expuestas a altas concentraciones de gases contaminantes, dependen más de la edad fisiológica de la hoja que de su edad temporal.

Las relaciones entre el grado de daños de las hojas de diferentes edades varían enormemente con la concentración de contaminantes. En exposiciones a largo plazo a bajas concentraciones, las hojas más viejas sufren más y antes los daños que las hojas jóvenes.

Ante una exposición a ácido fluorhídrico, los síntomas de daños aparecen primero en las hojas más jóvenes que en las que están desarrolladas, y las necrosis se presentan en estas primeras hojas antes que en las otras.

Los efectos del SO_2 y del ácido clorhídrico son contrarios a los del ácido fluorhídrico.

No se observa relación entre la acumulación de cloro y la edad de las hojas.

En plantas no contaminadas es fácilmente observable un aumento del contenido en cloro a medida que avanza la edad, pero la desviación entre los diferentes estadios de la hoja es mayor que cuando existe flúor, y mucho más grande que cuando existe azufre.

Parece ser que el ácido fluorhídrico y el ácido clorhídrico, al contrario que el SO_2 , no tienen relación con el intercambio de gases de las hojas. Se ha observado por otra parte que fuertes cantidades de cloro y de flúor en solución en la película de agua de la lámina de la hoja, entran al mesofilo de las hojas jóvenes a través de la cutícula, que es permeable para las sustancias disueltas.

65.5. INFLUENCIA DE LA ESPECIE, DE LA VARIEDAD Y DEL INDIVIDUO EN LA RESISTENCIA A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Las especies a nivel individual, las variedades, los cultivares, y todas las diferentes plantas que existen, reaccionan de forma diferente a un determinado contaminante atmosférico, como ya se ha indicado. No hay una resistencia absoluta a los contaminantes atmosféricos como se pensaba, sino que los vegetales resisten más o menos a los contaminantes en función de factores genéticos, del estadio de desarrollo, de los factores medioambientales y de otros factores más o menos importantes.

La resistencia de un organismo a los contaminantes tiene por una parte una

desviación del estrés, y por otra, una tolerancia al estrés. Evitar el estrés incluye mecanismos que influyen sobre la absorción de contaminantes o sobre la toxicidad. Bajo la tolerancia del estrés aparecen mecanismos que influyen en la capacidad de un organismo a sufrir los efectos de los contaminantes atmosféricos.

La absorción de contaminantes se puede reducir mediante el control y uso de características morfológicas, anatómicas, fisiológicas y ecológicas. La reducción de la toxicidad depende del tipo y del nivel bioquímico y fisiológico de las reacciones, que varían con los factores ambientales como clima, suelo y nutrientes. La resistencia propia de las plantas varía según la actividad de los ritmos, y depende del tiempo del año y del estadio del desarrollo vegetal.

Las reacciones son totalmente dispares en lo que se refiere al grado de daños en ciertas especies y variedades, y en lo que se refiere también a la acumulación de contaminantes en las hojas, lo que prueba que las especies reaccionan de forma diferente: Unas muestran daños con acumulación de flúor de 10 a 20 ppm de materia seca, mientras que otras ante 2.000 ppm no muestran daños, e incluso algunas no manifiestan daños visibles con 4.000 ppm. Asimismo, no hay conexiones entre el contenido de flúor y la forma de necrosis de algunas especies.

Las diferencias entre especies, variedades e individuos en lo que se refiere a resistencia a los agentes contaminantes atmosféricos, se debe en parte a diferencias bioquímicas.

Son factores determinantes los niveles de acumulación de los contaminantes, especialmente en las hojas y en los órganos celulares, y la traslocación de componentes de los contaminantes en las plantas.

Las plantas fisiológicamente más activas, con altos niveles de fotosíntesis y gran crecimiento lateral, son más sensibles que las otras.

Además, se observa que los estomas de las plantas sensibles permanecen más abiertos.

La importancia de la traslocación secundaria para los efectos negativos de los contaminantes específicos se puede observar en muchos ejemplos.

Se observan efectos similares a los del ácido fluorhídrico, en lo que se refiere a las necrosis marginales de las hojas, cuando se trata del contaminante ácido clorhídrico, como ya hemos indicado. En contraste a lo previsto, estas necrosis aparentemente no resultan de altos niveles de cloro en los márgenes de la hoja, sino de una alta sensibilidad de ese tejido.

En general, parece ser que los vegetales que muestran diferencias en el contenido natural de un elemento particular entre los márgenes de la hoja y el resto de ella, también muestran diferencias en estas secciones de la hoja después de una exposición a contaminantes.

La traslocación secundaria del azufre en la hoja parece ser relativamente poco importante para la acción de SO_2 . Por otra parte, la acumulación en las áreas

marginales puede presentarse en diferentes partes de las hojas de muchas especies, como se ha podido comprobar en múltiples observaciones.

Se contempla que el transporte secundario, especialmente el del flúor, es un factor determinante del tipo y extensión de los daños en muchas especies vegetales.

El grado de resistencia de las plantas cambia mucho con el tipo de contaminante.

Puede ocurrir que cuando las emisiones son muy altas o cuando las condiciones de distribución y de difusión del contaminante son muy malas, pueda llegar a desaparecer totalmente la vegetación, como se ha observado en diferentes casos.

No se pueden explicar los cambios en la composición de las comunidades de plantas directamente por los efectos de los contaminantes en especies sensibles. En zonas con cultivos puros o mixtos, se ha visto que los contaminantes también provocan daños en la competencia interespecífica. El efecto primario en las plantas sensibles aumenta, porque ejerce la desventaja en la competencia necesaria para los factores de crecimiento como los nutrientes, el agua, las reacciones, o el espacio de crecimiento. Además, estas especies pierden importancia en la composición de la comunidad.

Como resultado de los cambios en la competencia, la reducción de los miembros sensibles en la comunidad provoca un mejor crecimiento en las especies resistentes, siempre que el estrés originado por los contaminantes no sea extremado. En este caso, es posible la desaparición total de las plantas presentes.

Estos cambios reducen de todas formas el valor de las cosechas, como también se ha indicado.

El método más importante para reducir los efectos de los contaminantes en la vegetación puede derivarse de los factores genéticos y de los factores ambientales, buscando las características de especies y variedades más resistentes, como hemos indicado en capítulos anteriores. Si estas posibilidades se usan de forma óptima, se pueden minimizar estos efectos.

Las diferencias de resistencia, determinadas genéticamente, especialmente de individuos, proporciona posibilidades de seleccionar individuos y variedades resistentes a muchos contaminantes. Cuando unas especies se exponen durante largo tiempo a una contaminación por SO_2 , empieza a aparecer una selección natural de líneas resistentes, y a partir de aquí, se pueden obtener cultivares cada vez más resistentes a los contaminantes, como hemos señalado en el capítulo correspondiente.

DÉCIMA PARTE

La contaminación atmosférica y la fauna

CAPÍTULO 66

EFFECTOS GENERALES DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LA FAUNA

66.1. LA FAUNA Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Los agentes contaminantes de la atmósfera pueden afectar a los animales directamente mediante la inhalación de gases o de partículas nocivas, o bien indirectamente, por una parte mediante la ingestión de vegetales contaminados por absorción del agente o sedimentación sobre sus partes aéreas, y por otra, por consumo de agua contaminada con elementos o compuestos nocivos de origen atmosférico.

La salud de los animales puede verse afectada de forma crónica, enmascarándose los síntomas debido a enfermedades, carencias, etc., y los efectos suelen consistir en pérdidas de fecundidad y de productividad, así como lesiones externas o internas diversas, según sea el agente contaminante que actúe.

Generalmente ha sido más estudiado, dentro de una limitación evidente, el as-

pecto económico de los efectos de la contaminación atmosférica sobre los animales, siendo por tanto lógico, que se disponga de más información y datos de la fauna doméstica que de la salvaje.

FACTORES BÁSICOS DE ACCIÓN DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS SOBRE LA FAUNA

Tipo de agente contaminante
Tiempo de exposición
Concentración
Forma de acción perturbadora (inhalación, contacto, ingestión, etc.)
Especie animal
Edad del individuo
Estado sanitario del individuo
Alimentación (forma de alimentación, carencia, etc.)
Ubicación
Estación
Etología (comportamiento, costumbres, etc.)

Los efectos y alteraciones que se producen en esta última, desde el punto de vista de las comunidades de macro y microfauna, como son las emigraciones y desaparición de especies, son actualmente un campo de investigación de gran actividad.

En general, la fauna es un receptor cuyos efectos y cuya capacidad de respuesta a una inmisión de contaminantes dependen de múltiples factores internos y externos, como ocurre con los vegetales.

En la tabla adjunta se indican la mayoría de esos factores.

La sensibilidad de la fauna es, pues, muy variable según las especies, y en la tabla adjunta se da una orientación al respecto.

Se debe tener en cuenta que si se dice que un contaminante afecta a los mamíferos (el F, por ejemplo), no por ello se analizan *todos* los mamíferos, sino que los estudios se han volcado, como es lógico, en los de más interés para el hombre (en el caso del F, en el ganado vacuno).

Por ello, tanto en la tabla como en el texto siempre tendrá prioridad la fauna doméstica, aparte de que, además, al ser generalmente la más próxima físicamente

FAUNA BÁSICA DE INTERÉS, SENSIBLE A LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Contaminante	Grupo o especie sensible de interés	Comentarios
Derivados del azufre	Avifauna doméstica Gallinas y pollos Patos Canarios (muy sensibles) Ocas Gansos Ganado vacuno Conejos Fauna salvaje de biotopo reducido	En varios de nuestros trabajos se detectaron efectos directos en pulmón de gallinas, conejos y ganado vacuno ante concentraciones elevadas de SO ₂
Oxidantes (ozono, PAN, etc.)	Perros Gatos Conejos Fauna semidoméstica, como ratones, ratas, cobayas, murciélagos, etc.	Acción irritante, y sobre todo perturbaciones del aparato respiratorio.
Flúor y derivados	Mamíferos Fauna herbívora	Provoca fluorosis en los mamíferos Efectos de sustitución del Ca
Hidrocarburos	Mamíferos	Aparición de lesiones pulmonares y dérmicas Tumores
Partículas Activas	Fauna doméstica	Alteraciones en las vías respiratorias Alteraciones en las mucosas Alergias

te al hombre, estará también más cerca de los focos emisores y de los ambientes contaminados que la fauna salvaje.

Por otra parte debemos indicar que la microfauna y, en general, la fauna menor, no se ha estudiado mucho en estos aspectos.

66.2. EFECTOS GENERALES DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LA FAUNA

66.2.1. Fauna salvaje

Entomofauna

En ciertos países de Europa Central, en Inglaterra y en USA, se han realizado estudios sobre diversos tipos de insectos, principalmente en zonas forestales sometidas a concentraciones apreciables de SO₂, y, en resumen, se ha observado lo siguiente:

Picea excelsa, *Abies alba*, *Pinus sp.*

- Predominio de Curculiónidos:
 - *Pissodes sp.*
- Abundancia de Escolítidos de segundo orden:
 - *Hylurgops palliatus*.
 - *Trypodendron lineatum*.
- Disminución en Escolítidos dominantes en condiciones normales:

- *Pytyogenes chalcographus*.
- *Ips typographus*.
- *Ips amitinus*.

Pinus sp.

- Tendencia al dominio en Escolítidos que son secundarios en condiciones normales:
 - *Trypodendron lineatum*.
 - *Hylurgops palliatus*.
- Mantenimiento en Curculiónidos:
 - *Pissodes sp.*

La presencia de ácaros terrícolas se ve muy afectada por el SO₂, apareciendo bajas en la población y observándose alteraciones fisiológicas.

La acción del flúor se manifiesta en la entomofauna, según diversos autores, en modificaciones de las poblaciones, como se indica a continuación:

Fageto-Quercetum:

- Predominio de Tortricidos:
 - *Cacoecia murinana*.
- Abundancia de Escolítidos:
 - *Pityokteines sp.*
- Escasos ciertos pulgones:
 - *Dreyfusia sp.*

Abies alba:

- Predominio de pulgones:
 - *Dreyfusia sp.*
- Escasez de Escolítidos:
 - *Pityokteines sp.*
- Escasez de Tortrícidos:
 - *Cacoecia sp.*

En ciertos casos de mezclas de emisiones industriales, posiblemente debido a sinergismos, aparecen modificaciones en las poblaciones (melanismo industrial) de algunos insectos, como se ha observado en Inglaterra hace ya varios años. El *Biston betularios*, Geométrido que ataca a las frondosas, especialmente al abedul, tiene dos variedades, una clara y otra oscura; la primera es común en zonas rurales y rara la segunda, mientras que en los entornos de zonas industriales la variedad oscura es mucho más abundante. En Birmingham se comprobó que esa coloración oscura era una acción de mimetismo como defensa contra las aves, ya que en esta ciudad predominaba hace años la contaminación debida a hollines procedentes de combustiones.

Los efectos del polvo de cemento han sido estudiados, entre otros casos, en diversos artrópodos (Ortópteros, Coleópteros, Isópodos, etc.), y se han comprobado en ellos algunas alteraciones no en el número de especies, sino en el número de individuos de cada especie, que decrece a medida que aumenta la concentración de partículas. Como observación, se puede indicar que son algo más resistentes los insectos fitófagos que los zoófagos.

Avifauna

Los efectos de la contaminación atmosférica han sido muy poco estudiados sobre las aves salvajes debido posiblemente a la falta de interés económico y al desconocimiento que tenemos, por el momento, de la incidencia que los gases y partículas nocivas pueden tener sobre los ecosistemas a que pertenecen estos animales.

En zonas próximas a fábricas de aluminio se ha comprobado un aumento de 2 a 15 veces más en el contenido en flúor de los huesos de *Emberizidae* (escribanos) y *Ploceidae* (gorriones), mientras que en aves de mayor porte (*Columbidae*), no se observaron alteraciones dignas de mención. Es posible que estas alteraciones se deban fundamentalmente al régimen de alimentación, que hace que ciertas aves contengan flúor en cantidad variable, dependiente de la concentración en el alimento. A veces, si esta concentración es muy elevada, se producen aumentos en unas poblaciones y disminución en otras.

Mamíferos

Indicamos en este apartado la misma advertencia que en lo referente a avifauna sobre falta de datos al respecto.

Se conocen casos de envenenamientos y muertes de gamos, ciervos, liebres, corzos y otras especies cinegéticas desde principios del siglo pasado en Alemania y en ciertos países de Europa

Central debidos, sobre todo, a emanaciones de arsénico.

Respecto a las liebres, si las emisiones de contaminantes son elevadas o si existen sinergismos, aparecen disminuciones en el peso medio de la especie. Ante la presencia de sinergismos de SO₂ con otros agentes, se han observado disminuciones apreciables en el coeficiente de reproducción (hasta un 40% inferior al normal en algunos casos).

En los alrededores de fábricas de cemento se han comprobado aumentos en la alcalinidad de la orina de liebre, y asimismo aumentos en el coeficiente de reproducción (del orden de un 35 por superior). Esto último ocurre siempre que la contaminación no sea demasiado elevada, y puede ser debido a factores ecológicos, como disminución en la población humana, cierto abandono en los cultivos afectados, aumento de los refugios naturales y disminución en el uso de plaguicidas (*Lavour et al.*) y venenos en los entornos de las plantas de fabricación.

En general, las zonas forestales afectadas por la contaminación atmosférica sufren disminución en ciertas poblaciones de mamíferos en lo que se refiere a número de individuos, aunque las causas no sean directamente debidas a la inhalación de productos contaminantes, puesto que es difícil que los mamíferos salvajes, sobre todo los de gran porte, se aproximen a zonas industriales donde la presencia y actividades humanas son intensas.

En poblaciones de ratas de zonas próximas a industrias del aluminio, se han observado fluorosis y aumento general

en el contenido de flúor en huesos, debidos casi siempre al régimen alimenticio. Asimismo se han comprobado aumentos del flúor en los huesos de *Bufo* y *Rana*, anfibios que sirven de alimento a algunos mamíferos, lo que, presumiblemente, producirá también aumentos en la concentración de halógenos en los huesos de éstos últimos.

En ratas expuestas a concentraciones de SO₂ relativamente bajas (de 1 a 30 ppm), se han observado diversas alteraciones, sobre todo si la contaminación es permanente. *Ball* y otros investigadores encontraron que descendía la duración de vida y que aparecían alteraciones en los ojos y pérdidas de pelo. Asimismo vieron que el corazón sufría degeneraciones miocárdicas, los animales adultos padecían hemorragias, y las crías necrosis abundantes. Por lo observado hasta ahora, estos son los únicos mamíferos que han manifestado perturbaciones y reacciones irreversibles ante contaminaciones suaves de SO₂, pues no se conocen datos de ningún otro mamífero sensible a bajas concentraciones del gas entre varias especies estudiadas.

66.2.2. Fauna doméstica

66.2.2.1. Abejas

Generalidades

La contaminación atmosférica afecta intensamente a las abejas debido a sus características ecofisiológicas.

Generalmente, de los trobos o colonias de abejas salen 1/3 de ellas y recorren diariamente un círculo de unos 2 km de radio alrededor de la colmena, recolectando néctar y polen de las plantas que luego pasan a las abejas jóvenes que quedaron en el interior, para que estas completen su elaboración. De esta forma efectúan un trabajo de recogida de muestras cuya utilización para cualquier estudio de contaminación ambiental presenta tres grandes ventajas:

- Recorren un área grande de la zona a controlar (alrededor de los 12,5 km²).
- Homogeneizan y concentran las pequeñas muestras recolectadas, situándolas en un lugar determinado y conocido como es la colmena.
- Son muy sensibles a cualquier alteración del medio en que viven.

Por estos mismos motivos, el impacto ambiental que sufre la abeja con cualquier modificación de su entorno es mayor que el de muchos otros seres vivos.

Los vegetales, de los que dependen las abejas para su sustento, recogen la contaminación atmosférica por dos vías: la simple adherencia del polvo de los gases atmosféricos sobre las superficies externas, o la disolución y adhesión de estos mismos contaminantes del suelo a los tejidos y exudaciones de la planta. Ciertas flores, por su forma de copa, recolectan los agentes contaminantes mejor que otras. Las abejas viejas, pecoreadoras, recogen esta contaminación al mismo tiempo que el néctar y el polen. La intoxicación del resto de los habitantes de la colmena,

las abejas jóvenes o nodrizas, es debida al manejo de este néctar para su transformación en miel, y al consumo de miel o de la mezcla de miel y polen que ellas mismas preparan.

Efectos de los agentes contaminantes (SO₂ y flúor)

La respuesta de las abejas a diversos contaminantes atmosféricos ha sido objeto de numerosos trabajos. *Hillman* demostró que, en áreas de Pensilvania sujetas a niveles altos de dióxido de azufre, disminuyó significativamente el número de abejas sociales (*Apidae*). Por otra parte, *Atkins, Dreher, Frencik, Guilhon, Knowlton* y *Maurizio* han realizado trabajos sobre la acumulación de fluoruros en el organismo de las abejas.

Según *Carlson*, los fluoruros se acumulan en los tejidos de los insectos en la respiración, o pasando a través de las cadenas alimenticias. Este investigador descubrió, en insectos polinizadores recolectados cerca de una factoría de aluminio en Montana (USA), una concentración de fluoruros de 58,0 a 585,0 ppm de peso seco, lo que corresponde a unos 0,5 a 5,9 $\mu\text{gr/abeja}$ en peso seco.

Según *Guilhon*, las abejas mueren fácilmente a partir de los 16-18 $\mu\text{ gr de flúor/abeja}$. No puede producirse un envenenamiento por flúor con dosis inferiores a 10 μg ; a partir de 10 μg , y hasta los 16 $\mu\text{g/abeja}$, se produce una mortandad acentuada; el límite para las colonias de abejas se encuentran en los 10 μg de flúor por abeja.

Maurizio encontró abejas muertas en los alrededores de la fábrica de aluminio de Rheinfelden con más de 15 μg /abeja, y a veces con más de 20 μg . *Rousseau*, en los alrededores de Maurienne, analizó abejas que tenían de 18 a 24 μg de flúor. Según estos mismos autores, en experiencias realizadas en laboratorio, la dosis letal media (DL 50) de flúor en forma de derivado soluble es de 4,10 μg /abeja. Esta cifra parece no concordar con los resultados de *Guilhon*, pero hay que tener en cuenta que en las experiencias de laboratorio el flúor se administra por vía bucal, en una sola dosis y a abejas nodrizas, mientras que en el trabajo de *Guilhon* el material utilizado eran abejas pecoreadoras, más viejas, en las que la absorción de flúor se había hecho en varias dosis y en condiciones naturales.

Según *Dreher*, la DL 50 para abejas jóvenes, nodrizas, es de 5 (gr de flúor/abeja, administrando el fluor como FNa en dosis de 5 μg /día. Con una administración progresiva de flúor (FNa) variando entre 1 y 0,5 μg /día, la DL 50, según este mismo autor, es de 4-5 μg para las nodrizas, de 11 μg para las nodrizas que además del jarabe de azúcar recibieron una alimentación suplementada con polen, y de 13 μg para las pecoreadoras. *Dreher* encontró también que el 91 por 100 de este flúor se localizaba en el abdomen, y, dentro de éste, el 83% del flúor estaba en el intestino medio, en su mayor parte (94%) en las células epiteliales. Sostiene también, que la tasa de flúor es más alta en las abejas de verano que en las de invierno, lo que resulta del todo lógico si tenemos en cuenta el mayor número de salidas que las primeras

realizan al campo, y su mayor permanencia en contacto con los agentes contaminantes.

Pero no es sólo la acción directa del flúor la que incide perjudicialmente sobre las abejas; deben tenerse también en cuenta los efectos secundarios de esta contaminación, aún en el caso de que no llegara a niveles de peligrabilidad.

Una colmena es un sistema que mantiene un fino equilibrio influido por diversos factores: flora, climatología, relación entre el número de pecoreadoras y nodrizas, entre el de nodrizas y de cría, entre el de crías y el de pecoreadoras, edad de la reina, etc... Los agentes patógenos de algunas enfermedades graves, que pueden hacer desaparecer la colmena, están siempre presentes, y en una colonia equilibrada son mantenidos en estado de latencia. Concretamente, en las colmenas existe un equilibrio entre *Nosema apis* Z. y *Apis mellifera* L. Cuando la colmena se desvía de su ciclo anual regular, este equilibrio se rompe y se desencadena la virulencia de los agentes patógenos.

Una intoxicación por flúor puede no ser mortal para una colonia de abejas, pero unida a una nosemirosis aparecen sinergismos, y el resultado puede ser la desaparición de la colmena. *Dreher* demostró que se le puede atribuir al intestino medio, que comienza a digerir el polen, una función de defensa contra el flúor; esta defensa desaparece de manera evidente cuando la capacidad funcional de este órgano está disminuida por invasión de *N. apis* Z. en las células de su epitelio.

Soluciones

En los alrededores de ciertas fábricas de aluminio se ha sobrepasado ampliamente en los últimos años el límite de $10 \mu\text{g F/abeja}$ y se han registrado, en consecuencia, pérdidas más o menos graves.

La única solución factible es dotar a estas factorías de instalaciones adecuadas de tratamiento que eliminen el flúor de las emisiones.

La factoría de Rheinfelden, por ejemplo, lo hizo así, y, desde que comenzaron a funcionar esas instalaciones, la concentración de flúor por abeja examinada descendió de $16 \mu\text{g}$ a un tercio, y las pérdidas de abejas en los alrededores cesaron prácticamente. Se ha podido probar, pues, que se puede eliminar casi completamente el envenenamiento de abejas por flúor industrial con instalaciones de tratamiento apropiadas.

66.2.2.2. Gusanos de seda

En ciertos lugares con explotaciones intensivas del gusano de seda sobre plantas de *Morus sp.*, en cuyas proximidades existen concentraciones industriales, se han observado alteraciones similares a las de los *Ploceidae* ya citados, es decir: si las emisiones contienen flúor, al acumularlo el *Morus* se concentrará en el animal, sufriendo éstas alteraciones fisiológicas y morfológicas, disminuyendo el promedio de vida y la población, retrasándose el desarrollo, atrofiándose perceptiblemente las glándulas sericígenas, etc.

Las posibles soluciones al problema resultan antieconómicas, pues aparte de ser la más útil la eliminación de la causa de la contaminación, podría soslayarse en gran parte la intoxicación trasladando hojas de *Morus* desde lugares sanos a la explotación.

66.2.3. Efectos generales de algunos contaminantes específicos

CO

Los vertebrados de sangre caliente son muy sensibles al CO, pues se combina de forma irreversible con la hemoglobina de la sangre. Se forma así carboxihemoglobina, que no puede fijar el O_2 del aire que entra con la respiración a los pulmones y que pasa a la sangre, por lo que ese O_2 no es transferido a las células y el individuo acaba muriendo por asfixia en caso de una contaminación grave de CO.

El proceso es el siguiente: La hemoglobina está formada por 4 grupos hemo unidos a la molécula de globina (proteína). Existen unos átomos de N del agente orgánico quelante en 4 posiciones de coordinación, y 2 más ocupadas una por la molécula de globina, y la otra disponible para la coordinación, por una molécula de oxígeno. Al final se forma oxihemoglobina al coordinarse estas últimas.

El problema surge por la afinidad del CO para esa misma coordinación, que es muy superior a la del oxígeno (unas 200 veces), pues así, aunque la presión parcial del CO sea relativamente baja, pue-

de sustituir a una parte importante del oxígeno de la oxihemoglobina antes citada, formando entonces la carboxihemoglobina, que es el producto final que provocará la asfixia del individuo.

Niveles de $6,4 \cdot 10^3$ ppm de CO provocan en 2 minutos cefaleas y vértigos en los animales, y pérdida de conocimiento y la muerte de algunos en 15 minutos.

Lluvias ácidas

Simplemente indicamos que el descenso del pH que generan en el medio receptor provoca un descenso general en la diversidad. En la fauna acuática este descenso se agrava, y además se reduce mucho la productividad primaria del fitoplancton. Por esta causa, al faltar alimento para los animales consumidores de niveles tróficos superiores, descenderá considerablemente la producción secundaria.

Por otra parte, las lluvias ácidas generan ese descenso del pH, que además ejercerá una acción tóxica directa sobre la ictiofauna que puede provocar niveles importantes de mortalidad, sobre todo en salmónidos (casos de lagos de Suecia, Noruega y Finlandia, por ejemplo).

Hidrocarburos halogenados

Sus efectos tóxicos sobre los mamíferos, insectos y microorganismos son fuertes y se conocen muy bien, hasta el punto que se utilizan como plaguicidas.

Plaguicidas

Estos productos, de origen diverso, se emplean para tratar enfermedades y plagas en el medio agrario, a nivel agrícola, forestal y ganadero.

En principio eliminan individuos en diferentes estadios de su vida, y se aplican la mayoría de ellos por fumigación, por lo que aunque muchos son específicos, la mayoría no discriminan exclusivamente para una sola especie, pudiendo afectar además a la fauna doméstica.

Sus vías de absorción para la fauna se indican en la tabla adjunta.

VÍAS DE ABSORCIÓN DE LOS PLAGUICIDAS POR LA FAUNA

Vía	Proceso o efecto básico
Respiratoria (inhalación)	Entrada al cuerpo Bronquios (si hay) Pulmones (si hay) Difusión en la sangre Corrosión de todo el sistema (ácidos y álcalis fuertes)
Digestiva (ingestión)	Irritación de las vías de ingestión Irritación de la mucosa gástrica (si hay) Absorción en todo el sistema Corrosión
Cutánea (contacto)	Paso a través de la epidermis o de la cubierta externa que tenga el animal Dermis, si existe Mucosas (muy peligrosas) Corrosión externa Paso a la circulación sanguínea

Los factores que influyen sobre la toxicidad de estos productos para la fauna se indican en la tabla adjunta.

NO_x

Estos gases entran básicamente por inhalación, y la fauna de sangre caliente,

a niveles de alta contaminación urbana, sufre modificaciones bioquímicas y celulares difusas en el aparato respiratorio.

La tendencia es a alcanzar las zonas más profundas de la red pulmonar, y son frecuentes las bronquiolitis estenosantes.

A nivel alveolar, los NO_x provocan enfisemas.

FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA TOXICIDAD DE LOS PLAGUICIDAS EN LA FAUNA

Carácter	Factor	Comentarios
Intrínseco	Especie	La toxicidad varía con la especie. Piretrinas y rotenonas solo afectan a insectos, y casi nada a la fauna de sangre caliente
	Peso	La dosis necesaria para dañar será mayor a mayor peso del individuo, aunque la dosis/kg será mayor cuanto menor sea el animal
	Raza	En muchos animales las diferencias raciales son claras en cuanto a sensibilidad
	Sexo	Es frecuente que los machos sean más sensibles (Diazinón en ratas, p.ej)
	Edad	Los individuos jóvenes y los más viejos son más sensibles
	Susceptibilidad del individuo	Existen individuos con mayor tolerancia natural a estos productos
	Estado fisiológico	Las hembras preñadas o criando son más sensibles
	Estado sanitario	Los animales con alteraciones en algún órgano son más favorables a la acción letal de estos productos
Extrínseco	Vía de absorción	Es fundamental
	Excipiente o carga	De ellos depende la toxicidad
	Mezclas	Pueden aumentar o disminuir la toxicidad
	Exposición anterior	Pueden existir acumulación o reacciones de sensibilización o de intolerancia
	Temperatura	A más temperatura, en general más eficacia del producto (toxicidad acelerada)
	Humedad	En principio, muchos plaguicidas necesitan humedad natural o provocada

Parece ser que son más tóxicas las exposiciones cortas con alta concentración que las de larga duración y baja concentración, y se deben tener en cuenta las sinergias, ya citadas en otros capítulos, con el O₃.

Pentaclorofenol

Aunque es un fungicida de protección de la madera contra hongos, tiene una serie de particularidades que hacen que deba ser tratado especialmente.

Su agresividad aumenta al ir siempre acompañado por algunas impurezas de carácter muy contaminante, como son las dioxinas y los furanos.

El producto se absorbe por vía digestiva o por vía cutánea. Después, el animal lo excreta por vía urinaria casi en su totalidad.

La exposición crónica provoca lesiones en los riñones y en el hígado.

Es muy tóxico para los embriones y para los fetos animales.

66.3. EMISIONES CONTAMINANTES DE LA FAUNA

Todos conocemos la frecuencia y la proliferación de los problemas de alergias y, en general, de las vías respiratorias en ambientes de interiores.

La participación de los animales de compañía en estos problemas debe ser tenida en cuenta por lo que suponen en sí mismos como fuentes de emisión.

Los *perros* y *gatos* (sobre todo estos últimos, de los que hay más de 8 millones solo en Francia) son fuentes básicas de emisión animal.

La presencia de un gato supone una subida en el aire del alérgico más importante del gato (Fel d I) en 30 minutos. Una vez se ha ido el animal, el *Fel d I* permanece todavía cierto plazo de tiempo.

Si existe moqueta en el suelo, esa concentración aumenta.

En ambientes cerrados, el *Fel d I*, es transportado por partículas pequeñas, del orden de las 2,55 μ o menos.

En esos mismos ambientes se producen *ácaros*, insectos microscópicos que habitan en las moquetas, en los colchones, en los cojines o en las mantas, y se nutren de la escamación humana.

Son más frecuentes en altitudes inferiores a los 1.000 m, y en condiciones algo exigentes de temperatura y humedad.

Pueden existir de 2 a 3.000 individuos/partícula de polvo.

Sus deyecciones constituyen el producto más alérgico (favorecen el desarrollo del asma, etc.).

Si el aire está en calma, al ubicarse en partículas relativamente grandes, acaban sedimentando, pero si no es así, es decir, si existen vientos, su concentración crece enseguida, aunque baja rápidamente otra vez cuando cesan estos vientos.

Este fenómeno no ocurre con los alérgicos del gato.

Los animales (y el hombre) liberan *bacterias* y *virus*, aunque la mayoría de ellos no son viables en el aire durante mucho tiempo. Los *estafilococos* pueden vivir varios días sin multiplicarse, en el aire o en las partículas sólidas. El *bacilo piocianico* puede resistir durante años en un ambiente húmedo.

Se debe tener en cuenta que, bacterias, siempre hay en el ambiente, pero un problema medioambiental adicional que plantean es que su pared contiene una endotoxina que puede aparecer en el aire, y que si se inhala puede provocar escalofríos, tos o incluso fiebre.

CAPÍTULO 67

LOS MAMÍFEROS Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

67.1. EFECTOS DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS

Las partículas en suspensión en el aire pueden ser irritantes en sí, pero también pueden fijar diversos productos tóxicos: sulfatos, hidrocarburos, nitratos, metales pesados, etc.

En función de diversos factores como la especie, la edad y el estado sanitario del individuo receptor y, por supuesto, en función de su composición o la de los contaminantes que acarrear, las partículas sólidas pueden provocar muchas reacciones patógenas, fundamentalmente en las vías respiratorias.

El tamaño de las partículas será el factor determinante de su ubicación y, en la mayoría de los casos, de su patogenicidad. Si su mayor dimensión es superior a 10μ , quedan retenidas en las mucosas de la nariz o de la faringe; si el tamaño oscila entre 5 y 10μ se retienen en la tráquea o en los bronquios; si su tamaño es inferior a 5μ aumenta su pato-

genicidad, pues pueden penetrar hasta los alveolos pulmonares.

Si el ambiente irrita las mucosas y si existen en él hidrocarburos policíclicos, aumenta el riesgo de cáncer, y esto aumenta con la humedad y con temperaturas bajas.

67.2. EFECTOS DEL OZONO Y DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO

En el capítulo anterior se ha tratado sobre los efectos de los NO_x en la fauna. Aquí ampliaremos algo el tema a los mamíferos, y además se incluye el ozono por su carácter contaminante próximo al de los NO_x .

Los dos contaminantes son tóxicos por ser ambos oxidantes.

Los compuestos oxidantes atacan a las membranas celulares y forman peróxidos tóxicos con los lípidos que las constituyen.

Al mismo tiempo actúan dentro de las células de forma parecida a la de las radiaciones ionizantes: actúan sobre los complejos moleculares y excitan moléculas e iones de los tejidos que contactan o atraviesan. Estas moléculas e iones tienen gran capacidad de oxidación y de combinarse con aquellas estructuras moleculares que pueden degradar.

Resulta de todo esto un posible sinergismo o, por lo menos, una posible suma de actuación, entre perturbaciones aparentemente tan dispares como la de los oxidantes fotoquímicos y la de las radiaciones ionizantes.

En estudios sobre animales (mono, rata, oveja, hamster) y sobre seres humanos, se ha observado que al inhalar ozono se espesa el epitelio bronquial y aumenta el tejido conjuntivo alrededor del bronquio, con lo que a largo plazo se irá bloqueando la circulación del aire en la respiración. También se han observado pérdidas de los cilios del epitelio bronquial, quienes tienen como función, junto con la tos, de evacuar las partículas que hayan penetrado en las vías respiratorias. Por otra parte se ha visto frenada la eliminación del mucus, por lo que se acumulará en la tráquea, con lo que se llega así a una obstrucción bronquial.

Tanto el ozono como el NO_2 entran a las vías respiratorias profundas y ejercen su acción tóxica sobre los bronquiolos y sobre los alveolos.

En los grandes mamíferos y en el hombre se observan en general: irritaciones de las mucosas de las vías respi-

atorias, crisis de asma que son consecuencia de una elevación de la reactividad bronquial, tos, irritaciones de las conjuntivas y una disminución de la resistencia a los microorganismos patógenos. La capacidad y la resistencia física también disminuyen, como se ha comprobado en experiencias en Suiza (*Linder et al.* 1987) con ganado caballar, con ganado vacuno e incluso con seres humanos.

67.3. EFECTOS DEL MONÓXIDO DE CARBONO

Una vez visto el tema en el capítulo anterior, indicamos aquí alguna ampliación específica de los mamíferos.

Al contrario que la mayoría de los contaminantes, el CO no irrita las vías respiratorias de los mamíferos. No se manifiestan síntomas hasta que la concentración alcanza niveles que provocan una hipoxia de los tejidos o disminución del oxígeno disponible, sobre todo en el corazón y en el sistema nervioso central.

En la mayoría de los grandes mamíferos y en el hombre, cuando el nivel de carboxihemoglobina es superior al 40% se presenta el coma; a continuación sobreviene la muerte por hipoxia crítica de los tejidos en el cerebro y en el corazón.

El tratamiento ante una intoxicación por CO ha de basarse, entre otras cosas, en expulsar el gas con oxígeno mediante la aplicación de un aire enriquecido.

67.4. EFECTOS DEL SO₂ EN LOS MAMÍFEROS

El SO₂ es un gas muy tóxico para los mamíferos, pero por sus manifestaciones irritantes y odoríferas, es difícil que se alcancen en esta fauna niveles de toxicidad aguda, salvo en casos accidentales.

El olor es detectado por algunos mamíferos a concentraciones inferiores a 0,4 ppm.

Sin embargo, ambientes con SO₂ en bajas concentraciones son relativamente frecuentes, y aquí la toxicidad crónica (baja concentración y largo tiempo de exposición) ejerce toda su acción sobre los mamíferos.

A partir de 0,18 ppm el SO₂ provoca la aparición de reflejos condicionados del sistema nervioso vegetativo.

A menos de 1 ppm se reduce bastante la elasticidad pulmonar en las especies de mamíferos más sensibles, e incluso a nivel de individuos dentro de la misma especie.

En ambientes de 2 ppm de SO₂, con un tiempo de exposición de varios días, se observa en la mayoría de los mamíferos una hipersecreción de pirofosfato ácido sódico (PAS) en las células mucosas de los bronquios.

El SO₂ participa, directamente o con otros contaminantes, en la génesis de la bronquitis crónica de algunos mamíferos domésticos que estén sometidos con cierta permanencia a ambientes contaminados con ese gas, y en algunos casos puede aparecer enfisema pulmonar.

67.5. LA FLUOROSIS EN LOS MAMÍFEROS

Generalidades

Los mamíferos, en situación normal, consumen el flúor presente en los alimentos como elemento, sin sufrir por ello alteraciones de ningún tipo. Sin embargo, cuando el flúor ingerido supera la cantidad crítica específica, variable según diversos factores, aparecen al cabo de cierto tiempo síntomas de intoxicación fluorósica.

El flúor inhalado carece de importancia frente al volumen que supone su ingestión con el alimento.

Factores que influyen en la intoxicación

Factores geográficos, climáticos y estacionales

La localización del foco emisor de flúor es un punto muy importante a tener en cuenta, puesto que si la zona de influencia de la fuente contaminante está formada por pastizales o por cultivos que sirvan de alimento a los animales, el problema será grave, mientras que si ese área la constituyen suelos áridos no aprovechables y de topografía llana, la contaminación por flúor carece de importancia en lo que se refiere a los animales.

Las características climáticas de la región afectada pueden tener gran inte-

rés, pues vientos, precipitaciones, arrastres por escorrentía, humedades y otros factores, inciden sobre la difusión y sobre la sedimentación y dilución del flúor sobre los vegetales que sirven de alimento al ganado; por ello, la fluorosis suele ser más grave en épocas de precipitaciones persistentes, es decir, en otoño y en primavera (en España).

Los factores estacionales influyen sobre la intoxicación a causa de la actividad vegetativa de las plantas. En primavera las partes aéreas de los vegetales multiplican su superficie, con lo que el flúor recogido aumenta en cantidades elevadas, que irán a acumularse en el animal por vía alimenticia. En otoño, el rebrote producirá los mismos efectos, agravándose la intoxicación con las frecuentes lluvias características de la época.

En general el flúor puede tener su origen en el aire, en el forraje fresco, en los suplementos alimenticios o en el agua de bebida.

• **Factores indirectos**

a) *Flúor ingerido*

En primer lugar se deben citar los límites de tolerancia al flúor ingerido, aunque esto depende no sólo de la cantidad de halógeno, sino de la duración de la ingestión.

En principio se pueden indicar los límites establecidos por *Shupe, Lillie* y otros autores.

Rosemberg estableció como cifras experimentales en vacuno lechero, las siguientes:

- Fluorosis improbable: 1,0 mg/kg/animal/día
- Fluorosis posible: 1-1,5 mg/kg/animal/día
- Fluorosis cierta: 1,5 mg/kg/animal/día

El flúor que puede admitirse en heno no contaminado es hasta 14 mg/100 gr de m.s. (140 ppm), mientras que en los

LÍMITES DE SENSIBILIDAD AL FLÚOR

Especie	Animales en crecimiento (ppm) según Shupe	Adultos (ppm) según Shupe	Según Lillie (1970)	Según el Nat. Res. Council (1955)
Novillos de carne y leche	30	100	30-50	30-50
Vacuno de leche	30	100	30-50	
Vacuno de carne	40	100	30-50	
Buey	–	100	30-50	70-100
Ovino	50	160	100	
Caballar	60	–		
Cerda	70	–		

forrajes afectados el halógeno puede llegar a existir en cantidades superiores a 75 mg/100 gr de m.s. (750 ppm).

b) Duración de la ingestión

La intoxicación es crónica. Ello se debe a que la ingestión prolongada provoca la acumulación continua del flúor en los huesos hasta que aparece la perturbación de forma visible, después de cierto período de latencia.

c) Compuestos de flúor ingeridos

El peligro de fluorosis se agrava con la solubilidad del flúor o de sus derivados.

La solubilidad en agua, como orientación general, puede establecerse así:

SOLUBILIDAD DE LOS COMPUESTOS DE FLÚOR EN AGUA

Compuestos muy solubles	Compuestos algo solubles	Compuestos poco solubles
FH FNa FK F ₂ Mg	FNH ₄ F ₃ Sb F ₂ Fe F ₄ Fe	FHg FCd F ₃ Al

d) Condiciones alimentarias

Si la alimentación es insuficiente, la perturbación producida por el flúor se agrava, apareciendo retrasos en la salida de incisivos, lesiones más intensas, etc.

• **Factores intrínsecos**

a) Edad del animal

La fluorosis aguda puede aparecer en cualquier edad. La fluorosis crónica se presenta sólo en animales adultos, por acumulación de flúor en los huesos. Los síntomas se hacen visibles en los signos dentarios, que indicarán una alteración, aunque no necesariamente debida al flúor.

b) Especie

Si la fluorosis es aguda, los animales de vida corta sufren más sus consecuencias, ocurriendo lo contrario en caso de que la intoxicación sea crónica.

En principio, los rumiantes absorben muy rápidamente el flúor, y esto hace suponer que el halógeno es metabolizado por aquellos de forma diferente.

TABLA DE SENSIBILIDAD DE SHUPE (Nat. res. Council, 1955), en orden decreciente

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Terneras de leche y carne • Vacuno de leche • Buey • Ovino • Caballar • Cerda |
|--|

c) Estado sanitario

Los establos en buen estado de limpieza y ventilación, con animales sanos,

hacen que la fluorosis tarde más tiempo en manifestarse.

Si los animales tienen alguna enfermedad (sobre todo parasitosis), la fluorosis aparece más rápida y con mayor gravedad, y lo mismo ocurre si existen diferencias de metabolismo.

Sintomatología

• *Fluorosis aguda*

Se produce como consecuencia de la ingestión de grandes cantidades de flúor o de sus compuestos solubles.

Las fuentes de intoxicación más comunes son:

- Fluoracetato sódico (rodenticida).
- Fluosilicato sódico.
- Fluoruro sódico (ascaricida en cerda).
- Alimentos con exceso de flúor.

El período que transcurre entre la ingestión y la aparición de los síntomas puede ser de una media hora.

La sintomatología es la siguiente:

- Excitación.
- Lagrimeo.
- Rigidez.
- Anorexia.
- Disminución en la producción de leche.
- Náuseas.
- Debilidad.

- Fallo cardíaco.
- Vómitos.
- Incontinencia de orina y heces.
- Aumento de diuresis y caída de presión arterial.
- Convulsiones.
- Necrosis en mucosas del digestivo.
- Gran depresión.

• *Fluorosis crónica*

Aparece ante ingestiones prolongadas de dosis elevadas de flúor, y es posible el enmascaramiento y el error debido a enfermedades crónicas.

La sintomatología es la siguiente:

- Moteado y abrasión de los dientes.
- Grado de osteofluorosis.
- Cojeras intermitentes.
- Aumento del flúor retenido en huesos.
- Aumento del flúor en orina.
- Pelo seco y desordenado.
- Bajas en la actividad.
- Alteraciones morfológicas del esqueleto.
- Inflamación en articulaciones.
- Rigidez y encorvamiento de columna vertebral.
- Fracturas (en costillas principalmente, debido al peso del animal al acostarse).
- Rotura de huesos de la cadera.

- Rechazo de heno contaminado.
- Rechazo de comida (por lesiones osteoarticulares).
- Pérdidas de peso (como consecuencia de lo anterior).
- Disminución en la producción de leche.
- Modificación de las constantes sanguíneas

• *Diagnóstico*

La ejecución de un diagnóstico en animales que posiblemente padezcan fluorosis necesita el conocimiento previo de muchos parámetros, puesto que la sintomatología puede estar enmascarada por algunas enfermedades, principalmente nutricionales.

a) Síntomas clínicos

Los principales son los dentales. Estos aparecen en los animales intoxicados antes del cambio de dentición.

En vacuno se ha observado que existe cierta correlación entre las lesiones de los incisivos y los molares:

- Primer incisivo con segundo molar
- Segundo incisivo con tercer molar
- Tercer incisivo con segundo premolar

El diagnóstico clínico en incisivos debe ser complementado con el estudio del tejido óseo y de lesiones generales indicadoras.

El tejido óseo se resiente, y se observan cojeras, rigidez, roturas, etc.

El aspecto general muestra adelgazamientos, pérdidas de apetito, dificultades en la masticación, etc.

b) Causas etiológicas

Se trata de investigar la presencia de elevadas cantidades de flúor, tanto en el animal como fuera de él.

Estos controles se deben realizar sobre los siguientes elementos:

- Orina: Existe una relación entre el flúor controlado en orina y el flúor absorbido.
- Heces: Contienen el flúor insoluble.
- Huesos: Es el mejor medio de control. Contenido máximo en sínfisis pubiana. El tejido óseo esponjoso acumula también mucho flúor.
- Forrajes:
 - Lavados
 - Sin lavar
- Dientes:
 - El contenido en animales no contaminados es siempre inferior a 1.000 ppm en mandíbula inferior.
 - Las manchas y decoloraciones corresponden a valores óseos inferiores a 3.000 ppm.
 - Las demás lesiones corresponden a niveles superiores a 3.000 ppm.

• **Profilaxis**

Como idea general se puede indicar que las vías de prevención contra la fluorosis son:

- Disminución de las emisiones en las fuentes mediante instalaciones adecuadas de tratamiento.
- Reducción de la ingestión de flúor.
- Reducción de la absorción.
- Mitigar los efectos del halógeno.
- En caso de contaminación, tratamientos adecuados.

Pasamos, a continuación, a exponerlas brevemente.

a) *Disminución de las emisiones en las fuentes mediante instalaciones adecuadas.*

No necesita comentarios.

b) *Reducción de la ingestión de flúor*

Es posible un cambio de cultivos utilizando en las zonas contaminadas vegetales que no fijen el flúor o, si lo fijan, que lo hagan en partes no aprovechables (como ejemplo se puede indicar el del cereal, pues se aprovecha solamente el grano).

La rotación de cultivos es útil alternando zonas no contaminadas con terrenos contaminados.

La instalación de pastizales en zonas lejanas a los puntos de emisión puede solucionar el problema.

El uso intermitente de pastizales con nivel de flúor controlado, permite un aprovechamiento en épocas en que el halógeno aparezca en menor concentración:

- Más de 200 ppm de flúor en m.s. no permiten el uso del vegetal.
- Si la concentración está comprendida entre 100 y 200 ppm. de flúor, se puede usar el suelo en cereales forrajeros y tubérculos.
- Si la concentración es inferior a 100 ppm de flúor en m.s., se pueden utilizar los pastizales, aunque con limitaciones, como evitar sobrecargas, disminución del período de explotación de los animales, etc.

El abonado y el encalado del suelo, en caso de suelos ácidos, permite equilibrar el Ca y el P, de forma que el metabolismo del flúor no sufra alteraciones.

Otro método de reducción de la ingestión de flúor es simplemente la mezcla del forraje contaminado con otro no contaminado, o con subproductos industriales como melazas, piensos, etc.

c) *Reducción de la absorción*

Consiste en intervenir sobre el metabolismo del flúor antes de que produzca lesiones. Para ello han sido utilizadas sustancias quelantes como el sulfato, citrato o lactato de aluminio, que forman en el tubo digestivo de los animales un precipitado insoluble y, por tanto, no asimilable.

d) *Reducción de los efectos del halógeno*

Este sistema es de difícil solución, pudiendo indicarse, no obstante, que el cambio de animales por otros de ciclo más corto puede resolver el problema.

La sustitución del vacuno de leche por vacuno de carne más resistente o por ganado ovino, puede solucionar la perturbación producida en ciertas explotaciones afectadas por fluorosis.

e) *Tratamientos*

Si los animales padecen fluorosis en un grado reversible, se pueden tomar varias medidas, como son:

- Traslado de los animales a medios no contaminados.
- Corrección de los desequilibrios alimenticios modificando la ración.
- Medicaciones adecuadas.

67.6. EFECTOS DEL TABAQUISMO PASIVO EN LOS MAMÍFEROS

Solamente indicaremos aquí los problemas patógenos del sistema cardiovascular, los del aparato respiratorio y los problemas carcinogénicos que puede generar el humo del tabaco en los mamíferos de compañía (perros, gatos, etc.) cuando están en ambientes cerrados (viviendas, etc) junto con grandes fumadores, es decir, si están sometido a un fuerte tabaquismo pasivo.

Por otra parte, la esperanza de vida de estos animales disminuye en función del ambiente que respiren.

Finalmente hemos de indicar que los fetos sufren los efectos del tabaquismo pasivo a que esté sometida la hembra preñada, como es el caso frecuente en los mamíferos de compañía que citamos.

Para ampliar este tema, consultar en el índice todo lo referente al tabaquismo pasivo en el hombre, que se trata en varios capítulos, pues al fin y al cabo es otro mamífero, que si no fuma, sí está sometido con frecuencia a ese azote, al igual que los animales que citamos antes.

CAPÍTULO 68

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA DE LA FAUNA POR METALES Y ARSÉNICO

68.1. CONTAMINACIÓN POR MOLIBDENO

Es una contaminación muy localizada, pues son raros los casos citados.

El molibdeno actúa de forma indirecta, pues según algunos autores, el elemento no es muy tóxico *per se*, sino que penetra en el suelo y favorece el desarrollo de ciertos pastizales. Al mismo tiempo provoca una inhibición en la absorción de cobre por parte de las plantas, hecho que acusan inmediatamente los animales (vacuno y caballo), como comprobaron *Parker, Rose, Buxton, Allcroft* y otros autores. Los síntomas son, pues, los de las carencias de cobre, y se manifiestan con retrasos en el crecimiento, diarreas, pérdidas de pigmentación en ciertas partes del cuerpo, bajas en el rendimiento y producción de leche, etc... Asimismo se observan adelgazamientos, anemias y alteraciones del metabolismo del fósforo, lo que provoca malformaciones de huesos.

El área de influencia de una industria del molibdeno depende en gran parte de las características meteorológicas de la zona. Si los vientos no son demasiado fuertes y si son unidireccionales, la perturbación de los pastizales puede alcanzar hasta 6 u 8 km. de la fuente emisora.

La solución ante este tipo de contaminantes suele ser sencilla: Evitar la emisión o tratarla en la fuente, o un tratamiento a base de SO_4Cu , y si aparecen carencias de fósforo, un suplemento de este elemento en la ración diaria.

68.2. CONTAMINACIÓN POR ARSÉNICO Y DERIVADOS

La toxicidad del arsénico y de sus derivados para casi toda clase de animales es conocida desde la antigüedad, habiéndose aplicado en tratamientos plaguicidas desde mediados del siglo XIX.

68.2.1. Productos derivados y toxicidad

Los principales productos utilizados en tratamientos agrarios en base a este elemento son:

- Trióxido arsénico (o arsénico)
- Acetoarsenito de cobre (*Verde de Paris*)
- Arseniato de cal
- Arseniato de plomo
- Arseniato sódico
- Arsenito sódico

Todos estos productos son enormemente tóxicos para la fauna, detallándose a continuación ciertas características de cada uno de ellos relacionadas con la contaminación atmosférica.

Trióxido arsénico

Es un producto insoluble en agua que se utiliza sobre todo en cebos para roedores, ortópteros, hormigas, etc.

Es muy tóxico para los mamíferos, pues sus DL 50 rondan entre 10 y 15 mg/kg de peso para cualquier animal.

Acetoarsenito de cobre

Es un producto casi insoluble en agua.

Es muy tóxico para los animales de sangre caliente, y por supuesto para los insectos específicos.

Arseniato de cal

Es un producto insoluble en agua y puede actuar por ingestión o por vía cutánea.

Es enormemente tóxico para los insectos masticadores, y sobre todo para los mamíferos.

Su DL 50 para estos últimos es del orden de 5-10 mg/kg de peso.

Arseniato de plomo

Es un producto insoluble en agua, de similares características a las del anterior, y es muy tóxico para los mamíferos, aparte de los insectos específicos.

Arseniato sódico

Es un producto soluble en agua y cáustico, que actúa por ingestión o por contacto.

Es muy tóxico para los insectos específicos.

Es muy tóxico para los mamíferos y para las aves.

Arsenito sódico

Es un producto muy soluble en agua y muy cáustico.

Actúa por contacto o por inhalación.

Es muy tóxico para las plagas específicas.

Es muy tóxico para todos los animales de sangre caliente.

El arsénico y sus derivados se suelen aplicar por pulverización y algunos de estos por fumigación, por lo que su contaminación puede actuar por inhalación, por contacto o por ingestión (al sedimentarse sobre la vegetación).

68.2.2. Efectos del arsénico

Aparte de los productos inhalados o absorbidos por vía cutánea, el elemento o sus derivados se depositan sobre los vegetales, que son ingeridos posteriormente por los animales. Se forma en las proximidades de ciertas industrias. El As_2O_3 se deposita sobre las especies de pastizal y sobre ciertas briofitas (musgos) en cantidades que oscilan entre 10 y 150 ppm de m.s., concentrándose principalmente por sedimentación. El As_2O_3 ha sido encontrado en hígados de animales en cantidades de hasta 14 ppm. En diversos tejidos de terneros, vacas, corderos y caballos de zonas contaminadas, el contenido de As_2O_3 puede llegar a alcanzar desde cantidades mínimas en el hígado hasta varios cientos de ppm en partes externas como pelo y lana.

Los huesos suelen presentar cantidades del compuesto similares a las del hígado, y es frecuente que estén en una proporción de 1 a 100 respecto del pelo o de la lana.

La sintomatología se caracteriza por aparición de llagas con gran contenido en As.

Se presentan asimismo pérdidas de apetito, rechazo de alimentos y estado anémico general.

68.3. CONTAMINACIÓN POR PLOMO

Este contaminante actúa de forma muy localizada, y puede plantear problemas cerca de industrias de procesamiento del elemento, o bien en las proximidades de las industrias extractivas.

El metal se acumula en el suelo, en el agua y en los vegetales, lo que hace que los animales lo ingieran y sufran su acción en caso de que se sobrepasen los niveles asimilables.

Los animales en los que más se han estudiado los efectos del plomo son los ovinos y los bovinos. La intoxicación es grave en los corderos debido en gran parte a la ingestión de leche de la madre contaminada. Los animales presentan parálisis en la lengua y en las extremidades, diarreas periódicas, anemia y síntomas de debilidad general.

Los rumiantes, en general, son los animales que más sufren las consecuencias de la contaminación por plomo. En casos extremos se han llegado a encontrar hasta 1,5 g de plomo en 1 litro de leche de vaca o de oveja, cantidad capaz de provocar ampliamente los síntomas anteriormente descritos.

Las palomas urbanas presentan generalmente elevados niveles de plomo, aunque en los países desarrollados esta tasa está descendiendo como consecuen-

cia de la eliminación de las gasolinas con plomo.

El tabaco, según sea su procedencia, puede generar ciertas cantidades de plomo al quemarlo y aspirar el humo los fumadores y las personas y los animales próximos.

La acción tóxica del plomo es la perturbación de la biosíntesis de la hemoglobina, provocando en los mamíferos una ligera anemia y un aumento en la tasa de plomo.

Actúa sobre el sistema nervioso, sobre el sistema hematopoyético, sobre el hígado de los mamíferos, sobre el sistema reproductor y sensibiliza mucho ante las endotoxinas.

Si en las gasolinas, como ocurre todavía en la mayoría de los países en vías de desarrollo, se utiliza el plomo como antidetonante, al emitir los vehículos los gases por los tubos de escape e inhalarlos los mamíferos, el plomo que contienen en forma de micropartículas de tamaño inferior a 1μ , penetra en los alveolos pulmonares y es arrastrado por la sangre.

La mayor parte se va concentrando en los huesos (el 94%), el 2% va al cerebro, al hígado, a los músculos y a los riñones, y el 4% restante recircula por la sangre durante 30 o 40 días, hasta que se elimina.

El plomo que se ha concentrado en los huesos puede fijarse allí durante unos 30 años, y al cabo de este período el metal empieza a eliminarse.

68.4. CONTAMINACIÓN POR CADMIO

El cadmio puede aparecer en la atmósfera por emisiones industriales (industrias del cinc, etc.), por aumento de su solubilidad como consecuencia de lluvias ácidas o depósitos secos ácidos, o por causas naturales, como ocurre en ciertas áreas del mundo.

En los mamíferos se concentra en el hígado y en los riñones, entrando con facilidad por vía respiratoria.

El metal se absorbe más si el animal tiene carencias de Fe, de Ca o de proteínas, y es un elemento totalmente acumulativo.

68.5. CONTAMINACIÓN POR OTROS METALES PESADOS

Zn, Mg, Ni, Cr, Cu, y otros metales son muy tóxicos para la fauna que se encuentre en las inmediaciones de las fundiciones o de las industrias que tratan estos elementos.

Su presencia en el ambiente afecta a la vegetación y a la fauna que la ingiere, pero no siempre es achacable esta presencia a la contaminación atmosférica, pues la mayoría de los metales pesados son más solubles en los suelos ácidos, por lo que una acidificación de estos producirá una incorporación de ellos a la solución del suelo, como consecuencia, una acumulación en las plantas que los absorben y otra mayor en los animales que ingieren estas plantas.

Casi todos los metales pesados actúan como indicamos para el aluminio, constituyendo moléculas muy activas que pueden bloquear procesos biológicos o perturbar muchas reacciones.

El resultado se traduce en alteraciones visibles o invisibles en los animales, que se manifestarán al exterior en función de los factores incidentes indicados en otros capítulos de esta misma Parte.

El mercurio, como contaminante atmosférico, tuvo más importancia hace 30 años. Después, debido a su carácter tóxico, ha disminuido mucho su uso.

Este metal en su forma inorgánica no es extremadamente tóxico, pero en presencia de microorganismos se transforma a través de diversas reacciones en mercurio orgánico, que es un producto muy tóxico.

En cualquiera de sus formas, si del aire pasa al suelo o/y a la vegetación y los animales ingieren el metal, este puede afectarles si la concentración o la cantidad ingerida alcanzan los umbrales de toxicidad.

Volviendo a los metales citados en general, no es frecuente la contaminación atmosférica de fauna por estos elementos.

68.6. CONTAMINACIÓN POR ALUMINIO

Al igual que otros muchos metales, el aluminio, si esta ionizado, constituye moléculas muy activas capaces de perturbar muchas funciones biológicas celulares en los animales, sobre todo en los mamíferos.

El aluminio en el aire no es muy frecuente, pero pueden existir emisiones en algún caso de combustión (residuos urbanos) o en industrias especializadas que generen partículas de pequeño tamaño que se incorporen como polvo a la atmósfera.

En cualquier caso, el metal, en concentración suficiente, puede afectar a diversos órganos animales.

UNDÉCIMA PARTE

La contaminación atmosférica y la salud humana

CAPÍTULO 69

LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y LA SALUD PÚBLICA

69.1. LÍNEAS GENERALES DEL PROBLEMA EN LA SALUD PÚBLICA

Está claro que antiguamente los problemas de la contaminación atmosférica se limitaban a los interiores (vivienda, edificios públicos) a causa de los sistemas de cocina y de calefacción y a veces al hacinamiento, y a las emisiones en algunos núcleos urbanos por las mismas causas, unidas a las condiciones climáticas (smog de Londres, etc.).

En la actualidad, el primer caso de esta situación se repite en ciertas zonas de nuestro planeta, como ocurre en las pequeñas viviendas de los indígenas en las alturas de los Andes o en algunas áreas próximas al círculo polar.

Así, a causa sobre todo de la combustión directa de biomasa con fines domésticos se han definido 5 problemas de salud básicos:

– Problemas obstructivos pulmonares crónicos.

- Problemas cardíacos.
- Tumores malignos (en vías respiratorias).
- Infecciones respiratorias agudas (niños y ancianos).
- Frecuencia de peso insuficiente de los niños al nacer a causa de problemas de salud en el período perinatal.

En esta situación se encuentran en la actualidad más de 500 millones de personas.

En el mundo desarrollado la situación es diferente por otras causas.

Por una parte afectan al hombre las emisiones urbanas debidas sobre todo al tráfico, a la calefacción y a diversas actividades propias de las ciudades.

Por otra parte, las industrias emiten grandes cantidades de agentes contaminantes diversos en función del tipo de actividad de cada una de ellas.

Finalmente hemos de observar que la población de los países desarrollados pasa

cerca del 90% de su tiempo en lugares cerrados, lo que quiere decir que se encuentra sometida a una atmósfera en la que domina el aire recalentado por las calefacciones, el aire acondicionado, el tabaquismo, el CO₂ si hay aglomeración sin tratamiento del aire, y otras situaciones negativas que se tratarán en la Parte correspondiente a la contaminación atmosférica en interiores en esta misma obra.

Así, por unas causas o por otras, gran parte de la población mundial está afectada por la contaminación atmosférica a nivel de su salud, con efectos diversos según las circunstancias.

69.2. CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LA SALUD HUMANA

Efectos en la salud humana

- Molestias debidas a humos y malos olores.
- Irritación de las mucosas.
- Irritación de las vías respiratorias.
- Alteraciones de la función pulmonar.
- Susceptibilidad creciente a crisis asmáticas.
- Susceptibilidad creciente a ciertas infecciones (enfriamiento, etc.).
- Enfermedades de las vías respiratorias (bronquitis crónica, etc.).
- Aumento del riesgo de enfermedades cardiovasculares.

- Aumento del riesgo de cáncer de pulmón y de otros órganos.
- Perturbaciones del sistema nervioso central y alteraciones enzimáticas.
- Efectos específicos de contaminantes (algún gas determinado, los metales, etc.).
- Aumento de la mortalidad en las zonas contaminadas.

Factores incidentes

- Intensidad de las emisiones.
- Cantidad de las emisiones.
- Carácter de veneno más o menos fuerte.
- Posibles sinergismos.
- Proximidad a la fuente.
- Condiciones ambientales (clima, estación física, etc.).
- Medidas posibles de protección.
- Susceptibilidad individual de las personas.

69.3. LA CUESTIÓN A NIVEL DE LA SALUD PÚBLICA

69.3.1. Elementos básicos

A partir de los años 60 del siglo pasado, en que la opinión pública y el cuerpo médico observaron las mortalidades ocurridas en varios casos de fuerte contaminación, se empezaron a considerar medidas técnicas y políticas que pudie-

ran mitigar esos daños, de manera que a partir de los años 70 (casi a finales) se plantearon seriamente las actuaciones y los estudios a nivel social, económico, político, biológico y médico.

Los elementos esenciales que se consideraron a nivel salud pública fueron:

- Gasolinas sin plomo.
- Escapes de los vehículos automóviles.
- SO₂.
- Lluvias ácidas.
- Deforestación por contaminación.
- Emisiones industriales.
- Emisiones urbanas.
- Tabaquismo pasivo.
- Reducción programada de las emisiones.

69.3.2. Acciones internacionales (OMS, PNUMA, OCDE, Consejo de Europa, UE, EPA)

- Calidad del aire en el medio urbano.
- El plomo.
- Los NO_x.
- Los oxidantes fotoquímicos.
- Los SO_x.
- Las partículas en suspensión.
- El CO.
- Los hidrocarburos.
- Control de emisiones industriales.

- Enfermedades prenatales determinadas en la fecundación.
- Enfermedades prenatales determinadas después de la fecundación.
- Enfermedades postnatales debidas a carencias y agresiones.
- Enfermedades postnatales debidas a defectos de adaptación. Se refiere a la artificialización de nuestra forma de vida con condiciones ambientales, de alimentación, de radiaciones, etc., desfavorables para nuestra especie. En esta artificialización la contaminación atmosférica se considera un problema prioritario.

69.4. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y SALUD HUMANA: SISTEMAS DE ESTUDIO Y CONTROL A NIVEL GENERAL

- Experimentación con animales.
 - Tóxicos a nivel individual.
 - Mezclas de tóxicos.
 - Concentraciones variadas.
 - Duración de la exposición.
 - Estandarización de los animales.
- Experimentación en el hombre.
 - Tests agudos en voluntarios.
 - Tests en enfermos respiratorios crónicos.
- Encuestas epidemiológicas.
 - Encuestas transversales.
 - Encuestas longitudinales.

- Estadísticas de morbilidad.
 - Registros médicos.
 - Control de frecuencias de consulta de ambulatorio para enfermedades respiratorias agudas, en correlación con los niveles de inmisión.
- Estadísticas de defunciones.

CAPÍTULO 70

FORMAS DE ACCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE EL ORGANISMO

70.1. FORMAS DE CONEXIÓN O ENTRADA DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN EL ORGANISMO

70.1.1. Inhalación

La inhalación provoca o agrava muchas enfermedades de garganta, nariz y oído, pero sobre todo incide en las enfermedades broncopulmonares. La contaminación atmosférica irrita las mucosas de las vías respiratorias, es decir, de las fosas nasales, de la tráquea, de los bronquios y de los bronquiolos. Además, los contaminantes atmosféricos reaccionan con las células que tapizan los alveolos pulmonares.

Algunos productos tóxicos, como el CO, entran en competencia con el O₂ del aire, con graves repercusiones en el organismo.

70.1.2. Absorción-ingestión

Es el caso de algunas lluvias ácidas cargadas con metales como Pb, Al, Hg, Cd, etc., provenientes de las industrias, o de ambientes urbanos contaminados, que depositan los agentes contaminantes sobre el agua y sobre la vegetación, que serán ingeridas por el hombre o por cierta fauna, que los concentrará y a su vez será ingerida por el hombre.

Su efecto tóxico se orienta a la médula ósea, al sistema nervioso, al hígado, a los riñones, al sistema cardiovascular y al sistema endocrino.

70.1.3. Contacto

El contacto puede ser de carácter contaminante leve, como ocurre con los agentes *convencionales* no corrosivos o agresivos, que afectan sobre todo a las mucosas o incluso a la piel, pero con carácter leve, o bien puede ser gravemente peligroso si se trata de agentes corrosi-

vos, como pueden ser algunos plaguicidas o ciertos productos ácidos o muy alcalinos.

Estos productos contactan con las personas por accidente, como son los casos de *Bhopal* o de *Seveso*, por manejo inapropiado de ciertos productos, o bien se utilizan en conflictos armados o en terrorismo, como ha ocurrido con el *carbunco* en 2001 en Estados Unidos, en el que se propagó esta contaminación biológica, de la que su forma más peligrosa de entrada en el hombre es precisamente por inhalación.

En estos casos, el producto contacta con las células externas de la piel, sobre las que provoca una irritación y después una inflamación.

Si la contaminación no es muy grave, la lesión se cura con pocas o ninguna secuela. Si, por el contrario, la contaminación es grave, puede ocurrir que la lesión se convierta en una irritación crónica, con secuelas como cicatrices y otras.

70.1.4. Por efecto indirecto

Algunos agentes tóxicos pueden actuar sobre el sistema nervioso, y si la dosis es lo suficientemente elevada, pueden paralizar los músculos que controla ese sistema nervioso, como pueden ser los de la respiración.

Por otra parte, puede ocurrir la sustitución de componentes normales, como hace el CO al sustituir al oxígeno en la hemoglobina de la sangre, formando

carboxihemoglobina, lo que provoca la asfixia del individuo, o como hace el flúor al sustituir al calcio en los huesos de los mamíferos.

70.1.5. Por efectos alérgicos

Algunos tóxicos, la mayoría en forma de partículas, provocan una sensibilización como reacción del sistema inmune, lo que genera disfunciones en algunos órganos, como la rinitis alérgica en la nariz, el asma en los bronquiolos o la neumonía alérgica en los alveolos pulmonares.

Los productos alergénicos actúan a partir de cantidades ínfimas, provocando el disparo de reacciones diversas.

70.2. FORMAS DE ACCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE EL ORGANISMO A NIVEL INTERNO

En principio, una persona inhala 12 m³ de aire al día, mientras que consume 1-1,5 kg de alimentos y de 1 a 3 litros de agua.

Con estas comparaciones vemos la importancia del aparato respiratorio, con una superficie alveolar de 80 a 100 m², que hace que los pulmones sean uno de los órganos más importantes del cuerpo humano desde el punto de vista medioambiental, pues constituyen un filtro protector del cuerpo y un órgano de almacenamiento de la información inmunitaria.

El aire que entra en contacto con el cuerpo humano puede estar limpio, y así cumple su función en el aparato respiratorio, o bien puede estar contaminado, en cuyo caso puede actuar sobre el aparato respiratorio, sobre las mucosas, sobre el aparato digestivo o sobre la piel, según sean las características de esa contaminación.

En principio, el grado de penetración de los contaminantes atmosféricos depende de sus propiedades físicas y químicas. Así, los gases muy hidrosolubles como el SO₂ o el formaldehído, son absorbidos por las vías aéreas superiores, mientras que los menos hidrosolubles como el NO₂ o el O₃ pueden alcanzar los alveolos pulmonares.

Las partículas sólidas de $\phi > 5-10\mu$ son retenidas en el tracto respiratorio superior, mientras que las más pequeñas pueden penetrar más profundamente.

En cuanto a la piel, el contacto con los contaminantes químicamente poco activos no reviste problemas, pero los vapores y productos irritantes o cáusticos pueden afectarla. También pueden presentarse fenómenos alérgicos.

Las membranas del cuerpo humano sufren más las consecuencias de la contaminación atmosférica.

Los productos irritantes atacan a las de la nariz, a los senos nasales, al parénquima pulmonar y a los ojos.

La irritación de estos tejidos se manifiesta, inicialmente por la puesta en marcha de los mecanismos de defensa:

- Las lágrimas limpian los ojos.

- Las secreciones mucosas de las paredes de las cavidades nasales defienden y protegen el epitelio.
- Las vibrisas eliminan parte de los contaminantes, impidiendo que penetren más al interior.
- Los pelos y demás sistemas del interior de la nariz retienen las partículas de más de 5 o 10 μ .
- El olfato advierte de la presencia de algunos contaminantes tóxicos (no es así con los que no generan ningún olor).

En la laringe, los agentes contaminantes de carácter muy irritante pueden provocar el cierre de la glotis, impidiendo el paso del aire.

Más abajo, a nivel de las membranas bronquiales, el movimiento de los cilios hace subir a las partículas y gases disueltos que hayan podido entrar y que hayan sido detenidos por el mucus. Este mucus, mezclado con los contaminantes, es expulsado por expectoración, o es ingerido. Además, con el mecanismo de la tos se eliminan los restos que puedan quedar en la vía y en las partes profundas de los pulmones.

Si los gases irritantes que sean muy solubles en agua son inhalados, pueden disolverse en las secreciones acuosas de la parte superior del aparato respiratorio.

En esta parte el epitelio es más resistente y soporta mejor la agresión, aunque con ciertos límites, pues si el gas o las partículas son muy irritantes o corrosivas y si su concentración es elevada, pueden llegar a paralizar el movimiento de los cilios de las membranas de la trá-

quea y de los bronquios, y al agredir directamente al epitelio provocan una escamación, que si se hace frecuente por estar el individuo en ambiente contaminado, puede llegar a generar una producción excesiva de células para hacer frente a esa escamación, o incluso a transformarlas.

Si las partículas contaminantes agresivas son muy pequeñas, o si se forman aerosoles con los gases agresivos, todos ellos son capaces de penetrar más profundamente en el aparato respiratorio, alcanzando las paredes de los alveolos, que se hacen más vulnerables después de adsorber o de absorber esos productos.

Los contaminantes de este tipo, si son las partículas simples actuarán por contacto físico con las paredes alveolares irritando o corroyendo, y si son las de los aerosoles, actuarán liberando por desorción los gases corrosivos o irritantes, que dañarán el epitelio.

Los gases y las micropartículas contaminantes que no son irritantes serán absorbidos por los pulmones, y se depositarán en diversas partes del organismo en función de sus características. Desde los alveolos pulmonares pasarán a la sangre y se incorporarán a ella en función de:

- La cantidad de gases que ya contenga la sangre.
- La cantidad de gases que ya contengan los tejidos.
- La velocidad de absorción de ese gas.
- La solubilidad del gas en la sangre y en los líquidos orgánicos.

Los gases que se han incorporado a la sangre se distribuirán así:

- Una parte es rechazada al / desde el pulmón.
- Otra parte se incorpora a algún tejido.
- Otra parte puede combinarse con otras sustancias del organismo.
- Otra parte puede modificarse.
- alguna de estas partes puede ser eliminada por vía renal.
- Otras partes pueden ser eliminadas por vía intestinal.

A los alveolos pulmonares solo pueden llegar las partículas de $\phi < 1\mu$, reteniéndose en ellos sobre todo los de dimensiones $0,6\mu < \phi < 1\mu$, aunque esta retención depende mucho de la concentración del contaminante en el aire, de su agresividad y del ritmo de la respiración.

Por lo que se refiere a los aerosoles, pasan de los alveolos pulmonares a la sangre, y después a los líquidos intersticiales y superficiales del parénquima pulmonar en función de su solubilidad, como antes indicamos.

Los aerosoles insolubles son arrastrados por las células hacia el sistema linfático, en el que se depositarán en los puntos de sedimentación de los linfáticos pulmonares o en los ganglios. Algunas de estas partículas atraviesan las redes alveolares y se incorporan a los canales linfáticos sin haber sido fagocitadas por los leucocitos.

Los gases y aerosoles disueltos en la sangre van a los diferentes órganos del cuerpo y pueden ser eliminados parcial-

mente por vía renal o por vía intestinal, como antes se ha indicado, y algunos son neutralizados previamente por los mecanismos de defensa del organismo, como también se ha indicado.

Algunos de estos contaminantes se concentran en órganos determinados, donde pueden alcanzar concentraciones tóxicas si el nivel de contaminación exterior es grave.

La acción de los contaminantes atmosféricos puede manifestarse también por la vía digestiva.

La ingestión puede tener un origen semidirecto, al entrar el contaminante atmosférico a la nariz y a la garganta y condensarse o mantenerse, y de ahí, por deglución, pasar al aparato digestivo, o bien puede tener un origen indirecto, al depositarse el contaminante atmosférico sobre el agua o sobre los alimentos, o bien haber sido absorbido por los vegetales alimenticios a partir de suelos que han recibido los contaminantes y ser estos ingeridos por el hombre.

En otro orden de cosas, hemos de indicar que son frecuentes los sinergismos, que provocan un aumento notable de la agresividad y acción de algunos contaminantes atmosféricos cuando se mezclan o en presencia de algún otro agente incidente muy concreto, que no se corresponden con los efectos que causaría el contaminante si estuviera aislado, sino que son mucho más graves.

Se deben tener en cuenta finalmente las posibilidades de antagonismos o de reducción de la agresividad a causa de diferentes reacciones químicas y bioquí-

micas, que pueden llegar a anular los efectos de un contaminante.

70.3. PATOLOGÍAS BÁSICAS

En principio son cuatro, existiendo después infinidad de patologías de menor importancia y de diferentes efectos:

Estas patologías básicas son:

Asma

El asma es una disnea paroxística que se presenta en crisis, como consecuencia de una obstrucción parcial de los bronquios y de los bronquiolos, que es provocada por un espasmo de la musculatura anular de bronquios y bronquiolos asociado a un edema de la mucosa y a secreciones más abundantes y viscosas que las normales.

En las alergias puras, entre crisis y crisis la función pulmonar es normal.

Si el asma es de origen alérgico, se debe a agentes externos, que pueden desencadenar reacciones patológicas por diversas vías.

Si el asma es de origen constitucional, puede ser debido a alteraciones del sistema que controla la excitabilidad de los bronquiolos.

Bronquitis crónica

Se define como una expectoración bronquítica cotidiana durante más de 3

meses al año durante más de 2 años consecutivos.

Se presenta con una frecuencia cuatro veces superior en el hombre que en la mujer.

Está ligada en el 75% de los casos al hábito de fumar, y suele aparecer entre los 30 y los 60 años de edad, sobre todo en poblaciones industriales o urbanas.

La irritación permanente de los bronquios se suele unir a una reducción de la resistencia a las sobreinfecciones agudas, lo que puede acarrear insuficiencias respiratorias agudas y el fallecimiento.

Enfisema pulmonar

Es una dilatación de algunos grupos de alveolos y de lóbulos pulmonares debida a una destrucción progresiva de las paredes alveolares.

Suelen aparecer además inflamaciones de los bronquiolos y atrofia de la

mucosa bronquial, y de ahí la tendencia, en estos casos, a las sobreinfecciones.

En la evolución de la enfermedad, el tórax sufre modificaciones y el paciente tiene dificultades respiratorias, pudiendo llegar al final a insuficiencia respiratoria y a la invalidez.

Alergias

Solamente indicaremos que el organismo se defiende produciendo anticuerpos específicos contra el producto alérgico.

Los ambientes confinados, las deyecciones de los ácaros domésticos, las cucarachas, las proteínas alérgicas de la piel de los animales domésticos, el humo del tabaco, el polen de muchas especies vegetales (gramíneas, etc.), el polvo doméstico, etc., etc., son los agentes más comunes que generan o producen alergias.

CAPÍTULO 71

TOXICOLOGÍA E HIGIENE INDUSTRIAL EN RELACIÓN CON LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

71.1. MEDIO AMBIENTE, INDUSTRIA Y SALUD

Las relaciones entre el medio ambiente, la industria y la salud son múltiples. La preocupación por el medio ambiente es también la preocupación por la salud. El impacto del medio ambiente sobre la salud es evidente, y proteger el medio ambiente equivale por tanto a proteger al hombre, mejorando su entorno natural y asegurando su salud y su bienestar físico y mental.

Por otra parte, la repercusión del ambiente laboral o industrial sobre el hombre -como trabajador- y su salud, es también enorme. Paralelamente al desarrollo tecnológico de la industria, se ha producido una evolución de nuevas patologías o enfermedades denominadas profesionales.

El carácter indisociable de estos tres elementos: medio ambiente, industria y salud, conduce al desarrollo de una medicina global, que tiene por objeto

proteger al hombre de los daños y riesgos del medio ambiente y de su trabajo, y garantizarle una calidad de vida adecuada.

Se trata por tanto de un reto que implica una dualidad de objetivos:

1. Defender la salud protegiendo el medio ambiente de la acción humana, especialmente de los impactos derivados de la actividad industrial.
2. Defender la salud del hombre como trabajador, protegiendo el ambiente industrial y disminuyendo los riesgos de enfermedades y accidentes profesionales.

En resumen, se trata de conseguir la seguridad y la salud del hombre como ciudadano y como trabajador, garantizando la protección del medio ambiente y del medio laboral.

Una política adecuada de protección del medio ambiente y del hombre debe contar con los siguientes elementos:

- Información.
- Formación y sensibilización.
- Vigilancia y prevención.
- Medios económicos suficientes para la inversión en seguridad e higiene industrial, y en seguridad y protección medioambiental.
- Técnicos especializados encargados de la protección del medio ambiente y de los trabajadores en el medio industrial.
- Colaboración, comunicación y diálogo de todas las partes implicadas: trabajadores, empresarios o industriales, higienistas, médicos y psicólogos, técnicos y especialistas en seguridad, técnicos y especialistas en medio ambiente, etc.

A lo largo de esta obra se ha tratado bastante profundamente el problema medioambiental derivado de las actividades industriales, de los contaminantes que éstas generan, de sus efectos sobre el medio ambiente y sobre las tecnologías de prevención y los tratamientos de corrección de todas estas situaciones.

Por otra parte, la protección del hombre en el medio industrial, que reúne tres especialidades: seguridad, higiene y medicina, se trata en los epígrafes que siguen.

71.2. TOXICOLOGÍA INDUSTRIAL: VIGILANCIA Y PREVENCIÓN

El desarrollo industrial de los últimos años, ha aumentado el número de activi-

dades profesionales generadoras de nuevos compuestos químicos que pasan a formar parte del medio laboral, exponiendo al hombre a distintos riesgos y peligros y afectando, por tanto, a su salud. Estas sustancias presentes en el ambiente de trabajo penetran en el organismo humano a través de diversas vías, principalmente la oral, la respiratoria y la cutánea, como ya hemos indicado en otros capítulos.

Los riesgos de la toxicidad industrial serán más o menos graves, afectando de una forma u otra al trabajador en función de varios factores como la intensidad de la exposición, el tipo de agente contaminante o la respuesta orgánica de la persona, es decir, su propia capacidad detoxificadora.

Como consecuencia de la aparición de estos riesgos, se han desarrollado técnicas y metodologías diversas que buscan la prevención de enfermedades profesionales producidas como consecuencia de la toxicidad en la industria. Esta prevención se debe desarrollar a tres niveles:

a) Riesgos del producto

Se debe realizar un estudio para conocer los riesgos de los productos que se están utilizando y sus daños o efectos sobre los trabajadores, informando a éstos en todo momento. También es importante la formación de cada trabajador, de manera que los productos sean manipulados adecuadamente y sin peligro para el hombre. Cada producto debe

ir correctamente etiquetado, indicándose sus características mediante símbolos internacionales.

b) Riesgos del puesto de trabajo

Es necesario establecer el grado toxicológico y el riesgo higiénico de cada puesto de trabajo, fijando los valores límites o umbrales de exposición en función de la naturaleza del agente contaminante, de la magnitud de sus efectos sobre el trabajador, de la respuesta detoxificadora de éste, de la intensidad de exposición, etc.

La evaluación del grado toxicológico en un determinado puesto de trabajo se realiza desarrollando los siguientes puntos:

- Estudio minucioso del puesto de trabajo y de su atmósfera, identificando sus contaminantes mediante técnicas de observación, de toma de muestras y de análisis.
- Análisis de cuantificación de las muestras obtenidas, determinando los valores reales de exposición.
- Análisis de comparación de estos valores reales con los valores de referencia o valores límites de exposición.
- Interpretación de los resultados: valoración de los riesgos del puesto de trabajo sobre la salud del trabajador.
- Aplicación de las medidas de corrección y puesta en marcha de un servicio de vigilancia periódica.

c) Gestión de los riesgos

Se ha de desarrollar un plan estratégico de reducción o eliminación de los riesgos aplicando las medidas de protección de los trabajadores frente a la toxicología atmosférica laboral: reconocimientos médicos, vigilancia periódica, uso de protecciones individuales, campañas de formación y sensibilización, soluciones técnicas adecuadas a cada puesto de trabajo, etc.

La prevención debe comenzar apenas el trabajador ingresa en la empresa, mediante un reconocimiento médico previo de selección en función del puesto que va a ocupar; además, ningún trabajador debe desempeñar una tarea determinada si no posee las condiciones adecuadas para ello (salud, conocimientos, experiencia, etc.).

La prevención en la industria continúa mediante la vigilancia regular y sistemática de los trabajadores y de su salud a través de exámenes médicos periódicos o especiales, a través de estudios sobre temas específicos como el infarto, el cáncer, el estrés, etc.

El papel del médico en la industria o en la empresa es de suma importancia, ya que los términos salud e industria son inseparables. Una buena gestión de la salud en la industria beneficia a todos; los trabajadores alcanzan un grado elevado de bienestar físico y psíquico mejorando su calidad de vida, y la empresa gana en vitalidad, en medios humanos y en medios económicos.

Las obligaciones del médico del trabajo son, entre otras, las siguientes:

- Reconocimientos de selección para evaluar el estado general del paciente y su capacidad para el puesto de trabajo.
- Reconocimientos periódicos para detectar posibles patologías o enfermedades derivadas (o no) de su actividad industrial.
- Valoración de las condiciones de higiene, seguridad y salubridad en el trabajo.
- Realización de reuniones, debates, coloquios y diálogos sobre temas relacionados con la salud: nutrición, alcohol, drogas, tabaquismo, etc.
- Realización de campañas de prevención de enfermedades o de otros riesgos derivados de la actividad laboral.

71.3. SENSIBILIZACIÓN E INFORMACIÓN A NIVEL GENERAL

Cualquier empresa o industria con proyección de futuro y con aspiraciones de mercado, debe tener, entre otros objetivos, la defensa del medio ambiente y la del trabajador y sus derechos, para dar una imagen limpia en lo que se refiere a contaminación del medio ambiente y en lo que trata sobre el número de accidentes o de enfermedades profesionales, al cumplimiento de la normativa de seguridad e higiene en las condiciones materiales de prestación del trabajo, etc.

En resumen, se trata de la incorporación del *marketing ecológico* dentro de la empresa como elemento decisivo para su funcionamiento. Cuanto mayor sea la pre-

ocupación por el medio ambiente y por la seguridad y la higiene, y cuanto mayores sean las inversiones aportadas por la empresa o industria en cuestión para corregir las deficiencias en este sentido, mayores serán a largo plazo los beneficios obtenidos. Estos beneficios están representados por un ahorro de tiempo, un ahorro económico, un descenso del índice de accidentes y de bajas por enfermedades profesionales, una reducción de pérdida de bienes, un aumento del bienestar de los trabajadores, una producción más elevada, una mejora de la calidad del entorno medioambiental y la imagen de la industria asociada a una actividad limpia y sana.

Para la consecución del éxito de la industria en su relación con el medio ambiente y con la situación de salubridad de sus trabajadores, son muy importantes la sensibilización y la información, puesto que la protección del medio es, en gran medida, un problema de concienciación de la sociedad.

La sensibilización implica la formación y concienciación de los profesionales, tanto actuales como futuros, y la del resto de la sociedad, sobre los problemas reales de salud, seguridad y medio ambiente de la empresa:

- *Sensibilización general*. Se trata de grandes campañas de cara a los consumidores y al público en general, a través de mensajes claros, directos y sencillos.
- *Sensibilización de empresarios e industriales*. Las empresas industriales deben convencerse de la importancia de la seguridad, de la higiene y de la

prevención de los daños o riesgos sobre la salud y el medio ambiente. Los recursos, el tiempo y las inversiones dedicadas por la empresa a la protección del medio ambiente y de los trabajadores, no han de ser restringidas o escatimadas, pues a largo plazo suponen un enorme beneficio para todos. No deben anteponerse los intereses económicos a la protección del entorno o de los trabajadores. Las empresas deben modificar sus políticas, a fin de incluir en ellas aspectos tan importantes como los ya mencionados.

- *Sensibilización de los trabajadores.* Se deben realizar campañas de concienciación de los trabajadores, de forma que las normas de seguridad e higiene laboral y de protección del medio ambiente, pasen a formar parte de sus hábitos y de su conducta normal en el trabajo.
- *Sensibilización de los países, gobiernos y organismos internacionales.*
- *Sensibilización de los niños y jóvenes.* Se deben realizar grandes esfuerzos para sensibilizar a las futuras generaciones respecto al medio ambiente y la salud.

Se han de integrar ciertos conocimientos de ecología, naturaleza y salud en los programas escolares, de forma que los niños «hereden» la preocupación y el respeto por el medio ambiente, y ciertas nociones de seguridad e higiene en los programas de Formación Profesional para educar a los futuros trabajadores frente a una correcta prestación laboral. Asimismo las Universidades, Escuelas

Técnicas y otras Enseñanzas Superiores deben garantizar la formación de sus alumnos –futuros profesionales–, proporcionándoles los conocimientos necesarios para asumir responsabilidades y tomar decisiones respetando el medio ambiente y la salud.

Las campañas de información, basadas en hechos y cifras, deben ser continuas, directas y sencillas, canalizándose a través de la publicidad como medio de formación, de educación y de información, proponiendo un comportamiento colectivo o personal coherente en lo que se refiere al medio ambiente y a la salud.

71.4. HIGIENE INDUSTRIAL EN RELACIÓN CON LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

71.4.1. Bases generales

La evolución tecnológica, la automatización e información del trabajo, las nuevas demandas y las actuales formas de vida, son las causas de la aparición de nuevas patologías y enfermedades asociadas a la industria. Hoy día, los trabajadores y la sociedad exigen un nuevo concepto de la Seguridad y la Higiene en el trabajo, basado hasta ahora en la prevención y en la ausencia de enfermedades. Ese nuevo concepto busca el equilibrio entre el trabajo y las necesidades físicas, psíquicas y sociales, y entre el hombre y la tecnología.

Por supuesto, no se deben confundir los términos de accidente laboral y en-

fermedad laboral. En los accidentes de trabajo, las lesiones se producen de manera instantánea e imprevista; sin embargo, las lesiones producidas por las enfermedades laborales requieren un tiempo más o menos repetitivo de exposición, como consecuencia del trabajo diario en el mismo ambiente industrial. Estas enfermedades afectan a gran parte de la población expuesta y de ahí su enorme incidencia en el absentismo profesional, y el alto coste que ello representa para la empresa y para la sociedad.

Las medidas de prevención y de higiene en el trabajo tienen como objetivos el control, la reducción y la eliminación de los daños que la actividad industrial pueda acarrear al trabajador, mediante la supresión de las condiciones ambientales insalubres en el ámbito laboral. Por ello, la ecología humana debe unirse a los esfuerzos de la higiene en el trabajo, ya que es la ciencia que estudia los efectos de las fuerzas ambientales sobre la salud humana.

La prevención en la industria debe reunir tres ramas: seguridad, higiene en el trabajo y medicina, en beneficio de la empresa, del trabajador y de la sociedad, para detectar y corregir las situaciones de riesgo o peligro que afectan a las máquinas, al ambiente industrial y al hombre, y para reducir los accidentes y las enfermedades profesionales.

Creemos que la importancia de la seguridad en la industria ha quedado clara en capítulos anteriores. La medicina industrial, en relación con la higiene y el trabajo, asegurará la calidad de vida, previniendo las enfermedades o dolencias

que pudieran afectar al hombre en el marco industrial (todo ello se comenta en el capítulo correspondiente).

La higiene industrial tiene como finalidad preservar y mejorar la salud de los trabajadores, controlando cualquiera de los elementos que inciden sobre ella, suprimiendo las causas más frecuentes de fatiga, estrés, malestares, dolores y enfermedades que influyen negativamente en el rendimiento y en la productividad del trabajador, y por último proporcionando las condiciones de salubridad adecuadas. En resumen, se trata de transformar la labor diaria del trabajador en una tarea más fácil, más agradable y, por supuesto, carente de riesgos para su salud.

Son muchas las actividades profesionales que exponen al hombre a determinadas sustancias o productos capaces de afectar su estado de salud. La prevención de cualquier enfermedad profesional se realiza, en primer lugar, mediante el estudio del riesgo higiénico creado por los contaminantes, determinando las condiciones ambientales insalubres y fijando los valores límites sobre exposiciones a tóxicos, ruidos, ventilación, temperatura, humedad, etc. En segundo lugar, una vez que se conoce el riesgo higiénico de cada puesto de trabajo, se deben proponer y aplicar todas aquellas medidas que sean necesarias para mantener unas condiciones ambientales sanas para el trabajador: modificación de procesos, sistemas y operaciones, cambios de las sustancias más contaminantes, protecciones en maquinaria, uso de protecciones personales, aislamiento de operaciones con alto riesgo de contami-

nación, buena ventilación, orden y limpieza en la instalación, sistema de turnos de trabajo, etc.

Sin embargo, para conseguir una higiene industrial correcta y adecuada es necesaria, ante todo, la prioridad del aseo o higiene individual.

71.4.2. Contaminación ambiental intrafábrica

Ya sabemos que los contaminantes ambientales son todas aquellas sustancias presentes en cualquier estado físico (líquido, sólido o gaseoso) que alteran la composición normal del ambiente industrial, atentando contra la salud de los trabajadores.

El grado de contaminación ambiental en la industria puede medirse a través de los llamados indicadores de riesgo o de exposición, que detectan los niveles adquiridos por aquellos compuestos que penetran en el organismo a través de diversas vías (oral, respiratoria o cutánea). Existen unos niveles permitidos de exposición a las distintas sustancias o agentes contaminantes que no deben ser superados, siendo el deber de toda industria mantener la concentración ambiental de dichos contaminantes dentro de los límites legales establecidos.

Además del grado de contaminación ambiental, se debe tener en cuenta el grado de contaminación interna del trabajador, determinado por dos factores: la intensidad de exposición externa y la capacidad detoxificadora del individuo. También es importante el hecho de co-

nocer el impacto de cada contaminante sobre el organismo, su toxicidad y la patología que desencadena. A través de determinados reconocimientos o estudios, que valoran ciertos indicadores biológicos, podemos conocer los efectos de los contaminantes. Así, por ejemplo, la valoración de la carboxihemoglobina nos permite conocer los niveles de monóxido de carbono en sangre, o bien la valoración de ciertos parámetros enzimáticos puede medir el impacto de una actividad sobre el funcionamiento hepático, etc.

Se deben conocer los riesgos higiénicos de cada puesto de trabajo para prevenir sus respectivas enfermedades profesionales, informando de ello a los trabajadores y asegurando su formación en materia de higiene y seguridad personal.

Los agentes contaminantes penetran en los organismos de los trabajadores a través de las vías de entrada ya citadas. Estos agentes se pueden clasificar, bajo el punto de vista de la higiene industrial, en agentes químicos, agentes físicos y agentes biológicos.

Agentes químicos

El desarrollo industrial de las últimas décadas ha favorecido la utilización de un número elevado de nuevos productos químicos sólidos, líquidos o gaseosos, que pasan a formar parte del ambiente de trabajo afectando (en muchos casos gravemente) al trabajador. Su acción puede ser local u orgánica. La acción es local si se produce fundamentalmente por contacto con la piel o

las mucosas, originando irritaciones, dermatitis, eczemas, alergias, etc. La acción orgánica ocurre si el agente penetra en el organismo por absorción de la piel, por inhalación o por ingestión, y sus efectos se producen a través de la sangre. Dichos efectos no sólo dependen de la vía de penetración del agente, sino también de su grado de toxicidad, del tiempo de exposición y de la respuesta o capacidad de detoxificación del trabajador, siendo muy variados: irritación, intoxicación, envenenamiento, asfixia, efectos depresivos del sistema nervioso central, enfermedades respiratorias de todo tipo, e incluso la muerte. Un ejemplo claro es el *síndrome Ardystil* que marcó en Noviembre de 1992 al sector textil alcoyano, pues un producto tóxico utilizado en la aerografía textil afectó a muchos trabajadores, causando la muerte de algunos de ellos por fibrosis pulmonar.

Las medidas preventivas contra estos agentes químicos no pueden resumirse en algunas líneas, pues es necesario en cada caso un estudio específico de los riesgos de cada puesto de trabajo, del nivel de exposición, de los efectos de cada agente contaminante permitidos, de las medidas de corrección adecuadas para asegurar al trabajador su protección, etc. Sin embargo, en líneas generales, una protección eficaz se realizará teniendo en cuenta los siguientes factores:

- *Prevención médica.* Se deben realizar los reconocimientos médicos de selección o preempleo (en función del puesto que se va a ocupar), y los reconocimientos periódicos en el seno de la industria.
- *Protección colectiva.* Son aquellas medidas que afectan a la instalación o al ambiente de trabajo y, por tanto, a los trabajadores como conjunto. Son entre otras:
 - Buena ventilación
 - Captación de humos, partículas de polvo, vapores y gases.
 - Aislamiento de las operaciones especialmente insalubres o que entrañen riesgos elevados.
 - Instalaciones sanitarias limpias, adecuadas a cada puesto de trabajo y a disposición de los trabajadores (duchas, lavabos, etc.).
- *Protección individual.* Los equipos de protección personal deben ser seleccionados en función del trabajo y de sus necesidades, y de los agentes contaminantes generados, y son entre otros:
 - Mascarillas respiratorias, capuchas o caretas.
 - Guantes.
 - Calzado adecuado.
 - Trajes de trabajo.
- *Prevención técnica.* La realización de otras medidas de prevención, como la protección colectiva o individual, no exime de la obligación de estudiar y aplicar soluciones técnicas que disminuyan los riesgos de contaminación del trabajador:
 - Empleo de sustancias o materias primas menos tóxicas o peligrosas.

- Sustitución de los sistemas o procesos con mayor riesgo de contaminación.
- Reemplazo de maquinaria o equipos más antiguos por otros más modernos, más seguros y más higiénicos.
- *Higiene individual.* La higiene, el aseo personal y el respeto del propio cuerpo, son elementos fundamentales para alcanzar una higiene industrial correcta. Las distintas medidas para ello son:
 - Educación del trabajador.
 - Higiene de la piel.
 - Limpieza del cuerpo (manos, fosas nasales, extremidades, oídos, boca, etc.).
 - Limpieza y cambio periódico de los trajes de trabajo.
 - No comer, fumar, ni beber durante el trabajo.
 - Dieta equilibrada (vitaminas, oligoelementos, etc.).

Agentes físicos

Los agentes físicos contaminantes en la industria son fundamentalmente la presión y las radiaciones.

Los malestares o enfermedades producidas por variaciones de presión son escasos en la industria, exceptuando todos aquellos trabajos que se realizan bajo el agua y en los cuales los trabajadores utilizan aparatos de aire comprimido. Sus efectos sobre la salud humana son a nivel del oído, con dolores, hemorragias, otitis, e incluso perforación del tímpano;

también aparecen a nivel fisiológico, pues se producen modificaciones de la presión arterial, de la respiración, del ritmo cardíaco, de la sensibilidad auditiva, del timbre de voz o de la sudoración.

Sin embargo, el papel de las radiaciones en la industria es mucho más importante. El hombre en su ambiente laboral se encuentra continuamente expuesto a radiaciones de fuentes artificiales en todo el rango de longitudes de onda: ultravioleta (200-400 nm), visible (400-760 nm) e infrarrojo (760-3000 nm).

Los estudios realizados se centran en dos aspectos: los espectros de acción y las dosis o cantidades límites. Sus efectos sobre el trabajador varían en función del tipo de radiación (longitud de onda) y del tiempo de exposición, afectando fundamentalmente a la piel y a los ojos.

Los trabajadores más expuestos son aquellos que trabajan al aire libre bajo el sol (radiaciones ultravioletas fundamentalmente), así como aquellos que están en contacto con aparatos o productos que irradian energía.

La cantidad de radiación absorbida por la piel puede producir efectos beneficiosos, como es la formación de la vitamina D por absorción de energía ultravioleta, necesaria para el desarrollo del cuerpo humano pero también puede producir efectos perjudiciales como quemaduras térmicas por exposición al calor (radiación visible o infrarroja), eritemas o enrojecimiento de la piel (principalmente radiación ultravioleta) o enfermedades crónicas como el melanoma maligno y el cáncer de piel.

Los efectos sobre los ojos, menos frecuentes pero no menos graves, son fundamentalmente fotoqueratitis, y fotoconjuntivitis, es decir, inflamación de la cornea y de la conjuntiva del ojo, como consecuencia de la exposición a la radiación ultravioleta. También pueden producir quemaduras más o menos graves y cataratas.

Otros efectos de las radiaciones son la disminución de la agudeza visual, los dolores de cabeza o jaquecas frecuentes, y los efectos psicológicos, endocrinos o neurológicos.

En lo que se refiere a otros tipos de radiaciones (ionizantes y algunas no ionizantes), recomendamos al lector que consulte la obra *Ingeniería del medio ambiente*, de esta misma colección.

Agentes biológicos

Líneas generales

Los agentes biológicos son los microbios, los virus, los parásitos y los hongos. Todos ellos pueden producir enfermedades contagiosas o no, que son las principales causas del absentismo profesional.

Son numerosos los factores que favorecen el desarrollo de los diversos agentes biológicos, y por lo tanto el desarrollo de sus respectivas patologías o enfermedades: Falta de higiene o aseo personal, falta de higiene colectiva, malas condiciones ambientales (temperatura, humedad), escasa ventilación, condiciones de

salud y fortaleza de cada trabajador, contacto con animales, contactos con ciertos productos o restos de ellos (piel, lanas, cuernos, abonos animales), desorden y falta de limpieza, falta de vacunación y de prevención médica, condiciones sanitarias del lugar de trabajo, incumplimiento de la protección personal (mascarillas, guantes, calzado, traje de trabajo).

Algunas enfermedades industriales producidas por agentes biológicos pueden ser las siguientes: Neumonías, gripes, faringitis, sinusitis, alergias, difteria, tuberculosis, carbunco, brucelosis, fiebres tifoideas, tétanos.

Medidas especiales

En casos extraordinarios, como ha ocurrido en 2.001 con el terrorismo con carbunco en Estados Unidos, se hacen necesarias medidas de protección a tenor con el problema, analizando previamente todas las características del contaminante y protegiendo consecuentemente a la población, y muy especialmente a la población de alto riesgo (carteros, personal sanitario, políticos, etc.).

71.5. ENFERMEDADES PROFESIONALES. PREVENCIÓN

71.5.1. Las enfermedades profesionales

El padecimiento de enfermedades o dolencias profesionales ha ido en au-

mento a medida que la industria se ha ido desarrollando, agravándose por las nuevas condiciones de trabajo. Actualmente existen distintos factores inherentes al ámbito laboral que influyen en el bienestar y en la salud del trabajador. El estudio de estos factores, de sus efectos y de sus riesgos, tiene como objetivo la obtención de unas condiciones ambientales más seguras y saludables.

Son cada vez más frecuentes y numerosas las actividades que ligadas a la industria y realizadas en recintos cerrados, exponen al trabajador a distintas condiciones de iluminación, temperatura, humedad, ruido o calidad del aire. La modernización y la automatización de la industria y la evolución tecnológica de los equipos, de los sistemas y de los productos utilizados, han supuesto un aumento de la efectividad y de la productividad industrial, pero al mismo tiempo han agravado en algunos casos los riesgos de alteración del ambiente laboral.

Esta exposición persistente a determinados fenómenos ambientales desequilibrados (contaminación del aire, calor, iluminación escasa, humedad excesiva, ruidos intensos, molestos o repetitivos), puede afectar a las personas que desarrollan su trabajo en la industria, causándoles molestias y daños al ocasionarles enfermedades y trastornos y al alterarles sus funciones biológicas. En la tabla adjunta se indican los trastornos y enfermedades de este origen.

Existen además algunas dolencias o lesiones ligadas al tipo de trabajo o esfuerzo realizado relacionadas con su monotonía y su carácter repetitivo: le-

siones musculares, problemas posturales, enfermedades traumáticas.

71.5.2. Prevención

Llamamos medidas de prevención o de anticipación a todas aquellas decisiones previas a la puesta en marcha de cualquier industria o instalación que implican una rigurosa planificación y diseño de los procesos y sistemas, de los equipos y de la maquinaria, de la iluminación, de la ventilación, de las vibraciones y el ruido ambiental, de las sustancias que se van a emplear, de los productos que se van a generar o de las instalaciones sanitarias.

Las medidas de corrección son posteriores y están dirigidas a modificar y subsanar aquellos problemas o errores derivados del funcionamiento de la industria.

Las enfermedades o lesiones que hemos indicado en el epígrafe anterior implican incapacidad laboral, aumentando el absentismo profesional y largas bajas en el trabajo, lo que supone enormes pérdidas de tiempo y de producción, representando un alto coste para la empresa. Todo ello es evitable si se ponen en práctica las medidas de higiene y seguridad necesarias, y todas las demás medidas de prevención y de corrección encaminadas a controlar y eliminar las condiciones ambientales insalubres, asegurando el bienestar de los trabajadores y la calidad de vida en su trabajo.

Para elaborar y aplicar el plan de higiene, se necesita la colaboración de in-

genieros, técnicos, empresarios, trabajadores, higienistas, médicos y psicólogos.

71.6. CALIDAD DEL AIRE INDUSTRIAL

71.6.1. Problemas básicos

La calidad del aire depende de distintos factores, como son la naturaleza y concentración del contaminante, la intensidad y frecuencia de emisión, el número de fuentes contaminantes, la temperatura y la humedad, la ventilación, etc., como hemos visto ampliamente a lo largo de esta obra.

Las causas de la alteración de la composición del aire, de su contaminación o sencillamente de su enrarecimiento, se mencionan a continuación:

a) *Causas de contaminación independientes de la actividad industrial*

- Ventilación deficiente.
- Empleo masivo de aire acondicionado o de calefacción.
- Humo del tabaco.
- Contaminación atmosférica.
- Terminales de ordenador, video o TV.
- Iluminación fluorescente.
- Campos electromagnéticos.
- Respiración y transpiración humana.
- Materiales de construcción y de revestimiento (telas, fibras, plásticos, pinturas).

b) *Causas derivadas de la actividad industrial.* Son mucho mas graves, por

TRASTORNOS Y ENFERMEDADES MAS FRECUENTES PRODUCIDOS POR EXPOSICIÓN FRECUENTE A FENÓMENOS AMBIENTALES DESEQUILIBRADOS

<ul style="list-style-type: none"> - Dolores de cabeza - Jaquecas y migrañas - Fatiga psíquica y física - Vahidos - Nauseas - Dolores corporales - Estrés - Irritación - Depresiones - Insomnio - Pérdida de reflejos - Trastornos de la visión - Dificultades respiratorias - Cáncer, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Asma - Anginas - Faringitis - Sinusitis - Irritación de mucosas - Enfermedades infecto-contagiosas - Enfermedades cardiovasculares - Trastornos metabólicos - Trastornos nerviosos - Trastornos psicológicos - Trastornos de la epidermis - Alergias - Dermatitis
---	---

su capacidad de contaminación del aire y por su relación directa con el trabajador.

Se han tratado y explicado ampliamente en este capítulo y en capítulos anteriores, y por ello nos limitaremos solamente a citarlas:

- Agentes químicos contaminantes.
- Agentes físicos contaminantes.
- Agentes biológicos contaminantes.

71.6.2. Ventilación

La ventilación es una operación realizada para evacuar el aire interior viciado y aportar aire puro. La ventilación es necesaria como medida de higiene y saneamiento, de protección de la salud de los trabajadores y de prevención de las enfermedades profesionales, pues renueva el aire del recinto industrial, eliminando o diluyendo los contaminantes ambientales interiores (agentes químicos, humos, gases tóxicos, polvo, etc.), mejorando la calidad de la atmósfera laboral y facilitando el mantenimiento de unas condiciones de temperatura y humedad óptimas (frente a la condensación, las temperaturas extremas, etc.).

La ventilación puede ser natural o artificial.

La *ventilación natural* se produce al establecerse una corriente de aire por diferencia de temperatura entre el exterior y el interior del edificio.

Para aprovechar al máximo las posibilidades de este tipo de ventilación, es

indispensable una correcta planificación, considerando todos los factores implicados: la temperatura externa, el viento, la variación de la temperatura en función de la época del año o de la estación, el diseño del edificio (forma, dimensiones, etc.), la ubicación de las fuentes calefactoras en el interior del recinto, la colocación de las salidas y entradas de aire, la actividad desarrollada por la industria, el número de trabajadores en el recinto, etc.

La *ventilación mecánica o artificial* es más efectiva que la anterior. Existen distintos sistemas de ventilación artificial más o menos complejos. Se utilizan ventiladores para introducir el aire o moverlo en el interior de los recintos, campanas extractoras para la succión o extracción del aire, conductos o tuberías para canalizar la salida o entrada de aire a los diferentes sectores del edificio, etc.

En cualquier caso, los sistemas de ventilación han de cumplir varias condiciones. En primer lugar, los aparatos utilizados han de ser silenciosos; de esta manera se evita la inclusión del ruido como agente contaminante. En segundo lugar, es indispensable un riguroso mantenimiento del sistema de ventilación, garantizando su funcionamiento: limpieza de conductos, unidades extractores y filtros; evitar la condensación, etc. Por último, y dada la importancia de las campañas de ahorro de energía, y en beneficio de la empresa, es necesario conciliar dos factores ciertamente contradictorios: aislamiento y ventilación, consiguiendo el equilibrio justo entre ambos.

Debemos advertir que de vez en cuando ocurren brotes de enfermedades que se generan en torres de refrigeración o en instalaciones de acondicionamiento de aire, como es el caso de la Legion-

lla, que aparece desgraciadamente con cierta frecuencia (casos de 2001 en Murcia, etc.). En estas situaciones, son totalmente válidas y necesarias las recomendaciones indicadas en este epígrafe.

CAPÍTULO 72

EFECTOS DE LAS PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS

72.1. BASES GENERALES

Ya se indicaron en un capítulo anterior las formas de entrada de las partículas atmosféricas en el organismo humano y sus efectos según sean sus características de mayor a menor agresividad en cuanto a provocar irritación, corrosión o simplemente incrustaciones.

También se indicó que las grandes partículas quedan retenidas en los tramos superiores del aparato respiratorio, mientras que las muy pequeñas y los aerosoles que pueden formar pueden penetrar hasta las zonas más profundas de los pulmones.

Las partículas emitidas por los motores de combustión (diesel) están constituidas por un núcleo de carbono elemental con hidrocarburos peligrosos adsorbido en su superficie. Estos hidrocarburos tienen carácter cancerígeno y mutagénico.

Está comprobado el riesgo de *cáncer de vejiga* en los conductores de camión, aunque también influye si son fumadores.

Calculan algunos autores que en zonas industriales se depositan del orden de las 300 Tm de partículas /km²/año.

En principio se definen las siguientes afecciones básicas:

- Alergias
- Bronquitis crónica
- Silicosis
- Carcinoma pulmonar
- Asbestosis

De estas afecciones solo comentamos las tres últimas, pues las anteriores han sido tratadas en otros capítulos.

72.2. SILICOSIS

Es la *fibrocitosis pulmonar*, causada por la inhalación de polvo de sílice o de silicatos.

En la minería del carbón o del hierro, en las canteras y en algunas industrias

(vidrio, etc.) pueden presentarse enfermedades muy parecidas.

El resultado de estas situaciones es que el polvo se deposita en los alveolos pulmonares, formando nódulos que reducen la función pulmonar.

El proceso consiste en la acumulación de histiocitos en el parénquima pulmonar, que fagocitan esas partículas extrañas, transformándose en fibrocitos.

Estos fibrocitos provocan la formación de los nódulos que citamos y la esclerificación de los alveolos pulmonares, que pierden así su elasticidad, con lo que se reduce la función del pulmón.

72.3. CARCINOMA PULMONAR

Los hidrocarburos policíclicos y otros productos de carácter carcinógeno presentes en el polvo urbano apoyan el desarrollo del *cáncer de pulmón*.

72.4. ASBESTOSIS

Es una enfermedad provocada por la inhalación de polvo de asbesto, y más rara vez por su ingestión.

Los minerales del grupo del asbesto son silicatos de magnesio o ferro-sódicos, de estructura fibrosa.

Si las fibras del asbesto se disocian mecánicamente, se obtiene el *amianto*, producto de gran uso industrial, sobre todo en la construcción, como aislante térmico, como material ignífugo, como material para la fabricación de frenos y

embragues, etc., aunque últimamente le está ocurriendo algo similar que al mercurio: por sus implicaciones medioambientales por ser contaminantes de primer orden se está procediendo paulatinamente a su sustitución por otros productos más inocuos para el medio ambiente. Basta decir que a finales de los años 70 del siglo pasado se extraían anualmente en el mundo del orden de los 4 millones de toneladas.

La asbestosis provoca *cáncer de pulmón*, hecho comprobado desde 1931, así como también se ha visto que el humo del tabaco forma una especie de sinergia con el asbesto e induce mucho más esa patología.

El amianto produce los mismos síntomas y daños, pues al fin y al cabo es el mismo producto. El tipo de cáncer más frecuente que provoca es el *mesotelioma pulmonar*, que consiste en una infiltración fibrosa difusa del parénquima alveolar y de las pleuras, que adquiere las características de un tumor. Esta patología suele tener un tiempo de latencia muy largo, del orden de los 37 años, y en casos extremos pueden pasar hasta 50 años entre el comienzo de la exposición y la aparición del mesotelioma.

Parece existir una correlación entre el contenido de estas partículas en el aire y la aparición de bronquitis y crisis de asma, sobre todo en las aglomeraciones urbanas.

Los síntomas se manifiestan con 100 μg de polvo/ m^3 de aire en los fumadores, mientras que en los no fumadores son necesarios los 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de aire.

CAPÍTULO 73

EFECTOS DE LOS DERIVADOS DEL AZUFRE

Aunque las emisiones de SO_2 se han ido reduciendo en los países desarrollados como consecuencia, entre otras cosas, de la mejora de las combustiones, llegó a alcanzarse tal nivel de contaminación, que aún con estas reducciones, ese nivel sigue siendo muy alto con cierta frecuencia.

Generalmente un episodio de fuerte contaminación por SO_2 va asociado a un aumento de la mortalidad en las áreas urbanas.

Últimamente se ha observado que si la concentración a nivel urbano supera los 300 a 1.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de aire/día, la mortalidad aumenta ligeramente.

Así, es importante saber el efecto de los picos de contaminación sobre los individuos que ya padecen bronquitis crónica, estando comprobado que cuando suben los niveles de emisión de SO_2 en una zona industrial, aumenta la mortalidad por asma y por bronquitis crónica.

Asimismo, existe una relación estadística entre el aumento de la concentración media del SO_2 en el aire, y el aumento de la tasa de enfermedades respiratorias y la disminución de la función pulmonar.

Si la concentración supera los 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{día}$, aumenta la patología respiratoria aguda.

Los asmáticos sufren ante concentraciones algo elevadas de SO_2 , sobre todo en su acción física, cosa que no ocurre en niveles de SO_2 inferiores a 0,4 ppm.

Por otra parte, los sulfatos como componente azufrado, al igual que los óxidos de azufre, actúan como agravantes de enfermedades respiratorias tales como asma, bronquitis crónica y enfisemas pulmonares. Además reducen las funciones pulmonares, irritan los ojos y los conductos respiratorios y son causantes de una mortandad elevada. Los efectos se hacen patentes a partir de 8-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

El SO_2 inhibe los movimientos de los cilios en el aparato respiratorio inferior, como se ha indicado en el capítulo correspondiente, en un efecto común a otros productos irritantes, que hace que esos cilios no puedan arrastrar las partículas tóxicas hacia fuera, con lo que pueden aparecer diversos problemas respiratorios como los ya citados.

El SO_2 puede detectarse más por el sabor que por el olor, pues a partir de 0,3 ppm se detecta por el sabor, mientras que el olor lo identifica a partir de 2 o 3 ppm.

Los efectos generales se indican en la tabla adjunta.

**EFFECTOS GENERALES DEL SO_2
SOBRE EL ORGANISMO
HUMANO**

Concentración (en ppm)	Efectos generales
0,3-1	Se detecta por el sabor
2-3	Se detecta por el olor
6-12	Irritación en el interior de la nariz y en la garganta. Tos en algún caso
18-22	Irritación ocular y lagrimeo
> 0,8%	Irritación de las partes húmedas de la piel
< 0,4	No se detectan molestias

El SO_3 , aunque más infrecuente en el aire que el SO_2 , es un gas fuertemente irritante a partir de concentraciones muy bajas. A partir de 1 ppm provoca sensación de ahogo.

Sus efectos patológicos son los mismos que los del SO_2 .

El H_2SO_4 de las lluvias ácidas, por sí mismo es un ácido corrosivo y muy activo, pero en las concentraciones en que aparece en la atmósfera, no ejerce efectos directos sobre el hombre.

El H_2S es de efectos similares.

El CS_2 es algo diferente, pues con 300 ppm de concentración durante varias horas origina dolores de cabeza y confusión mental.

2.000–3.000 ppm durante 30 minutos (puede ocurrir en una emisión accidental) provocan la locura.

Si la exposición es a una concentración de 300 ppm durante varios días, se presentan síntomas graves de neuritis, vista deformada y trastornos mentales.

Si la exposición es a 30-40 ppm durante un día, pueden aparecer dolores de cabeza, histeria y somnolencia.

CAPÍTULO 74

EFFECTOS DEL MONÓXIDO DE CARBONO

Sobre la salud humana provoca deficiencia de oxígeno en la sangre, dolor de cabeza, fatiga, pérdida del control sobre los músculos, y puede ser responsable de malformaciones del feto en el caso de mujeres embarazadas.

Produce graves intoxicaciones e incluso la muerte por asfixia (su afinidad por la hemoglobina de la sangre es 200 veces mayor que la del oxígeno). Es producido por explosiones en minas de carbón, en las canteras, durante los incendios, en los altos hornos y en la síntesis de ciertos gases; se usa en metalurgia, en los combustibles gaseosos y formando parte de algunos productos químicos.

A la inversa de otros contaminantes atmosféricos, el CO no irrita las vías respiratorias, y no produce síntomas más que cuando ya está a una concentración que lleva al individuo a una hipoxia de los tejidos, pues ya hemos explicado en otros capítulos el proceso de formación de la carboxihemoglobina, que conlleva un déficit de oxígeno en la sangre.

En las personas con problemas en la perfusión tisular, los síntomas pueden aparecer antes, en concentraciones del 2,3 al 3% de CO, mientras que en individuos sanos, estos síntomas pueden presentarse a partir de tasas del 15% de carboxihemoglobina.

Una tasa de carboxihemoglobina de más del 40% lleva al coma, y la muerte sobreviene por hipoxia tisular crítica a nivel cerebral y cardíaco.

Parece ser que una concentración relativamente alta de CO aumenta la tasa de mortalidad debida a infartos de miocardio.

El CO favorece el depósito de colesterol en las paredes arteriales, y sobre todo en las arterias coronarias, por lo que es muy peligroso para las personas con enfermedades cardiovasculares. En estas personas las dosis de CO que afectan al paciente son muy bajas, con efectos graves a partir de un 10% de concentración, produciéndose sobre todo agravamientos en la angina de pecho.

El CO afecta a la vista y a la audición, potenciando la acción del ruido con un efecto sinérgico.

En la tabla adjunta se indican los efectos básicos del CO.

EFECTOS BÁSICOS DEL CO

Concentración de carboxihemoglobina	Efectos
$c < 0,8$	Prácticamente ningún efecto digno de mención
$0,8 < c < 2,5$	Primeros síntomas en enfermos cardiovasculares
$4 > c > 2,5$	Efectos psicomotores en individuos sanos
$10 > c > 4$	Efectos sobre el sistema cardiovascular, efectos sobre el sistema nervioso central
$15 > c > 10$	Efectos persistentes sobre el sistema arterial si la exposición es larga
$40 > c > 15$	Efectos muy graves con posibles infartos y muerte en algún caso
$c > 40-60$	Muerte por hipoxia tisular crítica a niveles cerebral y cardíaco

En la tabla adjunta se indican las poblaciones que por su actividad se encuentran más expuestas a concentraciones ambientales de CO más elevadas que las normales.

POBLACIÓN MÁS EXPUESTA A LOS EFECTOS DEL CO

Agentes de circulación Fumadores Empleados de peaje en autopistas Peatones próximos a vías de circulación Motoristas Conductores de automóviles Conductores de taxi y autobús

CAPÍTULO 75

EFFECTOS DE LOS DERIVADOS DEL NITRÓGENO

Su inhalación por el hombre en exposición aguda produce irritaciones en las mucosas de las vías respiratorias, crisis de asma por elevación de la reactividad bronquítica, tos, irritación de las conjuntivas y una disminución de la resistencia general a las patogenicias.

Los más tóxicos son el NO y el NO₂, y sobre todo este último.

En principio existen muy pocos casos de intoxicación directa por óxidos de nitrógeno, pues hacen falta dosis elevadas que no es fácil que se presenten, salvo accidentalmente.

El N₂ también puede plantear problemas, siendo bastante más conocida su patología. Al igual que los demás contaminantes de este grupo, el N₂ debe tener una concentración bastante alta, que solo se da en casos de accidente.

En principio el N₂ provoca, con dosis de 5 ppm y tiempo de exposición de 10 minutos, trastornos respiratorios momentáneos. Si la dosis es de 90 ppm apa-

rece edema pulmonar, y ocurre una reducción irreversible de la función pulmonar si el tiempo de exposición es de 18 horas. Si la concentración es de más de 140 ppm y el tiempo de exposición de varios días, sobreviene la muerte.

Los NO_x son, en general, producto tóxico por ser oxidantes, como hemos visto en otros capítulos.

El organismo humano posee sistemas de defensa contra un exceso de átomos o de moléculas con un elevado poder oxidante (el mismo oxígeno es muy tóxico por inhalación prolongada en estado puro), y estos sistemas básicamente son las peroxidasas.

Los oxidantes atacan la membrana celular, formando con los lípidos que la constituyen peróxidos tóxicos. Además, también actúan dentro de la célula de forma similar a las radiaciones ionizantes, pues en paralelo con ellas tienen un gran potencial de oxidaciones y de combinación con las estructuras moleculares a las que son capaces de degradar.

Así, a nivel molecular y celular, ambos grupos de tóxicos pueden potenciarse mutuamente y formar sinergismos.

En general es muy difícil identificar el papel específico de los NO_x en cada caso, pues suelen presentarse en mezcla con otros agentes contaminantes.

El N_2O es el óxido de nitrógeno más abundante en las atmósferas limpias, en las que puede estar a 0,25 ppm.

El NO_2 , si la concentración es superior a 10 ppm, provoca hiperplasia de los

neumocitos, y a más largo plazo una obliteración de los bronquiolos.

A baja concentración (de menos de 1 ppm) no se conocen bien los efectos, aunque se piensa que sea parcialmente responsable de algunas bronquitis crónicas.

Los PAN provocan fuertes irritaciones oculares (lagrimeo, conjuntivitis, etc.) a partir de concentraciones de 8-10 ppb, debiéndose tener en cuenta que en ciertas grandes aglomeraciones urbanas se superan las 60 ppm.

CAPÍTULO 76

EFECTOS DEL OZONO

El ozono pertenece al grupo de los oxidantes fotoquímicos como contaminante secundario, junto con los aldehídos y los PAN.

Es un gas oloroso, que últimamente ha cobrado gran importancia por su existencia en la estratosfera y por la agresión que sufre en ella por parte de los CFC, que hace que este gas, que protege la Tierra como una pantalla contra ciertas radiaciones solares de UV, sea destruido.

El ozono de la baja atmósfera, que es el que está presente en el aire que respiramos, es independiente del ozono estratosférico, pero su escasa concentración en el aire troposférico depende mucho de la contaminación.

La concentración de ozono en el aire varía a lo largo del día, pues procede de la contaminación que se forma a través de un conjunto de reacciones fotoquímicas, por lo que durante el día el proceso es más rápido y habrá más ozono que en la noche. Lo mismo ocurre a nivel esta-

cional, siendo su concentración más elevada en verano.

El ozono, al ser un oxidante potente, reacciona con los ácidos grasos poliinsaturados y forma radicales libres. Por esta vía, un exceso de ozono podría provocar lesiones fibrilares a nivel alveolar.

Por otra parte, y esto se debe tener muy en cuenta, el ozono y el NO_2 producen sinergismos y potencian mucho el ambiente oxidante.

El olor del ozono se detecta a partir de concentraciones de 15 a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Irrita la mucosa ocular a partir de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A partir de 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ altera la percepción visual si el período de exposición es de más de 3 horas. Si la concentración alcanza los 1.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ estos efectos se agravan.

Los efectos sobre el pulmón aparecen a partir de concentraciones de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en períodos de exposición de más de 2 horas. Si esta concentración sube hasta cerca de los 2.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ya se observan

alteraciones claras de la mecánica de ventilación del sistema respiratorio y de la reactividad bronquial.

Si el individuo está realizando esfuerzo físico, estos efectos se presentan a partir de concentraciones de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo los asmáticos más sensibles, ya que se desencadena en ellos un proceso de broncoconstricción.

Se han observado migrañas con concentraciones de O_3 de 100 a $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En los niños se reduce la función pulmonar a partir de concentraciones de ozono de 40 a $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la tabla adjunta se indican los efectos generales del ozono.

El ozono aumenta la sensibilidad de los asmáticos a los productos alergénicos, provocándoles una reducción de su volumen respiratorio.

En general, una concentración de ozono ligeramente elevada es posible

que a largo plazo provoque un envejecimiento prematuro del pulmón.

El organismo humano siempre intentará adaptarse (ley de minimización) a los ambientes alterados y pone en marcha mecanismos de defensa contra los oxidantes, como son los sistemas enzimáticos como la peroxidasa, la reductasa, etc., o los nutricionales, como las vitaminas C, E, β -caroteno, selenio, etc. Así, después de varios días de exposición, los pulmones se van adaptando, las vitaminas actúan, etc. El ozono no puede ser disociado de los otros oxidantes fotoquímicos, aunque es el mejor indicador de ese grupo.

El ozono actúa sobre el epitelio de los tejidos de las vías respiratorias y penetra en profundidad, actuando con sus efectos tóxicos sobre los bronquíolos y sobre los alvéolos.

El ozono forma sinergismos con el polen de las gramíneas, pues irrita y sensibiliza las mucosas.

EFFECTOS GENERALES DEL OZONO

Concentración (en ppm)	Efectos
$0,25 > C$	No se observan alteraciones
$0,25 < C < 0,7$	Opresión, molestias respiratorias, irritación nasal
$0,7 < C < 1,8$	Tos y expectoración. Grave perturbación de la función respiratoria
$5 < C$	Fuertes dolores de cabeza, somnolencia. Ya es peligroso para la vida

CAPÍTULO 77

EFFECTOS DEL MERCURIO, DEL PLOMO, DEL CADMIO Y DEL AMIANTO

Aparte de lo que se ha tratado en otros capítulos sobre estos elementos y compuestos, consideramos necesario detallar algo más sobre ellos referente exclusivamente a sus efectos sobre el hombre.

77.1. MERCURIO

La absorción del mercurio se realiza fundamentalmente por inhalación. El comportamiento del elemento en el organismo depende de sus distintas formas y de sus respectivas propiedades físico-químicas, afectando a distintos órganos (riñón, hígado, bazo, testículos, cerebro). Sus efectos son variables: ligeros temblores, irritabilidad, pérdidas de memoria, insomnio, pesadillas, depresiones, debilidad muscular, problemas vasomotores, problemas genéticos, grave toxicidad sobre el feto, etc.

El mercurio se utiliza en muchas industrias químicas (síntesis de cloro e hidróxido sódico), en la fabricación de ter-

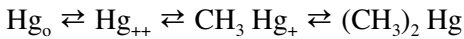
mómetros, barómetros y otros aparatos científicos, en aparatos eléctricos, en pinturas, en productos farmacéuticos, etc.

En principio, cuando se acumula en el organismo actúa mucho como agente inhibidor de la actividad enzimática y, puede provocar la aparición de malformaciones fetales.

Se deben tener en cuenta las grandes cantidades de este metal que se emiten a la atmósfera, bien como componente de algunos carbones, por las erupciones volcánicas o bien por uso agrario o industrial.

El mercurio se sublima con facilidad, y tiene algunas formas muy volátiles como el dimetilmercurio, que se dispersa mucho en la atmósfera.

Por otra parte, el mercurio mineral de los sedimentos o de ciertos residuos puede ser transformado por ciertas bacterias a metilmercurio y luego a dimetilmercurio según la reacción



Esta conversión bacteriana del mercurio mineral en mercurio orgánico es un fenómeno lento, siendo los sedimentos en condiciones eutrofas, con potencial redox positivo que permite la difusión del oxígeno molecular y con pH ligeramente ácido, el mejor medio para esta metilación.

Así, las masas de agua dulce como lagos, embalses o desembocaduras de ríos son los lugares más favorables para la biotransformación del mercurio mineral en alquimercurio.

En general, en una atmósfera limpia el mercurio está presente a nivel de menos de 2 pp t (0,0025 mg/m³ de aire), mientras que en zonas industrializadas se puede detectar concentraciones superiores a 32 ppt (0,04 mg/m³ de aire).

En el hombre suele acumularse por ingestión, aunque la vía atmosférica en ambientes industriales puede ser importante.

El metal es mutágeno a nivel celular, y se han comprobado mutaciones cromosómicas en linfocitos humanos en personas con dieta de pescado contaminado.

En principio los órganos que más sufren por esta contaminación son el cerebro y los riñones siendo el hígado un punto importante de acumulación.

En la tabla adjunta se indican los efectos fundamentales de la intoxicación.

El mercurio mineral, al ingerirse, se absorbe en muy pequeño porcentaje, pe-

EFFECTOS BÁSICOS DE LA INTOXICACIÓN POR MERCURIO

Alteraciones sensoriales del oído
Constricción del campo visual
Insensibilidad de las extremidades
Temblores
Marcha tambaleante
Respuestas reflejas exageradas
Atrofia cortical a nivel cerebral y del cerebelo
Picnosis extendida en las neuronas
Inhibe la glutacio-reductora
Inhibe la fosfoglucosa isomerasa sérica

ro no ocurre lo mismo con el metilmercurio, que es absorbido prácticamente en su totalidad.

El mercurio mineral se acumula en los riñones, mientras que el metilmercurio, al ser muy soluble en los lípidos, penetra en el cerebro, en la médula espinal y en los nervios periféricos.

En lo que hemos indicado referente al feto, el mercurio en exposiciones a baja concentración atraviesa la barrera placentaria y puede inducir daños en el cerebro fetal, con retraso en el desarrollo.

A largo plazo, dosis bajas de mercurio pueden provocar daños neurológicos y renales, con posibilidad de aparecer una albuminuria.

Ciertos autores advierten sobre las emisiones de los incineradores de cremación de difuntos, pues estos si llevan amalgamas en la boca, pueden provocar una media de emisión de 2,4 g de Hg por persona, lo que hace que 3000 incineraciones anuales puedan originar una emisión de más de 7 kg de mercurio al año.

Se debe tener en cuenta que la inhala-

ción de vapores de mercurio favorece la fijación directa del metal en el cerebro, y es en parte el caso de los médicos dentistas y enfermeras ayudantes, que es posible que absorban estos vapores al hacer las amalgamas de los pacientes, pues su nivel de mercurio en la hipófisis es bastante elevado.

Debemos indicar que la experiencia de España en estos problemas es grande, a causa de la existencia de minas de cinabrio milenarias en explotación, como son las de Almadén. Se conocen en detalle la sintomatología y los efectos del mercurio cuando los mineros respiran el metal en su forma inorgánica.

El fenilmercurio y el metexifenilmercurio son productos de características intermedias entre el mercurio inorgánico y el metilmercurio.

77.2. PLOMO

El plomo penetra en el organismo fundamentalmente por vía digestiva, no descartándose la absorción cutánea ni la entrada a las vías respiratorias por inhalación. Produce una enfermedad conocida como saturnismo profesional. El plomo y sus derivados aparecen en las siguientes actividades industriales: metalurgia del plomo, pinturas y esmaltes, gasolinas, imprentas, baterías, acumuladores, cubiertas de cables, municiones, laminas y tuberías, aleaciones para soldadura y fusibles, etc.

Efectos: El plomo se va acumulando lentamente en los órganos del cuerpo humano, provocando lesiones que pueden

llegar a ser de extrema gravedad en el sistema nervioso. También produce enfermedades de tipo crónico, como son la inhibición de la síntesis de hemoglobina, posibles efectos en las funciones digestivas y reproductivas, posibles daños en el cerebro y alteraciones en la conducta y disfunciones neurológicas, especialmente en niños. También pueden ser causante de la aparición de anomalías cromosómicas en los individuos.

Una exposición permanente al plomo en baja concentración puede provocar anemia, disfunciones renales y diversos daños al sistema endocrino, y sobre todo en las glándulas reproductoras.

El saturnismo, que es consecuencia de una intoxicación por plomo, es una enfermedad laboral reconocida hace muchos años.

Su acción tóxica es la perturbación de la biosíntesis de la hemoglobina, provocando una ligera anemia y un aumento del nivel de plomo en el organismo.

El plomo, como contaminante atmosférico, si está en forma de micropartículas de tamaño inferior a 1μ puede penetrar con facilidad en los alvéolos pulmonares, y después es arrastrado por la sangre. Gran parte del metal se fija en los huesos, donde puede permanecer muchos años (unos 30). Otra parte se acumula en los tejidos y otra circula por la sangre durante un mes después de la exposición.

El plomo orgánico es mucho más tóxico que el inorgánico, y afecta al hombre según la duración de la exposición, según su concentración en el aire y se

gún sea la edad del receptor, siendo muy sensibles los niños, que absorben más el plomo que los adultos (sobre todo por vía industrial). Los niños pueden tener problemas neurológicos con síntomas como alteración del sueño, fatiga, dolores abdominales, estreñimiento, anemia, etc., y si la intoxicación es grave pueden llegar a tener una encefalopatía.

En zonas en que el ambiente tiene un alto nivel de plomo, se han detectado en niños bajas en el coeficiente intelectual, retraso escolar, distracción, etc.

Una concentración ambiental de plomo elevada, puede provocar subidas en la tensión arterial (hipertensión) y subidas en la urea de la sangre.

En algunos países todavía se utiliza el metal como antidetonante de las gasolinas bajo las formas de plomo tetraetilo y de plomo tetrametilo.

En caso de absorción de estos derivados, los síntomas de intoxicación se manifiestan como delirios, nerviosismo y posible parálisis, con un restablecimiento que es función del tiempo de exposición.

El plomo actúa sobre el desarrollo y envejecimientos de los glóbulos rojos de la sangre, a los que una intoxicación crónica les produce un fuerte aumento de fragilidad mecánica y osmótica.

77.3. CADMIO

Es un agente causante de enfermedades respiratorias de carácter crónico, anemia e hipertensión, y su presencia afecta a los sistemas nervioso y cardio-

vascular. Es, además, un posible compuesto carcinógeno. En la Naturaleza se concentra de forma especial en la vegetación y en los crustáceos.

El metal es un poderoso agente mutagénico y cancerígeno.

Es de fácil absorción por vía digestiva y pulmonar, y esta absorción se agudiza si existen carencias de calcio, de proteínas o de hierro.

El cadmio, en su forma ionizada es una molécula muy activa, capaz de alterar muchas funciones biológicas celulares.

Por otra parte, también es agresivo para la mucosa olfativa, junto con otros metales pesados.

Una vez ha pasado a la sangre a través de los aparatos respiratorio o digestivo, se acumula sobre todo en el hígado y en los riñones.

Perturba la función renal al acumularse en el órgano y determina la aparición de hipertensión.

La carga corporal de cadmio aumenta con la edad, y es más importante en la mujer que en el hombre a causa de la mayor capacidad de absorción intestinal de aquella.

Los diabéticos son muy sensibles a esta contaminación.

Se deben tener en cuenta las múltiples fuentes de contaminación por cadmio, ya que sus aplicaciones son muy diversas y el control en los seres vivos y la reducción de su tasa ambiental son casi la única vía efectiva de defensa.

Su presencia en el humo del tabaco se trata en el capítulo correspondiente.

77.4. AMIANTO

El amianto es un conjunto de silicatos hidratados cristalinos, con una geometría fibrosa con filamentos más de 3 veces más largos que anchos.

El asbesto es un producto similar, y en concreto, silicato magnésico, y es nocivo por inhalación.

En la antigüedad ya se conocían los efectos nocivos del amianto y del asbesto en los mineros del sector. Plinio el Viejo indicaba que se debía utilizar protección respiratoria para impedir la inhalación del polvo de estos minerales.

Su toxicidad es sobre todo por inhalación, habiéndose presentado algún caso de accidentes graves por esta contaminación, como ocurrió en Armley (Leeds, G.B.), donde 40 habitantes que vivían cerca de una fábrica que procesaba amianto, fallecieron de cáncer de pulmón o de mesotelioma.

El amianto, en una de sus múltiples aplicaciones, en la construcción, se preparaba proyectando sus fibras sobre un soporte. Este material, con el tiempo se erosiona y va liberando fibras al aire, con la correspondiente intoxicación para los habitantes que las inhalen.

Las baldosas de vinilo-amianto también pueden producir el mismo efecto, por desgaste.

Los jóvenes son una población de mucho riesgo de mesotelionia, por lo que ese problema es particularmente importante en los locales que frecuente esta población (escuelas, discotecas, etc.).

Los riesgos para la salud dependen también del tipo de fibra, y en conjunto el amianto o el asbesto corresponden a los minerales que se indican en la tabla adjunta.

MINERALES DEL AMIANTO

Crisotilo
Cocidiolita
Amosita
Antofilita
Tremolita
Actinolita

La asbestosis se describió hace casi 90 años, y consiste en una enfermedad provocada por este contaminante en el parénquima pulmonar y en el peritoneo. A estos niveles las fibras de amianto provocan enfermedades inflamatorias que evolucionan hacia la fibrosis, o transformaciones celulares que evolucionan hacia el cáncer.

En principio, la asbestosis pulmonar se desarrolla al provocar el amianto un espesamiento de las paredes de los bronquiolos, lo que crea una obstrucción de las vías aéreas menores.

Por otra parte, el amianto crea una fibrosis a nivel de la pleura que puede ser difusa o en placas localizadas, que a su vez se pueden calcificar. Esta fibrosis pleural es típica de una contaminación por materiales fibrosas.

El mesotelioma de la pleura o del peritoneo es un cáncer muy específico de la exposición al amianto, y la exposición profesional es muy peligrosa, pudiendo incluso llevar los trabajadores las fibras en la ropa y contaminar a sus familias, sobre todo a los niños.

El amianto puede provocar, además de la asbestosis y del mesotelioma, cáncer de pulmón.

El tamaño más pernicioso de las fibras oscila en el entorno de menos de 5 μm de diámetro y más de 5 μm de largas.

CAPÍTULO 78

EFFECTOS DE LOS PLAGUICIDAS

78.1. DEFINICIONES Y FORMAS DE APLICACIÓN

Los plaguicidas son productos que se utilizan para combatir las enfermedades y plagas que dañan a la producción agraria, y fundamentalmente a los cultivos y a las semillas.

Un plaguicida se compone del principio activo, del preparado comercial y de la dilución que se utiliza en su aplicación.

Los plaguicidas se pueden clasificar, según sus propiedades de acción, en:

- Insecticidas.
- Acaricidas.
- Rodenticidas.
- Nematicidas.
- Herbicidas.
- Molusquicidas.
- Fungicidas.

Se aplican en forma de polvo, en forma de líquido o en fumigación co-

mo gases, como se indica en la tabla adjunta.

FORMAS DE APLICACIÓN DE LOS PLAGUICIDAS

Forma de aplicación	Tratamiento
Sólida	Polvos para espolvoreo o para tratar semillas, gránulos o cebos
Líquida	Nebulización Atomización Pulverización Riego Tratamiento de semillas
Fumigación	Aerosoles <ul style="list-style-type: none">• Nieblas• Humo Gases <ul style="list-style-type: none">• Masas forestales• Agricultura• Almacenes• Sanidad

78.2. FORMAS DE ABSORCIÓN

Las formas de absorción en la intoxicación pueden ser:

- *Por vía digestiva.* Simplemente, tras una aplicación aérea, pueden sedimentar sobre cualquier alimento expuesto, con lo cual lo ingiere el hombre.

Si el individuo está en ayunas, la absorción del producto es intensa y rápida; si no, puede provocar una serie de vómitos al irritar la mucosa gástrica que hacen que expulse gran parte, con lo cual se reduce mucho su toxicidad, o bien, si no se provocan vómitos se mezcla con el resto del alimento ingerido y su toxicidad dependerá ya de las características propias del producto, de la velocidad de absorción y de otros muchos factores.

- *Por vía respiratoria.* Es una vía muy peligrosa, pues estos productos tóxicos pueden penetrar en cualquiera de sus formas sólida, líquida o gaseosa.

A causa de su minúsculo tamaño, estos productos, una vez en el aire, pueden entrar hasta el alveolo pulmonar, desde donde por la gran vascularización de la zona y a causa de ser muy delgada la pared alveolar, su difusión a la sangre es intensa y rápida.

La temperatura aumenta el peligro de intoxicación por inhalación, por lo que el riesgo es más elevado durante las horas más cálidas del día y durante el verano.

- *Por contacto.* Algunos plaguicidas que se utilizan en soluciones grasas, tienen ciertas propiedades que les permiten el paso a través de la epidermis del hombre, penetrando en la dermis e incorporándose al torrente sanguíneo.

Si el contacto se realiza con las mucosas, la penetración es más intensa, y por otra parte el daño inmediato a las mucosas es mucho más fuerte que en la piel.

78.3. FACTORES INCIDENTES EN LA TOXICIDAD DE LOS PLAGUICIDAS

En la tabla adjunta se indican los factores básicos.

FACTORES INCIDENTES EN LA TOXICIDAD DE LOS PLAGUICIDAS

- Peso del individuo
- Raza: Las personas de raza blanca resisten peor los efectos de los derivados fenólicos
- Sexo: Las mujeres son más sensibles
- Edad: Los niños y los ancianos son más sensibles
- Susceptibilidad del individuo
- Estado sanitario del individuo
- Estado fisiológico: El embarazo aumenta la sensibilidad
- Patología del individuo: La insuficiencia renal aumenta los daños. La insuficiencia hepática potencia los daños
- Vía de absorción
- Excipiente
- Mezcla
- Exposición previa
- Clima
- Estación ecológica

Por su acción, los plaguicidas pueden actuar:

- Por inhibición de la colinesterasa
- Como tóxicos espasmódicos
- Como tóxicos de la respiración

- Como tóxicos de la sangre
- Como tóxicos del metabolismo
- Como tóxicos cáusticos

78.5. CLASIFICACIÓN BÁSICA E INTOXICACIÓN

En la tabla adjunta se indican los plaguicidas fundamentales, con su base química y con los efectos tóxicos que provocan.

78.4. SÍNTOMAS

Los síntomas se pueden clasificar según se indica en la tabla adjunta.

SÍNTOMAS DE INTOXICACIÓN POR PLAGUICIDAS

Síntomas	Causa	
Intoxicación aguda	Accidente Error Suicidio Asesinato Negligencia	Dosis únicas altas
Intoxicación subaguda	Absorción prolongada de pequeñas dosis	
Intoxicación crónica	Absorción prolongada e inadvertida de pequeñas dosis que serían inocuas en una sola acción	
Hipersensibilidad	Enfermedades ajenas a la contaminación Problemas fisiológicos	
Alergias	Predisposición Sinergismos	

Grupo	Base	Intoxicación
Insecticidas	Clorados	<ul style="list-style-type: none"> • Las dosis son variables en función de cada producto y de los factores incidentes • El mayor peligro es la intoxicación crónica, por ser acumulativos • Cuadros sintomáticos de daños renales y hepáticos • Temblores • Crisis convulsivas • Mareos, confusión mental y fatiga
	Organo-fosforados	<ul style="list-style-type: none"> • Inhibición de la colinesterasa de la sangre • Acumulación excesiva de acetilcolina en los órganos correspondientes • Miosis y anisocoria en las pupilas, con hiperemia de la conjuntiva • Rinorrea intensa en la mucosa nasal, con hiperemia • Opresión torácica, tos e hipersecreción

Grupo	Base	Intoxicación
Insecticidas	Organo-fosforados	<ul style="list-style-type: none"> • Contracciones fibrilares en los músculos de las zonas afectadas • Anorexia, náuseas, vómitos, espasmos intestinales, ardor, diarrea e incontinencia intestinal • Aumento de salivación y de secreción sudorípara • Incontinencia vesical • Fatiga, calambres y debilidad muscular • Vértigos, ansiedad, depresión, confusión mental, inhibición de reflejos • Convulsiones, depresión de los centros respiratorio y circulatorio, y muerte
	Arsenicales	<ul style="list-style-type: none"> • Vómitos • Deposiciones blanquecinas • Deshidratación • Calambres musculares • Piel seca • Anuria • Dolor intenso en el tórax • Cefalgias • Tos • Sequedad faríngea, afonía, coriza • Leucocitosis neutrófila • Aumento de la urea • Intoxicación crónica: <ul style="list-style-type: none"> – Manchas grises en la piel – Hiperqueratosis – Faringitis, traqueitis y conjuntivitis – Uñas frágiles • Trastornos en el riego sanguíneo • Anemia perniciosa • Polineuritis arsenical progresiva
	Fluorados	<ul style="list-style-type: none"> • Sialorrea • Náuseas, vómitos, diarreas • Calambres, convulsiones, parálisis musculares • Disnea, coma y muerte • Hacen incoagulable la sangre • Intoxicación crónica <ul style="list-style-type: none"> – Dientes moteados – Alteraciones óseas – Hipocalcemia típica
	Nitrados	<ul style="list-style-type: none"> • Fatiga intensa • Sed • Sudoración • Frecuencia respiratoria y circulatoria en aumento • Hipertermia • Agitación, convulsiones, delirio, coma y muerte

		<ul style="list-style-type: none"> • Intoxicación crónica: <ul style="list-style-type: none"> – Efectos en función del riñón – Efectos en función del hígado – Alteraciones oculares
	De origen vegetal	<ul style="list-style-type: none"> • Se absorbe mucho por mucosas y piel (nicotina) • Actúa sobre los ganglios y produce parálisis (nicotina) • Cuadros de todo el aparato digestivo, si se ingiere (nicotina)
	Carbamatos	<ul style="list-style-type: none"> • Daños de todo tipo en el aparato digestivo • Síntomas respiratorios • Edema pulmonar • Miosis • Asfixia, paro cardíaco y muerte
Fumigantes	<ul style="list-style-type: none"> • Son todos extremadamente tóxicos, y las vías de absorción son sobre todo la respiratoria y por contacto. 	
Acaricidas	<ul style="list-style-type: none"> • Efectos similares a los de los insecticidas organofosforados 	
Nematicidas	<ul style="list-style-type: none"> • Irritación de la conjuntiva y de la mucosa nasal • Irritación de la garganta • Debilidad general • Congestión pulmonar 	
Fungicidas	Derivados mercuriales	<ul style="list-style-type: none"> • Muy tóxicos para el hombre • Alergias • Cefaleas, irritación, ataxia • Demencia • Temblores • Muerte
	Compuestos de estaño	<ul style="list-style-type: none"> • Muy tóxicos por todas las vías • Irritación de las mucosas • Irritación de las vías respiratorias • Irritación de la piel
Herbicidas	<ul style="list-style-type: none"> • Actúan según el producto, aunque son todos tóxicos • Los cloratos producen metahemoglobina • Algunos son cancerígenos • Los nitratos tienen iguales efectos que los insecticidas nitrados, ya tratados 	
Raticidas	De origen natural	<ul style="list-style-type: none"> • Algunos son extremadamente tóxicos (estruccina) • Otros son poco tóxicos (escila)
	De origen mineral	<ul style="list-style-type: none"> • Son extremadamente tóxicos a pequeñas dosis
	De origen orgánico	<ul style="list-style-type: none"> • Son ligeramente tóxicos
	Anticoagulantes	<ul style="list-style-type: none"> • Algunos casi no son tóxicos • Otros (dicumarínicos) son muy tóxicos <ul style="list-style-type: none"> – Orina sanguinolenta – Hematomas – Muerte

CAPÍTULO 79

EFFECTOS DEL HUMO DEL TABACO

79.1. CONSECUENCIAS PATOLÓGICAS

El tabaquismo es un verdadero azote de los tiempos modernos, y sobre todo en zonas urbanas y en espacios cerrados, donde es muy frecuente la formación de sinergismos con otros de los muchos contaminantes existentes en esas atmósferas específicas.

Se debe tener muy en cuenta que esta adicción afecta a las personas de su entorno a diferencia del alcoholismo o de la drogodependencia, en los que el enfermo solo daña a su salud.

La tasa de mortalidad en los fumadores es muy superior a la de los no fumadores, reduciendo considerablemente su esperanza de vida (una media de 5 años para las personas que fuman 20 cigarrillos diarios).

La acción patógena del humo del tabaco produce los siguientes daños básicos:

- Al sistema cardiovascular.
- Al aparato respiratorio.
- Diversos tipos de cáncer.
- Acción sobre el feto.

79.2. ACCIONES SOBRE EL SISTEMA CARDIOVASCULAR

El humo del tabaco afecta al sistema cardiovascular de forma muy compleja:

- Efectos estenosantes de la nicotina.
- Hipoxia permanente del miocardio por inhalación de CO.
- Carboxihemoglobina en sangre 12 veces más elevada que en los no fumadores.
- Aceleración de los procesos patológicos de la arteriosclerosis, y más a nivel de la coronaria.
- Enfermedades coronarias con frecuencia 10 veces superior en los fumadores.

- Mortalidad por infarto de miocardio 3 veces superior en los fumadores de la clase de edad comprendida entre los 45 y los 54 años.
- Aumento en la agregación de las plaquetas (fase previa a la arteriosclerosis).
- El benzo-a-pireno acelera el desarrollo de la placa de ateroma que lesiona la pared vascular.
- Disminuye la aptitud al esfuerzo físico, por aspirar CO.

79.3. ACCIONES SOBRE EL APARATO RESPIRATORIO

- La bronquitis crónica es 8 veces más frecuente en los fumadores adultos que en los no fumadores.
- El SO₂ potencia el efecto del humo del tabaco.
- Con un cigarrillo se absorben de 40 a 50 µg de benceno (leucemia).
- El humo del tabaco aporta cadmio (hasta 2,3 µg/cigarrillo), que es un metal acumulativo y tóxico.
- El polonio 210 se encuentra con más abundancia en la orina de los fumadores.
- Los nitrosaminas son un producto cancerígeno de primer nivel que se emiten con el humo del tabaco.
- Aparecen también dioxinas en cantidades de 5 mg/m³.

79.4. EFECTOS CARCINÓGENOS

El humo del tabaco interviene fuertemente en la inducción de diversos tipos de cáncer.

- Induce la aparición de carcinomas bronco-pulmonares.
- Induce la aparición de carcinomas gástricos.
- Induce la aparición de carcinomas hepáticos.
- Existe sinergia con la nicotina.

79.5. EFECTOS SOBRE EL FETO

- El feto es la persona más vulnerable de todas las que se exponen al humo del tabaco.
- Existe un riesgo de mortalidad perinatal 3 veces más elevado en las mujeres embarazadas que sean fumadoras.
- Son más frecuentes los falsos alumbramientos.
- Los embarazos extrauterinos se multiplican por 2,2.
- El feto es mucho más sensible a los productos cancerígenos.
- Ciertos compuestos del humo del tabaco, son carcinogénicos.
- Frecuente deficiencia en cinc.
- Reducción del peso del feto en 120 g si el padre consume un paquete de cigarrillos al día.

- Con fuerte tabaquismo de la madre solo se alcanzan pesos de 2,5 kg al nacimiento.
- 80% de aumento del riesgo de aborto por tabaquismo pasivo.
- Doble riesgo de leucemia

79.6. EL TABAQUISMO PASIVO

Este problema se empezó a plantear seriamente a partir de un informe emitido por la OSH de EEUU en 1986, en el que se confirmaba que la inhalación involuntaria del humo de tabaco era causa de enfermedades y problemas de salud similares o casi similares a los de los fumadores.

En la tabla adjunta se indican los efectos generales del tabaquismo pasivo sobre la salud.

En estos momentos se considera el humo del tabaco como uno de los contaminantes atmosféricos más frecuentes y

EFFECTOS DEL TABAQUISMO PASIVO SOBRE LA SALUD HUMANA

Efecto	Evidencia
Alteraciones respiratorias	Reconocida
Aumento de bronquitis	Reconocida
Tos y expectoración	Reconocida
Reducción de la función pulmonar	Reconocida
Irritación de las mucosas	Reconocida
Problemas respiratorios en los asmáticos	Reconocida
Cáncer de pulmón	Evidencia
Alteraciones cardiovasculares	Casi evidencia

más nocivos en interiores (fallecen anualmente en el mundo 2,5 millones de fumadores), siendo la causa de 11 veces más muertes que en los años 50, a pesar de las campañas antitabaco que proliferan cada vez más.

Fumar debe dejar de considerarse como una contaminación individual, y este vicio debe ser tomado como una contaminación colectiva.

En Europa, y según datos de la OMS, mueren más de 200.000 personas al año que sufren tabaquismo pasivo, y de hecho en la mayoría de los países desarrollados se están tomando medidas legislativas restrictivas (*Ley Evin* de 1991 en Francia, etc., etc.), de forma que creo que en estos momentos los criterios mundiales están cambiando a causa de la presión sanitaria y social, exactamente de la misma forma que cambiaron en los años 70 en lo referente a la contaminación atmosférica urbana.

El tabaquismo pasivo está formado por los siguientes procesos:

- Corriente principal, que emite el fumador al expulsar el aerosol complejo que ha inhalado, y que ha sido más o menos parcialmente filtrado por los pulmones.
- Corriente lateral, constituida por la combustión del tabaco (cigarrillo, pipa o puro) entre una aspiración y la siguiente del fumador.

En principio, la corriente lateral, debido entre otras cosas a la temperatura de combustión, contiene más productos tóxicos que la corriente principal.

Las fuentes básicas del tabaquismo pasivo son:

- La contaminación (humos) de fondo.
- Los familiares y amigos fumadores.
- Los colaboradores profesionales.
- La presencia temporal en lugares públicos.

Está comprobado que cerca del 20% de los cánceres de pulmón de los no fumadores está en relación directa con la exposición previa al humo del tabaco durante su infancia y adolescencia, y en general, el tabaquismo pasivo aumenta un 40% el riesgo de cáncer de pulmón.

Los fumadores pasivos tienen un 30% más de riesgo de muerte por isquemia cardíaca o por infarto de miocardio que los no fumadores no expuestos al humo del tabaco.

El tabaquismo pasivo afecta sobre todo a los fetos, aunque también daña directamente a las mujeres embarazadas, a los niños y a quienes tienen problemas respiratorios, cardíacos, vasculares, e, incluso oculares.

El tabaquismo pasivo provoca, en los lactantes, deficiencias de Zn por antagonismo con el Cd del humo del tabaco, lo que aumenta la absorción del aluminio de la leche.

Los niños de edad inferior a un año hijos de fumadores tienen el doble de bronquitis, y después, tienen mucha más frecuencia de extirpación de las amígdalas.

En la tabla adjunta se indican algunas cifras orientativas sobre el tabaquismo pasivo.

RIESGOS Y DAÑOS DEL TABAQUISMO PASIVO

- Si se fuman 9 cigarrillos, un bebé próximo absorbe el equivalente a 3.
- 3 cigarrillos confieren a un bebé características de fumador pasivo.
- Un bebé tiene el doble de bronquitis si sus padres fuman.
- Los niños hijos de fumadores tienen más otitis, bronquitis y rino-faringitis.
- El tabaquismo pasivo del feto aumenta en un 80% el riesgo de aborto.
- El riesgo de leucemia se dobla en los niños cuya madre ha fumado durante el embarazo.
- El tabaquismo pasivo aumenta el riesgo de cáncer de pulmón en un 40%.

CAPÍTULO 80

EFECTOS DE OTROS CONTAMINANTES

80.1. FLÚOR

El flúor tiene una gran afinidad por el calcio, por lo que si el organismo humano lo absorbe de alguna manera, pasará a los huesos y, en menor medida a los dientes.

La vía de absorción básica es por ingestión de agua o de alimentos contaminados, que pueden recibir el halógeno de industrias emisoras.

En el capítulo correspondiente se indica todo lo referente a la fluorosis en los mamíferos y allí remitimos al lector.

80.2. CROMO

Se producen en las emisiones en ciertas industrias de recubrimiento electrolítico, en manufacturas, y en la combustión de residuos y del carbón. También puede aparecer con el uso de ciertas pinturas anticorrosivas.

En el hombre produce dermatitis, cáncer de piel y cáncer de pulmón.

80.3. ALUMINIO

Es un elemento de los más abundantes en la naturaleza, y con múltiples aplicaciones en el mundo desarrollado.

Parece ser que actúa sobre el cerebro, deteriorando las funciones intelectuales y acabando en demencia del individuo afectado.

Influyen mucho las características genéticas de cada persona.

Parece ser que el Al también está relacionado con la enfermedad de Parkinson, encontrándose por otra parte descensos en la mineralización ósea y relaciones con la osteoporosis.

Las sales de aluminio son más neurotóxicas que el propio metal.

80.4. SILICIO

El polvo de sílice penetra por inhalación, depositándose en los alvéolos pulmo-

nares y produciendo silicosis, enfermedad tratada en otro capítulo, caracterizada por la formación de nódulos en los pulmones y, por tanto, provocando una disminución de la función pulmonar. Enfermedades parecidas padecen también los mineros, y canteros por inhalación de otras partículas minerales como el hierro o el carbón. Fuera de las canteras y de las minas, el polvo de sílice aparece en algunas industrias como las manufacturas del vidrio y de la cerámica, cementos, cosméticos, productos farmacéuticos, papel, agentes antiapelmazantes en alimentos, en ciertos insecticidas o en la adhesión en textiles.

80.5. NÍQUEL

La exposición a una atmósfera contaminada por níquel provoca en el hombre dermatitis, neumonitis, cáncer de pulmón y cáncer nasal y de senos.

80.6. VANADIO

Sus efectos sobre el hombre son irritación de los conductos respiratorios y de otros tejidos sensibles, bronquitis crónica con posibilidad de aparición de enfisemas pulmonares, y posibilidad de formación de cáncer de pulmón. Además, el vanadio produce sinergismos con el dióxido de azufre.

80.7. BERILIO

En el hombre provoca dermatitis, úlceras de piel, inflamación pulmonar, y

muy posiblemente sea un agente causante de cáncer de pulmón y cáncer de huesos.

80.8. MANGANESO Y DERIVADOS

El MnO_2 es un contaminante importante en ambientes de la industria del ferromanganeso, y provoca diversos problemas neurológicos.

Cada persona tiene una capacidad diferente de eliminación.

80.9. ARSÉNICO

Su asimilación por el hombre le produce bronquitis y otras enfermedades respiratorias, además de dermatitis, cáncer de piel y cáncer de pulmón (véanse los epígrafes correspondientes).

80.10. RADÓN

Es un gas radiactivo que proviene de la desintegración del uranio.

La inhalación de sus metabolitos es el origen básico de contaminación.

Las fuentes fundamentales son los materiales de construcción y la evaporación de agua contaminada.

Provoca cáncer de pulmón y posiblemente otros muchos tipos de cáncer (estómago, próstata, riñón, leucemia, melanomas, etc.).

80.11. FÓSFORO Y DERIVADOS

Es muy difícil encontrar ambientes con alta concentración de fósforo o de sus derivados (véase en el capítulo correspondiente lo dedicado a plaguicidas fosforados).

En principio, la intoxicación crónica por fósforo se manifiesta con dolores gastrointestinales e ictericia, pérdida de apetito y descenso del metabolismo.

Por otra parte provoca fragilidad y deformación de los huesos, y descenso en la resistencia a las infecciones.

80.12. TALCO

En el hombre puede provocar cáncer de pulmón, al igual que la fibra de vidrio.

80.13. BENCENO

El benceno actúa sobre el sistema nervioso causando excitación y estupor, y produciendo incluso necrosis de los tejidos. Además actúa también sobre los órganos hemotopoyéticos, provocando anemia.

El benceno o sus mezclas se utilizan en las plantas productoras de benceno, en la limpieza en seco, en la fabricación y uso de pinturas, esmaltes y barnices, en insecticidas y fumigantes, como disolvente, etc.

80.14. PERCLOROETILENO

La exposición prolongada o aguda a vapores de percloroetileno o de sus deri-

vados produce una intoxicación grave a nivel del hígado, del riñón y del sistema nervioso. Además, este compuesto puede transformarse en el interior del organismo en epóxidos mutagénicos y carcinógenos. Aparece en las siguientes actividades industriales: en plantas de fabricación de percloroetileno, en la industria metalúrgica, en la industria del electrodoméstico, como solvente y desengrasante o en el lavado en seco y tintorerías.

80.15. MERCAPTANOS

Su olor repulsivo puede provocar náuseas, dolores de cabeza e incluso desvanecimientos.

80.16. ALDEHÍDOS

El formaldehído y el acetaldehído son los COV más importantes existentes en una atmósfera industrial o urbana, pues se incluyen en la composición de muchos productos de gran uso.

El riesgo sanitario que suponen es fundamentalmente respiratorio.

La dosis máxima recomendada por la OMS es de 0,1 mg/m³ de aire, siendo normal en una atmósfera urbana una concentración de 0,005 a 0,01 mg/m³, con picos de 0,1 mg/m³ de aire. En algunos lugares se pueden alcanzar los 1,15 mg/m³.

En concentraciones de menos de 0,5 mg/m³ los aldehídos pueden irritar las mucosas y las vías respiratorias superiores, aunque no alteran las vías inferiores.

A baja concentración, una exposición prolongada aumenta las crisis de asma.

Pueden formar sinergismos con otros contaminantes y disminuir así las defensas inmunitarias del organismo humano.

Es posible que el formaldehído esté relacionado con el cáncer nasofaríngeo.

Por ser muy soluble en el agua, el formaldehído es un gas irritante de las mucosas y de las vías respiratorias superiores.

En la tabla adjunta se indican los efectos según la concentración.

EFFECTOS DEL FORMALDEHÍDO SOBRE LAS PERSONAS

Concentración ppm	Efectos
< 0,5	Sin efectos
0,05 - 1,5	Efectos neurofisiológicos
0,05 - 1,0	Nivel de detección del olor
0,01 - 2,0	Irritación de ojos
0,10 - 25	Irritación de las vías respiratorias superiores
5 - 30	Efectos sobre bronquios y pulmones
50 - 100	Pulmonía, edema pulmonar
> 100	Muerte

80.17. TOLUENO, XILENO, TRICLOROETILENO Y TETRACLOROETILENO

Son productos que entran en la composición de pinturas y disolventes y en las gasolinas sin plomo.

Pueden ser peligrosos en industrias y en interiores si están en concentraciones consideradas cercanas a las tóxicas.

Pueden originar leucemias y cáncer en el aparato digestivo.

El xileno puede provocar malformaciones congénitas.

El tricloroetileno aumenta el riesgo de cáncer de hígado y de las vías biliares.

El tetracloroetileno aumenta el riesgo de cáncer de esófago y de cuello del útero.

El tolueno se absorbe por vía pulmonar y algo por vía cutánea. Después de aspirarse, parte sale otra vez en la espiración y parte se oxida. Los efectos básicos son irritación de mucosas, vías respiratorias y bronquios, y a veces de la piel. Actúa sobre el sistema nervioso y sobre el aparato digestivo, como ya hemos indicado.

80.18. PVC

Su fabricación necesita aportes de agentes plastificantes y suavizantes, compuestos volátiles que se liberan a la atmósfera durante varios meses después de su salida de fábrica.

Aumentan la hipertensión y provocan enfermedades cardiovasculares. Asimismo se han observado síntomas respiratorios, náuseas y vómitos.

Entre los agentes plastificantes, los ftalatos tienen múltiples efectos sobre la salud, casi a nivel hormonal, y es posible que afecten gravemente a la reproducción.

80.19. DIOXINAS Y FURANOS

Las dioxinas aparecen sobre todo por síntesis del triclorofenol, como impurezas con ciertos fungicidas como el pentaclorofenol, junto con los furanos, y en la combustión de ciertos materiales plásticos y demás cuando se incineran a baja temperatura.

En dosis subletales afectan a varias funciones y órganos.

Se altera el metabolismo de los lípidos con subida del nivel de colesterol si la dosis de dioxina es baja, y baja ese colesterol (sérico) si la dosis es alta.

El hígado sufre directamente su acción, y en concreto las células parenquimáticas.

Algunas dioxinas tienen un fuerte poder teratógeno, y la capacidad cancerígena de dioxinas y furanos está fuera de toda duda.

80.20. OLORES

Generalmente, los problemas de los olores se presentan si la fuente emisora está ubicada cerca de un núcleo habitado que pueda verse afectado durante algún período de tiempo más o menos prolongado.

Si existen condiciones meteorológicas inestables o si la emisión se realiza en época cálida, el problema se agrava.

En nivel cultural y las exigencias de calidad de vida de la población afectada también pueden influir en el grado de re-

chazo. Asimismo pueden ser importantes, aparte de la duración de la emisión, su intensidad, el tipo de olor y la edad de los receptores, además de otros factores.

No es objeto de esta obra detallar los efectos ni como se producen; solamente indicaremos que está comprobado que la población rechaza los olores si se cumple alguna o varias de las situaciones siguientes:

- Si se repiten los episodios con frecuencia.
- Si tienen visitas de personas que viven en otro lugar.
- Si las personas alérgicas se ven afectadas.
- Si los más ancianos se ven afectados.
- Si los enfermos de otro tipo se ven afectados.
- Si el área afectada es una ciudad-dormitorio y el cuerpo laboral nota la diferencia de olores al acudir y al regresar de su trabajo en otras zonas.
- Si grupos políticos, ecologistas o naturalistas establecen una campaña que se haga eco del problema.
- Si existe depreciación en el valor de las viviendas y oficinas afectadas.

Cuando una masa poblacional se ve ante un problema de olores de origen industrial reconocido, pueden surgir muchas situaciones negativas, sobre todo cuando existe posibilidad de demandas de tipo económico.

Al mismo tiempo, al ser un tema en parte algo subjetivo, de difícil evaluación

y caro de estudiar, se presta a posibles argumentaciones bien razonadas por ambas partes, que pueden dar pie a situaciones muy complicadas desde los puntos de vista técnico, médico y jurídico.

DUODÉCIMA PARTE

La contaminación atmosférica urbana

CAPÍTULO 81

EL CLIMA Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

81.1. MEDIO URBANO Y CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La ciudad se puede considerar como un hecho geográfico de la humanidad en la cual se establecen unas relaciones específicas con un elemento físico como es el clima. En las ciudades se construyen edificios con la finalidad de crear un ambiente climático diferente, siendo uno de sus problemas que estas construcciones modifican las condiciones climáticas externas que existen en los espacios que rodean esos edificios.

Uno de los factores más importantes que se debe considerar dentro de la ciudad es la contaminación atmosférica, que puede afectar a la salud de los seres vivos y a las construcciones propiamente dichas, y que a causa de las emisiones de gases, polvo o aerosoles modifica con mayor o menor gravedad las condiciones atmosféricas urbanas, que se diferenciarán más o menos de las de su entorno.

En los estudios del clima urbano y de la contaminación atmosférica urbana, la precipitación, la temperatura, la humedad y el viento son los elementos climáticos básicos incidentes. Además, aunque la influencia de la ciudad sobre el clima es muy grande, los efectos causados por la misma se pueden generalizar y agrupar en los siguientes:

- Modificación de la composición del aire (emisiones, básicamente).
- Modificación del equilibrio térmico.
- Modificación en la dinámica del aire: vientos, etc.
- Modificación en el régimen pluviométrico.
- Modificación en el régimen de tormentas.
- Modificación de la rugosidad topográfica.
- Impermeabilización del suelo, que además absorbe rápidamente las pre-

cipitaciones mediante la red de alcantarillado.

- Poca vegetación y por tanto poca evapotranspiración.

En la ciudad podemos hablar de variaciones energéticas originadas por la construcción de los edificios y derivadas de la propia actividad humana.

Al hablar de contaminación atmosférica, evidentemente la ciudad es una fuente de emisiones de todo tipo, y en este sentido condiciona el medio.

A esto debe añadirse el ambiente en interiores, pues si la atmósfera externa de los edificios urbanos está contaminada, gran parte de los agentes contaminantes externos pasarán a los interiores, añadiéndose a los que se generan allí mismo, como son las emisiones de los materiales presentes, el humo del tabaco o el alto nivel de CO₂.

Al hablar de fuentes de calor, tenemos que añadir las de origen artificial, como son la energía proveniente de las calefacciones, los automóviles y la emisión a la atmósfera de gran cantidad de productos que contaminan el aire urbano. Así, como antes hemos indicado, las zonas urbanas presentan grandes diferencias, dependiendo de su grado de contaminación,

81.2. EFECTO DE ISLA TÉRMICA

Por regla general la temperatura dentro de la ciudad es mas alta que en las áreas rurales que la rodean, y esto es lo que se conoce con el nombre de *isla tér-*

mica, debida a la difusión del calor que tienen almacenado los edificios y a los contaminantes que hay sobre la ciudad. En contraste, la ciudad recibe la radiación solar durante el día, con lo cual los edificios y las calles absorben este calor; esta energía que han captado se libera después de la puesta de sol, lo que hace que el efecto de isla térmica sea mas visible por la noche.

Este efecto de isla térmica es mayor en días despejados y con vientos en calma, aunque puede cambiar a lo largo del día y depende de las propias características de la ciudad.

Para ampliar este tema véase el capítulo específico correspondiente.

81.3. MICROMETEOROLOGÍA URBANA Y CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Las zonas urbanas tienen una serie de propiedades que las diferencian de las zonas rurales, como pueden ser la temperatura, la sequía, la rugosidad y la contaminación atmosférica, que son superiores desde un punto de vista micrometeorológico y de calidad del aire.

Existen así diferencias en muchos parámetros micrometeorológicos, como son el perfil de velocidad media, el espectro de energía, el gradiente vertical de temperatura o los coeficientes de difusión.

Otro de los puntos importantes es la distribución de la temperatura dentro de

la ciudad, que según los estudios realizados puede dividirse en tres regímenes diferentes:

- *Días soleados y con viento*: La diferencia de temperatura entre el campo y la ciudad no experimenta cambios significativos.
- *Noches con algo de viento*: Una capa de mezcla se forma encima de la ciudad, mientras que en su entorno la atmósfera es estable, haciendo que la temperatura en la zona rural y la de la zona urbana sean diferentes.
- *Noches tranquilas*: Debido al efecto de isla de calor, se forma una célula de convección sobre la ciudad, lo que altera su temperatura.

Hemos de indicar, por otra parte, que en los primeros cientos de metros de la atmósfera de una ciudad el aire está siempre mezclándose, y se suele considerar que la desviación típica de las fluctuaciones laterales del viento varía básicamente en función de la altitud, y un poco en función de la longitud de *Moin-Obukhov*.

La intensidad de las turbulencias aumenta sobre las ciudades generalmente del orden del 40% respecto del entorno.

Así pues, al hablar de micrometeorología hacemos referencia a la relación existente entre los distintos objetos de la ciudad y algunos parámetros meteorológicos, como el viento, la temperatura, las precipitaciones, etc.

Cada uno de ellos es afectado por las condiciones particulares de cada ciudad y de cada zona de ella en lo que se refiere a

ubicación, latitud, altitud, orientación, color de las calles y de los edificios, etc.

La contaminación urbana cerca del suelo se ve así más o menos en niveles diferentes según las emisiones en cada zona, pero a medida que se sube en vertical la situación tiende a homogeneizarse rápidamente.

81.4. VENTILACIÓN URBANA Y CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La circulación del aire urbano en situación anticiclónica está condicionada por los contrastes térmicos entre unas zonas y otras de la ciudad, o por los contrastes existentes entre las diferentes islas de calor. Además, también influyen mucho, como ya se ha indicado, los obstáculos artificiales (edificios, etc.) y los naturales (ríos, cerros, etc.).

Si las calles son estrechas y tortuosas, como ocurre en las aglomeraciones urbanas antiguas, y si los edificios son altos y están juntos, se dificulta mucho la ventilación, lo que favorece la concentración de contaminantes.

Por otra parte, la altura respecto a la calle determina en gran parte las concentraciones de NO_x , y la altura de los tejados la de los SO_x .

Las inversiones térmicas locales provocan casi siempre las mayores concentraciones de contaminantes.

Estas situaciones provocan que cuando sube el nivel de concentración de NO_x , baja mucho la de O_3 .

81.5. FACTORES INCIDENTES EN EL CLIMA Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA URBANA

Ya hemos indicado en otros apartados que las áreas urbanizadas se diferencian del medio natural en numerosos componentes, de los que se citaron la temperatura, la sequía o la rugosidad. Además se pueden citar los siguientes:

- Contienen edificios de altura y tamaño muy variable.
- Disponen de calles o canales viarios.
- Contienen numerosas actividades antrópicas, de servicios e industriales, entre otras.
- Concentran aglomeraciones humanas más o menos numerosas.
- Concentran numerosos sistemas de transporte individual o colectivo.
- Suponen una gran superficie impermeabilizada.
- Contienen poca vegetación.
- Contienen y generan contaminantes atmosféricos.

Como consecuencia de todo esto, estos factores provocan fenómenos de rugosidad, ya tratados en otros capítulos, y favorecen la ascensión del aire. Además, modifican las condiciones de radiación y producen la desaparición rápida de las aguas de lluvia por las redes de alcantarillado.

Las zonas urbanas generan variaciones térmicas acusadas, creando un reparto térmico típico. A nivel del suelo se forman islotes o islas de calor. En invierno, el recalentamiento general sufre un

aporte debido a las actividades antrópicas urbanas, sobre todo a las industriales, de 1,5 a 3 °C (casos comprobados en Londres, Nueva York y Madrid). En verano, esta participación en el recalentamiento local se acentúa, pues entran en liza los materiales del suelo y de las construcciones: asfalto, pizarras, tejas y hormigón, que se recalientan fuertemente por acción directa del sol.

Por otra parte, el efecto ya citado en colinas y laderas, de la exposición, orientación y pendientes, supone un aporte complementario de concentración térmica.

En total, las diferencias térmicas entre las ciudades y su entorno oscilan entre 3 y 8 °C (según los datos de Nueva York, Londres, Madrid, Zurich, Basilea y Berna).

En lo que se refiere al agua, ya hemos indicado que la infiltración del agua de lluvia es mínima y la evacuación es muy rápida. Como consecuencia, la evaporación después de una precipitación es débil y de corta duración y por tanto la humedad relativa urbana es sensiblemente inferior a la del medio natural.

Al ser el mecanismo de la evaporación un fuerte consumidor de energía, las consecuencias térmicas al respecto serán: En invierno aparecen ganancias térmicas y bajas en la humedad relativa. En verano, se acentúa mucho el recalentamiento por la falta de evaporación, y esto es una de las causas de la formación de las *islas térmicas urbanas*.

Por lo que se refiere al viento, ya hemos indicado en otros apartados lo que supone la presencia de obstáculos de to-

do tipo y dimensiones, y la acción de las calles rectas o tortuosas y de las plazas y avenidas amplias. Todo ello provoca casi siempre la concentración de los contaminantes y dificulta su evacuación al exterior de la ciudad.

En general, el viento se desvía al pasar sobre las ciudades; se suelen generar también, en determinantes circunstancias, brisas procedentes del entorno periurbano y, finalmente, por las causas antes expuestas, se canalizan los vientos, y estos operan en consecuencia.

¿En qué afecta a la contaminación atmosférica del medio natural, bajo el punto de vista climático, la presencia de un área urbanizada?

En primer lugar este área actúa como un foco generador de contaminación, que

alcanzará casi siempre al entorno periurbano o, incluso, a zonas más alejadas.

En segundo lugar, al modificar los regímenes térmicos (ascensos de las masas de aire, inversiones térmicas) e hídricos (baja evaporación), las condiciones de contaminación atmosférica de las áreas periurbanas dependerán en gran parte de las de la ciudad, aunque debilitadas.

En tercer lugar, la canalización de las masas de aire hace que estas, de una forma o de otra, puedan alcanzar las zonas periféricas en forma directa, estando cargadas con los contaminantes de origen urbano, independientemente de que la contaminación atmosférica generada por una ciudad pueda llegar a zonas alejadas si consideramos a la ciudad como un foco puntual de contaminación.

DIFERENCIAS MICROCLIMÁTICAS ENTRE CIUDADES EUROPEAS SITUADAS A LA ORILLA DE MASAS DE AGUA

Factor climático	Período del año	Barlovento	Sotavento
Temperatura	Enero Agosto	Más baja Más elevada	Más elevada Más baja
Precipitaciones	Dic.-feb. Junio-agosto	Menos Más	Más Menos
Nieve	Enero-dic.	Menos días de nieve	Más días de nieve
Humedad relativa	Dic.-febr.	Menos	Más
Velocidad del viento	Dic.-febr.	Menos	Más

DIFERENCIAS CLIMÁTICAS ENTRE LOS BOSQUES Y EL CAMPO RASO

Masas forestales	Campo raso
Más cálidas en invierno Velocidad del viento reducida (rozamiento) Humedad relativa más elevada Reserva de agua elevada	Más cálido en verano Velocidad del viento más elevada Humedad relativa más baja Reserva de agua baja

DIFERENCIAS MICROCLIMÁTICAS ENTRE VALLES Y COLINAS

Factor climático	Período	Valles	Colinas
Temperatura mínima	Diurno	Mucho más baja	Más elevada
Variación de temperatura	Diurno y anual	Más grande	Más pequeña
Hielo	Nocturno	Más abundante	Menos abundante
Velocidad del viento	Nocturno	Más escasa	Más elevada
Niebla	Matutino	Más abundante	Menos abundante

DIFERENCIAS MICROCLIMÁTICAS ENTRE LAS CIUDADES Y EL CAMPO

Ciudades	Campo
Brumas ligera, nieblas, y contaminación atmosférica Temperatura más elevada, en invierno y en verano Velocidad del viento más baja (rozamiento) Irradiación menor	Cielo despejado Temperatura más baja Velocidad del viento más elevada Irradiación mayor

CAPÍTULO 82

FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA URBANA

82.1. INFLUENCIA DE LA CIUDAD SOBRE EL CLIMA Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La irregularidad de la ciudad influye en las temperaturas y en el resto de los demás elementos ambientales. Así, podemos clasificar los siguientes efectos causados por la superficie urbana:

Flujo urbano

Por norma general, las velocidades del viento son menores en el área urbana que en el área rural. Además, el tamaño de los edificios hace de obstáculo para el viento, actuando como efecto pantalla. Quizás el efecto de viento más frecuente es el de brisa: el aire caliente asciende dentro de la ciudad durante el día hasta cierta altura, y desde allí se dirige a la periferia, donde desciende casi hasta la superficie, para di-

rigirse finalmente hacia el centro de la ciudad.

En las zonas cercanas a las montañas se produce una brisa de montaña que en las zonas de aglomeración urbana crea una inversión nocturna muy importante para el problema de la contaminación. Por norma general, la velocidad de estas brisas es función de otros factores, como pueden ser la intensidad del efecto de isla térmica y la estabilidad térmica. Los estudios muestran que la velocidad de estas brisas es más elevada en la periferia debido a que el gradiente térmico es mucho más fuerte.

Esto afecta directamente a cualquier situación de contaminación urbana.

Color de los edificios y de las calles

La absorción de calor depende mucho del color, como se indica en la tabla adjunta.

ABSORCIÓN DE CALOR DE LOS EDIFICIOS SEGÚN SU COLOR

Color	% de absorción
Blanco	40
Colores claros	55
Marrón claro	68
Rojo	70
Ocre	75
Gris	80
Metálico claro	85
Azul	88
Verde	90
Marrón oscuro	90
Negro	100

Materiales de construcción

Los materiales con que se construyen los edificios determinan considerablemente su capacidad de almacenamiento y de retención del calor. Los cristales dobles en las ventanas, el aislamiento con cámaras rellenas de fibra de vidrio o de espumas y los materiales cerámicos, hacen que los edificios que tomen calor por dentro (calefacciones) o por fuera (radiación solar) lo acumulen muchas horas, y a lo largo de días en épocas de temperaturas muy altas.

Morfología urbana

Las zonas de sombra absorben mucha radiación, por lo que las altas latitudes y los edificios altos, que crean muchas zonas de sombra, favorecen la absorción de radiación por este concepto (aunque evidentemente no por otros), y, por el contrario, las calles amplias y los edificios bajos absorben menos radiación por esa vía.

Época del año

En verano generalmente aumenta el albedo.

Las superficies verticales reflejan más la radiación en verano, y en invierno, al ir más tendidos los rayos solares, penetran más en los edificios.

En las ciudades el albedo oscila entre 0,10 y 0,35, siendo por tanto más bajo que en su entorno.

Factores térmicos y de contaminación atmosférica urbana

En la tabla adjunta se indican los factores que inciden sobre la disminución radial (del centro hacia el exterior) de las temperaturas urbanas y sobre la contaminación atmosférica.

FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA DISMINUCIÓN TÉRMICA RADIAL URBANA Y SOBRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Factor	Efecto o característica
Dirección del viento.	Isla de calor. Difusión, dispersión y traslado de contaminantes atmosféricos.
Velocidad del viento	Si aumenta, se reducen las diferencias térmicas con el exterior.
Inversiones térmicas	Isla de calor y aumentos generales de la temperatura y de la contaminación atmosférica a nivel urbano.
Ubicación	El mar o las masas de agua interiores, así como los ríos o los bosques condicionan mucho las temperaturas y el nivel de contaminación atmosférica urbana.
Densidad de población	$\Delta t = A\sqrt{D}$, siendo: Δt = Aumento de la temperatura. A = Coeficiente urbano. D = Densidad de población.
Morfología urbana	Influyen las sombras, la circulación, los materiales de construcción, etc.

EFECTOS TÉRMICOS DEL EXCEDENTE DE CALOR URBANO

- Menos días de heladas
- Menos días de nieve
- Menos días de niebla
- Temperatura más elevadas en altitud

Vientos

La propia construcción de las ciudades, a base de calles, plazas, avenidas y edificios variadísimos en dimensiones, sobre todo en altura, confiere a su topografía unas características de rugosidad en nada parecidas a las de su entorno, más natural.

Esto quiere decir que, como norma general, una ciudad implica una reducción de la velocidad del viento que pasa sobre ella.

Los cambios de velocidad varían con las condiciones de cada ciudad en lo que

se refiere a sus dimensiones, al relieve propio y al urbanismo específico.

En principio se presentan tres efectos básicos sobre los vientos, a saber:

- Desviación, al pasar sobre la ciudad
- Canalización cerca del suelo
- Formación de brisas procedentes del entorno de la ciudad

Es muy frecuente la rotación ciclónica si la velocidad del viento es grande, a causa del rozamiento, y una desviación ciclónica provocada por el efecto isla de calor, si la velocidad del viento es baja.

Si el viento de gradiente es muy bajo o nulo, se forma una brisa procedente del entorno de la ciudad, pues el aire caliente de esta asciende y atrae el aire frío de su entorno, para lo que deben presentarse las siguientes condiciones:

- Gradiente de presión bajo: anticiclón o pantano barométrico
- Diferencias térmicas con el entorno de la ciudad

En el interior de las ciudades el viento se canaliza por las calles rectas y amplias, mientras que las calles estrechas y sinuosas no se prestan a movimientos rápidos del aire.

Donde existen edificios muy altos son frecuentes los torbellinos.

Todos estos efectos inciden directamente en la contaminación atmosférica, pues los vientos mueven masas de aire o facilitan la dilución y la dispersión, como se puede ver en los capítulos correspondientes.

Nieblas y nubes

Por lo general, el aire urbano contiene núcleos higroscópicos que favorecen la aparición de nieblas en la ciudad, que además suelen ser más persistentes que en el campo debido principalmente a la contaminación atmosférica urbana. La presencia de partículas en suspensión sobre la ciudad favorece el aumento de la nubosidad dentro de ella, pues la mayor inestabilidad del aire en la ciudad afecta a la nubosidad y al régimen de precipitaciones de manera notable. El

significativo aumento de las nieblas y de la nubosidad en las ciudades puede reducir de manera importante el período de insolación a nivel urbano.

De todos modos, si la contaminación es baja, el efecto isla de calor provoca la disipación de las nieblas en muchos casos. Si es alta, ocurren situaciones como los famosos smog de Londres.

Humedad del aire

Como es sabido, la ciudad es un lugar donde casi siempre los grandes cuerpos de agua escasean, lo que disminuye la evaporación, a lo que se une la reducción de la evapotranspiración debida a la pobre existencia de zonas verdes. Esto favorece el efecto de isla térmica. Por lo tanto, la cantidad de vapor de agua presente en el aire de las ciudades es menor durante el día con cielos nubosos, mientras que por la noche y con cielos despejados aumenta de manera notable.

Las zonas más cálidas suelen ser las céntricas, reduciéndose hacia la periferia. Las zonas verdes suelen ser más frescas.

El desarrollo de la ciudad también acentúa el aumento de la humedad y de la temperatura dentro de la ella, pero, como ya hemos dicho anteriormente, es el propio desarrollo de la ciudad el que altera todos estos factores, sobre todo cuando se potencia la construcción de grandes edificios, que ejercen de obstáculo para los vientos y las brisas.

Debemos tener en cuenta que a una ciudad llega el agua por las precipitaciones

y por las canalizaciones, y a veces, si existen, por los ríos o por el mar. Estos aportes pueden suponer un factor de humedad de primera magnitud en muchos casos.

En principio, en una ciudad hay más precipitaciones y mucha menos evaporación que en su entorno, como ya hemos indicado en otros apartados. La consecuencia es que la humedad relativa urbana

es manifiestamente inferior a la del campo circundante, y esto se acentúa además por el excedente de calor que tiene la ciudad.

82.2. FACTORES CLIMÁTICOS INCIDENTES

En la tabla adjunta se resumen los factores básicos.

FACTORES CLIMÁTICOS Y EFECTOS SOBRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Factor general	Factor específico	Características y efectos
Estación climatológica	Invierno	<ul style="list-style-type: none"> • Más emisiones a causa de la calefacción.
	Verano	<ul style="list-style-type: none"> • Menos emisiones en muchas ciudades por el no uso de la calefacción y período de vacaciones, que reduce considerablemente el tráfico urbano. • Más emisiones en ciertos núcleos urbanos por afluencia turística.
Dispersión vertical de los contaminantes	Presión atmosférica	<ul style="list-style-type: none"> • A más presión, más pesado es el aire y menos se dispersan los contaminantes en la atmósfera. • Así, los anticiclones son más desfavorables.
	Estabilidad del aire	<ul style="list-style-type: none"> • Está determinada por la variación del perfil en altitud. • Si una molécula de aire que asciende es más caliente que las de su entorno, es más ligera y sigue ascendiendo. Si la humedad relativa es inferior al 100%, tiene al ascender un enfriamiento adiabático de 1 °C/100 m. Cuando alcanza el 100% de humedad y hay saturación y condensación, con lo que se produce calor (en la condensación), el enfriamiento de la partícula es menor del orden de los 0,5 °C. Mientras asciende, la atmósfera es inestable. • Cuando la molécula de aire es más fría que las de su entorno, es más pesada y tiende a descender, con lo cual la atmósfera es estable. • Con el aire estable hay poca dispersión vertical de los contaminantes. • Con el aire inestable la masa atmosférica asciende y la dispersión vertical de los contaminantes es fuerte. • En zonas costeras, en verano, el aire marino fresco es estable, por lo que la brisa deposita los contaminantes atmosféricos que ha recogido, en las zonas donde se detiene. • Así, en algunos lugares situados a varios kilómetros de la costa la contaminación puede ser elevada. • Por el contrario en el continente, en verano, el suelo calienta el aire, por lo que las condiciones son de inestabilidad y la difusión vertical de contaminantes es fuerte.

<p>Dispersión vertical de los contaminantes <i>(continuación)</i></p>	<p>Ubicación (estación)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • En los valles la contaminación es menor en la entrada al valle y hacia la salida, si existe ascenso del aire. • En estos valles, las laderas tendrán bastante sedimentación de contaminantes, al contrario que en la entrada y en la salida. • A más pendiente, más depósitos en la ladera al viento y en la cima. • Donde abundan las inversiones térmicas habrá más contaminación. • En las laderas expuestas al sol suben más arriba el aire y la contaminación. • En estas zonas hay baja difusión en invierno.
<p>Dispersión horizontal de los contaminantes</p>	<p>Velocidad del viento</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Hay una fuerte correlación entre la velocidad del viento y la intensidad de la contaminación. • Influye mucho la rugosidad de los edificios o la de las zonas verdes.
	<p>Dirección del viento</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Un viento fuerte casi siempre está asociado a turbulencias atmosféricas y a la dispersión de los contaminantes. • Los vientos flojos suelen arrastrar las partículas a fuerte distancia. • Las brisas del campo agravan la contaminación atmosférica en los centros urbanos. <ul style="list-style-type: none"> – Los vientos convergen y acumulan los contaminantes. – Suelen ser flojos. – No son continuos. – Si se detienen, aumenta la contaminación.
	<p>Precipitaciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La lluvia limpia la atmósfera y arrastra los contaminantes hacia el suelo y las aguas superficiales (véase el epígrafe correspondiente) • Una precipitación fuerte puede arrastrar casi todos los contaminantes del aire por donde pasa. • Las nieblas agravan la contaminación atmosférica. (véase el epígrafe correspondiente).
	<p>Transformación de los contaminantes por las condiciones meteorológicas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Con humedad o nieblas, el SO_2 se acidifica hasta llegar parcialmente al SO_4H_2 • Lluvias ácidas (véase el epígrafe correspondiente). • Nieblas fotoquímicas (véase el epígrafe correspondiente). • Evolución de los NO_x según clima (véase el epígrafe correspondiente).

CAPÍTULO 83

INFLUENCIA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE EL CLIMA URBANO

83.1. FACTORES URBANOS DE EMISIÓN

Las ciudades, según diversas circunstancias, emiten más o menos contaminantes a la atmósfera, según se indica en la tabla adjunta.

FACTORES DE PRODUCCIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN UNA CIUDAD

Tamaño de la aglomeración urbana. Actividades de la aglomeración urbana. Estación (ubicación). Entorno. Nivel de vida. Energía que consume y su origen. Tráfico. Industrias ubicadas en el casco urbano. Clima. Estructura: <ul style="list-style-type: none">• Altura de los edificios.• Otras dimensiones de los edificios (longitud, anchura).• Anchura de las calles.• Diseño de las calles (tortuosas, rectas, pendientes, etc.).
--

83.2. EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE EL CLIMA URBANO

83.2.1. Disminución de la radiación solar

La presencia de contaminantes atmosféricos en el aire implica una reducción de la radiación solar directa, que en parte se rechaza hacia el exterior (radiación difusa), en parte es absorbida por las partículas y otra parte, la *útil*, penetra hacia la superficie del planeta.

En principio se destruye gran parte de la radiación UV.

Al aumentar la contaminación atmosférica aumentan las brumas y las nieblas, y se reduce la duración de la insolación.

Se ha comprobado que en algunas ciudades donde sus Ordenanzas Municipales se han orientado al control y a una

reducción apreciable de la contaminación atmosférica, en los últimos 20 años ha aumentado la insolación en invierno hasta en un 75%.

Esto se debe a que en invierno aumentan las emisiones, como ya se ha indicado en otros capítulos, y además es más grande la capa atmosférica que deben atravesar las radiaciones solares.

Por otra parte, la influencia de la contaminación atmosférica en el centro de las ciudades puede verse enmascarada o realmente reducida por la de las islas de calor de la ciudad, que provocan una reducción de las brumas y de las nieblas.

83.2.2. Disminución de la visibilidad

Véase el capítulo correspondiente a contaminación atmosférica y visibilidad.

83.2.3. Influencia sobre la humedad y sobre las precipitaciones

Los contaminantes atmosféricos forman frecuentemente núcleos de condensación alrededor de los cuales se acumula vapor de agua.

Si aumenta la contaminación atmosférica, crecerá la humedad relativa y la presencia de brumas y nieblas.

Asimismo se generarán precipitaciones verticales más fuertes, con un efecto contrario y a veces algo compensatorio respecto al que provoca la urbanización.

Así pues, la contaminación atmosférica urbana aumenta la humedad relativa, las brumas, las nieblas y las lluvias en las ciudades, y lo mismo ocurre en las aglomeraciones industriales.

83.2.4. Influencia sobre la temperatura

Al absorber los contaminantes atmosféricos que están en forma de partículas, parte de la radiación solar incidente sobre la Tierra, acumulan calor, lo que favorece el aumento de la temperatura, pero como al mismo tiempo estos contaminantes reducen parcialmente la entrada de la radiación solar y provocan la formación de brumas y nieblas, como ya hemos indicado.

Ese fenómeno de recalentamiento se limita mucho, aunque en función de los factores indicados al principio del capítulo, existen muchas ciudades en el mundo en las que la contaminación atmosférica es responsable de más del 50% del aumento de la temperatura urbana, si estos factores son favorables al respecto.

CAPÍTULO 84

SALUD EN EL MEDIO URBANO

84.1. PARÁMETROS AMBIENTALES URBANOS

El estado de salud de cualquier población está determinado por cuatro factores: el genético, el comportamiento individual, la calidad de los cuidados médicos y el Medio Ambiente.

Una prevención médica completa debe incluir la *medicina medioambiental*, que ha de estudiar en primer lugar los factores ambientales que actúan simultáneamente sobre la salud humana y cuyos efectos son en parte desconocidos, y en segundo lugar el comportamiento del ser humano.

Hoy día el estudio de las relaciones salud - medio ambiente no se puede limitar al simple análisis de ciertos factores naturales como el clima, la geología, los vientos, etc., pues el desarrollo de la civilización y su evolución técnica e industrial han modificado sustancialmente la química del aire, la del suelo, y la de las aguas (contaminación química, radiactividad, acidificación, destrucción de bos-

ques, calentamiento del planeta), y por supuesto también han afectado al entorno cotidiano del hombre y a éste, ya que son muchas las *nuevas* enfermedades o patologías surgidas paralelamente al desarrollo de la civilización y de la industria.

La medicina medioambiental, en su lucha por proteger la salud del hombre, debe mejorar la calidad del Medio Ambiente, tanto exterior como interior, pues el biotopo del hombre comienza en su casa o en su lugar de trabajo, extendiéndose después a la Naturaleza que le rodea.

El hombre está influido cotidianamente por muchísimos elementos exteriores variables que actúan simultáneamente sobre él, con intensidad débil o fuerte y de forma temporal o permanente; estos elementos, son los llamados parámetros ambientales. Dichos parámetros han de ser estudiados para mejorar la calidad del aire, para reducir los ruidos y olores desagradables, para restablecer las condiciones de iluminación, temperatura y humedad adecuadas, y pa-

ra minimizar la contaminación electro-magnética o radiactiva. En conjunto se trata, pues, de mejorar las condiciones higiénicas, sanitarias y de seguridad de los ciudadanos.

El estudio de todos los parámetros ambientales implica un análisis exhaustivo de su intensidad, de los efectos de su acción combinada o aislada, a corto y

a largo plazo, de posibles sinergismos, de la variabilidad de los factores en un mismo medio, etc.

Muchas de las enfermedades que han venido a la par que la industria y el desarrollo, son debidas, en algunos casos, a aspectos que son consecuencia de la acción aislada de factores ambientales como los indicados en la tabla adjunta.

**FACTORES AMBIENTALES
SUSCEPTIBLES DE GENERAR ENFERMEDADES PROFESIONALES**

<ul style="list-style-type: none"> - Aire acondicionado - Calefacción - Iluminación fluorescente - Ventilación incorrecta - Electricidad estática - Radiactividad - Exceso de humedad ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> - Exceso de sequedad ambiental - Contaminación química de la atmósfera - Pantallas de TV - Pantallas de ordenador - Impresoras (ozono) - Fotocopiadoras (ozono)
--	--

Sin embargo, en la realidad, y en la mayor parte de los casos, las enfermedades se producen como consecuencia de la actuación combinada y simultánea de todos los factores o agentes ambientales, y de ahí la problemática de su estudio y de su prevención. Por ejemplo, una enfermedad cardiovascular puede ser debida a una multitud de factores como el tabaquismo, la alimentación inadecuada, la falta de ejercicio, la obesidad, la hipertensión causada por los ruidos, el estrés que supone el trabajo, etc.

Otro elemento importante es la intensidad de exposición. La relación entre la intensidad de acción del agente y los efectos biológicos producidos es exponencial. Además de la intensidad, se deben estudiar el tiempo o la duración de la exposición, así como la naturaleza o el tipo de agente ambiental, ya que, por

supuesto, no serán los mismos los efectos de una exposición repentina e intensa a cualquier factor ambiental, como la exposición al monóxido de carbono tras una explosión o durante un incendio, que los efectos de una exposición lenta, continua, diaria y de intensidad débil, como la exposición a una contaminación atmosférica de fondo en una ciudad. Lo mismo ocurrirá con los efectos de exposiciones periódicas y repetitivas.

La intensidad de los factores ambientales puede ser variable en función de las condiciones del medio interno (casa, trabajo) y del medio externo, pues existen ciertos parámetros como la humedad, la climatología, la temperatura, etc., que pueden potenciar o, por el contrario, disminuir e incluso anular la acción de los factores ambientales sobre el hombre.

Asimismo, otro factor que no conviene olvidar es la sinergia de los agentes ambientales, pues en muchos casos si varios de ellos coinciden en el medio, su efecto puede ser mayor y más grave que la suma de sus efectos individuales, como se ha indicado en los capítulos correspondientes. Como ejemplo, podemos indicar que las enfermedades respiratorias en un ambiente atmosférico contaminado son más numerosas en fumadores que en no fumadores: el tabaquismo y la insalubridad del aire favorecen dichas enfermedades.

Es evidente que la medicina ambiental deberá analizar cada agente o factor ambiental por separado y aisladamente para conocer sus efectos y poder prevenirlos, pero es imprescindible también un profundo conocimiento de la acción combinada de los factores ambientales, examinando sus efectos y detectando posibles sinergismos.

84.2. ENFERMEDADES MEDIOAMBIENTALES URBANAS BÁSICAS

En los países industrializados, y como consecuencia del desarrollo y de la creciente evolución tecnológica, la población se ve afectada por gran número de nuevas enfermedades, favorecidas, producidas o agravadas por las condiciones ambientales del hogar, de la ciudad o de la industria: enfermedades nerviosas, enfermedades mentales, enfermedades cardiovasculares, cáncer, alergias, enfermedades respiratorias, etc.

Vamos a comentar algunas de ellas.

84.2.1. Enfermedades básicas

Cáncer

Aproximadamente el 80% de los cánceres está relacionados con agentes ambientales (contaminantes atmosféricos, radiactividad, rayos ultravioletas, campos electromagnéticos, determinados productos químicos, etc.), aunque sus efectos exactos no se conocen o aún no están demostrados. De alguna manera estos factores cancerígenos ambientales desencadenan o favorecen el inicio o la propensión del tumor.

Enfermedades cardiovasculares

Las enfermedades cardiovasculares son una de las causas más frecuentes de muerte en las sociedades desarrolladas e industrializadas (aproximadamente un 40% de las muertes ocurridas desde los años setenta). Son muchos los factores que de alguna manera provocan este tipo de enfermedades: tensiones y estrés, alimentación desequilibrada, consumo de tabaco, vida sedentaria y falta de ejercicio físico, arterioesclerosis, hipertensión arterial, obesidad, colesterol, contaminantes atmosféricos, etc., aunque deben existir otros muchos factores ambientales, que aún desconocemos, con efectos importantes sobre el sistema cardiovascular.

Enfermedades nerviosas y mentales

Son numerosos los factores que de alguna manera afectan al sistema nervioso

y al cerebro atacándolos directamente, como ciertas sustancias químicas neurotóxicas, o bien perturbando el equilibrio psicológico a través de determinados factores ambientales como el ruido, la iluminación, la monotonía en el trabajo, los olores, una ventilación escasa en los recintos cerrados, el estrés, etc. Así, pueden producirse enfermedades nerviosas como depresiones, esclerosis, parálisis, enfermedad de *Parkinson*, enfermedad de *Alzheimer*, senilidad, locura, etc., como hemos visto en anteriores capítulos, y eso que son solo las provocadas por contaminación atmosférica.

Alergias

En los interiores existen muchos alérgenos como polvo, partículas, ácaros, animales o restos de animales, microorganismos y productos químicos. Todo ello está muy relacionado con las condiciones ambientales y de higiene como la humedad, la temperatura, la ventilación, etc.

Este tema se trata ampliamente en la Parte correspondiente.

Enfermedades respiratorias

Existen diversas manifestaciones como bronquitis, tos, resfriados, rinitis, asma, neumonitis, fibrosis pulmonar, enfermedades bronco-pulmonares, irritación de las mucosas, etc., que son consecuencia de la exposición a polvo, gases, vapores, humos y ciertas partículas, y a agentes sensibilizantes relacionados con determinadas actividades o con el uso de determinados productos.

84.2.2. Identificación de daños a la salud

Las técnicas e instrumentos para detectar e identificar los daños producidos por la acción de los agentes externos sobre la salud humana, son numerosas.

Precisamente, como consecuencia de la relación directa Medio Ambiente - industria - salud, nace una ciencia llamada Epidemiología, que estudia y enlaza las características del medio con la naturaleza, la frecuencia y la evolución de las enfermedades o patologías. De esta manera se pueden detectar nuevas enfermedades que afectan a la población, identificando los agentes ambientales que las causan.

La epidemiología tiene una doble vertiente:

- *Epidemiología retrospectiva*: se trata del análisis de la salud y de la mortandad de una población que estuvo expuesta a un riesgo ambiental, a través de certificados o diagnósticos médicos, con certificados de defunción, etc.
- *Epidemiología prospectiva*: vigilancia sistemática temporal de una población expuesta a un riesgo ambiental, para detectar la aparición de posibles enfermedades. Se trata de un estudio a largo plazo de los efectos sobre la salud de unas determinadas condiciones ambientales.

La epidemiología debe ser considerada y valorada como un instrumento imprescindible para la toma de decisiones respecto de la población.

DECIMOTERCERA PARTE

Contaminación atmosférica en interiores

CAPÍTULO 85

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LOCALES Y VIVIENDAS

85.1. BASES GENERALES

Antes decíamos *vamos a tomar el aire*, cuando estábamos en nuestras viviendas. Se sobreentendía que se salía de casa –aire viciado y contaminado– a la calle –aire limpio y puro–.

Ahora se sale de la vivienda o del trabajo a calles que suelen estar con una contaminación atmosférica dependiente de muchas circunstancias, y habría que distanciarse de la ciudad para alcanzar ese aire *limpio*, y no a cualquier lugar no urbano, pues existen amplias zonas donde la contaminación atmosférica originada por múltiples actividades llega transportada por los vientos.

En los países y en las ciudades existen normas, reglamentaciones y ordenanzas que restringen cada vez más las emisiones de las fuente fijas o móviles, por lo que en lo que se refiere a algunos contaminantes atmosféricos se ha conseguido una reducción apreciable.

Pero, ¿qué ocurre en nuestras viviendas? Pues que no existe ninguna reglamentación que controle la calidad del aire del interior.

Esto tiene como consecuencia nuestra permanencia durante muchas horas en un ambiente con mucho CO₂, con poco oxígeno y con contaminantes propios (emisiones de las personas y de los materiales internos) y ajenos (contaminación atmosférica de la ciudad).

Se debe tener en cuenta que pasamos una media de 20-22 horas al día en lugares cerrados (el 90% de nuestro tiempo), sea en nuestro domicilio, sea dentro de vehículos, sea en el trabajo, siendo las personas de riesgo (niños y ancianos) quienes más tiempo pasan en esos lugares.

Evidentemente, en vacaciones y los fines de semana la situación es diferente, pero aún así, se pasa un mínimo de 14-16 horas en lugares cerrados en esas fechas.

Por otra parte se realiza una media de 20.000 inspiraciones y espiraciones al

día, por lo que la *exposición* es enorme, y la relación salud-calidad del aire es íntima en lo que se refiere a determinadas afecciones.

Los *avances* de la civilización también han alcanzado a la tecnología y a los materiales de construcción, consiguiéndose mejor aislamiento térmico y de ventilación a costa de la calidad del aire interior, pues además se utilizan productos nuevos y se concentran las emisiones del humo del tabaco, de los

disolventes y de toda una serie de emisiones inertes o vivas, orgánicas o inorgánicas, que en su gran mayoría son filtradas por nuestro sistema respiratorio.

85.2. CONTAMINANTES BÁSICOS EN INTERIORES

A continuación se indican en una tabla bastante completa los grupos de contaminantes más importantes y los agentes más destacados.

CONTAMINACIÓN BÁSICA EN INTERIORES

Tipo o causa	Contaminante o fuente
Contaminantes procedentes del exterior	SO _x NO _x Pb O ₃ Ra
Contaminantes producidos en los propios edificios	Aparatos de combustión: <ul style="list-style-type: none"> • Cocinas de gas. • Mal funcionamiento de los aparatos de gas: <ul style="list-style-type: none"> – Intoxicación por CO. • Combustión de motores en lugares cerrados. Actividades de los vecinos: <ul style="list-style-type: none"> • Productos domésticos. • Equipamiento de oficinas. <ul style="list-style-type: none"> – Papel autocopiante. – Fotocopias. • Bricolaje: <ul style="list-style-type: none"> – Fuentes de riesgos tóxicos: <ul style="list-style-type: none"> • Productos de riesgo tóxico: <ul style="list-style-type: none"> - Disolventes. - Pigmentos. - Ácidos volátiles. - Monómeros. • Técnicas: <ul style="list-style-type: none"> - Soldaduras. - Decapado en caliente. Humo del tabaco: <ul style="list-style-type: none"> • Benceno. • Otros hidrocarburos. • Cadmio, polonio. • Dioxinas, nitrosaminas. • Plaguicidas.

Contaminantes producidos por los materiales	<p>Formaldehído:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fuentes: <ul style="list-style-type: none"> – Humo del tabaco. – Tableros aglomerados. – Espumas del urea-formol. – Caravanas de camping. – Otras fuentes. <p>Fibras minerales artificiales. Amianto. Productos de tratamiento de la madera:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lindano. • Pentaclorofenol.
Biocontaminantes	<p>El hombre como fuente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El cuerpo humano. • Escamación cutánea. • Olor humano. • CO₂. • Humedad. <p>Animales de compañía. Microorganismos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bacterias. • Virus. • Ácaros. • Vegetales. • Variantes. <p>Instalaciones en edificios:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Climatización. • Aire acondicionado. • Humidificadores. • Circuitos de distribución de agua caliente. • Baños jacuzzi.
Humedad	<p>Acciones de la humedad sobre los contaminantes. Protecciones contra la humedad exterior. Protecciones contra la humedad interior. Niveles de humedad</p>
Síndrome de los edificios insanos	—

85.3. CALIDAD DEL AIRE EN INTERIORES

La calidad del aire en los locales públicos y en las viviendas privadas casi nunca se tomó en serio bajo el punto de vista de la contaminación ambiental hasta los años 70 del siglo pasado.

La crisis del petróleo de 1973 provocó que la mayoría de los países desarrollados analizaran cada uno su situación energética para buscar soluciones a ese problema, y casi todos comprobaron, entre otras cosas, que dilapidaban mucha energía por diferentes vías, y entre ellas por la pérdida de calor en la calefacción.

En consecuencia, lo primero que hicieron en esa línea fue mejorar los sistemas de aislamiento para reducir esas pérdidas de calor, lo cual incluía la disminución del intercambio de aire entre el interior y el exterior.

Este confinamiento del aire empezó a crear con cierta frecuencia situaciones de degradación de su calidad que indujeron a considerarlas como problemas graves de sanidad pública, y en ese sentido se comenzó a analizarlas de forma sistemática e integral.

Así, un fenómeno que es consecuencia de ese problema es el *síndrome del edificio enfermo* (*sick building syndrome*), que se manifiesta en oficinas y centros de enseñanza con la aparición en muchos de sus usuarios de irritaciones en las mucosas y en la piel, dolores de cabeza, náuseas, etc.

El origen exacto de estas alteraciones no se conoce bien, aunque está claro que depende en gran parte de la calidad del aire del local, pues en cuanto se mejora la ventilación, esos síntomas desaparecen.

La calidad del aire en los interiores puede variar en función de diversos factores, tanto en su composición como en la concentración de los contaminantes presentes según el nivel de vida, el tipo de actividad que realicemos y según sea el ambiente en que nos desenvolvamos.

Debemos tener en cuenta que el aire es el vector de numerosas sustancias que comprenden gases, aerosoles, vapores, polvo orgánico o inorgánico, microorganismos, iones, etc., y de ondas sonoras.

Además puede interactuar con diversas radiaciones ionizantes, o puede sufrir la acción de campos electromagnéticos.

Por otra parte, el clima, en lo que se refiere a temperatura, humedad, presión atmosférica, radiación solar y viento, también influye en la calidad del aire de los interiores.

Así, el aire, como vector de sustancias y como elemento sometido a acciones físicas externas y a los fenómenos climáticos, cuando se encuentra confinado en interiores, también puede sufrir la acción de la mayoría de todos estos factores de alteración.

Finalmente hemos de indicar que la arquitectura, nuestro comportamiento y toda una serie de factores ajenos a ese elemento, también influyen directamente en su calidad.

85.4. CONCENTRACIÓN E INTERACCIONES DE CONTAMINANTES EN INTERIORES

En los interiores, donde el hombre pasa la mayor parte de su tiempo, la concentración de los componentes del aire y de los *añadidos* varía por el hecho del confinamiento, por la densidad humana y por su exposición-emisión (tiempo de estancia del hombre), por la influencia de la atmósfera externa (y de su contaminación) y, finalmente, por la emisión de los materiales y animales presentes y del propio hombre.

Así, en principio, el CO₂ es más abundante en los interiores, sobre todo si están bien aislados.

El CO mantiene su concentración al compararla con la del aire exterior, pues se absorbe poco y, en general, el intercambio de aire entre el interior y el exterior, aunque sea mínimo, es suficiente para mantener igual concentración.

Por lo que se refiere a las partículas, parece lógico que su concentración sea bastante inferior en los interiores a causa del aislamiento por una parte, y por otra por el uso del aire acondicionado (la mayor diferencia se presenta en el interior de los automóviles). Esta diferencia puede alcanzar hasta el 85-90% por debajo de la concentración en el exterior, e incluso más en función de la *calidad* del edificio.

En cuanto al SO₂, su concentración baja en forma parecida, aunque si el aislamiento es bueno, la concentración puede descender en algunos casos por debajo del 90% de la que exista en el exterior. A esto contribuyen los materiales de los interiores, pues algunos reaccionan con el SO₂ (como ocurre con el poliuretano y otros), por lo que su concentración en el aire interior puede ser aún mucho más baja.

Esta última observación referente a la reactividad de los materiales de los interiores con los contaminantes atmosféricos, puede originar efectos positivos (destrucción del contaminante) o negativos (sinergias o transformaciones, según el caso), pero debe tenerse muy en cuenta, pues frecuentemente va a condicionar la situación.

Estas interacciones ocurren mucho con ciertas partículas y aerosoles, ya que tienen una fuerte capacidad de adhesión a suelos, paredes o techos constituidos por materiales que por su carga eléctrica o por su composición, hacen que esas partículas se adhieran, sean absorbidas o sean transformadas.

Para el SO₂ las pinturas de emulsión y ciertos tejidos (fibras naturales) aumentan su velocidad de depósito, y lo mismo ocurre con el cuero (sillones y demás muebles tapizados con este material).

Los aceites, hidrocarburos y demás productos que se desprenden en las cocinas y en las calefacciones, pasan a los lugares cerrados y se depositan sobre las superficies presentes o permanecer parcialmente en el aire.

A pesar de la ventilación de las cocinas (extractores, ventiladores, filtros, ventanas abiertas, etc.), es un hecho la acumulación de grasas en su entorno, y lo mismo ocurre con ciertos sistemas de calefacción (estufas de petróleo o de gas, chimeneas de leña, etc.), que generan emisiones específicas en los interiores.

Finalmente insistimos en el hecho de que muchos contaminantes pueden unirse o reaccionar con los múltiples materiales existentes en los interiores, por lo que la atmósfera en estos lugares, que es donde más tiempo pasa el hombre, tiene unas características especiales que deben ser analizadas para poder establecer de alguna forma planes de mejora de la calidad de su aire, lo que redundará de forma inmediata en la salud humana.

CAPÍTULO 86

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, EDIFICIOS Y CONTROL EN RELACIÓN CON LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN INTERIORES

86.1. EDIFICIOS CLIMATIZADOS

La climatización provoca la presencia de una atmósfera que es procesada continuamente y que es filtrada y humi-

dificada, de manera que proporciona al hombre unas condiciones de confort que mejoran su calidad de vida.

Puede ocurrir sin embargo lo que se indica en la tabla adjunta.

PERTURBACIONES QUE PUEDE PROVOCAR LA CLIMATIZACIÓN DE LOS EDIFICIOS

Perturbación	Causas	Efectos
Sick building syndrome	Formaldehído, humo del tabaco, microorganismos, falta de iones negativos, baja humedad del aire, exceso de temperatura, emanaciones de pinturas, disolventes y otros materiales presentes, mala ventilación.	<ul style="list-style-type: none">• Cefaleas.• Somnolencia.• Irritación de las mucosas.• Fatiga.• Opresión torácica.• Piel seca.
Productos alérgicos	La presencia en los sistemas de humidificación de: <ul style="list-style-type: none">– Esporas de hongos.– Bacterias.– Endotoxinas.– Desinfectantes.	Los propios del asma.
	Contaminación de los sistemas de humidificación Presencia de precipitinas	Alveolitis alérgica extrínseca: <ul style="list-style-type: none">• Escalofríos.• Fiebre.• Jadeo.• Infiltración de tejido pulmonar.• Posible fibrosis crónica.

(Continuación)

Perturbación	Causas	Efectos
Productos alérgicos (cont.)	Presencia de un antígeno en los humidificadores: <ul style="list-style-type: none"> • Bacterias. • Amebas. • Endotoxinas. 	Fiebre de los humidificadores: <ul style="list-style-type: none"> • Cefaleas. • Fatiga. • Dolores musculares. • Fiebre. • Jadeo. • Repetición a los pocos días.
Agentes infecciosos	Infecciones (sobre todo respiratorias) provocadas por: <ul style="list-style-type: none"> • Bacterias. • Hongos. • Virus. 	Tuberculosis. Neumonía (Legionella). Micosis (Aspergillus). Paperas.

Esto no quiere decir que la norma sea la existencia de estos problemas de salud, sino más bien lo contrario, pues una filtración del aire y su humidificación, si están realizadas correctamente, pueden ser beneficiosas frente a una atmósfera de interior cargada de CO₂, de emanaciones de los materiales presentes, de humo de tabaco y de otros mu-

chos productos ya citados en otros apartados.

86.2. DISOLVENTES UTILIZADOS EN INTERIORES

En la tabla adjunta se indican los productos y sus efectos sobre la salud.

DISOLVENTES UTILIZADOS EN INTERIORES Y SUS EFECTOS SOBRE LA SALUD

Producto químico	Producto comercial o uso	Efectos sobre la salud
Alcanos	Heptano Disolventes universales Limpiadores de pinceles Pinturas Lacas Colas	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso en general Anemia Daños en la circulación
	Hexano Gasolinas ligeras Disolventes universales Lacas Colas de secado rápido	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Atrofias musculares Alergias Irritante para la piel Irritante para las mucosas
	Nonano Disolventes universales Limpiadores de pinceles Pinturas Lacas Colas	Posibles daños en el cerebro Posibles daños al sistema nervioso

(Continuación)

	Producto químico	Producto comercial o uso	Efectos sobre la salud
Alcanos (continuación)	Octano	Disolventes universales Limpiadores de pinceles Pinturas Lacas Colas	Posibles daños al cerebro Posibles daños al sistema nervioso
	Pentano	Gasolinas ligeras Detergentes Aceites Grasas	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Alergias Irritante para la piel Irritante para las mucosas
Alcoholes	Butanol	Goma-laca Lacas celulósicas Colas Lacas sintéticas Pinturas sintéticas	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Irritante para la piel Irritante para las mucosas
	Etanol	Pinturas naturales Lacas celulósicas Goma-laca Detergentes	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Daños al hígado
	Isopropanol	Goma-laca Lacas de celulosa Otras lacas Lacas sintéticas Pinturas sintéticas	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso y en el hígado Irritante para la piel y las mucosas
	Metanol	Colas Pinturas especiales Lacas especiales	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Pérdida de vista Clasificado como muy tóxico
	Fenilmetanol	Lacas celulósicas Otras colas Lacas sintéticas Pinturas sintéticas	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Irritante para la piel Irritante para las mucosas
	Propanol	Goma-laca Lacas celulósicas Otras colas Lacas sintéticas Pinturas sintéticas	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Daños en el hígado
Compuestos aromáticos	Etilbenceno	Numerosas colas Lacas sintéticas Pinturas sintéticas Ceras Limpiadores de pinceles Disolventes universales	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Hemorragias de la piel Hemorragias de las mucosas Penetra en el organismo a través de la piel

(Continuación)

	Producto químico	Producto comercial o uso	Efectos sobre la salud
Compuestos aromáticos (continuación)	Estireno	Todas las lacas Pinturas de poliéster Colas	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Daños en el hígado Posiblemente cancerígeno
	Tolueno	Colas Limpiadores de pinceles Lacas Pinturas sintéticas Ceras Disolventes universales	Daños en el cerebro Daños en el hígado Daños en el sistema nervioso Posiblemente cancerígeno
	Xileno	Numerosas colas Lacas Pinturas sintéticas Ceras Limpiadores de pinceles Disolventes universales	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Daños en el hígado Posiblemente cancerígeno
Hidrocarburos clorados	Diclorometano	Decapantes muy poderosos Cauchos clorados Colas cloradas Lacas cloradas	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Posiblemente cancerígeno
	Percloroetileno	Desengrasantes de metales Limpieza en seco	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Posiblemente cancerígeno
Ésteres	Acetato de butilo	Colas con acetato de polivinilo Pinturas con acetato de polivinilo Cauchos clorados Acrilatos Nitrocelulosas	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso
	Acetato de etilglicol	Goma- laca Lacas de secado rápido Cauchos clorados Acrilatos Poliésteres	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Penetra en el organismo a través de la piel
	Acetato de metilo	Lacas celulósicas Poliésteres Resinas Melaninas	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Penetra en el organismo a través de la piel
	Butilglicol	Goma-laca Lacas celulósicas Resinas Cauchos clorados Acrilatos Carbamidas	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Penetra en el organismo a través de la piel

(Continuación)

	Producto químico	Producto comercial o uso	Efectos sobre la salud
Ésteres (continuación)	Dietileter	Goma-laca Lacas celulósicas	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Puede provocar anemias
	Etilglico	Goma-laca Lacas celulósicas Resinas Cauchos clorados Acrilatos Melaninas	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Penetra en el organismo a través de la piel
	Tetrahydrofurano	Acrilatos Acetato de polivinilo Policloruro de vinilo Cauchos clorados	Pérdida de conocimiento Daños en el hígado Daños en los riñones
Cetonas	Acetona	Lacas de secado rápido Cauchos clorados	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Eczemas Anemias en casos generales
	Ciclohexanona	Lacas de secado rápido Cauchos clorados Esmalte de uñas Alquitranes Polivinilacetato Polivinilbutirato	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso
	Metiletilcetona	Lacas de secado rápido Colas de secado rápido	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso Edemas pulmonares Daños en el hígado Daños en los riñones
	Metilisobutilcetona	Lacas de secado rápido Colas de secado rápido Poliéster Policloruro de vinilo	Daños en el cerebro Daños en el sistema nervioso
Terpenos	Terpenos de los Agrios	Pinturas Lacas	Alergias Posiblemente cancerígeno
	Aceite de trementina	Pinturas Colas Lacas Polivinilacetato Polivinilbutirato	Alergias Eczemas Sarna

86.3. CRITERIOS PARA LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

En la tabla adjunta se indican los criterios básicos y sus efectos.

CRITERIOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE INTERIORES EN RELACIÓN CON LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

criterio	Efecto
Masa volúmica (densidad)	Mide el peso de un volumen dado Peso o ligereza del material <i>Material denso:</i> Peso elevado Buen aislamiento sonoro Buena inercia térmica Buena conductividad Buena resistencia mecánica Poca retención de agua <i>Material poco denso:</i> Buen aislante térmico Poca resistencia a la compresión
Conductividad térmica	Calidad aislante.
Resistencia térmica	Capacidad de oponerse al paso del calor.
Capacidad térmica	Capacidad de almacenar calor.
Efusividad térmica	Forma de transportar los flujos térmicos.
Resistencia a la difusión del vapor de agua	Según su forma de porosidad. Es la forma de permitir el intercambio de gases, de líquidos y de partículas sólidas entre dos caras de un muro.
Capilaridad	Capacidad de empaparse (saturarse) de agua. Capacidad de absorción de agua. Capacidad de succión.
Tasa de saturación del agua	Cantidad de agua que puede absorber un material.
Poder adsorbente (higroscópico)	Capacidad de tomar gases por adherencia y de soltarlos si desciende la humedad del material.
Carga electrostática	Los materiales cargados con electricidad estática atraen las partículas de polvo.
Radiactividad	Se genera radon, que produce radiación α .
Toxicidad	Muchos materiales utilizados en los edificios son tóxicos, como ocurre con el formaldehído, los disolventes en general, el estireno, el PVC, etc. (veáanse los epígrafes correspondientes).
Transmisión de calor (coeficiente K)	Confort. Flujo de calor que atraviesa un muro.
Inercia térmica	Cantidad de calor que puede absorber un muro (como la capacidad térmica de un material).
Constante de tiempo	Tiempo que tardan en equilibrarse térmicamente todas las capas que componen un muro.
Espesor de aire equivalente	Equivalente de grosor de aire para una misma resistencia a la difusión del vapor.
Clases de resistencia de materiales	Resistencia a la compresión y a la deformación.
Consumo de energía	Energía artificial que se ha consumido para fabricar un material.

86.4. MODELOS

Simplemente indicamos que se pueden utilizar modelos similares, y más o menos complejos, que los modelos de concentración de contaminantes que se aplican en las predicciones de contaminación en ambientes abiertos.

Se debe tener en cuenta que todos los modelos simplifican mucho la situación, separándose así de la realidad.

En principio, todos se basan en el cálculo del balance de materiales:

$$A = B + C - D - R, \text{ siendo:}$$

A = Flujo de contaminantes que salen con el aire del local.

B = Flujo de contaminantes que entran.

C = Contaminantes que se generan en el local.

D = Contaminantes que se eliminan en el local.

R = Contaminantes que se acumulan en el local.

$$\text{Por otra parte, } C = E + F + G + H + I$$

siendo:

E = Contaminantes que producen los aparatos presentes en el local.

F = Contaminantes que generan los materiales presentes en el local.

G = Contaminantes que emiten los disolventes presentes en el local.

H = Contaminantes que producen las personas en el local.

I = Contaminantes que producen los animales en el local.

Además, $D = K + L + M + N$, siendo:

K = Contaminantes absorbidos por los sistemas de depuración del local.

L = Contaminantes absorbidos por los materiales presentes en el local.

M = Contaminantes transformados por los materiales presente en otros inocuos.

N = Contaminantes absorbidos por personas y animales presentes en el local.

Así, será: $R = B + C - A - D$, es decir:

$$R = B + (E + F + G + H + I) - A - (K + L + M + N)$$

Insistimos en señalar que cuantos más datos se incluyan en el modelo, más aproximación se podrá hacer a la realidad.

86.5. SITUACIONES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

En un edificio, el uso que se da de cada espacio interior va a determinar en gran parte su situación de contaminación, como se indica en las tablas adjuntas.

SITUACIONES GENERALES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN INTERIORES

Espacio	Situación de contaminantes atmosféricos
Cocina	<p>Aceites Emanaciones de alimentos Emanaciones de materiales en ebullición Emanaciones de líquidos bajo fuerte calor Olores Calor Subida de los NO_x si la cocina es de gas Emanaciones y emisiones de motores eléctricos y compresores Extractores de gases condicionan la calidad del aire Ventanas abiertas con frecuencia condicionan la calidad del aire</p>
Hall	<p>Mucha ventilación e intercambio intenso de aire con el exterior Emisiones de materiales Poco humo de tabaco Contaminación similar a la del exterior Calefacción</p>
Dormitorio	<p>Ventilación variable o poca A/A condiciona según su calidad Humo de tabaco en fumadores Emisiones de ropa, muebles, camas, alfombras Calefacción</p>
Baño	<p>Ventilación variable Calefacción Agua caliente Emisiones de todos los productos cosméticos Olores</p>
Salón-comedor	<p>Poca ventilación Humo de tabaco en fumadores Emisiones de materiales: muebles, alfombras, sillones, sofás Emisiones de aparatos de música, TV, video, etc. Emisiones de personas Emisiones de plantas (si las hay) Emisiones de animales (si los hay)</p>
Oficina	<p>Ventilación dependiente de la calidad del A/A (si lo hay) Ventilación escasa en general Emisiones de los aparatos: Ordenadores, fotocopiadoras, fax, etc. Emisiones de las personas Humo de tabaco (si se permite) Polvo y residuos del papel y demás Emanaciones de los muebles de oficina</p>
Discoteca	<p>Mucho humo de tabaco Ventilación insuficiente, muy dependiente de la calidad del A/A Emisiones abundantes de las personas por aglomeración Emanaciones de los materiales (en general muy poco controladas) Olores</p>
Cine o teatro	<p>Ventilación suficiente en general, dependiente de la calidad del A/A Emanaciones de los materiales: butacas, alfombras, muros Emanaciones de los sistemas de proyección y sonido, si están en la sala Emisiones de las personas</p>
Taller	<p>Todo depende del tipo de actividad y de la calidad (nivel) dentro del sector profesional</p>

FUENTES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR LA INFRAESTRUCTURA EN INTERIORES DE DOMICILIOS Y OFICINAS

Equipamiento	Muebles y decoración
Cocinas de gas Cocinas eléctricas Cocinas de carbón Cocinas de leña Hornos de microondas Placas vitrocerámicas Baños: Saunas Jacuzzi Calefacción: de carbón de gas eléctrica por suelo radiante por acumuladores de calor de leña Lavandería: Lavadora Detergentes Aparatos e instrumentos específicos: Electrodomésticos Aparatos de oficina TV, video, radio, etc.	Madera Tapizados Cemento Yesos y escayolas Barnices y colas Aislantes Linóleo Focos de luz: Luz fluorescente Bombillas Focos halógenos Lámparas de vapor de mercurio y otros Muebles: Barnices Chapa Moquetas Alfombras Parquet Pinturas Revestimientos plásticos o vegetales Cortinas Visillos Asientos: Sofás Sillones Sillas Cojines Aparatos e instrumentos específicos

DECIMOCUARTA PARTE

Control de emisiones

CAPÍTULO 87

CRITERIOS Y PROCEDIMIENTOS DE TRATAMIENTO

87.1. LA PREVENCIÓN, EL CONTROL Y LOS ESTÁNDARES DE EMISIÓN

Para controlar las emisiones de contaminantes atmosféricos, se pueden enfocar las soluciones según se indica en la tabla adjunta.

PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

- Prevención en las fuentes emisoras:
 - Combustibles.
 - Ubicación.
 - Impacto ambiental.
- Prevención mediante el control de las emisiones:
 - Tratamiento de partículas.
 - Tratamiento de gases.
- Prevención por acción global:
 - Urbanismo.
 - Diseño.
 - Reducción de efectos globales:
 - Capa de ozono.
 - Efecto invernadero.
- Control de inmisiones.

La prevención siempre es mejor que el tratamiento. El problema es que la industria, las ciudades y los transportes ya existen, y deben ser estudiados y debe planificarse la acción bajo diferentes puntos de vista, de manera que se consiga mejorar la calidad de las emisiones hasta niveles aceptables.

Y ¿cuáles son esos niveles aceptables? Pues los que indique la legislación vigente, que en principio se rige por criterios sanitarios a medio y largo plazo, similares en casi todos los países desarrollados a los de la OMS.

Para este tema consúltese la Parte correspondiente a Legislación, en la que se indican los estándares de emisión en los países de la Unión Europea.

87.2. FACTORES BÁSICOS INCIDENTES

En la tabla adjunta se indican los factores fundamentales que influyen sobre la

concentración de contaminantes atmosféricos, para poder decidir, con esta base, la

mejor metodología a seguir para prevenir o para controlar y reducir las emisiones.

FACTORES FUNDAMENTALES QUE INFLUYEN SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Sector	Factor	Proceso afectado
Factores climáticos	Dirección del viento Velocidad del viento Humedad Condensación Cambios de temperatura Cobertura de nubes Presión atmosférica Calmas meteorológicas Inversiones térmicas Radiación solar Gradiente térmico Precipitaciones	Dirección de la masa de aire contaminado. Dispersión, difusión y transporte de la masa de aire contaminada. Disolución de contaminantes. Disolución y transporte de contaminantes. Ascenso o descenso de la masa de aire contaminada. Procesos convectivos. Desplazamiento vertical de la masa de aire contaminada. Sedimentación. Sedimentación, concentración. Reacciones fotoquímicas. Desplazamiento vertical de la masa de aire contaminada. Lluvias ácidas, arrastre de contaminantes a otra fase (suelo).
Factores de ubicación	Suelo Masas de agua próximas Topografía: – Montañosa – Llana Orientación Vegetación	Absorción, captación, adsorción, reacción de/con los contaminantes. Absorción, dilución, calentamiento, humidificación. Acción de laderas, valles y cimas montañosas, acción de valle. Acción de la temperatura y de los vientos. Acción de la luz, reacciones fotoquímicas, acción de la temperatura. Absorción, adsorción, reacción de los contaminantes.
Factores de contaminación	Concentración Concentración de otros contaminantes Sinergismos Reacciones con suelo, agua y vegetación Reacciones con la humedad atmosférica	Reacciones químicas. Reacciones químicas. Potenciación de los efectos de la contaminación. Transformación y reacciones químicas. Transformación y reacciones químicas.
Factores técnicos	Tipo de tratamiento de los contaminantes Altura de la chimenea Temperatura de salida de los contaminantes por la chimenea Caudales de emisión Concentración	Mayor o menor eficacia y calidad de las emisiones. Transporte y dispersión de los contaminantes. Fuerza ascensional de la masa contaminada emitida. Altura que alcanza la masa contaminada emitida. Intensidad de los efectos, sedimentación.

87.3. BASES Y SISTEMAS DE CONTROL

En la tabla adjunta se indican las líneas básicas de control.

LÍNEAS GENERALES DE CONTROL

- Estándares de emisión apropiados.
- Mejora de la difusión y dispersión.
- Cambio de procesos.
- Prevención.
- Reciclado.
- Recuperación.
- Reducción del control de emisiones.
- Reducción de las emisiones.
- Eficiencia del tratamiento.
- Eficacia de descontaminación.
- Cambios en los volúmenes de emisión.
- Mejoras en la penetración.

Evidentemente, cada agente contaminante o cada grupo de agentes tendrá un sistema o unos sistemas de control específicos, por lo que a continuación se tratarán algunos de ellos a nivel individual.

87.4. PROCEDIMIENTOS DE TRATAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

En esta obra indicaremos los procedimientos generales de tratamiento, y en cada grupo específico de contaminantes se señalarán los sistemas más apropiados con más detalle, pero sin entrar en una descripción detallada de los equipos, pues por una parte existe una infinidad de ellos, y por otra, esto sería el objeto de una obra de ingeniería química e industrial especializada en estos equipos, y a ese tipo de publicaciones remitimos al lector que quiera ampliar la información al respecto.

Los sistemas generales de tratamiento de las emisiones de contaminantes a la atmósfera son los que se indican en la tabla adjunta.

TRATAMIENTOS GENERALES DE LAS EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Grupo de contaminantes	Sistema básico	Tipo	Proceso	Sistemas y contaminantes tratados
Partículas sólidas	Separación	Físico	Separación mecánica Separación hidráulica Separación electrostática Separación por ultrasonidos Filtros Sistemas combinados	Humos, cenizas volantes, polvos negros de carbono, pigmentos, polvos metalúrgicos y, en general, toda clase de partículas.
Gases y aerosoles líquidos	Absorción	Físico	Solubilización casi siempre en agua.	Ácido acético Ácido fórmico Formaldehído Acetona Etanol Metanol
		Químico	Reacciones entre el líquido de lavado y los componentes contaminantes del gas. Se utiliza casi siempre agua que se debe tratar para reciclarla con sistemas de neutralización, precipitación, floculación, recirculación y filtración.	Líquidos de lavado alcalinos como sosa cáustica o lejía potásica para separar aerosoles, fenoles, mercaptanos y ácidos orgánicos. Líquidos de lavado, ácidos como ácido sulfúrico diluido y otros para separar aminas y compuestos orgánicos azufrados.
		Biológico	Descomposición bioquímica por microorganismos en suspensión en el líquido de lavado. Extracción periódica de la producción neta de biomasa.	Se utiliza biomasa en suspensión, biofiltros de todo tipo, incluido el suelo. Se tratan aminas, etanol, fenoles y metilmercaptanos. Se usan mucho como procedimientos de afinado.
	Adsorción	Físico	Retención de moléculas de gas, aerosoles líquidos o sustancias disueltas. Se realiza sobre la superficie de una sustancia sólida, como carbón activo. Se opera en ciclos o en continuo. El material adsorbente se puede regenerar por desorción con vapor o con un gas inerte.	Tricloroetano Xileno Clorobenceno Metilglicol
	Combustión	Químico	<u>Combustión catalítica</u> Oxidación térmica a $T \leq 500$ °C <u>Combustión normal</u> Oxidación térmica a $T \leq 800$ °C <u>Combustión a alta temperatura</u> Oxidación térmica a $T \leq 1800$ °C <u>Condición general</u> Los gases resultantes deben ser tratados por absorción para eliminar SO_x , NO_x , metales, etc.	Ácidos orgánicos Disolventes Aerosoles Hidrocarburos Fenoles Plastificantes

87.5. EFICACIA DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS: EFICIENCIA, PENETRACIÓN Y FACTOR DE DESCONTAMINACIÓN

Está claro que cada uno de los múltiples sistemas de tratamiento de contaminantes tendrá unas características que serán función de la tecnología que se aplique, de su calidad, del tipo de contaminante a tratar, del caudal, de la concentración y de las diversas circunstancias que corresponden a cada caso.

La eficiencia o eficacia de un sistema de tratamiento de contaminantes atmosféricos se define como:

$$\eta = \frac{x-y}{x} 100, \text{ siendo:}$$

η = Eficiencia, en %

x = Concentración del contaminante en la entrada.

y = Concentración del contaminante en la salida.

Entonces, la concentración del contaminante a la salida del sistema de tratamiento se podrá expresar como:

$$y = \frac{100 - \eta}{100} x$$

Como generalmente la eficacia de los sistemas de tratamiento es alta, pues casi siempre supera el 90%, se suele utilizar otra expresión como es la penetración, que se representa como $p = 100 - \eta$.

Asimismo se usa el factor de descontaminación FD :

$$FD = \frac{1}{P} = \frac{1}{100 - \eta}$$

También se ha utilizado el índice de descontaminación ID , que se expresa como $ID = \log FD$.

CAPÍTULO 88

TRATAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS CONTAMINANTES

88.1. BASES GENERALES. CAPTACIÓN

Estamos como siempre: el mejor tratamiento es evitar la emisión de las partículas en las fuentes que las producen. Esto puede realizarse por diferentes métodos, que abarcan desde el riego de áreas que contienen polvo, como en las industrias extractivas o en las obras públicas de infraestructura, hasta la recogida manual (barrido) o mecánica de residuos, como los sedimentos en las calles de una fábrica de fertilizantes, pasando por la instalación de sistemas industriales no productores de partículas.

Por otra parte, están los sistemas de tratamiento que se utilizan en la industria, de los que se indica un resumen en la tabla adjunta.

Antes de llegar a la fase de tratamiento, sobre todo en la industria y en general en interiores (viviendas, oficinas, etc.), es necesario disponer de una instalación de captación de la masa de aire contaminada, de manera que pue-

da ser conducida a los sistemas de tratamiento.

Para ello, se deben colocar los sistemas de captación lo más cerca posible de los puntos de emisión, y si es viable, incluso confinar estas fuentes, de manera que la corriente de gas con las partículas se dirija íntegramente al tratamiento.

Si las partículas están adhiriéndose o sedimentando continuamente, como ocurre en la industria metalmecánica, por ejemplo, se pueden elegir dos vías para la captación: una, rascar y recoger periódicamente el polvo sedimentado; la otra es instalar un sistema que desincruste el polvo adherido y junto con el sedimento, que lo ponga en suspensión para que sea evacuado por el sistema de captación.

Existen infinidad de sistemas de captación, basados todos ellos en el establecimiento de una red de tuberías con ramificaciones a cada punto de producción de partículas, que mediante una soplante o un ventilador aspiran la masa de aire

que contiene las partículas, y la arrastran hacia el sistema de tratamiento.

Los captadores son muy variados, y deben adaptarse a cada problema en lo que se refiere a forma, posición y caudal de absorción.

A veces se combinan con una pequeña soplante cuando el captador está a cierta distancia del punto de emisión de las partículas, pues esa soplante empujará la masa de aire contaminado hacia el captador, que la aspira.

SISTEMAS BÁSICOS DE CAPTACIÓN Y SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS

- Separación mecánica:*
 - Por gravedad
 - Por dispersión
 - Por inercia
 - Centrífuga
 - Ciclones
 - Otros
- Separación hidráulica:*
 - Venturi
 - Lavadores pulverizadores
 - Lavadores de placas
 - Lavadores de relleno
 - Condensadores
- Filtros:*
 - De mangas:
 - Con vibración
 - De flujo inverso
 - De ondas sonoras
 - Otros
- Separadores electrostáticos*
- Separación por ultrasonidos*
 - Sirenas rotativas
 - Sirenas estáticas
 - El proceso se basa en:
 - Colisión
 - Atracción
 - Efecto pared
 - Presión de radiación
- Sistemas combinados*

Como orientación general indicamos los sistemas de captación y separación apropiados según el tamaño de las partículas.

SISTEMAS DE CAPTACIÓN ADECUADOS PARA CADA TAMAÑO DE PARTÍCULAS

Sistemas de captación	Dimensiones de las partículas (en μ)
Cámaras de sedimentación	100-10.000
Separadores centrífugos	1-1000
Scrubers	0,01-100
Filtros de tejido (mangas)	1,01-100
Filtros ordinarios de aire	10-100
Filtros de alta eficacia	0,01-10
Impactadores	10-10000
Precipitadores térmicos	0,01-10
Separadores mecánicos	10-1000
Precipitadores electrostáticos	0,01-100

88.2. SEPARACIÓN MECÁNICA

Sistemas de separación por gravedad

Consisten en una cámara alargada, en la que al entrar el gas contaminado su velocidad desciende, lo que provoca el depósito de las partículas sedimentables.

Es un sistema eficaz para las partículas gigantes y gruesas, pero se ha quedado anticuado a causa de las dificultades de limpieza, que debe ser manual.

Solamente se utiliza en instalaciones con gran producción de partículas gruesas, antes de tratar el gas contaminado con otros sistemas más eficaces.

El rendimiento de retención será:

$$E_g = \frac{U_s A}{Q}, \text{ donde:}$$

E_g = Rendimiento ponderal de la retención.

U_s = Velocidad final de sedimentación de las partículas.

A = Superficie de la cámara (horizontal).

Q = Caudal volumétrico del gas.

Por otra parte, la velocidad media del gas en la cámara será:

$$V = \frac{Q}{s}, \text{ donde:}$$

V = Velocidad media del gas.

Q = Caudal.

S = Sección vertical de la cámara.

El tiempo de paso de una porción de gas por la cámara será:

$$t = \frac{L}{V}, \text{ donde:}$$

t = Tiempo de paso.

L = Longitud de la cámara.

La fracción captada es (según lo anterior y según la Ley de *Stokes*):

$$\eta = \frac{LgD^2\rho}{HV18\mu}, \text{ donde:}$$

η = Fracción captada.

g = Aceleración de la gravedad.

D = Tamaño de las partículas.

ρ = Densidad.

H = Altura de la cámara.

μ = Viscosidad del fluido.

Si se coloca una serie de placas horizontales (sistemas *Howard*), se dispone de una cámara de canales múltiples, más eficaz pero con más problemas de limpieza.

Sistemas de tratamiento por dispersión

Esta denominación creemos que es la más correcta para las chimeneas, pues realmente son instalaciones que emiten los gases procedentes de las diversas actividades contaminantes que previamente han sido tratados en las instalaciones correspondientes, de manera que la emisión por la chimenea cumpla la normativa legal vigente.

Para ampliar este tema consúltense los capítulos correspondientes a la legislación de la Unión Europea y a la española (Directiva Comunitaria 779/80, Real Decreto 1613 de 1 de agosto de 1985, etc.), en los que se indican las fórmulas, normas y cálculos, tanto de emisiones como de inmisión y de altura de las chimeneas.

En principio se establecen los valores de referencia de los niveles de emisión y de inmisión.

La concentración máxima de contaminantes a nivel del suelo se calcula con la fórmula:

$$C_m = CMA - CF, \text{ siendo:}$$

C_m = Concentración máxima de contaminantes a nivel del suelo.

CMA = Valor de referencia.

CF = Contaminación de fondo.

La altura de una chimenea se calcula, según la legislación, con la fórmula:

$$H = \sqrt{\frac{AQF}{C_m}} \sqrt[3]{\frac{N}{V\Delta T}}, \text{ siendo:}$$

H = Altura de la chimenea.

A = 70 · I_c = Condiciones climatológicas.

Q = Tasa máxima de emisión de partículas.

F = Coeficiente dependiente de la velocidad de sedimentación de las partículas.

C_m = Concentración máxima de contaminantes a nivel del suelo.

N = Número de chimeneas a distancia inferior a 2H.

V = Caudal emitido de gases.

ΔT = T_s – T_m.

$$I_c = \frac{\Delta T_1 + 2\delta t}{T_m} + \frac{80}{H}$$

T_m = Temperatura media anual.

δt = Diferencia entre temperaturas medias.

ΔT₁ = Máxima oscilación de temperaturas.

T_s = Temperatura de los gases a la salida de la chimenea.

Sistemas de separación por inercia

Estos sistemas se basan en someter la corriente de gas contaminado a cambios

bruscos de dirección, de manera que las partículas que arrastra, debido a su inercia, siguen trayectorias menos curvas que las de las líneas de corriente de la masa gaseosa, por lo que chocan con las superficies del separador y se recogen en colectores.

Existen muchos tipos de separadores por inercia con cámaras que básicamente pueden ser de cuatro diseños diferentes:

- *Cámaras de celosía o de persianas:* Son similares a una persiana, contra cuyos elementos chocan las partículas y sedimentan, mientras que el gas pasa a través de las persianas.
- *Cámaras de desviación:* Se basan en provocar un cambio de dirección de la corriente gaseosa para que rodee un obstáculo, contra el que chocarán las partículas al no poder desviarse debido a su inercia, por lo que después se depositarán bajo ese obstáculo.
- *Cámaras de película:* En ellas se hace describir una espiral al gas contaminado, en la que por la parte externa del conducto existen unos orificios por los que salen las partículas y se recogen fuera.
- *Cámaras de orificios de impacto:* Se basan en una serie de placas perforadas contra la que choca la corriente de gas contaminado. Las partículas se detienen y se recogen abajo.

Este sistema es bastante eficaz para capturar aerosoles líquidos.

Sistemas centrífugos de separación

Se basan en que la corriente de gas contaminado describa una trayectoria helicoidal dentro de una tolva, de manera que las partículas, por la fuerza centrífuga, se proyecten contra las paredes de la tolva y vayan cayendo al fondo del depósito.

Para favorecer el rendimiento de estos aparatos, que genéricamente se denominan ciclones, se deberá reducir su diámetro y se deberá aumentar la velocidad de circulación (el caudal), y sobre todo el primer parámetro, pues la aceleración centrífuga es inversamente proporcional al radio de giro. En cuanto al segundo parámetro, las pérdidas de carga aumentan con el cuadrado de la velocidad, por lo que esta se podrá aumentar hasta límites a partir de los cuales no es interesante por un descenso excesivo del rendimiento.

Los ciclones se caracterizan, según la fórmula de *Lapple*, por el Diámetro de corte, o diámetro equivalente de la partícula para el que el aparato tenga una eficacia de retención del 50%.

La expresión es:

$$D = 2,88 \sqrt{\frac{\mu}{2\pi} \frac{\mu H}{NrVp(\rho_p - \rho)}}$$

siendo:

D = Diámetro de corte.

μ = Viscosidad del gas.

H = ϕ o anchura de la entrada del gas contaminado.

N_r = Número de revoluciones de la partícula en su recorrido por el ciclón.

V_p = Velocidad de la partícula.

ρ = Densidad del gas contaminado.

ρ_p = Densidad de la partícula.

Si se utilizan en grupos en paralelo, que son los multiciclones, se reducen mucho las dimensiones, teniendo en común la entrada del gas, su salida y el depósito de recogida de partículas.

Los rotoclones son una variante con una soplante interna que crea la fuerza centrífuga para la separación.

El rendimiento de los ciclones es mayor cuanto mayores sean las partículas y cuanto más elevada sea su concentración.

Estos aparatos pueden tener problemas de abrasión, que serán función de la velocidad de circulación de las partículas, de la dureza de estas, de su tamaño, de su forma y de su concentración. Los puntos más sensibles son las soldaduras, las partes cónicas y los depósitos de recogida, por lo que deberán ser protegidos con revestimientos especiales.

88.3. SEPARACIÓN HIDRÁULICA

Este conjunto de sistemas basa su funcionamiento en la captación por agua o por agua con productos mejorantes.

Separadores de escorrentía

Los gases contaminados chocan y se deslizan sobre unas paredes por las que

discurre una lámina de agua, por lo que actúan el efecto de impacto, la difusión y la atracción electrostática.

Separadores de relleno (mixtos)

Se hace pasar la corriente de gas contaminado hacia arriba, a través de una masa de bolas de plástico que constituirán como un lecho fluidificado. Por encima se pulveriza agua que caerá sobre las bolas y sobre el gas, por lo que se consiguen múltiples efectos:

- Contacto interno de las partículas con la película de agua que cubre cada bola.
- Arrastre hacia abajo por el agua pulverizada
- Movimiento constante de las bolas provocado por el paso del gas y por la caída de agua.

Recogida de gotas en la parte superior, que en su caída también arrastrarán partículas.

Torres de lavado

Se pueden rellenar con diversos materiales, para que la corriente de gas contaminado las atraviese hacia arriba y contacte lo más posible con las películas de agua que recubren esos materiales. Suelen tener además, como en el caso anterior, pulverizadores de agua en la parte superior, y pueden estar rellenas con material fijo o, como en el caso anterior, con material flotante.

Pulverizadores

La corriente del gas contaminado atraviesa una torre o un depósito sobre el que se pulveriza agua.

Al chocar las partículas con el agua pulverizada son captadas por esta y arrastradas al depósito o tolva de recogida, en el que se forman lodos.

Suelen utilizarse con frecuencia sistemas mixtos:

- Pulverizador - lavador.
- Pulverizador - separador de relleno.
- Pulverizador - separador centrífugo.
- Pulverizador - separador de escorrentía.
- Pulverizador – Venturi.

Aparatos con tubo de Venturi

El gas contaminado pasa por un tubo de *Venturi*. En la parte más estrecha del tubo se inyecta agua pulverizada que al ir más lenta que el gas que entra irá captando las partículas que chocan con ella. Las partículas de agua atomizada van adquiriendo velocidad al incorporarse a la corriente de gas, pero durante ese período previo, su choque con las partículas sólidas es constante, hasta que ambas masas se desplazan a igual velocidad. Se van aglomerando así en pequeñas masas que van depositándose al fondo.

El sistema puede ser rectilíneo horizontal, con un ciclón al final, puede ser en forma de dos espirales en línea, una

convergente y la otra divergente, puede ser vertical, puede tener inyecciones de agua laterales que chocan contra unas placas deflectoras formando una cortina de agua que debe atravesar el gas contaminado, o puede ser de estrechamiento (caudal) variable.

Aparte, los aparatos Venturi se pueden complementar con sistemas para cargar eléctricamente las partículas, con generadores de microneblas o con inyecciones de aire comprimido o de vapor.

Lavadores de placas

El chorro de gas contaminado es sometido a una pulverización de agua y después choca con unas placas deflectoras, recogiendo las partículas en unos separadores que varían según sea el sistema (álabes, tolvas, cajas, etc.).

Condensadores

El procedimiento que utilizan consiste en saturar el gas contaminado con agua y en someterlo a un descenso de presión, con lo cual se condensa una parte del vapor de agua presente, y lo hace sobre las partículas, que actúan como núcleos de condensación. Estas partículas se irán aglutinando, a lo que ayudará la desaparición de la interfase entre las gotas y su unión (coalescencia). Con un sistema centrífugo se separa la masa de partículas.

El proceso será, pues:

Entrada del gas contaminado →
 Saturación → Sobresaturación →
 Expansión (descenso de presión) →
 Condensación →
 Coalescencia (aglutinación) →
 Contrigugación y separación

88.4. SEPARACIÓN POR FILTRACIÓN

El sistema se basa en el paso de la corriente de gas contaminado a través de un material poroso donde quedan detenidas las partículas.

La acción de estos filtros se basa en los siguientes efectos:

- Las partículas chocan directamente con los elementos del filtro.
- Las partículas rozan directamente con los elementos del filtro.
- Tamizado.
- Difusión.
- Las fuerzas electrostáticas actúan en algunos tipos de filtro (fibras sintéticas, etcétera).

Los filtros pueden ser:

Filtros básicos

Están constituidos por arena, grava, cok, anillos Raschig, etc.

También puede ser un conjunto de láminas colocadas como las escamas, con un líquido adhesivo.

A través de cualquiera de estos dispositivos se hace pasar el gas contaminado y se separan así las partículas que son retenidas por tamaños que lógicamente dependen de la malla del filtro.

Filtros de mangas

Consisten en un saco de papel, de fieltro o de un tejido, más o menos largo que recibe la corriente de aire contaminado y retiene las partículas en función de su malla.

A medida que van acumulándose las partículas aumentan la pérdida de carga y e rendimiento (al irse reduciendo las vías de paso por irse colmatando el filtro). Llegará un momento en que el rendimiento se va reduciendo hasta que se hace necesaria una limpieza.

Los tejidos a utilizar en estos filtros dependerán de la temperatura de trabajo (a alta temperatura se queman pronto, como hemos podido comprobar con frecuencia), de la intensidad abrasiva de las partículas, del tamaño de las partículas, de las formas y dimensiones de las partículas, de la agresividad química de las partículas, etc.

Se suelen utilizar fibras sintéticas o fibra de vidrio tratada con siliconas, aunque en general los filtros de mangas se eligen según las especificaciones del gas contaminado, sin mayor problema.

La separación de las partículas se realiza por vibración mecánica, por contracorriente periódica (flujo inverso), por vibración ultrasónica.

- Vibración mecánica.
- Vibración ultrasónica.
- Contracorriente periódica.
- Chorros instantáneos de aire a gran velocidad.

Para diseñar un filtro de mangas se debe tener en cuenta la fórmula:

$$K = \frac{Q}{S}, \text{ donde:}$$

K = Carga específica que recibe el filtro (en $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ min.}$).

Q = Volumen del gas.

S = Superficie del filtro.

La carga específica K debe estar entre 1 y 3.

Con los datos de partida de caudal, tipo de partículas, dimensiones de las partículas y la concentración de estas, es muy fácil calcular el tipo de filtro más apropiado a cada caso con los ábacos de cálculo y las tablas de diseño.

88.5. SEPARADORES ELÉCTRICOS Y ELECTROSTÁTICOS (ELECTROFILTROS)

Se basan en la aplicación de fuerzas eléctricas a las partículas, que se someten al paso por unos campos eléctricos que varían según el sistema (hilos de ionización, placas, etc.) que constituyen electrodos de descarga o de precipitación.

Las partículas que se han ionizado se depositan en los electrodos recepto-

res, donde se descargan de su carga eléctrica.

El sistema están constituido por un tubo o caja a lo largo del cual se desplaza el gas contaminado en el que se sitúan por una parte los electrodos emisores, constituidos por hilos verticales, y por otra los electrodos colectores, que son tubos o placas periféricas, a lo largo de los cuales se desplaza el gas contaminado.

Cerca de los electrodos emisores, donde se produce la ionización por choque de moléculas, el campo ionizado se ilumina, lo que constituye el efecto corona.

Este efecto es muy útil en el proceso, pues las partículas cargadas eléctricamente se desplazan, oscilando si la corriente es alterna; si la corriente es continua, las partículas cargadas se desplazan hacia el colector, se descargan y precipitan.

Se pueden aprovechar los dos efectos corona positivo o negativo, pues aunque por diferentes procesos, el resultado de captación es aceptable en ambos.

Para calcular el rendimiento de estos separadores se puede aplicar la fórmula:

$$\eta = 100 - (1 - e^{-Sw/Q}) , \text{ donde:}$$

η = Rendimiento (% de las partículas retenidas).

S = Superficie de los electrodos colectores.

w = Velocidad de desplazamiento de las partículas.

Q = Caudal del gas contaminado.

Aplicando la fórmula indicada en el capítulo anterior, la eficacia de captación será:

$$E = \frac{S_e - S_s}{S_e} 100 , \text{ donde:}$$

E = Eficacia de captación (% de partículas retenidas).

S_e = Concentración a la entrada del electrofiltro.

S_s = Concentración a la salida del electrofiltro.

Para diseñar un separador electrostático o un electrofiltro se deben tener en cuenta los siguientes factores de diseño:

- La presión del gas contaminado con la que se debe aplicar el efecto corona y la presión crítica, es decir, se debe alcanzar la tensión de descarga y esa presión crítica para optimizar los separadores (de alta presión).
- La temperatura, que actúa tanto sobre el efecto corona (sobre todo sobre el efecto negativo) como sobre la resistencia de las partículas.
- Las características dieléctricas de las partículas.
- La resistividad de las partículas.
- Las características del gas portador.
- Tiempo y residencia de las partículas en el separador.
- Humedad de las partículas.

Para mejorar el rendimiento de estos separadores se pueden añadir aditivos que van desde agua o vapor hasta múltiples gases, según el tipo de partícula; to-

do se orienta a reducir la resistividad de las partículas.

Los electrofiltros, aunque existen infinidad de diseños, pueden ser de dos tipos básicos:

De dos pisos o de doble etapa

Son los de los acondicionadores de aire, y son muy útiles para gases con bajas concentraciones de partículas, como ocurre en ambientes de industria fina.

Tienen una primera fase ionizante en cámara de intensidad variable y una segunda fase de precipitación.

De un piso o de una etapa (*Cottrell*)

En estos separadores las fases de ionización y de precipitación son simultáneas.

Pueden ser, a su vez de dos tipos:

- *Precipitadores de tubos*: el electrodo de precipitación está constituido por un grupo de tubos en paralelo, estando el electrodo de ionización a lo largo de estos.
- *Precipitadores de placas*: el electrodo de precipitación es un conjunto de placas o cadenas en paralelo, mientras que el de ionización está ubicado entre estas. El gas contaminado se desplaza paralelo o perpendicular al electrodo de ionización y paralelo al de precipitación.

La limpieza de los electrofiltros puede realizarse:

- En seco: Se separan las partículas por vibración o por golpeo.

- Por vía húmeda: Se separan las partículas por lavado y/o por golpeo y lavado.

88.6. SEPARACIÓN POR ULTRASONIDOS

Se trata más bien de aparatos auxiliares de otros como los ciclones o los filtros, de manera que mejoran considerablemente su rendimiento.

Los ultrasonidos producen un efecto de coalescencia que permite que los ciclones o los filtros colocados después tengan un rendimiento muy superior.

Los aparatos emisores de ultrasonidos que se utilizan suelen ser de dos tipos:

- Sirenas rotativas (más eficaces).
- Sirenas estáticas (más robustas).

Un separador por ultrasonidos provoca los siguientes fenómenos:

- *Atracción*: Las partículas situadas en el mismo rayo se atraen más si aumentan la frecuencia y la intensidad sonoras, y la concentración de esas partículas.
- *Colisión*: La inercia, las diferencias de densidad y las diferentes dimensiones de las partículas generarán variaciones en la amplitud y fases vibratorias que provocan la separación.
- *Efecto pared*: Se forman depósitos en la superficie del tubo.
- *Presión de radiación*: Aumenta la frecuencia de las colisiones si crecen la frecuencia y la intensidad acústica.

Como es natural, por el tipo de proceso que tratamos, tienen una influencia fundamental la frecuencia, la intensidad, la concentración y el tiempo de emisión de los ultrasonidos.

El sistema está constituido por un tubo de resonancia que contiene el emisor (la sirena) en el extremo superior, y un pistón de regulación que se desplaza a lo largo del tubo de resonancia. Dentro del tubo se hace circular una cortina de agua

a lo largo de la pared interna, o se provoca una pulverización (ducha) por arriba para arrastrar las partículas depositadas. Los gases contaminados entran lateralmente por abajo y una vez depurados salen lateralmente por arriba.

Generalmente estos aparatos se montan con los ciclones, como ya hemos indicado, aunque su uso se está extendiendo para complementar también otros tipos de tratamiento.

TRATAMIENTO DE LOS GASES CONTAMINANTES

89.1. BASES GENERALES. SISTEMAS DE TRATAMIENTO

Ya hemos indicado varias veces a lo largo de esta obra que el mejor sistema de eliminar la contaminación atmosférica es evitarla o, por lo menos, tratarla en la fuente. Pero esto no es siempre así, y el hecho es que ya existe esa contaminación porque no se dispone de métodos sustitutorios de una tecnología determinada, o bien porque se trata de industrias establecidas que tienen poca capacidad de acción en este campo por diversas circunstancias (falta de técnicos o de acceso a la información, problemas económicos, etc.).

En ese caso, de lo que se tratará es de buscar otras soluciones que permitan anular o disminuir al mínimo las emisiones de contaminantes a la atmósfera, para lo que se pueden utilizar varias vías:

- Cambios de combustibles,
- Tratamiento de los combustibles.

- Modificación de procesos.
- Modificación de equipos.
- Instalación de sistemas de tratamiento de los gases.

En este capítulo trataremos fundamentalmente de esta última solución, aplicada a los contaminantes gaseosos.

Los contaminantes gaseosos pueden ser homogéneos (SO_2 , CO , etc.) o heterogéneos (hidrocarburos, etc.).

Por otra parte, es frecuente que los contaminantes gaseosos que se emiten a la atmósfera reaccionen a causa de la incidencia de factores externos, como la temperatura, la humedad o la luz, o bien porque actúen entre sí. El caso es que existen mecanismos como los siguientes:

- Reacciones fotoquímicas.
- Catálisis.
- Sinergismos.
- Oxidación.

- Reducción.
- Condensación.
- Polimerización.
- Reacciones de los radicales libres.
- Adsorción.
- Absorción.
- Acidificación.
- Filtración.

Estos mecanismos provocan transformaciones de los contaminantes gaseosos, que unas veces reducen su acción contaminante y otras la potencian, al formarse otros productos más agresivos.

89.2. PROCESOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

Se dispone de los procedimientos y procesos de base siguientes:

- Modificación de procesos (casi todos).
- Sustitución (casi todos).
- Control de pérdidas (casi todos).
- Absorción (casi todos).
- Adsorción (vapores orgánicos, ozono, SO₂, olores).
- Condensación (COV).
- Incineración térmica (la mayoría).
- Incineración catalítica (COV, SO_x, NO_x, CO_x).
- Oxidación UV (COV, CO_x).
- Uso de membranas (COV).
- Biofiltración (COV y gran cantidad

de productos).

- Tratamiento con diferentes productos (SO_x, NO_x, F, Cl).

En los capítulos específicos de cada contaminante gaseoso se describen estos métodos, individualizados.

89.3. ABSORCIÓN

89.3.1. Bases generales y proceso

La absorción es una transferencia de moléculas de una fase gaseosa a una fase líquida.

Si tenemos una mezcla gaseosa en contacto con una fase líquida, puede ocurrir que alguno de sus componentes sea soluble o más soluble que los otros en el líquido, por lo que sus moléculas se separarán por difusión de la fase gaseosa, atraviesan la interfases gas-líquido y pasan a la fase líquida.

El movimiento de las moléculas del gas que se transfiere puede ser lento, por difusión molecular natural, o bien puede ser rápido, por difusión turbulenta provocada, que concierne a un proceso de más envergadura.

Las moléculas del gas soluble se desplazan a causa de su diferencia de concentración entre la fase gaseosa y la fase líquida.

La absorción puede ser física, en la que el agente contaminante que pasa al líquido absorbente se disuelve en este sin reaccionar con él, o química, en la que el agente contaminante se disuelve

en el líquido absorbente y reacciona con él, transformándose en otros productos.

Algunos de los disolventes que se utilizan en el lavado pueden ser regenerados y recuperados con un simple tratamiento de calor o por reducción de la presión, como ocurre con las soluciones amoniacales, con las soluciones de sales alcalinas o con las de dietanolaminas.

89.3.2. Sistemas de lavado

En principio, la absorción se suele realizar mediante cualquiera de los siguientes sistemas de lavado:

- Columnas a través de relleno o de lavado (son las más extendidas).
- Columnas de bandejas perforadas.
- Columnas pulverizadoras.
- Sombreretes barboteadores.
- Pulverizadores con fuerza centrífuga.

En la lista adjunta se indican los disolventes más utilizados en el lavado:

DISOLVENTES MÁS UTILIZADOS EN LOS LAVADORES DE GASES

H ₂ O
H ₂ O · NaOH
H ₂ O · Etanolamina
H ₂ O · Dietanolamina
H ₂ O · KOH

89.3.3. Relleno

En las columnas de lavado se suelen utilizar como relleno materiales como

los que se indican en la tabla adjunta, que serán función del gas a disolver y del disolvente a utilizar.

RELLENO DE LAS COLUMNAS DE LOS LAVADORES DE GASES

Tipo de material	Material	Relleno
Cerámico	Porcelana Gres	Anillos Raschig Anillos Lessing Anillos Pall Monturas Berl Monturas Intalox
Metálico	Aluminio Acero dulce Aleaciones diversas	
Plástico		
Carbono		

La base del relleno es una malla de un material que también será función del gas a tratar y del disolvente que se utilice. En principio, se utilizan madera, metal, vidrio, carbono o plásticos.

89.3.4. Eficacia de absorción

Para calcular la eficacia de absorción se puede utilizar la fórmula:

$$r_a = \frac{D\Delta C}{l} N_{sh}, \text{ donde:}$$

r_a = Tasa de absorción por unidad de superficie interfases.

D = Coeficiente de difusión del gas que se va a absorber.

ΔC = Diferencia de concentración a través de la interfase.

l = Dimensión lineal, característica de la interfase líquida.

N_{sh} = Número de *Sherwood*.

Así, la eficacia de la absorción es proporcional a la diferencia de las concentraciones en cada fase, por lo que si la concentración del gas contaminante es muy baja, serán necesarios volúmenes muy grandes para realizar esa absorción.

89.3.5. Resistencia

Para mejorar el rendimiento de proceso es fundamental reducir tanto la resistencia de la fase gaseosa como la de la fase líquida, y además se debe aumentar en lo posible la superficie de la interfase.

La resistencia en el gas contaminante soluble no se puede reducir, ya que al estar en mezcla con los demás gases insolubles, sus moléculas se deben difundir a través de los de estos gases para alcanzar la interfase.

Por lo que se refiere a la resistencia de la fase líquida el manejo es mejor, pues si se busca un disolvente que sea capaz de absorber grandes cantidades del contaminante, es decir, si el gas contaminante ha de ser muy soluble en el líquido de lavado, la resistencia es mínima.

Si el líquido de lavado es reactivo con el gas, la resistencia es todavía menor.

La gran superficie de los materiales de relleno de las torres de lavado facilita y amplía el contacto interfases.

Los materiales que hemos indicado antes se eligen por su gran superficie y por sus características de resistencia a la corrosión. Si esta es fuerte se deben utilizar materiales cerámicos, de acero inoxidable o trozos de cuarzo o de cok.

89.3.6. Pérdidas de carga

Las pérdidas de carga pueden ser importantes en algunos tipos de aparatos de lavado, siendo más bajas en las torres de relleno. En las torres de pulverización simple son bajas, mientras que en los aparatos de fuerza centrífuga son muy elevadas.

Las pérdidas de carga en las columnas de relleno se calculan con la *correlación de Sherwood*, según los diagramas correspondientes.

En las columnas de bandeja la pérdida de carga se calcula así:

$$h_T = h_d + h_L, \text{ siendo:}$$

$$h_d = 0,044 \frac{\rho_g}{\rho_l} \left(\frac{v_{og}}{C_o} \right)^2$$

$$h_L = \beta(h_w + h_{ow}), \text{ donde:}$$

h_T = Pérdida total de carga.

h_d = Pérdida de carga provocada por los orificios o por los sombreretes.

h_L = Pérdida de carga provocada por el cierre o fase líquida.

r_g = Densidad del gas.

r_l = Densidad del líquido.

v_{og} = Velocidad de paso del gas a través de los orificios o de los sombreros de la bandeja.

C_o = Coeficiente de corrección, de valor 0,7-0,8 para las bandejas perforadas y de 0,6-0,7 para las que tienen sombreros.

β = Factor de aireación, que se obtiene mediante un ábaco que es función de la velocidad superficial del gas a través de la zona activa de la bandeja, y de la presión parcial del contaminante en la fase gaseosa.

h_w = Altura del rebosadero.

h_{ow} = Altura de la cresta líquida sobre el rebosadero.

89.3.7. Factores incidentes

Se pueden producir pérdidas de absorbente por formación de espumas o por arrastre en la pulverización, que pueden llegar a ser importantes si coincide que el tamaño de las gotas de pulverización sea muy pequeño y la velocidad del gas sea grande. En este caso, la instalación debe disponer de un separador complementario para eliminar las gotas que se van arrastrando, pues en caso contrario se emitirán contaminantes a la atmósfera.

Los factores incidentes en el proceso que deberán ser controlados, son:

- Temperatura de los gases a la entrada.
- Temperatura de los gases a la salida.
- Caudal de los gases.

- Caudal del líquido lavador (absorbente).
- Pérdidas de carga.
- Concentración del gas contaminante.
- Niveles de corrosión.
- Niveles de incrustación.
- Niveles de colmatación.

89.3.8. Limpieza

Por lo que se refiere al líquido de lavado o disolvente del gas o de los gases contaminantes, que los captará del aire por disolución o por reacción química, se irá cargando de contaminantes con el paso del tiempo, por lo que será necesario limpiarlo periódicamente.

Esa limpieza o regeneración se puede realizar por diferentes procedimientos, de los cuales los más comunes son:

- *Desorción con corriente de un gas inerte.* Se realiza mediante un proceso casi inverso al de la disolución del gas inicial en el líquido, pues ahora se trata de pasar el contaminante del líquido a un gas, que suele ser vapor de agua, que una vez que haya captado el contaminante será condensado, por lo que este se podrá separar sin mayor dificultad.
- *Desorción por ebullición.* Al aumentar la temperatura se reduce la solubilidad del contaminante en el líquido absorbente, y si este líquido es agua y se hierve generará vapor, por lo que si el proceso se combina con el ante-

rior, la eficacia del sistema será muy elevada.

- *Desorción por reducción de la presión.* Si la absorción se realiza a presión, al reducir esta el líquido se sobresaturará de contaminante, que al estar en gran concentración se podrá separar con facilidad.

89.4. ADSORCIÓN

89.4.1. Bases y proceso general

La absorción es una transferencia de moléculas de una fase gaseosa a una fase sólida.

El proceso de adsorción puede ser de tipo físico, que es el que se basa en las fuerzas de atracción existentes entre la superficie sólida adsorbente y las moléculas que son adsorbidas (fuerzas de *Van der Waals*, fuerzas capilares, etc.), o de tipo químico (quimisorción), por el que se producen reacciones químicas en la superficie del adsorbente por las que se adsorbe más cantidad de gas o por las que este se transforma en otros productos.

Para que un gas contaminante sea adsorbido, es necesario que sea polar o que tenga enlaces polarizables.

En una adsorción física las atracciones que dominan son las fuerzas de *Van der Waals*, que producen condensaciones en estado líquido.

Si la superficie adsorbente es lisa, sin poros ni fisuras, estas fuerzas sólo

crean una lámina finísima, de grosor molecular.

Si la superficie adsorbente es porosa, con estructura capilar, la superficie de adsorción actuante es mucho más grande, y además actúa la condensación capilar, por lo que el efecto de adsorción es muy superior.

El proceso de adsorción es exotérmico, pues el calor de adsorción debido a la atracción de la superficie es mayor que el calor de condensación del gas que se adsorbe (las moléculas que son adsorbidas pierden su energía cinética).

En la separación o tratamiento de gases por adsorción existen cuatro etapas:

- Contacto del gas contaminante (fase gaseosa) con el adsorbente (sólido).
- Adsorción.
- Separación del gas contaminante del adsorbente sólido para regenerar éste.
- Separación –recuperación del gas contaminante.

89.4.2. Factores de adsorción

Para que un gas sea adsorbido en un adsorbente, ocurre que al principio, si está bien elegido el proceso, el flujo de partículas gaseosas que son adsorbidas es muy superior al de las que se desprenden por condensarse y adquirir la energía necesaria para despegarse, pero poco a poco se van equilibrando ambos flujos, hasta que llega un momento en que se adsorben tantas moléculas como se desprenden.

El proceso depende, entre otros factores, de los siguientes:

- Tipo de adsorbente.
- Tipo de gas a adsorber (adsorbato):
 - Estructura.
 - Peso molecular.
 - Punto de ebullición.
 - Polaridad.
- Concentración del adsorbato.
- Temperatura.
- Espesor y superficie del adsorbente.
- Dureza del adsorbente.
- Resistencia al paso del fluido (porosidad).
- Dimensiones del adsorbente.
- Necesidades de adsorción (especificaciones).
- Capacidad de adsorción del lecho adsorbente.
- Velocidad del gas.

89.4.3. Tipos de adsorbentes

En función de las necesidades de cada caso, deberá elegirse el sistema más apropiado de adsorción.

En principio, el adsorbente básico es el carbón activo, aunque en general se dispone de las siguientes posibilidades:

- Carbones activos.
- Geles de alúmina (secado de corrientes gaseosas).
- Gel de sílice.

- Geles de tierras de sílice.
- Zeolitas sintéticas (deshidratación y separación de gas contaminante).
- Impregnación de adsorbentes:
 - Bromo (para la adsorción de etileno, etc.).
 - Yodo (para la adsorción de vapores de mercurio).
 - Acetato de plomo (para la adsorción de SH_2).
 - Silicato sódico (para la adsorción de FH).
- Impregnación del adsorbente con un catalizador compuesto por:
 - Cu
 - Ag
 - Pb
 - Pt
 - CuO
 - MnO_2

89.4.4. Pérdidas de carga

El gas contaminante que entra en un sistema de adsorción sufre una pérdida de carga que depende fundamentalmente de la resistencia de los lechos de adsorción.

Para calcular la pérdida de carga del caudal de gas que entra en el lecho, se pueden utilizar diversos métodos. Unos tienen en cuenta las características del lecho, y otros no. Por nuestra parte indicamos que se puede utilizar la fórmula:

$$\frac{\Delta P}{h} = \frac{f G_g^2}{2 D_p g \rho_g}, \text{ donde:}$$

ΔP = Pérdida de carga.

h = altura del lecho de adsorción.

f = Factor de fricción.

G_g = Velocidad másica del gas.

D_p = Diámetro medio de las partículas del lecho de adsorción.

g = Aceleración de la gravedad.

ρ_g = Densidad del gas.

R = Número de Reynolds.

μ_g = Viscosidad del gas.

siendo:

$$f = \frac{480}{R}, \text{ si } R < 10$$

$$\text{o } f = \frac{60,3}{R^{0,339}}, \text{ si } R > 200$$

Si $10 < R < 200$, se deberá utilizar la curva correspondiente a los regímenes transitorios, partiendo de que:

$$R = \frac{D_p G_g}{\mu_g}$$

89.4.5. Procesos y bases de diseño

Al diseñar un sistema de adsorción se debe definir previamente qué eficacia se quiere alcanzar, para lo cual se utilizarán la velocidad de la corriente gaseosa y el espesor del lecho adsorbente, con objeto de conseguir un tiempo de contacto del gas con el adsorbente tal, que se alcance la eficacia definida en el diseño.

Por otra parte se tendrá en cuenta la pérdida de carga que provoque el lecho adsorbente, pues esta va a definir la velocidad máxima de la corriente gaseosa. Por ello, y para obtener la máxima eficacia, los equipos deberán ofrecer una superficie máxima de contacto a la corriente de gas y un frenado mínimo.

Los lechos adsorbentes pueden ser *delgados*, con poca pérdida de carga, que son los idóneos para tratar grandes volúmenes de gas con poca contaminación, como ocurre con los olores o con masas de aire con algunas impurezas.

También pueden ser *gruesos*, con más pérdida de carga, que son los más eficaces cuando se necesita una fuerte capacidad de adsorción, como es el caso de la recuperación de disolventes. En este caso, la pérdida de carga puede ser importante, por lo que el grosor máximo del lecho adsorbente se limita a 0,8-1 m.

Normalmente, la corriente de gas contaminado se hace pasar una sola vez a través del lecho adsorbente, y luego se emite al aire.

Se utilizan sistemas de regeneración del adsorbentes o sistemas sin regeneración según sea cada caso. Así, para eliminar olores se prefieren sistemas no regenerativos, y en general se usan estos sistemas para bajas concentraciones de contaminantes.

La adsorción se suele utilizar en las actividades indicadas en la tabla adjunta.

ACTIVIDADES QUE UTILIZAN PROCESOS DE ADSORCIÓN

Tratamiento de olores en la industria alimentaria.
 Industria del cuero.
 Industria textil.
 Instalaciones de gas natural.
 Fabricación de plaguicidas.
 Industria cementera.
 Fábricas de fertilizantes.
 Laboratorios farmacéuticos.

89.4.6. Regeneración y ciclo de vida de los adsorbentes

Los procedimientos de regeneración pueden ser de dos tipos: aquellos en los que se recupera el producto adsorbido, y aquellos en los que este se destruye. El primer caso corresponde al de la recuperación de disolventes y de otros productos.

El segundo caso corresponde a concentraciones elevadas de productos de escaso o de ningún valor económico.

En general, cuando se quiere regenerar el lecho adsorbente, se debe evitar su degradación.

Normalmente y en cualquier caso se suelen utilizar aire caliente o vapor de agua para aumentar la temperatura del lecho adsorbente, hasta que llega un momento en que se produce una desorción y se revierte el sentido del proceso: el gas contaminante (adsorbato) adsorbido se empieza a desprender del adsorbente y pasa a la fase gaseosa.

El análisis del proceso calorífico que verifica es el siguiente:

$Q_T = Q_M + Q_L + Q_C + Q_D$, donde:

Q_T = Calor total necesario para la regeneración de lecho.

Q_M = Calor absorbido por el depósito del lecho.

Q_L = Calor absorbido por el lecho adsorbente.

Q_C = Calor absorbido por el contaminante adsorbido por el lecho.

Q_D = Calor de desorción =

$$R = \frac{d \ln p}{d\left(\frac{1}{T}\right)}$$

R = Constante de los gases.

p = Presión de adsorción (presión parcial del gas en equilibrio).

T = Temperatura del proceso.

El ciclo de vida o de servicio de un adsorbente está determinado por su capacidad de adsorción, por la concentración de contaminante y por la masa gaseosa que recibe (velocidad-volumen).

En principio se puede utilizar la fórmula de *Turke*:

$$t = \frac{6,43 \cdot 10^6 SP}{eQ_r MC_v}, \text{ donde:}$$

t = Duración de la vida del adsorbente hasta su saturación.

S = Saturación proporcional del adsorbente (según tablas).

P = Peso del adsorbente.

e = Eficacia de adsorción.

Q_r = Caudal del gas.

M = Peso molecular medio del vapor adsorbido.

C_v = Concentración del vapor en la entrada.

En otro orden de cosas, y como hemos indicado al principio, cuando se utiliza un sistema de recuperación del adsorbato, se pasan el aire o el vapor a baja presión a través del lecho adsorbente. Así, sube la temperatura del lecho y se reduce su capacidad de equilibrio frente a los gases adsorbidos. Además, con esa elevación de la temperatura se suministra el calor latente de vaporización para el adsorbente y se reduce su presión parcial en la fase de vapor.

El vapor y el disolvente (si se trata de este) que han realizado la desorción salen de depósito y se condensan para poder recuperar el adsorbente.

Si el sistema de regeneración no recupera el producto adsorbido, se calienta la corriente gaseosa que entra hasta alcanzar una temperatura que desencadene una oxidación catalítica que se provoca impregnando el adsorbente con algún producto catalizador. Después se mantiene esa temperatura el tiempo que sea necesario hasta la destrucción total del adsorbato.

89.5. INCINERACIÓN

89.5.1. Bases generales

La incineración es una oxidación rápida de los compuestos orgánicos, que

en presencia de oxígeno se transforman en H_2O y en CO_2 , por lo que éste proceso puede ser muy útil en el tratamiento de los gases contaminantes que contengan productos orgánicos.

Los procesos de combustión pueden ser de diversos tipos, siendo los fundamentales los siguientes:

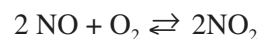
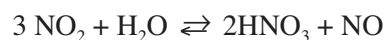
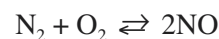
- Antorchas.
- Incineradores y quemadores de postcombustión.
- Combustión catalítica.

89.5.2. Control de los NO_x

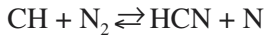
En la combustión la presencia y la concentración de O_2 es un factor determinante.

Se debe tratar de utilizar este gas en cantidades limitadas con objeto de evitar o de minimizar la producción de NO_x .

Al oxidarse totalmente la materia orgánica en la combustión en sistemas como las antorchas, los incineradores o los quemadores de postcombustión, y al existir una temperatura muy elevada, se generan NO_x , formándose según las conocidas reacciones ya indicadas en otros capítulos:



Al principio de una combustión, ocurre que



Parte de ese HCN que se produce reacciona con O_2 dando NO, y otra parte del HCN reacción con NO, dando N_2 .

La formación de los NO_x depende de varios factores, como son:

- Concentración de N_2 .
- Concentración de O_2 .
- Temperatura de la llama.
- Velocidad de enfriamiento de los gases.
- Proceso inicial de combustión.

El N_2 originado ataca al O_2 dando NO, según la primera ecuación que hemos indicado.

La temperatura de la llama entre 1.750 y 2.000 °C provoca la formación de NO_x si se incineran hidrocarburos.

El enfriamiento de los gases procedentes de la combustión, si es lento facilita la descomposición del NO que se ha formado en el proceso, y si es rápido, ese NO quedará libre en el aire como contaminante.

89.5.3. Antorchas

Proceso

Este proceso de combustión se suele utilizar cuando los gases contaminantes se emiten con concentraciones superio-

res a los límites de inflamabilidad y a caudales variables. Generalmente esto ocurre con las emisiones que tengan un poder calorífico superior a 400 Kcal/m³.

Con este sistema se trata también de evitar la producción de humos, y esto es fácil si antes de la ignición se mezcla previamente el gas con aire en antorchas con tubo de Venturi, siempre que el caudal del gas y el poder calorífico se mantengan suficientemente constantes y que el poder calorífico de la mezcla con el aire se mantenga en el orden de 1 termia/m³.

Si se inyecta vapor de agua se reduce la formación de carbono si se trata de hidrocarburos, pues se reduce la polimerización de estos y se facilita la formación de compuestos de oxígeno, que arden lentamente a temperaturas que no provocan polimerización ni cracking.

Si el gas contaminante viene diluido en gases inertes, habrá que realizar un precalentamiento para poder estabilizar la combustión. Este precalentamiento se realiza en la salida con un quemador que rodea el quemador piloto, de la misma manera que se efectúa en precalentamiento en muchas calderas domésticas de gas. Este procedimiento es viable si el calor de combustión de la mezcla es superior a 0,5 termias/m³.

• *Condiciones generales de operación:*

- Encendido adecuado.
- Temperatura apropiada.
- Zona de seguridad.
- Flexibilidad en caudales.
- Flexibilidad en composición de los gases.

- No producción de humos.
- Rendimiento máximo de combustión.
- Ruido mínimo.
- Resplandor y brillo mínimos.
- Altura suficiente de seguridad.
- Garantía de ignición en caso de vientos fuertes.
- Sistemas de protección contra el retorno de las llamas si los gases contienen oxígeno en presencia de hidrocarburos.

• *Aplicaciones:*

- Refinerías.
- Complejos petroquímicos.
- Plantas que operan con hidrógeno.
- Plantas que operan con amoníaco.
- Plantas que operan con ácido cianhídrico.
- Plantas de gases tóxicos.
- Puesta en marcha de plantas que operen con hidrocarburos.
- Parada de plantas que operen con hidrocarburos.

89.5.4. Incineradores y quemadores de postcombustión

Esta solución de incineración se aplica cuando los gases contaminantes tienen poca concentración, y la mezcla gaseosa está por debajo del límite inferior de inflamabilidad. En ese caso se debe realizar la combustión en una cámara cerrada.

Los hornos calentarán los gases hasta que alcancen su temperatura de auto-combustión, y para mantenerla el tiempo suficiente. Al mismo tiempo habrá que crear las turbulencias necesarias para

que la oxidación (combustión) sea completa.

Así pues, las condiciones de operación (combustión completa) son:

- Duración.
- Temperatura.
- Turbulencia.
- Nivel de mezcla de los gases.

En una instalación de este tipo se deben realizar los siguientes procesos:

- Creación de turbulencias mediante recorridos angulosos y largos.
- Mezcla de productos de combustión y gases contaminantes apropiada.
- Paso de esta mezcla por un conducto con cortacorrientes.
- En los incineradores clásicos de este tipo, las entradas en espiral rodeando al quemador protegen las paredes de la cámara de combustión de temperaturas peligrosas, y favorecen la vaporización de las nieblas orgánicas que se pueden formar. La mezcla de gases se efectúa en la zona estrecha, y la oxidación se termina en la cámara de ladrillo refractario, desde la que se emiten los restos del proceso hacia la chimenea.
- El quemador, siempre existente, inyecta combustible a gran velocidad y produce una turbulencia que favorece la mezcla con los gases que entran a la cámara.

* * *

En general estos procesos pueden ser útiles en determinadas industrias, pero pueden tener problemas de emisiones de NO_x , por lo que en algún caso necesitan instalaciones y procesos complementarios, cosa que desafortunadamente no siempre se hace a causa de los costos, que ya de por sí en el proceso básico son elevados.

Estos sistemas de combustión tienen las siguientes aplicaciones:

- Industria papelera.
- Incineradoras de residuos urbanos.
- Incineradores domésticos de residuos urbanos (en algunos países).
- Incineradores de chatarra de automóviles.
- Normas industriales.
- Laboratorios farmacéuticos.
- Fábricas de grafito.
- Industrias gráficas.
- Otras.

89.5.5. Combustión catalítica

• *Proceso*

La combustión catalítica es un proceso de oxidación incompleta de la materia orgánica, por el que esta se transforma en H_2O y CO_2 a menor temperatura que la necesaria en los procesos de postcombustión.

Estos sistemas consumen mucho menos combustible y emiten muy pocos

NO_x por ser la temperatura del proceso más baja que en los casos anteriores.

Se utilizan mucho cuando se quieren eliminar contaminantes combustibles que están en baja concentración en corrientes gaseosas a niveles muy inferiores al límite de inflamabilidad.

La acción de un catalizador provoca una unión exotérmica de los vapores orgánicos y del oxígeno a temperaturas mucho más bajas que las de la autocombustión.

El equilibrio de esta oxidación vendrá determinado por la temperatura, por la presión y por la acción del catalizador.

En general, el gas tiene más concentración de contaminantes que la concentración de equilibrio. A temperatura y presión constantes la concentración de contaminantes en el gas aumenta con la velocidad; a temperatura y velocidad constantes la concentración crecerá con la presión.

Existe casi siempre una temperatura mínima o temperatura de arranque o de cebado de la reacción, por debajo de la cual el catalizador no actúa.

En el otro extremo, existe una temperatura máxima por encima de la cual el catalizador se destruye.

Con el uso los catalizadores van perdiendo su efectividad, pues en realidad sufren atrición o *desgaste mecánico*, por la que tienen pérdidas de material, fuertes caídas de presión a través del lecho y recalentamientos que pueden llegar a la fusión, alterándose así la superficie del catalizador.

Por otra parte, sufren un *desgaste químico* por reacciones entre los productos catalíticos y algunas sustancias que puede arrastrar el gas que se está tratando, que pueden dar origen a reacciones más o menos permanentes. Además, también pueden sufrir un desgaste químico si se acumulan en su superficie compuestos pesados que pueda arrastrar el gas o que se formen en el proceso de oxidación, provocando incrustaciones que degradan el catalizador.

Algunos catalizadores se someten a un tratamiento químico de activación o de reactivación con H_2 o con SH_2 , para reducir los óxidos metálicos que tengan, a metales o a sulfuros, respectivamente.

• *Diseño*

Un sistema de combustión catalítica está compuesto por un catalizador activo contenido en una cámara o reactor de combustión catalítica, un sistema de inyección o de mezcla de oxígeno o del gas reductor, un sistema de precalentamiento para llevar el gas a la temperatura de arranque de la reacción de oxidación, y una salida (chimenea) al aire.

Además, consta de sistemas de control del flujo, de la temperatura y del contenido en impurezas, y de instalaciones de recuperación de calor y de regeneración del catalizador.

El tamaño de la instalación (o más bien del catalizador) vendrá determinado por las condiciones de presión y de velocidad del gas máxima admisible,

que a su vez depende de la concentración de impurezas del gas, de su naturaleza, de la temperatura, de la presión, del contenido en oxígeno y de la actividad del propio catalizador.

Los catalizadores pueden ser *másicos*, constituidos por sustancias activas, o *soportados*, en las que las especies activas se colocan sobre un material de cierta superficie específica.

Los elementos complementarios de estas instalaciones deberán ser capaces de soportar temperaturas elevadas, por lo que se utilizarán en ellos materiales refractarios y aleaciones especiales.

Asimismo, los catalizadores deben ser de fácil cambio, de manera que se pueda reemplazar cómodamente el catalizador gastado por otro limpio.

• *Características básicas de los catalizadores*

Los catalizadores deben tener una serie de propiedades generales y otras específicas, que hacen que en cada caso se deba diseñar el sistema más apropiado en función del problema que se presente.

- En principio, estas propiedades son:
- Resistencia térmica.
- Resistencia al envenenamiento.
- Resistencia mecánica.
- Mínimas pérdidas de carga.
- Ciclo de vida apropiado.
- Coste asumible.

- Eficacia suficiente para los gases sobre los que opere

Los catalizadores pueden presentarse en diversos formatos según la tecnología y el sistema que se aplique. Las formas y soportes más generales se indican en la tabla adjunta.

FORMAS Y SOPORTES MÁS COMUNES DE LOS CATALIZADORES

Forma del catalizador	Soporte Bolas
Bolas	Rejillas
Esferas	Entramados metálicos
Anillos	Placas perforadas
Bastones	Tamices específicos
Hilos	Hilos metálicos
Pastillas	Cintas metálicas
Placas	Cortinas metálicas

• *Sectores de uso de los catalizadores*

- Gases de motores de automóviles (motores de explosión).
- Purificación de gases en muchas industrias.
- Hornos de secado.
- Fabricación de ácidos alifáticos.
- Plantas petroquímicas.
- Conserveras.
- Plantas de ahumado de pescado.
- Hornos de pintura.
- Hornos de esmaltes.
- Tostado de café.
- Hornos de productos alimentarios.

- Imprentas
- Refinerías
- Industria química
- Eliminación de vapores orgánicos en general

89.6. CONDENSACIÓN

Un sistema general de tratamiento de gases para separar contaminantes, es su condensación mediante el aumento de la presión o extrayendo calor.

Al enfriar una corriente de aire que contenga gases contaminantes, los gases con un punto de condensación bajo se condensarán antes y podrán separarse del resto, como ocurre con los COV (VOC) y otros.

Este último método se suele aplicar utilizando agua como refrigerante. Normalmente se establece un circuito cerrado de refrigeración en tubos en un largo recorrido dentro de una cámara horizontal, por la que, de forma independiente, se hace circular la corriente de aire contaminado, de manera que tenga el contacto más íntimo posible con los tubos refrigerantes. De esta forma, el aire contaminado que al entrar por la parte de arriba de un extremo de la cámara está a una temperatura, sale por la parte superior del otro extremo depurado, habiéndose condensado a lo largo del trayecto, por enfriamiento, los gases contaminantes que se haya previsto separar, que se extraen en forma líquida por la parte inferior de la instalación.

El condensado recuperado se puede reciclar o utilizar como subproducto en muchos casos.

Según la *Ley de Raoult*,

$$y_i = x_i \frac{P_i}{P}, \text{ donde:}$$

y_i = Fracción molar del componente i del gas.

x_i = Fracción molar del componente i en el líquido.

p_i = Presión de vapor del componente i .

P = Presión total.

Por otra parte, según la *Ecuación de Antoine*,

$$\log p = A - \frac{B}{T + C},$$

donde A , B y C son constantes empíricas que se obtienen de tablas con los datos experimentales de A , B , C correspondientes a cada producto según la temperatura de acción.

A partir de estas fórmulas es posible calcular la temperatura necesaria para alcanzar la condensación de cada gas contaminante.

89.7. BIOFILTRACIÓN

Se trata de un proceso por el cual ciertos microorganismos oxidan bioquímicamente las sustancias orgánicas e inorgánicas contenidas en corrientes de aire contaminadas.

En la oxidación, esas sustancias son transformadas en CO_2 , H_2O , sales, etc.,

con una energía que se genera en la propia oxidación bioquímica, por la que además se produce biomasa.

Los microorganismos actuantes son hongos, algas y bacterias, fundamentalmente, por lo que la biocenosis presente es mixta, con varias especies, y depende del gas o de los gases presentes, de la composición y concentración de estos, de la temperatura, del pH, de la humedad, del oxígeno presente, etc.

El proceso de la biofiltración se divide en dos partes: la primera consiste en un pretratamiento, por el que se prepara el medio mediante la separación previa de las posibles partículas que pueda contener la corriente de gas, y en el que se aportan la humedad y la temperatura necesarias para que se realice el proceso biológico. Esta fase se desarrolla en un lavador-humectador antes de pasar a la siguiente, que es el propio biofiltro.

En la segunda parte del proceso, se recibe la corriente gaseosa limpia de partículas y con la humedad y temperatura apropiadas, en un depósito, cerrado o abierto, que sustenta una parrilla sobre la que existe una biomasa esponjosa que va consumiendo las materias orgánicas y demás presentes en la corriente que se aporta, a medida que esta pasa por la masa de microorganismos.

Los microorganismos van transformando así los contaminantes, extrayéndose por la base del depósito los condensados y por la parte superior, si el depósito es abierto, el aire depurado, y si es cerrado, por uno de los extremos

superiores se evacua por chimenea, después de terminar el recorrido por el biofiltro.

En las tablas adjuntas se indican los contaminantes que se pueden tratar y las aplicaciones industriales.

GRUPOS DE CONTAMINANTES EN CORRIENTE GASEOSA QUE SE PUEDEN TRATAR CON BIOFILTRACIÓN

Alcoholes: <ul style="list-style-type: none"> • Etanol. • Metanol. • Glicol. 	Ácidos orgánicos: <ul style="list-style-type: none"> • Ácido acético. • Ácido butírico.
Aldehídos: <ul style="list-style-type: none"> • Acetaldehído. • Formaldehído. 	Esteres de ácidos orgánicos: <ul style="list-style-type: none"> • Ester etilacético. • Ester de ácido glicólico.
Hidrocarburos aromáticos: <ul style="list-style-type: none"> • Benceno. • Tolueno. • Xileno. 	Derivados y combinaciones del nitrógeno: <ul style="list-style-type: none"> • Aminas. • Otros.
Fenoles: <ul style="list-style-type: none"> • Fenol. • Cresol. 	Derivados y combinaciones del azufre: <ul style="list-style-type: none"> • Amoníaco. • Sulfuro de hidrógeno.

APLICACIONES INDUSTRIALES BÁSICAS DE LA BIOFILTRACIÓN

Plantas de tratamiento de aguas residuales.
Plantas de tratamiento de residuos urbanos.
Fundiciones.
Talleres de vulcanizado.
Fábricas de harina de pescado.
Fábricas de harina de carne.
Fábricas con procesado de subproductos animales.
Mataderos.
Fábricas de pegamentos y colas.
Secaderos de tabaco.
Tostaderos de café y de cacao.
Fábricas de pinturas.
Fábricas de disolventes y barnices.
Industrias gráficas.

CAPÍTULO 90

CONTROL DE LOS COMPONENTES VOLÁTILES ORGÁNICOS

90.1. BASES GENERALES

Se llaman componentes volátiles orgánicos (COV, VOC, Volatile Organic Compounds) a los compuestos orgánicos sólidos o líquidos que contienen carbono orgánico y participan en reacciones fotoquímicas atmosféricas, no incluyéndose en este grupo los compuestos con carbono de carbonatos o de carburos, es decir, no se consideran aquí el CO, el CO₂, el H₂CO₃, los carburos y carbonatos metálicos y el carbonato amónico.

Los COV pueden ser:

- Compuestos alifáticos.
- Compuestos aromáticos.
- Compuestos no halogenados.
- Compuestos halogenados.

Esta agrupación artificial de productos (es casi equivalente a la de los hidrocarburos) se considera así por sus características y por su importancia como contaminantes atmosféricos.

90.2. CONTROL DE LOS COV

En principio se puede proceder por cualquiera de las siguientes vías:

Sustitución

Muchos COV pueden ser sustituidos por otros productos, y sobre todo debe intentarse con los COV que sean más tóxicos.

Control de pérdidas

Simplemente se trata de evitar pérdidas en los depósitos, envases y demás sistemas que contengan estos productos, y que por diferencias de temperatura o de presión puedan desplazarse en parte a la atmósfera.

Absorción

Es un sistema que se basa en la transferencia del gas contaminante, por

diferencia de concentración, a una fase líquida absorbente, que después es sometida a una destilación o a un tratamiento biológico.

Adsorción

El sistema se basa en la adsorción del gas contaminante en una fase sólida, que suele estar constituida por carbón activo, alúmina, zeolitas, etc. La fase sólida que ha captado el contaminante deberá ser regenerada o tratada, y esto se puede hacer mediante vapor (y condensación), como suele realizarse con el carbón activo, o por desorción con un gas inerte (si se hace con agua, esta deberá ser tratada después).

Condensación

Se enfría el gas y se condensan los contaminantes. El sistema es eficaz a muy baja temperatura (criogénica), pero costoso.

Incineración térmica

Se incinera el gas a alta temperatura (a más de 1000 °C), lo que oxida al contaminante. El proceso depende de la concentración del contaminante, de la temperatura, del grado de mezcla y del tiempo de residencia. Si está optimizado genera CO₂ y agua, aunque a veces se produce alguna materia tóxica.

Incineración catalítica

Es una incineración similar a la anterior, pero con presencia de un catalizador, que suele ser un metal o su óxi-

do, y a menos temperatura (a menos de 1000 °C).

Oxidación UV

Es una oxidación ante la acción de rayos UV.

Técnicas con membrana

Se pueden utilizar varias de estas técnicas, entre las cuales se pueden citar:

- Microfiltración.
- Ultrafiltración.
- Osmosis inversa.
- Electrodiálisis.
- Pervaporación.

Biofiltración

El gas contaminado se hace pasar por un reactor donde una fitoglea activa consume los COV y los transforma en CO₂, H₂O y biomasa.

El procedimiento sigue la siguiente secuencia:

Gas contaminado →
 Eliminación de partículas →
 Humidificación →
 Biodegradación en la película
 de fitoglea del biofiltro →
 Salida →

Modificación de procesos

Simplemente se trata de buscar alternativas que eviten o reduzcan la formación de COV.

CAPÍTULO 91

CONTROL DE LOS DERIVADOS DEL AZUFRE

91.1. BASES GENERALES

Ya hemos indicado en otras Partes de esta obra la importancia de los derivados del azufre en la industria, las emisiones que se producen y sus efectos sobre los seres vivos y sobre los materiales.

Su tratamiento es, pues, un capítulo fundamental en la lucha contra la contaminación atmosférica, y de ahí que se hayan puesto en marcha desde hace muchos años, y más ahora con las crecientes y ampliamente justificadas restricciones legislativas, medidas, sistemas y procesos de control y depuración cada vez más eficaces.

El control y tratamiento de los derivados del azufre es fundamentalmente de tipo químico, pues los tratamientos físicos o la combustión no son viables por ineficacia o por plantear problemas mayores.

Los derivados del azufre se forman por diferentes procesos, y pueden aparecer en reducciones (H_2S) o en oxidaciones ($\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Sulfatos}$).

91.2. PROCESOS

En la tabla adjunta se indican los procesos básicos de tratamiento.

SISTEMAS BÁSICOS DE TRATAMIENTO DE LOS DERIVADOS DEL AZUFRE

Sector o acción	Procedimiento
Hidrocarburos	Extracción con disolventes. Absorción.
Gases de combustión	<p><i>Absorción en soluciones acuosas:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Paso por una solución acuosa muy diluida de sales alcalinas (disolución y oxidación del SO₂). - Absorción del SO₂ por una solución de sulfito y bisulfito sódico, eliminación de partículas y tratamiento con óxido de cinc. <p><i>Absorción (extracción con amoníaco):</i></p> <p>Se basa en la reacción $2\text{NH}_4 \text{HSO}_3 \rightleftharpoons (\text{NH}_4)_2 \text{SO}_3 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$</p> <ul style="list-style-type: none"> - Absorción del SO₂ en solución acuosa de sulfito amónico y liberación de ese SO₂ por adición de H₂SO₄ - Lavado con agua amoniacal. - Oxidación catalítica del SO₂ a SO₃. Tratamiento con amoníaco. - Tratamiento del SO₂ con amoníaco gas. Se lava el sulfito amónico y se recupera el amoníaco.
Plantas productoras de H ₂ SO ₄ Fundiciones Gases de combustión Gases muy contaminados	<p><i>Oxidación catalítica:</i></p> <p>El tratamiento, con catálisis se basa en las reacciones $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{SO}_3$, utilizando un catalizador de pentóxido de vanadio o de óxido de manganeso.</p> <p>$\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$. Estos procesos se realizan en plantas de doble absorción.</p> <p><i>Método al ferro-óxido:</i></p> <p>Es una oxidación del SO₂ a SO₃ a 500-600 °C. A partir del H₂SO₄ que se produce, se forman sulfatos por combinación con el hierro, que se pueden disociar en ferro-óxidos y en SO₃ a más de 700 °C.</p> <p><i>Sistemas con aminas aromáticas:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Se separan las partículas y se pasa el gas a través de un reactor de absorción con agua y xilidina. Se calienta y se recupera SO₂ puro. Se añade carbonato sódico para obtener sulfato sódico. - Los gases, ya sin partículas, se pasan a una torre de absorción con anhídrido de dimetilnilina, se pasan a una solución de sosa y después a una solución de H₂SO₄. El SO₂ de la dimetilnilina se elimina con calor y vapor. El sulfato de dimetilnilina y el sulfito sódico dan sulfato sódico y sulfito de dimetilnilina. Se libera SO₂, que se purifica y se licua. <p><i>Adsorción:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - El gas contaminado llega a una temperatura ligeramente superior a la del punto de rocío ácido y entra al reactor de adsorción, que está relleno con carbón activo. Se enfría a 104 °C y parte se recicla. El SO₂ adsorbido y en agua se oxida a SO₃ y después a H₂SO₄. Al final gran parte de los gases se reciclan y se aprovechan. - El gas se pasa a través de varias capas de carbón activado, que recibe agua pulverizada. Se va oxidando el SO₂ a SO₃ y a H₂SO₄, que se separa por lavado del carbón activo.

<p>Centrales térmicas de carbón o de derivados del petróleo</p> <p>Gases poco contaminados</p>	<p><i>Lavado:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Lavado con agua y caliza, según la reacción $\text{SO}_2 + 2\text{Ca CO}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Ca SO}_4 + 2\text{CO}_2$ Evacuación por grandes chimeneas. – Se eliminan previamente las partículas y se pasa el gas a contracorriente por una torre con lodos con agua y caliza. El SO_2 se disuelve en el lodo y reacciona con la caliza, produciendo CO_2 y Ca SO_3. Los lodos sobrantes se pasan por un filtro que puede ser de vacío. – Se puede utilizar un procedimiento con Ca (OH)_2, siendo este compuesto más reactivo. – Sistemas de doble álcali: Se utilizan carbonato o bicarbonato sódico en presencia de un poco de calcio. Las sales de sodio son muy solubles y todas las sales estarán disueltas. La reacción es: $\text{SO}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{CO}_2$ y $2\text{Na}_2\text{SO}_3 + 2\text{Ca CO}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Ca SO}_4 + 2\text{Na}_2\text{CO}_3$. – Existen sistemas de tratamiento en seco que se basan en la inyección de partículas alcalinas en el chorro de gas contaminado, que una vez juntas con el SO_2, se capturan por diversos procedimientos (con CaO, Na_2CO_3, Na HCO_3, etc.). – Existen sistemas mixtos de tratamiento húmedo-seco que son combinación de los anteriores y que se utilizan mucho en diferentes procesos industriales.
--	--

Aparte de estos tratamientos, parece lógico actuar en otros campos, como se indica en capítulos anteriores.

Así, el cambio a combustibles con menor contenido en azufre es un paso importante.

Otro, es el tratamiento previo de los combustibles para eliminar el azufre antes de que sean utilizados.

La modificación de los procesos de combustión también es un método muy útil: Los sistemas de lecho fluido y la gasificación del carbón parecen ser las soluciones más apropiadas por el momento, pues permiten una separación eficacísima de los derivados del azufre.

CAPÍTULO 92

CONTROL DE LOS DERIVADOS DEL NITRÓGENO

92.1. BASES GENERALES

Consideramos como derivados del nitrógeno básicamente los NO_x , y dentro de ellos los más importantes son el NO , el NO_2 y el N_2O .

Sus fuentes son sobre todo las emisiones de los vehículos automóviles (el 70-80% del total), las combustiones (15-20% del total) y los procesos industriales (4-6% del total).

Entre el 20 y el 50% del N contenido en los combustibles fósiles, cuando estos se queman, se emite a la atmósfera como NO_x .

Su importancia como contaminantes atmosféricos radica en que contribuyen a las lluvias ácidas y al calentamiento global.

92.2. TRATAMIENTOS

En principio, existen tres vías generales de tratamiento de los NO_x , a saber:

- Lavado con soluciones de OHNa y de KMnO_4 .
- Modificación de los procesos de combustión para evitar la formación de NO_x .
- Tratamiento químico de los gases de combustión para transformar los NO_x en N_2 .

En la tabla adjunta se explican con más detalle estos sistemas.

SISTEMAS GENERALES DE TRATAMIENTO DE LOS NO_x

Sistema	Proceso
Lavado	<p>En fuentes de poca emisión de NO_x es viable económicamente realizar un lavado de los gases con soluciones de OHNa y de KMnO₄.</p> <p>El NO es poco soluble en agua, por lo que si se añade al líquido KMnO₄, este oxidante lo transforma rápidamente en NO₂, que será captado por el OHNa.</p> <p>Se pueden modificar en parte los factores que determinan la combustión, a saber:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura punta. • Tiempo de combustión a temperatura punta. • Contenido en oxígeno a temperatura punta. • Tiempo y oxígeno a alta temperatura.
Modificación de los procesos de combustión	<p>De esta manera se reduce considerablemente la producción de NO en la misma combustión.</p> <p>Se utilizan sistemas de combustión en dos etapas que tratan que se forme muy poco o nada de NO por falta de oxígeno.</p>
Tratamiento químico de los gases de combustión	<p>Se añade un agente reductor al gas que sale de la combustión, para tomar el oxígeno del NO. Esto se hace con CO en los motores de combustión y con NH₃ o similares en los hornos.</p> <p>El proceso puede ser catalizado con platino-rodio en vehículos, o con zeolitas en hornos (en estos últimos, si la temperatura supera los 870°C y es inferior a 980°C, no es necesario el catalizador).</p> <p>En las centrales térmicas el agente reductor suele ser el amoníaco, por ser de bajo precio. Se reducen el NO y el NO₂.</p>

CAPÍTULO 93

CONTROL DE LOS DERIVADOS DEL CARBONO

93.1. FUENTES CONTROLABLES

En principio, solo trataremos lo referente al CO, pues el CO₂ se considera bajo otros puntos de vista en capítulos que tratan sobre el efecto invernadero y otros en esta misma Parte.

Gran parte del CO se genera en los escapes de los vehículos de combustión interna. En total, en la tabla adjunta se indica un resumen de las principales fuentes de emisión que pueden ser controladas de alguna forma.

FUENTES BÁSICAS DE EMISIÓN DE CO QUE PUEDEN SER CONTROLADAS

Escapes de los motores de combustión interna. Humo del tabaco. Combustiones en general. Siderurgia. Motores de aviación. Procesado del petróleo. Calderas de carbón mal regladas o de mala calidad. Industria química. Incineradores de residuos urbanos. Fusión del Pb, del Co y del Cu en las industrias especializadas. Incendios forestales.
--

93.2. TRATAMIENTOS

En la lista adjunta se indican los sistemas más aplicados.

- Reducción de las emisiones de los vehículos automóviles con motor de combustión interna.
- Normativa legal restrictiva.
- Restricciones del tráfico en zonas de mucha circulación en situaciones meteorológicas adversas (inversiones térmicas, calmas meteorológicas, etc.).
- Ajuste de las combustiones.
- Uso de convertidores catalíticos en los motores y en las calderas.
- Uso de inyectores en los motores de combustión interna.
- Ajuste y reglaje de los sistemas de combustión en los motores en general.
- Uso de incineradores y quemadores de cámaras múltiples con postcombustión.

- Oxidación a CO₂.
- Ajuste del calibre del carbón para su mejor incineración.
- Mejoras en los sistemas de fusión de metales en las industrias especializadas.
- Previsión y extinción rápida de los incendios forestales.
- Mejor aprovechamiento en los procesos de la industria del petróleo.
- Mejor aprovechamiento en los procesos de la industria química.
- Uso de exceso de aire en las combustiones.
- Optimización de las mezclas combustible-aire.
- Restricción masiva del consumo de tabaco:
 - Restricciones de fumar en lugares públicos.
 - Campañas antitabaco.
 - Información al público.
 - Reducción de las prestaciones sociales a fumadores.

CAPÍTULO 94

CONTROL DE LAS EMISIONES DE PLOMO

Hasta hace muy poco tiempo, más del 90% del plomo existente en la atmósfera tenía como origen el consumo de gasolinas con plomo tetraetilo utilizado como antidetonante.

El plomo que se acumula en el cuerpo humano tiene además otros orígenes, como la industria, la minería de ciertos metales, el polvo en los interiores, el humo del tabaco, etc.

Su tratamiento y control se ha de basar en las medidas siguientes:

- Normativa cada vez más restrictiva en actitudes, procesos y concentraciones.
- Campañas antitabaco:
 - Prohibición de fumar en lugares cerrados.
 - Información al público.
- Eliminación total del plomo en las gasolinas.
- Control y eliminación del polvo en interiores.
- Control de las emisiones de metales pesados en los incineradores de residuos urbanos.
- Sustitución de sistemas de soldadura al estaño, pues las varillas de soldar suelen tener hasta un 70% de plomo y al proceder a la operación se emiten óxidos de plomo.
- Cambio del sistema de decapado de pinturas en caliente, pues el calor quema la pintura y se desprenden humos con metales pesados.
- Aplicación de las técnicas más eficaces de captación de partículas pequeñas.
- Mejora o sustitución de ciertos procesos industriales.
- Mejora o cambio de algunos procesos de combustión que emiten vapores de plomo o de sales de plomo.
- Enfriamiento de los gases con vapores de plomo, para que este o sus compuestos se condensen y las partículas

- resultantes sean captadas mediante sistemas de alta eficacia.
- Uso de sedimentadores de partículas.
- Uso de precipitadores electrostáticos centrífugos.
- Uso de filtros de mangas.
- Uso de lavadores por vía húmeda.
- Uso de tubos *Venturi*.

CAPÍTULO 95

TRATAMIENTO Y CONTROL DE LOS OLORES

95.1. REDUCCIÓN DE LA PERTURBACIÓN

Los procedimientos usuales más generalizados son:

- Adsorción.
- Cambio del proceso generador del olor.
- Uso de bacterias.
- Dilución.
- Condensación.
- Enmascaradores.
- Contrarreactivos.
- Oxidación:
 - Incineración.
 - Absorción química por vía húmeda.
 - Lavado por vía húmeda.
 - Oxidación por vía seca (gas).

A cada caso se le aplicará el sistema más adecuado.

Solamente el primer método y el último son verdaderamente sistemas de reducción de olores.

TÉCNICAS BÁSICAS DE REDUCCIÓN DE OLORES APLICADAS A DIFERENTES CASOS PRÁCTICOS

Industria	Técnica de reducción de olores
Refinería de petróleo	S, T, CC, P
Fertilizantes	S, A, CC, P
Detergentes	S, P
Resinas orgánicas	S, T, P
Plaguicidas	S, E, D, A, P
Textil	S, A, T, CC, P
Curtidos	E, P
Transportes	A, CC, P
Tostaderos de café	S, E, C, D, T, P
Pinturas	S, D, A, T, P
Laboratorios farmacéuticos	S, A, P
Colas y pegamentos	S, E, A, T, O, P
Jabones	S, A, T, P
Papel Kraft	S, E, C, D, P

O = Oxidación química.

D = Dilución.

E = Enmascaramiento.

C = Contrarreactivos.

S = Lavado por vía húmeda.

A = Adsorción.

T = Incineración.

CC = Combustión catalítica.

P = Modificación de procesos.

La modificación de los procesos, incluida la protección a lo largo de las líneas de producción, son las técnicas más adecuadas casi siempre.

Generalmente existen cuatro factores básicos a tener en cuenta en la lucha contra los olores, a saber:

- Intensidad - concentración
- Volumen de emisión
- Tipo de olor
- Ubicación de la fuente

Según sea la situación, algunos de estos factores serán los elementos determinantes del problema que habrá que tener en cuenta para orientar las medidas a tomar, según las indicaciones tipo reflejadas en la tabla de ejemplos adjunta.

95.2. CONTROL

95.2.1. Bases del control

Es fácil deducir que se pueden controlar algunos olores si se eliminan o se tratan las partículas que, en ciertos casos, los transportan.

Un lavador por vía húmeda puede tratar gases y corrientes líquidas por procedimientos físico-químicos, y puede separar las partículas presentes.

Para captar y separar partículas olorosas, son muy útiles los precipitadores electrostáticos en cierto tipo de industrias, como ocurre con las textiles, las agroalimentarias, las imprentas o la industria de la pasta y el papel. Una vez separadas las partículas, se retiran de las superficies de captación mediante pulverización con agua caliente a presión.

Para el control de los olores generados por el SH_2 en lagunas anaerobias o en estanques, es posible utilizar bacterias, aunque estas son bastante sensibles a las temperaturas extremas y a la disponibilidad de alimento en los ecosistemas en que se ubiquen.

En ciertas industrias se puede utilizar la condensación. El sistema suele aplicarse en uso combinado con lavadores, con incineración o con adsorción.

El control de los olores debe tener un carácter integral, es decir, deben tratarse en todos sus aspectos de captación, separación, tratamiento, confinamiento y mantenimiento del sistema aplicado. Asimismo deben tenerse en cuenta el transporte, la limpieza del material, el manejo de los productos crudos (materias primas) y acabados y su almacenamiento. Finalmente, es necesario tener en cuenta la disposición y gestión final de los residuos producidos.

La gestión adecuada de los olores no solo consiste en conseguir una alta eficacia en su eliminación, sino que tiene

también implicaciones económicas, sociales, de materias primas y combustibles, de tipos y volumen de residuos generados, etc., y todos estos factores han de tenerse en cuenta a la hora de decidir un plan de control de olores en una de-

terminada actividad, y ese plan, como indicamos, ha de ser, bajo todo punto de vista, *integral*.

A continuación detallamos algunos de los sistemas más utilizados.

SISTEMAS MÁS COMUNES DE DESODORIZACIÓN

Acción	Método	Sistema
Eliminación de partículas (olorosas)	Métodos mecánicos	Aparatos de gravedad Aparatos de inercia Aparatos centrífugos (ciclones, etc.)
	Métodos hidráulicos (vía húmeda)	Lavadores de contacto Pulverizadores Lavadores mixtos Condensadores
	Métodos por porosidad	Filtros de mangas
	Métodos eléctricos	Electrofiltros
	Ultrasonidos	Efectos: Colisión, atracción, pared, presión de radiación.
Tratamiento de gases (Olores)	Combustión	Antorchas Incineradores Quemadores de postcombustión Combustión catalítica
	Absorción	Torres de lavado Torres centrífugas y de pulverización
	Adsorción	Lecho adsorbente fino

95.2.2. Incineración

La incineración se puede realizar según dos vías básicas, como son la oxidación catalítica y la oxidación térmica, y el objetivo siempre es transformar los productos olorosos (gases o partículas) en óxidos, como ocurre con los com-

puestos orgánicos, que se convierten en agua y CO₂.

Para efectuar la transformación se utilizan incineradores, aparatos que conjugando los elementos de la combustión (oxígeno, tiempo, temperatura, turbulencia y combustible), pueden proporcionar

las condiciones óptimas necesarias de oxidación.

En muchos casos es necesario el uso de combustibles de apoyo, como sucede con los incineradores de lecho estático, cuando se necesita tratar olores en muy baja concentración y con temperatura elevada.

Cuando se utiliza lecho fluido (en incineradores dinámicos) para productos olorosos sólidos, la turbulencia obtenida hace que se pueda reducir fuertemente la temperatura de operación.

Como acabamos de indicar, utilizando adecuadamente los elementos de la combustión y optimizando la operación, se pueden conseguir rendimientos del 96 al 99,5%.

95.2.3. Oxidación catalítica

El sistema se basa en la utilización de catalizadores o agentes que provocan o aceleran las reacciones químicas, sin participar directamente ellos mismos. En la combustión de la materia orgánica, incluidos los hidrocarburos, es muy factible la oxidación catalítica, pues se consigue el efecto deseado a temperaturas muy inferiores a las que tendría que realizarse la oxidación si esta fuera una simple combustión.

Al ser necesaria una temperatura inferior a la de una combustión convencio-

nal, se consumirán, además, menores cantidades de combustible de apoyo.

La oxidación catalítica comprende los siguientes fenómenos:

- Transferencia de masa de los reactivos del fluido a la superficie de catálisis, y de la reacción de los productos de la superficie de catálisis a la superficie. Es una reacción reversible.
- Difusión de los reactivos y de los productos de reacción dentro y fuera de los poros del catalizador.
- Adsorción de los productos de reacción desde la superficie del catalizador.
- Desorción de los productos de reacción desde la superficie del catalizador.
- Reacciones superficiales de los reactivos adsorbidos para formar después productos químicos adsorbidos.

Los catalizadores que se utilizan normalmente en la oxidación catalítica están constituidos por metales como Pt, V, Pd, Mn, Cu, o Ni.

Generalmente se necesitan cantidades pequeñas de metal y de óxidos metálicos para obtener la mayor superficie de contacto posible con la corriente gaseosa.

EJEMPLOS DE COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS NECESARIAS PARA LA OXIDACIÓN CATALÍTICA Y PARA LA COMBUSTIÓN

Producto (Hidrocarburo)	Temperatura de combustión (en C°)	Temperatura en oxidación catalítica (en C°)
Hidrógeno	574	22
Acetileno	305	166
Benceno	580	227
Nafta	321	231
Tolueno	552	238
n-Octano	230	255
n-Butano	441	299
n-Hexano	248	232
Propano	481	343
Etano	360	472
Metano	404	632

APLICACIONES DE LA OXIDACIÓN CATALÍTICA

Producto o proceso	Temperatura para oxidación catalítica (en C°)	Contaminantes tratados
Cracking catalítico	343-426	Hidrocarburos, CO
Formaldehido	343	CO, CH ₄ , H ₂ , HCHO
Negro de carbón	648-982	Carbón, CO, CH ₄ , H ₂
Anhídrido ftálico	315-343	CO, HCHO, ácidos ftálico y maléico, naftoquinonas
Polietileno	260-648	Hidrocarburos
Cok	315-371	Vapores de petróleo, ceras
Esmaltes	315-371	Resinas, disolventes, colorantes
Barnices	315-371	Vapores de hidrocarburos

95.2.4. Condensación previa

Este sistema es muy útil, y además de aplicarse en el control de olores, puede instalarse antes de una incineración o de un lavado. Puede servir para recuperar parte del producto tratado.

Existen dos tipos de condensadores:

- Condensadores de contacto.
- Condensadores de superficie.

Los condensadores de contacto mezclan el condensado, los vapores y el refrigerante (que suele ser agua).

Los condensadores de superficie provocan el contacto de los vapores y el condensado con una superficie refrigerada, sin mezclarse con el refrigerante.

El sistema, en general, se basa en separar de la corriente gaseosa los conta-

minantes que pueden condensarse, con rendimientos de más del 96%.

Si se utiliza el primer sistema citado (contacto), se consigue más condensado, aunque con mayor consumo de agua y es un sistema muy útil, pues en muchos casos puede actuar además como un lavador, sobre todo si alguno de los productos volátiles presentes es soluble en el agua.

95.2.5. Lavado por vía húmeda

Líneas generales del lavado

El lavado de gases para eliminar sus olores se basa en el paso de la corriente gaseosa a través de líquidos, que pueden capturar las partículas generadoras de olor o eventualmente absorber los gases olorosos.

Los lavadores de gases pueden ser de diversos tipos, operando unos a alta presión con tiempo mínimo de contacto con el líquido lavador (*Venturi*), lavando otros a baja presión (contactor, torres de lavado), etc.

Los lavadores por vía húmeda generan un residuo húmedo y una corriente gaseosa húmeda, que habrán de ser tratados de forma que del primero se separen los lodos y se gestionen adecuadamente (deshidratación, vertido en lugares adecuados, etc.), y de la segunda que se separe la fase líquida, para que de este modo se complete el tratamiento de eliminación de olores y de gestión correcta de emisiones y residuos.

Lavadores Venturi

Se basa este sistema en la pulverización (atomización) del líquido en el tramo estrecho de un tubo *Venturi*, de forma que al pasar el gas por el estrechamiento choca contra las gotas del líquido y hasta que estas alcanzan por arrastre la misma velocidad que el gas, van chocando con él, y estas colisiones provocan la captación de las partículas en el líquido.

Existen diversas variantes basadas en el tubo de *Venturi*, adaptadas a diferentes problemas de emisión de olores.

95.2.6. Absorción

Consiste simplemente en una transferencia de masas de los olores del gas a una fase líquida absorbente, diferenciándose del lavado por vía húmeda en que este último se orienta a las partículas, mientras que la absorción actúa básicamente sobre los gases.

Las moléculas del gas a absorber se separan de la fase gaseosa por difusión, atraviesan la interfase gas-líquido y se incorporan a la fase líquida.

El movimiento molecular en la difusión puede ser lento (difusión natural) o rápido (difusión turbulenta).

Es muy frecuente la adición de productos químicos al absorbente para que reaccionen con los gases absorbidos (y algo con las partículas), sobre todo si estos no son muy solubles en agua.

Se suelen utilizar como absorbentes agua, agua con pH ajustado o agua con

pH ajustado o sin ajustar y con productos químicos.

Si se efectúa una absorción química de los olores, se forman nuevas sustancias, con reacciones irreversibles.

Los reactivos más usuales son:

- Hipoclorito sódico.
- Agua oxigenada.
- Cloro.
- Ácido sulfúrico.
- Acido fosfórico.
- Permanganato potásico.
- Ozono.
- Hidróxido sódico.

Los sistemas de absorción de olores más utilizados son las torres de pulverización y las torres de contracorriente y de corrientes cruzadas, aunque es muy frecuente la instalación de sistemas mixtos con *Venturi*, sistemas de espiral, etc.

95.2.7. Ozonización

El sistema consiste en la adición de ozono en alguno de los procesos, de forma que se verifique una oxidación seca o húmeda.

La vía más adecuada de ozonización parece ser efectuar un lavado con un líquido previamente ozonizado, es decir, se añade el ozono al líquido en vez de al gas, con lo que se pueden controlar muy bien las cantidades de ozono a aplicar.

La oxidación con ozono por vía húmeda (con agua) es eficazísima en el control de olores de lodos de depuradora, como se ha comprobado en diversas instalaciones desde 1990.

95.2.8. Adsorción

Se basa el sistema en las propiedades físicas de algunos sólidos porosos de estructura ultramicroscópica, que les permiten atraer selectivamente los gases y adsorberlos en su superficie.

Los adsorbentes pueden ser sólidos o líquidos, aunque estos últimos se suelen incluir en los tratamientos de absorción por efectuarse casi siempre, en este caso, ambos fenómenos a la vez.

El proceso consiste en un transporte de la masa del gas oloroso en fase gaseosa por convección, y en una difusión de este en los poros del adsorbente.

Generalmente se utiliza carbón activo a causa de las ventajas siguientes:

- Tiene una gran superficie (1.400 m²/g).
- Es un material no polar.
- Retiene los vapores orgánicos de Pm > 45.
- Se puede regenerar con facilidad.
- Retiene los vapores orgánicos con punto de ebullición por encima de 0 °C.

RETENCIÓN DE GASES POR CARBÓN ACTIVO (ADSORCIÓN)

Producto	Punto de ebullición (°C)	% de retención (referido al peso del carbón) a 20 °C y 760 mm
Ozono	-112	Se transforma en O ₂
Escatol	266	25
Putrescina	158	25
Tolueno	11	29
Dióxido de azufre	-10	10
Etilmercaptano	35	23
Formaldehido	-21	3
Ácido butírico	164	35
Acetaldehido	21	7
Cloruro de metilo	-24	5
Acetato de etilo	77	19

La adsorción de un gas oloroso aumenta con la presión y la concentración, y disminuye con la temperatura.

Aparte del carbón activo, existen otros adsorbentes para olores, como se indica en la tabla adjunta.

ADSORBENTES DE USO MÁS COMÚN

Producto	Acción o campo de actuación
Carbón activo	Gases no polares, hidrocarburos.
Carbón vegetal (o animal)	Gases no polares, hidrocarburos.
Hidróxidos: óxido de aluminio, gel de sílice, silicato magnésico	Gases polares, vapores polares.
Metales pulverizados	Como catalizadores.
Productos terrosos: bauxitas, arcillas, gredas	Baja capacidad de adsorción.

Para diseñar un sistema de tratamiento de olores por adsorción, se deben tener en cuenta los factores siguientes:

- Capacidad de adsorción del adsorbente.
- Posibilidades de regeneración.
- Tiempo de contacto entre el gas y el adsorbente.
- Garantía de distribución uniforme del gas sobre todo el adsorbente.
- Resistencia a la corriente gaseosa.
- Caudal del gas.
- Volumen del gas a tratar.

95.3. CASOS PRÁCTICOS

EJEMPLOS DE TRATAMIENTOS PRÁCTICOS INDUSTRIALES DE OLORES

Actividad	Condiciones y efectos	Sistema
Conservera de pescado	Gases calientes con alto contenido en partículas. Lavado de partículas, oxidación de gases, absorción. Actúa sobre aminas, aldehidos, mercaptanos, SH ₂ , grasas, etc. Se pueden alcanzar rendimientos hasta del 99%.	Venturi de baja energía (separa partículas y enfría los gases) + sistema de flujo cruzado con pulverización de cloro gas (con absorbente líquido en forma de solución cáustica diluida) + sistema de flujo cruzado con solución de SO ₄ H ₂ como absorbente + sistema de flujo cruzado con solución cáustica diluida.
Planta asfáltica	Vapores. Rendimiento del 92%	Lavador horizontal con una ligera pendiente. Se utiliza permanganato potásico reciclable como absorbente.
Tenerías, industria agroalimentaria, envasadoras de carne, industrias químicas diversas, plantas de pasta papelera, etc.	SH ₂ , SO ₂ , etc. Rendimiento del 98,5%	Sistema <i>Pepcon</i> . Sistema electrolítico. Produce oxidantes como ozono e hipoclorito sódico que reaccionan con el gas oloroso. Está formado por un rectificador en corriente directa + depósito de salmuera + células electrolíticas + torre de lavado + sistema de reciclado. Se pulveriza la solución oxidante en la torre de lavado y se reciclan los oxidantes mediante la electrolisis.
Vertedero controlado	Metano, SH ₂ , SO ₂ , CO ₂ , etc.	El gas se puede procesar y consumir, o puede ser utilizado. En el primer caso se recoge mediante pozos y se lleva a un incinerador. El metano se transforma en CO ₂ y vapor de agua, y el SH ₂ pasa a SO ₂ , que deberá ser evaluado. El calor producido en la incineración puede ser aplicado a la generación de vapor. En el segundo caso se pueden utilizar, a partir de los pozos de captación, tamices moleculares, y se pueden incorporar los gases a la red comercial de gas de consumo industrial y urbano.

CAPÍTULO 96

REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES

96.1. PLAN GENERAL DE REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES

En principio, en los capítulos anteriores se han indicado los sistemas de tratamiento, agrupándose aquí todas las posibilidades de que disponemos para realizar así un enfoque integral, y no solamente aplicar soluciones de descontaminación.

La anticontaminación, con la mejora de los procesos y de los combustibles, con medidas urbanísticas apropiadas y con otros métodos similares, se completará con las medidas de descontaminación (tratamientos).

Finalmente, hemos de indicar que la normativa legal que emiten los Organismos supranacionales, la Unión Europea y los países desarrollados, cada vez más restrictiva, hace que la reducción de las emisiones, aparte de un problema técnico, sea un imperativo legal que obliga a ellas, por lo que no se deben descartar en algunos

casos incluso el cierre de instalaciones, cosa impensable hace solo 10 ó 12 años.

96.2. CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES

Para cualquier estudio o proyecto de reducción o de eliminación de problemas de contaminación atmosférica, es necesario clasificar las fuentes por las siguientes razones:

- Para identificar a los autores de las emisiones.
- Para aplicarles el principio de *el que contamina paga*.
- Para que respeten la normativa vigente.
- Para poder conocer los diferentes focos emisores y poder establecer una estrategia de control apropiado.
- Para establecer la frecuencia de las emisiones.
- Para establecer el nivel de nocividad de las emisiones.

- Para establecer un orden de prioridades en las actuaciones.

Las fuentes artificiales pueden ser de los siguientes tipos:

- Puntuales:
 - Móviles (vehículos, aviones).
- Fijas:
 - Aparatos.
 - Instalaciones industriales diversas.
 - Calefacción.
 - Combustiones de otros tipos.
- Difusas:
 - Agua (depuradoras, aguas contaminadas).
 - Suelo (suelos contaminados por actividades industriales o agrarias).
 - Construcción (muros y edificios).

En general, las clasificaciones pueden realizarse según objetivos, y pueden ser:

- Según la naturaleza del foco de emisión (caso anterior).
- Según su número.
- Según su nocividad (con los criterios de frecuencia, densidad, riesgo inducido, dispersión geográfica, emisiones regulares, emisiones accidentales).

Los objetivos darán origen a unas normas de calidad y de control.

96.3. REGLAS Y COSTOS BÁSICOS

Como regla fundamental debemos indicar que *nunca* se debe efectuar una dilución antes de tratar la emisión.

Un razonamiento muy apropiado es el siguiente (*J. Martín*, 1988):

$$F = A \cdot C \text{ mg/h, siendo:}$$

F = Flujo del agente contaminante.

A = Caudal/hora (en m^3/h) de un aire contaminado por el agente citado.

C = Concentración del contaminante (en mg/m^3).

Si la masa de aire contaminado se diluye n veces, el nuevo caudal de aire menos contaminado será $n \cdot A$ y su concentración será C/n .

El costo de una instalación de descontaminación de aire y de su explotación, es básicamente proporcional al flujo de aire, y aunque mucho menos, también lo es a la concentración del contaminante.

El costo de una instalación de tratamiento del aire contaminado sin diluir será:

$$\frac{T \times A}{F} = D \text{ Dl/mg, donde:}$$

T = Costo del tratamiento de 1 m^3 de aire contaminado (en Dl/m^3).

a = Factor que depende de la concentración ($a = 1$ si el aire está contaminado y sin diluir; $a = 0,90$ si ese aire contaminado está diluido).

D = Costo del tratamiento del aire sin diluir.

y el costo de una instalación de tratamiento del aire contaminado diluido, será:

$$\frac{a T \times n \times A}{F} = a n D \approx n D \text{ Dl/mg}$$

es decir n veces el costo del tratamiento del aire sin diluir.

Casi todos los contaminantes atmosféricos, debido a su propia naturaleza, se diluyen fácilmente en el aire, pudiendo diferenciarse dos grupos, a saber:

- *Fuentes situadas en espacios libres*, como son las fuentes puntuales móviles y las fuentes difusas.
- *Fuentes situadas en espacios más o menos cerrados*, como son las fuentes puntuales fijas.

En estas últimas es donde se debe incidir en el control de los flujos, captando los gases lo más cerca posible de la fuente y tratándolos o recirculándolos.

Así se consiguen dos objetivos fundamentales:

- Se reducen al mínimo los flujos del gas contaminante.
- Se mejora el confort de los trabajadores, al evitar una dilución insuficiente de los gases en los espacios cerrados como oficinas, naves industriales o en minería.

96.4. MÉTODOS DE TRATAMIENTO

Véanse los capítulos correspondientes.

96.5. ACCIONES URBANÍSTICAS

- Planeamiento y proyecto de los edificios:

- Los materiales que absorben energía solar aumentan el efecto *isla de calor* (se corrige aumentando las superficies).
- Altura.
- Volumen.
- Orientación.
- Uso de vegetación en el entorno de los edificios.
- Riegos frecuentes.
- Zonación adecuada.
 - Evitar siempre edificar aglomeraciones en el fondo de valles.
- Diseño de formas urbanas apropiadas.
 - Calles.
 - Manzanas o cuadras con patio.
 - Villas.
 - Grandes edificios.
- Implantación de masas de vegetación urbana.
 - En calles.
 - En plazas.
 - En parques.
- Gestión apropiada de los desplazamientos.
 - Apoyo al transporte público.
 - Moderación-reducción de la circulación.
- Gestión del tiempo.
 - Pérdidas de tiempo en el transporte privado.
 - Pérdidas de tiempo en el transporte público.

- Horas punta.
- Cambio y adaptación de los horarios del comercio.
- Reducción de los desplazamientos mediante el uso de:
 - Teléfono.
 - Fax.
 - Ordenador-computadora.
 - Fotocopiadoras.
 - Videotextos.

CAPÍTULO 97

TÉCNICAS Y MÉTODOS DE REDUCCIÓN DEL EFECTO INVERNADERO

97.1. ACCIÓN POLÍTICA INTERNACIONAL

Vease el capítulo 43.

97.2. ACTUACIONES DE LA UNIÓN EUROPEA Y DE ESPAÑA CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO

Vease el capítulo 43.

97.3. MEDIDAS TÉCNICAS

97.3.1. Sector energético

- Reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero si se consumen combustibles fósiles.
- Aumento del rendimiento de conversión de estos combustibles.
 - Ciclo combinado.
- Aumento en la producción de energía eléctrica.
- Uso de combustibles fósiles más limpios.
- Cambio del carbón a final o a gas natural.
- Descarburación de los gases y combustibles.
- Almacenamiento de CO₂ y obtención de combustibles de alto contenido en hidrógeno.
- Reducción de las emisiones de metano y otros gases en los procesos de extracción y distribución.
- Ahorro de energía:
 - Mejora en los procesos industriales.
 - Mejora en aislamientos.
 - Potenciación del uso de energías renovables.
 - Eólica.
 - Biomasa.
 - Hidráulica.
 - Solar.

97.3.2. Sector industrial

Se trata de reducir considerablemente las emisiones de gases de efecto invernadero que se generan en múltiples procesos industriales.

Fundamentalmente, estos gases son:

- Dióxido de carbono.
- Metano.
- Óxido nitroso.
- Hidrocarburos halogenados.
- Hexafluoruro de azufre.

Las industrias que los generan son, sobre todo:

- Siderúrgicas de hierro y acero.
- Fábricas de aluminio.
- Fábricas de amoníaco y derivados.
- Cementeras.
- Industria química diversa.

Para reducir las emisiones en el sector industrial se pueden realizar, entre otras, las siguientes actuaciones:

- Modificación de procesos.
- Eliminación de disolventes.
- Sustitución de materias primas.
- Sustitución de materiales.
- Aplicación del reciclaje.
- Reducción del consumo de materiales.
- Recuperación de metano en las depuradoras de aguas residuales.
- Reducción de los HFC.

97.3.3. Sector de los transportes

- Uso de vehículos de bajo consumo de combustible.
- Uso de vehículos con diseño aerodinámico y con motores muy eficaces y ligeros.
- Modificación de los sistemas de transporte.
- Modificación de la forma y sistema de vida al respecto.
- Modificación del concepto de movilidad.
- Puesta en marcha de sistemas de transporte de bajo consumo de energía.
- Uso de combustibles procedentes de fuentes renovables.

97.3.4. Sector agrario

- Uso de combustibles procedentes de la biomasa.
- Gestión forestal adecuada.
- Gestión apropiada de pastizales.
- Gestión apropiada de terrenos de cultivo.
- Mantenimiento y ampliación de la cubierta forestal.
- Limitación de la deforestación.
- Creación de viveros y plantaciones.
- Promoción de la silvicultura.

97.3.5. Sector urbano

- Transportes urbanos apropiados, utilizando las líneas antes indicadas.
- Reducción de intercambios térmicos en los edificios, mejorando calidades aislantes.
- Mejora en el rendimiento energético de calefacción.
- Mejora en el rendimiento energético de la refrigeración.
- Mejora en el rendimiento energético de los suministros de agua.
- Mejora en el rendimiento energético de los electrodomésticos.

97.3.6. Sectores y medidas político-legales

- Legislación y normativa apropiadas.
- Tarificación energética.

- Actuación legal y supresión de reglamentos y subvenciones que favorecen la emisión de gases de efecto invernadero.
- Derechos de emisión.
- Programas y acuerdos con la industria.
- Gestión de servicios públicos.
- Gestión de proveedores de energía.
- Normas mínimas de rendimiento energético.
- Estimulación de investigación y desarrollo.
- Estimulación del uso de nuevas tecnologías limpias.
- Apoyo a las energías renovables.
- Medidas de sensibilización, formación e información.

CAPÍTULO 98

TÉCNICAS Y MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE LOS GASES QUE AFECTAN A LA CAPA DE OZONO

98.1. PROTECCIÓN INTERNACIONAL DE LA CAPA DE OZONO: REDUCCIÓN Y CONTROL DE EMISIONES

Cuando en 1974 se evidenció el efecto devastador de los CFCs sobre la capa de ozono, se empezaron a tomar medidas. El CFC, cuando llega a la estratosfera se disocia, liberando el cloro, que capta el oxígeno del ozono, destruyendo su estructura. En 1977 se iniciaron las primeras prohibiciones y limitaciones. En EE.UU. se eliminaron los CFCs de los aerosoles, exceptuando los que tenían fines médicos. En 1980, la CEE acordó no seguir produciendo CFCs y reducir en un 30% su empleo en los aerosoles.

Paralelamente, el PNUMA organizó el Plan Mundial de Acción sobre la Capa de Ozono, ocupándose de temas como la vigilancia, los efectos de la radiación ultravioleta sobre la salud humana, etc.

Por otra parte, se establecieron modelos de predicción, los cuales afirma-

ban que en los próximos 100 años la capa de ozono podría disminuir en un 3% a nivel global, pero a nivel local este porcentaje podría alcanzar el 30%. Entre los años 1977 y 1984, se observó que la cantidad de ozono estratosférico sobre la Antártida, en primavera, había disminuido en más de un 40%, dando lugar al famoso *Agujero de ozono*.

Los convenios internacionales de protección más relevantes han sido:

- *Convenio de Viena*. Se aprobó en 1985, y su entrada en vigor no llegó hasta 1988. Se esbozaron las líneas generales de acción para la protección de la capa de ozono. El objetivo fundamental del Convenio era adoptar las medidas apropiadas para proteger la salud humana y el medio ambiente contra los efectos nocivos que pueden ser consecuencia de las actividades humanas que modifican, o pueden llegar a modificar, la capa de ozono. En este convenio no se tuvieron en cuenta los CFCs como objeto de control,

sino sustancias químicas potencialmente agresoras, en general.

Los compromisos básicos del Convenio son:

- Estimular la investigación y la cooperación entre los miembros del Convenio.
 - Cooperación mediante la realización de observaciones sistemáticas.
 - Intercambio de información de los efectos producidos por las actividades humanas.
 - Repercusiones de estas modificaciones sobre la salud humana.
 - Adopción de medidas legales para controlar estas actividades humanas.
 - Establecimiento de protocolos para adoptar las obligaciones del Convenio.
- *Protocolo de Montreal sobre las sustancias que destruyen la capa de ozono y las acciones de la UE.* Tras la aprobación del Convenio de Viena, se desarrolló un protocolo que regulase las sustancias potencialmente peligrosas para el ozono. Para el desarrollo de este protocolo hubo una serie de inconvenientes que retrasaron su redacción, como fueron los siguientes:
- No había total seguridad sobre el agujero de ozono antártico.
 - No se conseguía llegar a un acuerdo sobre la forma de control de las emisiones, pues unos países optaban por la descontaminación mientras que otros pretendían la anticontaminación.

En 1987, el agujero de ozono antártico y su relación con los CFCs era un hecho constatado. En septiembre de ese mismo año se firmó el Protocolo de Montreal, cuya máxima prioridad era prohibir la producción y el uso de ciertos CFCs a partir de 1989 y de los halones a partir de 1992. Se observó una reducción del 20% desde 1993 y del 50% a partir de 1998, en relación con los niveles de 1986.

El Protocolo se basaba en la regulación del comercio internacional de estas sustancias químicas.

En 1989 se descubrió que el agujero de ozono era mayor de lo que se pensaba, que los causantes eran los CFCs, y que había un adelgazamiento en la capa de ozono del ártico y en el resto del planeta.

La Comunidad Europea se declinó por una reducción del 85% de la producción y del consumo, para lograr después su total eliminación a finales del siglo. Puso en funcionamiento un Reglamento según el cual el plazo para la eliminación de los CFCs era a finales de junio de 1997. Actualmente (siglo XXI), la Comisión Europea ha adoptado una propuesta de nueva regulación sobre las sustancias que agotan la capa de ozono, que entre otras cuestiones pretende:

- Prohibir el uso y producción de plaguicidas con bromuro de metilo en 2001.
- Prohibir el uso de HCFCs en:
 - Espumas de poliuretano, en 2003.

- Equipos de refrigeración, en 2001.
- Disolventes, en 2003.
- Congelar la producción de HCFCs hasta el año 2008.

En 1990 se aprobaron los Ajustes y la Enmienda al Protocolo de Montreal, en los cuales los CFCs serían eliminados para el año 2000.

Este Protocolo, se ha cumplido ampliamente.

Según esto, se puede establecer un calendario de eliminación de las sustancias que atacan a la capa de ozono.

En primer lugar se muestra el plan de eliminación de sustancias dañinas a la capa de ozono en países desarrollados,

**PLAN DE ELIMINACIÓN DE
SUSTANCIAS DAÑINAS PARA LA
CAPA DE OZONO PARA LOS
PAÍSES DESARROLLADOS, SEGÚN
EL PROTOCOLO DE MONTREAL**

Fecha	Sustancia	Porcentaje de reducción
1996	CFCs, TCC, MCLF, HBFCs	100
1994	Halones	100
2004	HCFCs	35
2010		65
2015		90
2020		99,5
2030		100
2001	MBr	25
2005		50
2010		100

según el artículo 2 del Protocolo de Montreal.

En el artículo 5 del citado Protocolo se menciona la eliminación de las sus-

**PLAN DE ELIMINACIÓN DE
SUSTANCIAS DAÑINAS PARA LA
CAPA DE OZONO PARA LOS
PAÍSES EN DESARROLLO, SEGÚN
EL PROTOCOLO DE MONTREAL**

Fecha	Sustancia	Porcentaje de reducción
2003	CFCs	20
2005		50
2007		85
2010		100
2005	Halones	50
2010		100
2003	Otros CFCs	20
2007		75
2010		100
2005	TCC	50
2010		100
2005	MCLF	30
2010		70
2015		100
2006	HBCFs	100
2040	HCFCs	100

tancias que atacan a la capa de ozono en los países en desarrollo. El protocolo de Montreal fue reforzado en Londres en 1990 y en Copenhague en 1992, ampliando su cobertura a otras sustancias, y posteriormente en 1995 y 1997 se acordaron nuevos objetivos.

**PLAN DE ELIMINACIÓN O REDUCCIÓN
DE COMPUESTOS CONTAMINANTES CON FLÚOR**

Compuesto	Año	Reducción
Halones	1994	Eliminar el 100% la producción.
CFCs, CCl ₄ , CH ₂ CCl ₃	1996	Eliminar 100% la producción.
HBFCs	1996	Eliminar 100% la producción.
HCFCs	1996	Reducir el consumo a un 2,8% del consumo de CFCs en 1989 más el consumo total de CFC en 1989.
CH ₃ Br	2020	Eliminar el 100% a excepción de un 0,5%.
	1995	Reducir la producción y el consumo a los niveles de 1991.
	2003	Reducir el 70%.
	2005	Eliminar el 100% con alguna excepción para la agricultura.

Los principales usos de los CFCs han sido:

- Fluido frigorígeno en refrigeración y en aires acondicionados.
- Agente espumantes en la fabricación de espumas plásticas.
- Propelente de los aerosoles.
- Disolventes de limpieza.
- En el sector electrónico.

El bromuro de metilo se mineraliza en el suelo en un porcentaje considerable, por lo que la emisión a la atmósfera representa entre el 35 y el 85% de la cantidad empleada inicialmente. El 70% de las aplicaciones del bromuro de metilo se ha dedicado a la fumigación para el control de plagas.

**98.2. SUSTITUCIÓN
DE PRODUCTOS.
ALTERNATIVAS**

El problema por el que no se terminan de utilizar sustancias que dañan la

capa de ozono, es la falta de sustitutos que ofrezcan las mismas prestaciones que las sustancias sustituidas. A veces, los sustitutos son más perniciosos que las sustancias originales, pues al principio se investigaron más de 100 posibles sustancias químicas sustitutivas, y tras dos años de estudios de toxicidad, análisis, costos, etc., el número de estas quedó reducido a cuatro.

El sector de refrigeración ha eliminado los CFCs, y ha tomado como productos transitorios los HCFCs, hasta que introduzcan completamente los HFCs. Pero el problema de la eliminación radica sobre todo en las instalaciones existentes, que requieren de las sustancias iniciales para que funcionen y no de sus sustitutos, y por otra parte, la sustitución de la maquinaria no es viable a corto plazo.

Actualmente existe un buen sustituto no clorado, como es el HFC-134^a, como alternativa para la mayoría de las aplicaciones: Frío doméstico, refrigeración, cadenas de distribución de alimentos,

climatización de automóviles y de edificios, etc., aunque el uso de este sustituto requiere instalaciones nuevas, lo que necesita cierto período para el cambio.

La Unión Europea, en su Reglamento n° 3093/94, permite el uso de HCFCs en la producción de espumas plásticas de aislamiento y como refrigerantes industriales y comerciales.

Encontrar un sustituto del bromuro de metilo es una tarea difícil, ya que éste producto tiene infinidad de aplicaciones, y por otra parte, muchas de las alternativas al bromuro de metilo generarían gran cantidad de residuos, de forma que esto las convierte en inviables. Otros métodos alternativos provocarían así impactos ambientales de diversa considera-

ción. Como alternativas factibles, aplicables en determinadas circunstancias, podemos señalar:

- Insolación
- Esterilización con vapor de agua
- Rotación de cultivos
- Desarrollo de especies vegetales resistentes
- Empleo de sustratos artificiales

Se pueden reducir las emisiones de bromuro de metilo al menos en un 33%, para lo que se han desarrollado cubiertas de plástico más impermeables y equipos de inyección a mayor profundidad, en condiciones óptimas de temperatura y humedad.

CAPÍTULO 99

CONTROL DE LAS EMISIONES DE LOS VEHÍCULOS AUTOMÓVILES

99.1. BASES GENERALES

Siguiendo la línea indicada a lo largo de esta obra en lo referente al control de las emisiones, siempre se ha de buscar el tratamiento en la fuente o lo más cerca posible de ella.

En este caso se tratará de actuar sobre los combustibles, tema de otros capítulos de este libro, y sobre las emisiones de los motores de los vehículos.

La acción deberá completarse con técnicas urbanísticas, de gestión del tráfico y de concienciación ciudadana.

Los motores de los vehículos que consumen hidrocarburos, de explosión o de combustión, emiten diversos agentes contaminantes, como ya se ha indicado en otros capítulos.

Básicamente estos contaminantes son:

- Dióxido de carbono.
- Monóxido de carbono.

- Óxidos de nitrógeno.
- Hidrocarburos inquemados.
- Aldehídos.
- Dióxido de azufre.
- Alquitranes (motores Diesel).
- Trazas de cloro, bromo, fósforo, etc.

Los factores que influyen en la emisión son, entre otros, los siguientes:

- Tipo de motor.
- Edad del motor.
- Tecnología del motor.
- Régimen de marcha.
- Tipo de combustible.
- Potencia del motor.
- Estado del motor.
- Tipo de circulación.

99.2. SISTEMAS DE REDUCCIÓN Y DEPURACIÓN DE GASES DE ESCAPE

El uso de *catalizadores* es la solución que se ha encontrado para reducir las emisiones de los escapes de los motores, aplicándose sobre todo la postcombustión catalítica.

Los problemas de los catalizadores ya se han indicado en otros capítulos de esta obra, y se presentan igualmente en los sistemas aplicados en los vehículos (desgaste, pérdida de eficacia, calentamiento, etc.).

La mejora en el rendimiento de los motores, la de la explosión y la de la combustión son tres sistemas de reducción de las emisiones, así como el uso de motores mejorados o diferentes.

Los *motores Diesel* son interesantes por su bajo consumo de combustible y por la calidad de sus emisiones, pues si su bomba de inyección está bien regulada, los gases de escape contienen pocos contaminantes.

El aspecto negativo es su peso, su costo, el ruido y los olores que emiten, aunque en los últimos años la turboalimentación y la mejora general del proceso de combustión hacen que su eficiencia térmica sea muy elevada, y su rendimiento, potencia y aceleración son ahora muy positivos.

Los *motores de dos tiempos* tienen por su parte muchas ventajas, pues son muy simples, con menos piezas, pequeños, ligeros y baratos, y lo mismo ocurre con los *motores rotativos* (*motores Wankel*), que tienen hasta un 30% menos de piezas que los demás. Sobre estos dos tipos de motores merece la pena investigar y mejorar, pues tienen grandes posibilidades en cuanto a la generalización de su uso si se consiguen sistemas razonables.

Los *motores con turbina de gas*, que se suelen utilizar en aviación y en algunos vehículos de transporte, todavía tienen problemas de gasto de combustible, pero tienen buenas posibilidades futuras.

Los automóviles con *sistemas mixtos* (eléctrico/combustión o explosión) son muy interesantes, pues una parte de su tiempo de uso no contaminan, aunque para fabricar las baterías son necesarias agresiones considerables al medio (extracción de minerales, procesamiento, fabricación de piezas, ensamblaje, fabricación de ácidos y puesta en uso).

Los *motores de vapor*, los del *sistema Stirling* y los *gasógenos* han sido propuestos a lo largo de los últimos 60 años, teniendo posibilidades siempre que se investigue mucho y se dediquen a ello grandes recursos económicos.

DECIMOQUINTA PARTE

Medida de la contaminación atmosférica

CAPÍTULO 100

ANÁLISIS, EVALUACIÓN Y CÁLCULO DE LAS EMISIONES

100.1. MEDIDAS GENERALES DE LA EMISIÓN Y CONTROLES AMBIENTALES AL AIRE LIBRE. BASES DE LOS ESTUDIOS.

Los estudios, medidas y evaluaciones de la contaminación atmosférica pueden tener dos enfoques básicos.

El primer enfoque es el análisis en la fuente, es decir, el estudio de la emisión: se toman muestras en un conducto, en una chimenea o en un sistema cualquiera de evacuación de gases.

En esta situación el problema es sencillo, pues las concentraciones de

contaminantes son relativamente elevadas, estos contaminantes son conocidos y se parte de puntos concretos de muestreo.

El segundo enfoque es el análisis o estudio de los contaminantes en el medio ambiente y en la inmisión, es decir, se trata de conocer, identificar y evaluar los contaminantes atmosféricos una vez han sido emitidos y evacuados a la atmósfera, donde pueden difundirse, evolucionar, transformarse y trasladarse como hemos visto en los capítulos correspondientes.

En este segundo enfoque el problema es mucho más complicado, pues las concentraciones son muy inferiores a las de

FACTORES DE CONVERSIÓN ENTRE UNIDADES DE MEDIDA DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES EN EL AIRE

	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃
1 ppm	2.860 µg/m ³	1.880 µg/m ³	1,145 mg/m ³	2.000 µg/m ³
<i>Fuente:</i> WHO. Air Quality Guidelines for Europe. WHO Regional Publications, European Series No 23. Copenhagen, 1987.				

la emisión, y son muy variables a causa de los fenómenos de difusión y por la incidencia de los factores externos, sobre todo los meteorológicos, los climáticos y los topográficos.

En principio, en las medidas de emisión el problema se reduce a muestrear en un punto representativo de paso de los contaminantes, y a analizar periódicamente o en continuo esas muestras.

En este caso se deben separar los controles según el tipo y fase de los contaminantes:

- Medida y control de gases contaminantes.
- Medida y control de líquidos contaminantes.
- Medida y control de partículas contaminantes.

A continuación se establece una curva con los resultados y se puede realizar así un seguimiento, en el tiempo, de la evolución de la contaminación atmosférica en un punto determinado.

En las medidas y estudios en el medio ambiente *libre* habrá que tener en cuenta, entre otros, los siguientes conceptos y factores:

- Tipo de muestreo que se quiere realizar.
 - Instantáneo.
 - Continuo.
- Influencia de la duración y periodicidad del muestreo sobre los resultados.
- Elección del método de análisis más apropiado.

- Elección de los aparatos más apropiados.
- Implantación de una red de control.
 - Elección de los puntos de muestreo y análisis.
 - Elección de los parámetros a analizar.
 - Elección de los contaminantes a analizar.
- Expresión de los resultados.
- Cartografía.
- Modelos de contaminación.

100.2. ETAPAS

Emisión

- Muestreo.
- Análisis.
- Resultados.
- Curva o interpretación no continua.

Al aire libre e inmisión

- Muestreo.
- Preparación de la muestra.
- Análisis.
- Resultados.
- Interpretación de los resultados.
- Red de muestreo y análisis: interpretación.
- Cartografía.

En ambos casos el plan general deberá ser:

- Muestreo.
- Tratamiento de la muestras.
 - Secado.
 - Solubilización.
 - Transformación química.
 - Fijación.
 - Separación.
- Análisis.
- Cálculos (con referencia a patrones).
- Resultados.

100.3. MEDIDAS Y ANÁLISIS EN LA EMISIÓN

100.3.1. Partículas

Muestreo

Los muestreos deben ser representativos, por lo que al ser las partículas bastante heterogéneas en composición, forma, dimensiones y densidad, es difícil conseguirlos, y más si las condiciones están influidas por factores externos como los meteorológicos, como ocurre con las partículas sedimentables en ciertas condiciones.

Además, también influyen las características del sistema y del aparato de muestreo. Sin embargo, con un sistema y con aparatos apropiados es posible tomar muestras que definan bien la contaminación existente.

El muestreo en ductos y chimeneas debe realizarse en condiciones de isocinetismo (sondas isocinéticas, etc.), pues velocidades de muestreo superiores o inferiores a la del flujo gaseoso falsean la representatividad.

En muchos ductos y chimeneas está preparado el punto de introducción de la sonda, de manera que la muestra sea homogénea independientemente del tamaño de las partículas.

Los sondeos en tramos horizontales pueden no ser representativos, pues es posible que exista segregación de ciertas partículas, por lo que siempre que sea viable se realizará en tramos verticales.

Los sondeos a la salida de los ductos deben realizarse teniendo en cuenta los factores externos que vayan a influir.

Métodos y aparatos

Hace años (en los 60 y 70 sobre todo) se diseñaron sistemas y aparatos de captación pasiva de partículas sedimentables, como aforadores de *Bergerholl*, *Owen*, placas *Diem*, esferas de *Lieja* con vaselina, etc. Actualmente solo se utilizan aforadores de depósitos y los demás se han desechado a favor de otras tecnologías que se indican a continuación.

Las muestras se someten a análisis gravimétrico y conteo, y después se realizan análisis químicos o microquímicos.

La *gravimetría* se basa en la captación de las partículas por un filtro colo-

cado en un aspirador, y en el control del peso de este antes y después. Si se coloca una serie de filtros de distinta porosidad, se puede hacer además una *separación granulométrica por filtración*.

Las partículas sedimentables (en general con $10\mu < \emptyset < 100\mu\text{m}$) suelen estar constituidas por :

- Materia inorgánica.
 - Sílice.
 - Sulfatos.
 - Cloruros.
 - Nitratos.
 - Metales.
- Materia orgánica.
 - La propia de cada actividad industrial.

Para controlar las partículas sedimentables también se puede hacer una *sedimentación fraccionada*, separando las fracciones gruesas, medias y finas por decantación en líquidos.

Se pueden identificar las fases cristalinas presentes mediante difracción de rayos X.

La normativa vigente en la Unión Europea y la de la USEPA indican metodologías y aparatos de análisis, y lo mismo los *Standard Methods*, tanto en lo referente a los cartuchos filtrantes para utilizar en ciclones como a otros métodos.

Los *sistemas inerciales* como los impactadores y otros, permiten efectuar análisis de partículas en la emisión. Los más importantes son:

- Impactadores
 - *Greenbeerg-Smith*
 - *Midget-impinger*
 - De cascada
 - Conímetros
- Ciclones
- Venturi-scrubber
- Sistema *Cegrit*
- Espectrómetro para aerosoles

Los *separadores eléctricos* son también útiles, tanto para el análisis en continuo como en discontinuo.

Los *sistemas ópticos* son básicamente:

- Escala de *Ringelmann*, para evaluar la opacidad.
- Smokescope para evaluar la opacidad.
- Índice *Shell-Bacharach* para evaluar la opacidad.
- Sistemas de absorción de luz para evaluar la opacidad.
- Sistemas de difusión de luz para evaluar la opacidad.
- Microscopía.

Existen otros métodos, como los aparatos con laser, los aparatos de infrarrojos o los conductímetros eléctricos que, en función del problema, pueden dar resultados totalmente fiables.

Caso particular de los metales

Los metales se muestrean y se captan de la atmósfera al mismo tiempo que las

partículas sedimentables o que el polvo en suspensión.

Después del análisis gravimétrico, la mayoría de las partículas se solubilizan y muchos metales pueden analizarse por absorción atómica (espectrofotometría, espectroscopía).

También pueden analizarse mediante rayos X (fluorescencia específica de cada elemento).

100.3.2. Gases

Muestreo

El muestreo se ha de basar en gran parte en lo indicado en el epígrafe anterior.

En este caso no existen fenómenos de separación ni de segregación; sin embargo, puede ocurrir que los gases contaminantes reaccionen entre sí o con el oxígeno del aire durante el período que transcurre entre el muestreo y el análisis.

Para captar los gases, las Normas indicadas en el epígrafe anterior especifican los métodos y procesos más apropiados.

En principio, los gases se pueden captar para su análisis:

- Por absorción.
- Por adsorción.
- Por condensación.

Si se hace por *absorción* sobre un líquido, se puede realizar un barboteo, se

puede utilizar un sistema de impacto, un *Venturi-scrubber*, un lavador, un absorbente de pulverización u otros sistemas.

Si se hace por *adsorción* gas a sólido, los sistemas más prácticos son la adsorción sobre carbón activo, sobre ^{14}C , sobre gel de sílice o sobre alúmina activada, según sea el gas.

Si la captación se realiza por *condensación*, el gas se enfría y se efectúa una condensación fraccionada, lo que facilita los análisis.

Métodos y aparatos

Existe infinidad de gases contaminantes producidos en la industria, no siendo objeto de esta obra la descripción detallada de su análisis, pues para ello están las Normas indicadas en el epígrafe anterior.

Sin embargo describiremos aquí unas líneas generales que orientarán al lector al respecto, sirviéndole como base antes de consultar las obras de referencia.

Dióxido de azufre

Para análisis en continuo:

- Acidimetría.
- Colorimetría.
- Coulometría.
- Conductividad.
- Fotometría a la llama.
- Fluorescencia UV.

- Para análisis discontinuo:
- Tubos reactivos específicos.
 - Captadores pasivos.
 - Bujías de bióxido de plomo.
 - Método *West-Gaeke* (con colorimetría al final).
 - Método del agua oxigenada.

Trióxido de azufre y ácido sulfúrico.

Valoración por perclorato bórico en presencia de thorina.

Monóxido de carbono

- Para análisis en continuo:
- Espectrometría de IR (absorción IR no dispersa).
 - Conductividad térmica.
 - Oxidación electroquímica.
 - Cromatografía de gases.

- Para análisis discontinuo:
- Tubos reactivos específicos.

Oxidos de nitrógeno

- Para análisis en continuo:
- Colorimetría.
 - Quimioluminiscencia.
 - Para análisis puntual:
 - Método del ácido fenilsulfónico

- Método manual de reacción con H_2O_2 y SO_4H_2

Ozono

- Para análisis en continuo:
- Colorimetría.
 - Quimioluminiscencia.
 - Absorción en UV.

- Para análisis discontinuo:
- Tubos reactivos específicos.

Compuestos orgánicos volátiles (COV)

- Para análisis en continuo:
- Ionización a la llama.
 - Cromatografía de gases-ionización.

- Para análisis discontinuo:
- Adsorción-desorción-análisis.

Sulfuro de hidrógeno

Absorción en sulfato de cadmio, tratando el sulfuro con HCl y valorando con tiosulfato sódico en presencia de almidón como indicador.

Mercaptanos

Absorción en disolución de nitrito de plata, tratándose el sobrante con ClNa y valorando el exceso de cloruros con nitrato de plata en presencia de cromato sódico como indicador.

100.4. MEDIDAS Y ANÁLISIS AL AIRE LIBRE Y EN LA INMISIÓN

100.4.1. Partículas

Muestreo y análisis

Se puede expresar el estudio del polvo atmosférico mediante el cuadro adjunto.

En el caso de depósitos de polvo, sobre todo en lo que se refiere a vegetales, habrá que indicar, en los análisis cuantitativos, el contenido por unidad de superficie, generalmente peso-volumen/cm² en el caso de vegetales (en hojas, ramas, tallos, etc.), y según períodos de tiempo determinados según la concentración y el tipo de estudio, es decir, se puede expresar el contenido de partículas/cm²/hora (o día, semana, mes o año).

La granulometría también es de interés en este tipo de estudios, como se comprobará en los ejemplos indicados al final del capítulo.

Depósitos de polvo (muestreo y análisis cuantitativo)

Trataremos fundamentalmente el problema en lo que se refiere al Medio

Natural que, en este caso, estará representado por los vegetales.

Se pueden tomar las muestras mediante espátulas si el volumen es grande, o por aspiración (aspirador *Söderman*), agujas enmangadas, lancetas o pinzas, si la cantidad de polvo es pequeña.

El muestreo se realizará previo estudio de las condiciones meteorológicas (precipitaciones, vientos, heladas) y a lo largo de diferentes períodos del año.

El estudio de los depósitos en vegetales deberá ir acompañado de un muestreo libre, es decir, de una recogida del polvo depositado en una superficie lisa y conocida. Para ello, es práctico utilizar una placa de vidrio de superficie conocida, con una capa de vaselina neutra (vertida en caliente); se coloca la placa en posición horizontal y, una vez transcurrido el mismo período que para el muestreo en vegetales, se recoge.

Si se elimina el vehículo mediante un disolvente, se pueden separar las partículas de polvo por filtración.

Es muy interesante también impregnar con vaselina cierto número de hojas de verticilos próximos a las que son objeto de estudio, recoger el depósito correspondiente (cada uno con su método) y comparar los resultados.

Depósitos de polvo	Polvo radiactivo	Polvo en suspensión
Análisis cualitativo Análisis cuantitativo	Análisis específico Intensidad de radiaciones	Análisis cualitativo Análisis cuantitativo (concentración) Granulometría
Gravimetría	Tipo de radiaciones	

Otro método es el de los recipientes aforados *Owen*, que recogen las partículas en una especie de embudos.

Una mejora sobre este método consiste en emplear dos recipientes *Owen* con una cubierta horizontal que dispone de un eje vertical, de forma que, si una parte de la cubierta obtura uno de los recipientes, el otro queda libre. Acoplado al sistema va un motor movido por baterías y un circuito eléctrico que pasa por una soldadura sensible al agua, de tal modo que, cuando llueve, se cierra el circuito, y una de las partes de la cubierta obtura un recipiente; cuando cesa la precipitación y se seca la soldadura, vuelve a abrirse el circuito y se descubre ese recipiente. Con este sistema, es posible muestrear por separado las partículas depositadas en período seco y las depositadas en época de precipitaciones.

Como aparato orientativo se puede utilizar también un recipiente con un embudo de superficie conocida; las precipitaciones arrastran las partículas que se recogerán en el recipiente. En el fondo de éste, se coloca algo de sulfato de cobre para eliminar algas. Al realizar la recogida se debe lavar el embudo con parte del líquido recogido en el recipiente, pero hay que tener en cuenta que con éste método solo se podrán estudiar las partículas insolubles en agua.

Para el muestreo de las partículas sedimentables también se pueden utilizar las esferas de Lieja, que son unas esferas de aluminio de $\phi = 12$ cm, con una capa fina de vaselina en su exterior. Se colocan a 3 m de altura en lugares abiertos y con ellas se captan las partículas para su

posterior análisis, y además se conocen la dirección y el sentido de donde vienen.

Polvo en suspensión (muestreo y análisis cuantitativo)

El estudio de las partículas en suspensión en el aire ha provocado el interés de gran cantidad de investigadores, y el resultado ha sido la creación de un elevado número de técnicas y aparatos, unos homologados y otros no, que permiten controlar una parte del polvo atmosférico. Decimos una parte, puesto que el rendimiento no es del 100 por 100 nunca, por existir una serie de factores como el tipo de atmósfera objeto de estudio, tipo y cantidad de las partículas, dimensiones, velocidad de muestreo, etc., que hacen que con diferentes aparatos y en iguales condiciones experimentales, los resultados sean lo suficientemente dispares como para poder indicar solamente referencias a un producto fijado previamente.

Indicamos a continuación una serie de sistemas de estudio de partículas atmosféricas en suspensión que nos dará una orientación sobre la utilidad de cada sistema.

a) Settlement dust counter

Consiste en un cilindro calibrado con una perforación en el fondo, que se abre sobre una superficie impregnada en vaselina. Se deja penetrar el aire a estudiar, y después se deja decantar la muestra durante cierto tiempo: el polvo más grueso se adhiere a la superficie impregnada y se cuenta al microscopio.

b) Conímetros

Son aparatos de aspiración que proyectan el aire según diferentes sistemas.

- *Conímetro Zeiss*

Es una bomba aspirante, portátil, que proyecta el chorro de aire sobre una superficie adherente (placa de vidrio con vaselina). Dispone de un microscopio incorporado y de escalas que permiten realizar el conteo de las partículas que se han adherido a la placa.

Una variante consiste en la utilización de un contador electrónico de partículas.

El sistema es útil en atmósferas con elevado índice de contaminación por partículas (por ejemplo, en industrias extractivas).

- *Conímetro Aitken*

La bomba aspirante proyecta el aire a una cámara saturada de vapor de agua y en ella se provoca la dilatación del gas; baja la temperatura, y las partículas se convierten en núcleos de condensación, descendiendo sobre un micrómetro sobre el que pueden ser contadas.

- *Conímetro Kolze*

Es similar al Zeiss y se utiliza en minería.

- *Jet dust counter (Owens)*

Se proyecta un chorro de aire por una perforación muy estrecha contra una pla-

ca húmeda sobre la que se adhieren las partículas. Mediante microscopio y micrómetro pueden ser contados los granos de polvo; el error suele ser considerable.

- *Precipitadores térmicos y de ionización*

Necesitan todos una circulación lenta de la corriente de aire.

Unos se basan en la colocación de una placa fría junto a un filamento a 300 °C. En la atmósfera rica en partículas estas se precipitan contra la placa.

Otros (conímetros eléctricos) provocan la ionización de las partículas, que se proyectan a continuación sobre una superficie adherente.

c) Impingers

Se utilizan en la industria. Consisten en tubos de vidrio con sistema de aspiración, conectados a un líquido contenido en un recipiente que, a su vez, contiene en el fondo una placa sobre la que se capturan las partículas. Estas pasan en forma de suspensión al líquido y pueden ser estudiadas (por conteo y gravimetría) previa evaporación.

d) Filtración

Puede hacerse pasar un chorro de aire a través de filtros apropiados que retienen el polvo.

Estos filtros pueden ser muy diversos:

- Pasteur (algodón, fulmicotón, amianto, etc.).
- Papel poroso.
- Arena fina.
- Esferas de vidrio impregnadas de glicerina.
- Filtros solubles.

Los filtros solubles se utilizan mucho para el control de gérmenes. Suelen utilizarse los de sal tratada y esterilizada. El material se disuelve en agua después del muestreo, se centrifuga y se mide el nivel alcanzado por las partículas.

e) *Sistemas ópticos*

- *Nefelómetros*

Se basan en el control, mediante una escala conocida, de la relación entre la difusión de luz producida por un aerosol ante una proyección de luz y la concentración de aerosol.

- *Medidas de la opacidad*

Se utilizan, sobre todo, en el control de humos. Se estudia la opacidad en el aire, en líquido agitado con la muestra o la visibilidad de un objeto a través del aire contaminado.

El sistema más utilizado es el de la escala de *Ringelmann*, que es una serie de cartulinas con cuadrículado de líneas negras más o menos intenso que se coloca a cierta distancia del observador (15 metros). Se comparan los colores del humo y de la cartulina y se indica el número

correspondiente de esta. El procedimiento es muy grosero.

- *Ultramicroscopio*

Se observa con este aparato un volumen conocido de aire que se hace circular entre dos placas de vidrio paralelas y muy próximas. Un fondo negro permite efectuar el conteo.

Análisis granulométrico y microscópico

Es el estudio del tamaño de las partículas. Para ello existen métodos muy variados, según sean el diámetro de las partículas y el objeto del estudio.

Para medidas directas, que es el caso más común en el medio agrario, se puede utilizar la visualización con una plantilla cuadrículada. También es útil proyectar la imagen sobre pantalla, pero el método más práctico es el de la microfotografía. Este último consiste en montar con la muestra una preparación no fijada, de modo que las partículas no sufran alteración antes de la observación al microscopio o lupa binocular. Con una plantilla de medida se pueden calcular las dimensiones y realizar, además, fotografías de los cuerpos que presenten más interés.

El método indirecto, del que sólo indicaremos poco más que su existencia, dispone de diferentes sistemas; uno de ellos es el estudio de la velocidad de sedimentación de las partículas en una suspensión, según la *Ley de Stokes*. Se to-

man las muestras a intervalos fijos de tiempo y a la misma profundidad, y así se separan los diferentes tamaños, se evapora el vehículo y se pesa el depósito. Este procedimiento es para partículas con velocidad de sedimentación relativamente rápida ($\phi < 5\mu$). Para partículas pequeñas ($\phi < 0,1\mu$), se puede utilizar la difracción en R.X. o la ultracentrifugación.

En análisis de polvo en estudios sobre vegetales, se puede utilizar la escala de división de partículas adoptada en Francia para el control de la silicosis:

$\phi > 5m$
$5m > \phi > 3m$
$3m > \phi > 1m$
$1m > \phi > 0,5m$
$0,5m > \phi > 0,2m$
$\phi > 0,1m$

Generalmente, a no ser que se trate de estudios muy especiales, los trabajos en vegetación sólo necesitan esta escala hasta la mitad, y es por ello por lo que nosotros nos inclinamos por las medidas directas, pues son ampliamente suficientes.

Análisis microquímico

Este análisis sirve para identificar gran parte de los componentes de un grupo de partículas determinado (fracción mineral y algo la orgánica).

En estudios de depósito en campo indicamos la técnica de *Rassenfosse* que hemos modificado y orientado para poder conocer con rapidez un número apreciable de contaminantes, pues es muy sencilla y rápida, y casi siempre es suficiente para este tipo de trabajos.

1. Se coloca parte de la muestra en un porta.
2. Se añade una gota de ClH diluido.
 - Si existen carbonatos, \uparrow CO₂.
 - Si existen óxidos de hierro, aparecen manchas amarillas.
3. Otra parte de la muestra se coloca en un porta.
4. Se añade una mezcla de ácido gálico y trioximetileno, a la que se ha añadido una gota de agua en el momento de uso.
 - Si existen sales cálcicas solubles aparece color azul.
5. Otra parte de la muestra se coloca en un porta.
6. Se añade una gota de amoníaco.
 - Si existen cobre o sus óxidos, aparece color azul (a los 5 min.).
7. Otra parte de la muestra se coloca en un porta.
8. Se añade algún colorante como azul de metilo, fuchsina o auramina (se introducen parte de las partículas en una solución al 1/1.000 durante 24 h., se decanta, se filtra, se lava y se seca).
 - Las arcillas se colorean.

- Las partículas procedentes de combustiones (carbón, cok, silicatos) no se colorean.
- Los restos celulósicos se colorean y se distinguen debido a su estructura.

Esta técnica elemental casi siempre es suficiente para trabajos sobre las partículas que normalmente sedimentan sobre las partes aéreas de los vegetales en el entorno de actividades que emiten contaminantes de este tipo, como es el caso de las canteras, fábricas de cemento y otras.

Estudio del polvo radiactivo

Tiene su gestión específica, como se ha indicado en otros apartados de ésta obra.

Visibilidad

Para controlar la contaminación ambiental por partículas también es útil el estudio de la *visibilidad*, teniendo en cuenta los coeficientes de extinción, la absorción, la difusión, la hora del día, los factores meteorológicos y todo lo indicado en el capítulo correspondiente.

100.4.2. Gases

En principio se pueden utilizar la mayoría de los sistemas de muestreo y análisis indicados para la emisión, siempre que se disponga de las instalaciones ade-

cuadas y partiendo de la base de que el método sea lo suficientemente fino como para captar y analizar gases a muy bajas concentraciones, que es lo que se presenta habitualmente en el aire libre.

Aparte de esto, indicamos, aunque algunos se repitan, los métodos más usuales de análisis.

- *Dióxido de azufre:*

- Acidimetría.
- Adsorción sobre gel de sílice, desorción, hidrogenación, transformación en H_2S , reacción sobre molibdato amónico y fotocolorimetría.
- Absorción sobre tetracloromercuriato sódico, parasosanilina y aldehído fórmico, y fotocolorimetría.

- Conductimetría.

- Bromometría.

- Bujías de PbO_2 .

- *Acido sulfúrico y sulfatos:*

- Conductimetría.

- Acidimetría.

- *Fluor:*

- Titrimetría.

- Fotometría.

- Fluorometría.

- *Oxidos de nitrógeno*

- Método *Saltzman* (automatizado y continuo mediante una columna gas-líquido).

- Métodos electroquímicos.
- Espectroscopia de I.R.
- Detectores de quimiluminiscencia.
- Espectroscopía UV.
- Espectrometría de masas.
- Cromatografía.
 - Gaseosa.
 - Gas-sólido.
 - Gas-líquido.
 - Detectores.
- *Ozono*:
 - Yodometría – espectrofotometría.
- *Monóxido de carbono*:
 - Método del pentóxido de yodo.
- *Sulfuro de hidrógeno*:
 - Método del acetato de plomo y reflectometría.
 - Método del hidrato de cadmio, con azul de metileno y espectrofotometría.
- *Hidrocarburos policíclicos*:
 - Cromatografía sobre alúmina – luz UV.

En los capítulos correspondientes a la contaminación atmosférica y la vegetación se indicaron algunos métodos de análisis específicos, y allí remitimos al lector.

Aparte, indicamos lo siguiente:

Entre las más serias consecuencias de la contaminación atmosférica están los

daños causados a la vegetación y a la agricultura en general.

Las plantas muestran especial sensibilidad y especificidad de respuesta a la mayor parte de los contaminantes atmosféricos, sufriendo daños significativos a concentración de aquéllos mucho más bajas que las que afectan a los seres humanos y animales. La mayoría de los tóxicos que hemos señalado son dañinos en concentraciones de 1 ppm o menos, y algunos en concentraciones tan bajas como unas pocas partes por billón. Son, pues, las plantas, los seres más sensibles y directamente amenazados por la contaminación atmosférica.

- Se han propuesto numerosos métodos para la detección y determinación *química* de contaminantes atmosféricos en las plantas, siendo algunos de los más tradicionales los siguientes:
 - Métodos para la determinación de sulfitos, sulfatos, cloruros y fluoruros en las hojas de plantas (Mc Kee y Bieberdorf, 1960).
 - Determinación de fluoruros (Nichol y col., 1957); (Gwirtsman, Navrodineau y Coe, 1957); (Weinstein, 1966); (Debiard, 1967). Método del electrodo selectivo.
 - Determinación del azufre por espectrofotometría de absorción atómica (Roe, Miller y Lutwark, 1966). Determinación por acenización seca (1978).
 - Determinación del arsénico mediante análisis por activación neutrónica y espectrometría (Kirchmannly, Roderbourg y Wey, 1965-66).

- Método de Karlín para determinar pequeñas cantidades de plomo (1968).
- Método de Kim y Silverman para el mercurio.
- Método de Gunther y Spenger para compuestos orgánicos de bromo en plantas superiores (1968).

CAPÍTULO 101

MEDIDA DE LOS COMPONENTES CLIMÁTICOS EN RELACIÓN CON LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

101.1. LÍNEAS GENERALES

El objeto de este capítulo es describir las bases que nos permiten conocer y analizar las agresiones que sufre el medio por la vía de la contaminación atmosférica.

El clima, como uno de los factores fundamentales que rigen gran parte de los fenómenos y de los procesos que se verifican en la biosfera, da origen a la Climatología, ciencia que trata de conocer sus mecanismos de formación, teniendo en cuenta que estos están directamente relacionados con el suelo, con la hidrosfera, con la cobertura vegetal y con la contaminación ambiental.

El control del clima será, pues, un instrumento que nos permitirá obtener una amplísima información sobre ese factor y sus componentes, y sobre las interacciones que genera, por una parte con otros elementos del medio como suelo, agua, vegetación y fauna y, por otra, con la contaminación ambiental.

Para obtener esa información sobre el clima, es necesario disponer de unas metodologías de trabajo y de unos instrumentos que permitirán realizar observaciones que proporcionarán datos que, una vez procesados, darán lugar a las interpretaciones correspondientes.

101.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA

101.2.1. Funcionamiento

En principio, las medidas y las observaciones pueden ser *directas* (termómetros, barómetros, etc.) o *indirectas* (a distancia: Lidar, sonar, radar, etc.).

El sistema de funcionamiento de los instrumentos de medida puede ser:

- *Analógico*, mediante el cual la información varía de forma continua y según las dimensiones a medir.

Un sistema analógico está constituido por 3 elementos básicos: captador, convertidor de la señal e indicador analógico.

- *Númérico* o digital, mediante el cual la información varía de forma discreta cuando las dimensiones consideradas varían de forma continua.

Un sistema digital está constituido por 3 elementos básicos: captador, convertidor analógico/númérico y registrador numérico.

101.2.2. Características básicas

La **Precisión** es la capacidad de un instrumento de suministrar los valores medidos más o menos próximos a los verdaderos. Es una propiedad que limita las dimensiones a medir, y depende de una serie de factores básicos, a saber:

- Resolución.
- Afinado (finura de la medida).
- Fiabilidad.
- Sensibilidad.
- Deriva del cero.
- Comodidad.
- Fidelidad.
- Tiempo de respuesta.
- Linearidad de la respuesta.
- *Resolución*: Variación mínima detectable con el instrumento
- *Sensibilidad*: Variación de la señal de salida del captador/variación de la di-

mensión medida o señal de entrada. A menor sensibilidad se captarán menos detalles.

- *Linealidad de la respuesta*: Será mejor cuanto menor sea el rango de medida.
- *Fidelidad*: Si se repite la medida de una misma cantidad, la fidelidad del instrumento caracterizará la dispersión de los datos captados.
- *Deriva de cero*: El ajuste de los aparatos es fundamental, y se deben corregir periódicamente las posibles derivas que surgen como consecuencia de los cambios climáticos.
- *Fiabilidad*: Es la capacidad de un instrumento de suministrar datos correctos durante un tiempo dado sin averiarse.

Es una característica esencial de los instrumentos de medida, y sobre todo de los que miden en continuo.

Para evaluar la fiabilidad de un instrumento existen diferentes fórmulas, como por ejemplo:

$$MTBF: \frac{1}{p}$$

Siendo

MTBF = Mean Time Between Failures.

p = Tasa de averías.

O bien, en el período de vida normal de un instrumento, si no se tienen en cuenta el tiempo inicial de funcionamiento, en el que pueden aparecer problemas de ajuste, defectos de fabricación, etc., ni el último período, en el que el aparato está viejo por el uso, se puede indicar (*Simidchiev*):

$$F(t) = e^{-pt}$$

Siendo

$F(t)$ = Fiabilidad en función del tiempo.

p = Tasa de averías

t = Tiempo

101.3. MEDIDA DE LA TEMPERATURA

En general se mide en grados centígrados (*Celsius*).

101.3.1. Sistemas por dilatación de líquidos

Termómetros de lectura directa

- De temperatura instantánea: Con mercurio, alcohol o tolueno.
- De temperatura máxima: Con mercurio.
- De temperatura mínima: Con alcohol o tolueno.

Se pueden utilizar:

- Termómetros de máximas
- Termómetros de mínimas
- Termómetros de mínimas y máximas
- Termógrafos de líquido (con registro)

101.3.2. Sistemas por dilatación de sólidos

Se basan en la dilatación de dos láminas finas soldadas, constituidas cada una

por un metal de coeficiente de dilatación diferente, que hacen que el conjunto se curve al subir o al bajar la temperatura.

Se pueden utilizar:

- Termómetros
- Termógrafos (con registro)

101.3.3. Sistemas basados en cambios de estado

- Cristales de color (cristal líquido).
- Termógrafos de control de la tensión de vapor saturante en equilibrio con un líquido.

101.3.4. Sistemas basados en las variaciones de resistencias eléctricas

Termoresistencias

- Tipos de resistencia:
 - Cobre
 - Platino

Se mide la resistencia mediante un puente de *Wheatstone*.

Termómetros de semiconductores

Algunos semiconductores reaccionan al calor disminuyendo su resistencia, al contrario que los metales, según la ley:

$$R(T) = a e^{\frac{b}{T}}$$

Siendo:

$R(T)$ = Resistencia en función de la temperatura.

a = Constante.

b = Constante.

T = Temperatura, en °K.

101.3.5. Pares térmicos (termopares)

Se basan en la producción de una fuerza electromotriz según la superposición de los efectos *Peltier*, *Thomson* y *Volta*.

101.3.6. Radiotermómetros

Se basan en la pérdida de calor de los cuerpos por radiación en el infrarrojo térmico.

El sistema se compone de:

- Sistema.
- Óptico.
- Filtro.
- Detector.
- Amplificador.
- Tratamiento de las señales.
- Temperatura de radiación.

Basándose en estos sistemas, se construyen cámaras de infrarrojo térmico para realizar termografías.

Pueden tener:

- Detectores térmicos.

- Detectores cuánticos (fotodíodos).

101.3.7. Termómetros de cuarzo piezoeléctrico

Son instrumentos digitales, cuyo funcionamiento se basa en la medida de la frecuencia de resonancia de un cristal.

101.4. MEDIDA DE LA HUMEDAD

101.4.1. Definiciones

- *Masas*

$$m_A = m_a + m_w$$

Siendo

m_A = Masa total de un volumen V_A de aire húmedo a T_a °C de temperatura y a una presión P_A .

m_a = Masa del aire seco de la mezcla.

m_w = Masa del vapor de agua de la mezcla.

- *Relación de mezcla*

$$r = \frac{m_w}{m_a}$$

Siendo r = Relación de mezcla

- *Humedad relativa*

$$Hr = 100 \frac{e_a}{e(T_a)}$$

Siendo

H_r = humedad relativa, en %

e_a = Tensión del vapor de agua

T_a = Temperatura

$e(T_a)$ = Tensión de vapor saturante a la temperatura T_a

- **Temperatura del punto de rocío**

Es la temperatura a la que una partícula de aire se satura cuando sufre un enfriamiento isobárico.

Déficit de saturación

Es la diferencia entre la tensión de vapor saturante a la temperatura del aire y la tensión de vapor actual.

$$\Delta e = e(T_a) - e_a$$

Siendo

Δe = Déficit de saturación.

T_a = Temperatura del aire.

$e(T_a)$ = Tensión de vapor saturante a la temperatura T_a .

e_a = Tensión de vapor actual.

101.4.2. Higrómetros basados en los cambios de dimensión de sustancias higroscópicas

Higrómetros e higrógrafos de captador orgánico

Se basan en la propiedad de algunas materias orgánicas de cadenas molecula-

res largas, de adsorber moléculas de agua y de estirarse o encogerse en función de la humedad del aire. El caso típico es el del higrómetro de cabello humano desengrasado, aunque existen otros materiales como la tripa de buey, la tripa de cerdo, el algodón o el nylon.

Higrómetros capacitativos

Se basan en una lámina de un polímero higroscópico a la que se conectan dos electrodos metálicos porosos, constituyendo el conjunto un condensador.

Al adsorber agua el polímero, aumenta de volumen, separándose los electrodos, con lo que varía la capacidad del condensador, por lo que si este se monta en un circuito oscilante, se pueden medir las variaciones de frecuencia.

101.4.3. Higrómetros de condensación

Son los higrómetros del punto de rocío.

Midiendo la temperatura del punto de rocío se puede conocer la humedad absoluta del aire. Para alcanzar el punto de rocío, se enfría una superficie lisa hasta que se condense una película de agua. En ese momento se obtiene la temperatura del punto de rocío. La medida se realiza en el instante apropiado mediante unos dispositivos ópticos más o menos complejos.

101.4.4. Higrómetros electrolíticos

Se basan en las propiedades conductoras de ciertas soluciones salinas saturadas higroscópicas.

El instrumento consiste en un manguito de lana de vidrio impregnado de una de esas soluciones, sobre el que están enrollados en hélice dos hilos metálicos sobre los que se hace pasar una corriente alterna y que actuarán a modo de electrodos. La corriente pasará de un hilo a otro a través de la solución y calentará el manguito por efecto *Joule*. Este calor hará que se evapore el agua de las sales higroscópicas hasta que se secan y cesa de circular la corriente, por lo que el manguito se enfriará, se volverá a fijar el vapor de agua, y el proceso volverá a empezar.

Al final, la temperatura se estabiliza y está en equilibrio con la temperatura del punto de rocío. Se determina con una termoresistencia colocada en el centro del manguito.

Estos higrómetros son muy sensibles a la contaminación y deben recibir constantemente energía eléctrica, y además su tiempo de respuesta es relativamente lento, pero, aún así, se han utilizado con frecuencia.

101.4.5. Higrómetros de absorción de radiación

Son analizadores de gases, y son muy precisos.

Constan de 2 tubos idénticos, uno de los cuales contiene el aire a analizar y el

otro aire seco. Se hace pasar a través de ellos, alternativamente, un haz de luz monocromática que corresponda a una de las bandas de absorción del agua. Un detector recibirá así una señal alternativa cuya amplitud será función de la humedad del aire.

101.4.6. Psicrómetros

Se fundamentan en dos termómetros clásicos, uno seco y el otro húmedo (rodeado de algodón o de muselina). Al evaporarse el agua de este último, lo enfriará. La diferencia de temperatura entre ambos o depresión del termómetro húmedo, nos dará, en unas tablas apropiadas, la humedad del aire, teniendo en cuenta si el termómetro húmedo es ventilado o no (en este caso se puede sobreestimar la humedad hasta en un 20%).

• *Psicrómetros de ventilación natural*

Son menos precisos que los de ventilación forzada y el clima les afecta mucho, siendo sus informaciones de frecuente sobreestima de la humedad, sobre todo si el aire está en calma.

• *Psicrómetros honda*

El sistema monta los termómetros sobre una placa giratoria, que se mueve con una manivela cuando se ha humedecido la tela que rodea al húmedo, hasta que se alcanza el equilibrio térmico a los

4 minutos y una velocidad de unos 4 m/seg.

Estos aparatos tienen varios inconvenientes, a saber:

- Solo permiten realizar medidas puntuales.
- La velocidad de giro puede fallar por exceso o por defecto, y esto influye en la temperatura.
- Los depósitos pueden recibir radiación solar directa.
- En el período que transcurre entre la detención de la rotación y la lectura, la temperatura del termómetro húmedo puede subir.

• *Psicrómetros de aspiración*

El más conocido es el de *Assmann*, en el que los dos termómetros están montados dentro de un bastidor metálico cromado que los protege de la radiación solar directa. En la parte superior tienen un motor con una turbina o un ventilador que aspira aire, y que provoca la corriente sobre los bulbos de los termómetros, que se regula a 3,6 m/seg.

Otros modelos basados en el de *Assmann*, con termosondas eléctricas, suministro permanente de agua a la tela envolvente del termómetro húmedo, etc., regulan la velocidad de la corriente hasta 5m/seg., de forma que el coeficiente psicrométrico tenga un valor constante.

En el uso de estos aparatos, si la altitud pasa de los 800 m o si la temperatura

es baja, se deben realizar las correcciones apropiadas (según presión atmosférica y temperatura).

101.5. MEDIDA DEL VIENTO

101.5.1. Velocidad del viento

Generalidades

La medición de la velocidad del viento puede expresarse en m/seg, en Km/hora, en nudos o según la escala de *Beaufort*.

Los aparatos que se utilizan son los anemómetros, que pueden ser:

- De molinete y de hélice.
- Térmicos.
- Sónicos.

Anemómetros de molinete y de hélice

Son los más utilizados. Constan de un captador, que puede ser un molinete de cazoletas o una hélice, y de un sistema de transmisión, que puede estar compuesto, a su vez, por un reductor mecánico, por un generador eléctrico o por un dispositivo de impulsos.

La ecuación básica que relaciona la velocidad de rotación del molinete o de una hélice con la velocidad del viento, es:

$$U = a \Omega + U_0$$

Siendo

U = Velocidad real del viento.

a = Coeficiente de contraste del anemómetro.

Ω = Velocidad de rotación del aparato.

U_0 = Nivel de arranque del anemómetro.

Anemómetros estáticos

- *Anemómetro de tubo de Pitot*

Es un captador direccional que mide la presión estática y la del viento, y obtiene la velocidad del viento con la fórmula:

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Siendo

\bar{u} = Velocidad media del viento.

$\Delta p = \rho \frac{\bar{u}^2}{2}$ = Presión de detención del aire.

ρ = Masa específica del aire.

- *Anemómetros de arrastre*

Se basan en el arrastre de cuerpos cuyo coeficiente de arrastre sea constante dentro de un amplio margen de velocidades del viento.

Utilizan la fórmula

$$F_x = AC_x \rho \frac{\bar{u}^2}{2}$$

Siendo

F_x = Arrastre.

A = Área de la sección del cuerpo perpendicular al movimiento.

C_x = Coeficiente de arrastre.

Si se conoce además la temperatura del aire, se puede obtener la velocidad del viento.

- *Anemoclinómetros*

Se basan en un péndulo ligero que en función de la velocidad del viento se desplazará de la vertical más o menos, en un cambio constante e inestable. Proporcionan informaciones bastante groseras.

Anemómetros térmicos

Se basan en el intercambio de calor de un hilo en convección forzada.

El principio de estos anemómetros parte de la *Ley de King*

$$\phi_h = (a + b \sqrt{\bar{u}}) \Delta T^n$$

Siendo

ϕ_h = Flujo de calor intercambiado por un cilindro calentado a una temperatura superior a la del aire y sometido a un viento de velocidad media \bar{u} .

a, b = Constantes de las dimensiones del cilindro.

\bar{u} = Velocidad media del viento.

ΔT = Diferencia de temperatura entre el cilindro y el aire.

n = Coeficiente (próximo a 1).

Se puede llegar al control de la resistencia eléctrica del hilo, obteniendo

$$R_2 I^2 \cong (R_2 - R_1) (a' + b' \sqrt{\bar{u}})$$

Siendo

R_1 = Resistencia del hilo a la temperatura T_1 .

R_2 = Resistencia del hilo a la temperatura T_2 .

I = Intensidad de la corriente eléctrica.

$$a' = \frac{a}{\alpha R_1}$$

$$b' = \frac{b}{\alpha R_2}$$

α = Coeficiente termoeléctrico.

Estos anemómetros pueden ser de hilo caliente o de película caliente.

Anemómetros sónicos

Se basan en que el sonido se propaga más rápidamente en el sentido del viento. Se determinan las componentes del viento según los 3 ejes de coordenadas mediante dobles parejas de transmisor-receptor definiendo cada eje.

Se aplican las fórmulas

$$t_1 + t_2 \cong \frac{2d}{C_s} \quad \text{y} \quad C_s = 20,067 T_v^{\frac{1}{2}}$$

Siendo

t_1 = Tiempo de tránsito del sonido del emisor 1 al receptor 1.

t_2 = Tiempo de tránsito del sonido del emisor 2 al receptor 2.

d = Distancia entre emisor y receptor.

C_s = Velocidad del sonido.

T_v = Temperatura virtual del aire.

Así, obtenemos, según los tiempos de tránsito, la velocidad del viento en cada eje de coordenadas.

Normalmente ahora se utilizan, en vez de las dobles parejas de emisor-receptor, transductores que funcionan alternativamente como emisores y como receptores.

101.5.2. Dirección del viento

La OMM dice que la dirección del viento se debe indicar en grados a partir del Norte geográfico y en el sentido de las agujas del reloj.

La dirección del viento es aquella desde la que sopla, y se redondea a la decena de grados más próxima, dentro de una rosa de los vientos de 36 direcciones.

Se mide mediante veletas, registradoras o no.

Las veletas pueden tener formas diferentes, buscándose con ellas la mejor

respuesta posible a los movimientos del aire, que será función de su diseño, de su longitud de onda, de su tasa de amortiguación de la respuesta, del rozamiento del eje, etc.

Generalmente se debe transmitir la información a una rosa de los vientos, y en ella se van registrando las variaciones a lo largo del día.

Para la transmisión de la información se pueden utilizar reóstatos, potenció-

metros, codificadores de ángulos numéricos o condensadores variables.

101.6. MEDIDA DE LA INSOLACIÓN Y DE LA RADIACIÓN

Para simplificar este epígrafe, estableceremos en cuadros y tablas los diferentes sistemas de captación y medida de la insolación y de la radiación.

TIPOS DE CAPTADORES

Tipos de captador	Características básicas
Captadores térmicos	Absorben la radiación y la transforman en energía térmica que se convierte a señales eléctricas que se transmiten a registradores.
Captadores cuántico	Absorben los quanta de energía de radiación que reciben y liberan electrones que producen una corriente eléctrica.

CAPTADORES TÉRMICOS BÁSICOS

Captador	Uso
Pirheliómetros	Medida de la radiación solar directa bajo una incidencia normal.
Piranómetros	Radiación solar de un hemisferio. Miden la radiación global, la radiación reflejada por el suelo y la radiación difusa.
Pirgeómetros	Miden las radiaciones de gran longitud de onda descendente (atmosférica) y ascendente (terrestre).
Pirradiómetros	Miden las radiaciones de longitud de onda corta y larga.

CAPTADORES CUÁNTICOS BÁSICOS

Captadores (detector)	Principio
Detector fotovoltaico	Aparece una tensión eléctrica.
Detector fotoemisor	Varía la tasa de emisión de electrones de un objeto (superficie).
Detector fotoconductor	Cambia la conductividad del detector.

APARATOS DE MEDIDA DE LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA (PIRHELÍOMETROS)

Instrumentos de referencia	Pirheliómetro de compensación, de <i>Ångström</i> Pirheliómetro de disco de plata, de <i>Abbott</i>
Instrumentos secundarios	Pirheliómetro de <i>Linke-Feussner</i> Pirheliómetro de <i>Eppley</i>

APARATOS DE MEDIDA DE LA RADIACIÓN GLOBAL (PIRANÓMETROS)

Piranómetros de termopila	De intercambios térmicos verticales De intercambios térmicos horizontales
Piranómetros lineales	Análisis de la radiación bajo cubierta vegetal

APARATOS DE MEDIDA DE LA DURACIÓN DE LA INSOLACIÓN

Heliógrafo <i>Campbell – Stokes</i> Heliógrafos automáticos
--

101.7. MEDIDA DE LAS PRECIPITACIONES

Las precipitaciones son la fase líquida o sólida en que se transforma el vapor de agua de las nubes al condensarse y que pasan del aire al suelo.

Pueden ser verticales (lluvia, nieve, etc.) u horizontales (rocío, escarcha, etc.).

Se expresan según el espesor de un plano de agua que contuviera la misma cantidad de agua que la de la precipitación en un período determinado.

101.7.1. Pluviómetros

Son recipientes cilíndricos abiertos por arriba, con un depósito receptor gra-

duado, donde se mide, en mm, la precipitación.

Existen diversos tipos de pluviómetros, aunque todos con el mismo fundamento. Si se utilizan como totalizadores (para largos períodos de tiempo), se debe depositar en el receptor una pequeña cantidad de aceite para evitar la evaporación.

101.7.2. Pluviógrafos

Son pluviómetros registradores, que pueden captar información sobre el inicio, la cantidad de precipitación, su intensidad y su duración, y de los que existen varios tipos, a saber:

- *De cangilones basculantes o volcadores*. Son los más sencillos y los más extendidos, y son muy válidos para las transmisiones a distancia.

Consisten en unos recipientes simétricos montados sobre una balanza, de

manera que cuando uno de ellos recibe agua de lluvia procedente del colector, se inclina (a partir de recibir 0,2 – 0,5 mm) y la vierte, pasando el otro recipiente a recibir el vertido siguiente. Estos cambios se transmiten a una gráfica con facilidad.

Para conocer la intensidad de una precipitación, bastará con controlar el tiempo transcurrido entre dos vertidos.

- *De sifón.* Consisten en un depósito al que llega el agua que recoge el colector. Este depósito tiene un flotador unido a una plumilla que va dibujando una gráfica a medida que aquel asciende.

Al llenarse el depósito, un sistema de sifón lo vacía y la plumilla vuelve a dibujar la gráfica.

Durante el vaciado puede recogerse la lluvia en un depósito auxiliar, o bien se puede bascular el depósito cuando está lleno, para acelerar esta fase del proceso.

- *De pesada.* Se basan en que el peso de un recipiente y el de la precipitación que recoge se registran en continuo mediante una balanza de pesas o con un sistema de resorte (dinamómetro), que llevan acoplada una plumilla que va dibujando una gráfica.

Estos aparatos suelen disponer de unos amortiguadores de aceite para evitar las oscilaciones que pueda provocar el viento, y de un producto anti-congelante para poder recoger precipitaciones a baja temperatura.

101.7.3. Nivómetros

Son pluviómetros con pantallas protectoras contra el viento, aunque también se pueden utilizar varillas graduadas que miden la altura de la nieve, o pluviógrafos de pesada protegidos, siendo estos últimos muy útiles, pues suministran la información en tiempo real.

101.8. MEDIDA DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA

La unidad de medida que se suele utilizar para la presión atmosférica es el pascal, que es $\text{Pa} = 1 \text{ New/m}^2$, siendo

$$\text{Pa} = \text{Pascal}$$

$$\text{New} = \text{Newton}$$

o mejor en hectopascal (hPa), pues es de una dimensión superior ($1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$), más apropiada a la meteorología.

En general tenemos:

$$1 \text{ hPa} = 0,750062 \text{ mm Hg}$$

$$1 \text{ mm Hg} = 1,333224 \text{ hPa}$$

En condiciones de nivel del mar, 0°C y 45° de latitud, una columna de mercurio de 760 mm ejerce una presión de 1.013,25 hPa.

101.8.1. Barómetros de mercurio

Consisten en un tubo vertical de vidrio, cerrado por arriba y lleno de mercurio, cuya parte inferior se sumerge en un depósito con mercurio.

La altura de la columna variará en función de la alteración del equilibrio: peso de la columna de Hg – presión atmosférica. Esta variación se mide en una escala graduada en unidades de presión.

El barómetro lleva adjunto un termómetro para corregir las lecturas de la presión en función de la temperatura, pues esta última afecta directamente a la altura de la columna.

101.8.2. Barómetro aneroides

Consiste en dos membranas metálicas finas, soldadas por el borde y bombeadas, de forma que la presión atmosférica se equilibra con la fuerza elástica de las membranas o con la ayuda de un resorte.

Están al vacío o rellenas con un gas inerte, y tienen una escala en la que se visualizan las variaciones de la presión atmosférica, o se registran con una pluma adosada.

101.8.3. Barógrafos mecánicos

Los barómetros aneroides necesitan ampliar considerablemente los movi-

mientos de las membranas, por lo que se establecen mecanismos que aumentan la señal entre 100 y 500 veces.

La precisión (debe ser de 0,2 hPa) depende del rozamiento del sistema mecánico de amplificación, de la temperatura, de la histéresis de la cápsula del barómetro aneroides y de la deriva de esta. La solución es limitar al máximo estas desviaciones ajustando el barómetro con frecuencia y realizando las correcciones cuando sea necesario.

101.8.4. Barógrafos eléctricos y barógrafos electrónicos

Se pueden utilizar cápsulas aneroides, cristales de cuarzo o los tubos de *Bourdon*; en cualquiera de estos sistemas se parte de la variación de una dimensión a causa de la presión atmosférica.

Un transductor transforma esa variación de dimensión en tensión eléctrica, frecuencia o resistencia eléctrica, que se registran y se acumulan en una base de datos.

Este sistema tiene múltiples ventajas, como la falta de rozamiento o la capacidad de almacenamiento de datos.

CAPÍTULO 102

REDES DE MEDIDA, CONTROL Y PREVISIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

102.1. REDES METEOROLÓGICAS

102.1.1. Bases generales

Lo mismo que se indicó en nuestra obra *Tratado de Climatología Aplicada* (Ed. Mundi Prensa. 2002) en lo referente al uso de las redes meteorológicas, la disponibilidad de datos meteorológicos representativos puede ser de gran importancia para la agricultura, el urbanismo, el turismo, las diferentes obras de ingeniería y para llevar a cabo una correcta ordenación del territorio. En nuestro tema, es decir, en el estudio y control de la contaminación atmosférica, esta disponibilidad es básica para poder captar datos que nos permitirán hacer estudios, previsiones y diseños, y para el establecimiento de redes de control.

A continuación se detallan algunas consideraciones básicas de los aspectos fundamentales que se han de tener en cuenta:

102.1.2. Estaciones meteorológicas

Variables meteorológicas e instrumentos de medida

1. Temperatura :

- *del aire*: Juego de termómetros de extremas y termógrafo.
- *del suelo*: Termómetro de mínima instalado a 10 cm del suelo y otros a 10, 20, 50 y 100 cm de profundidad.

2. Humedad del aire: psicrómetro con termómetros seco y húmedo, hidrógrafo.

3. Precipitación: pluviómetro y pluviógrafo.

4. Insolación: heliógrafo.

5. Evaporación: tanque de evaporación.

6. Viento: veleta y anemómetro, y anemocinómetro.

La instrumentación debe cumplir una serie de requisitos mínimos:

Aportar medidas fiables de las variables meteorológicas.

- Debe ser calibrada regularmente.
- Debe estar homologada.
- Debe tener un fácil manejo y calibrado.

Por otra parte, se ha de llevar un libro de registro en el que figure la fecha de instalación de cada aparato, calibrado, factor de corrección, averías, causas de interrupción, etc., ya que puede resultar vital para detectar anomalías en las serie climatológicas.

Emplazamiento de la estación

- Ha de encontrarse en un lugar representativo de las condiciones meteorológicas y climáticas de la zona, teniendo en cuenta los elementos próximos que pudieran alterar las mediciones obtenidas.
- Los instrumentos deben situarse en un terreno llano y sin obstáculos.
- La estación debe protegerse con una valla de 10 × 10 m y 1,2 m de altura.

Para obtener datos adicionales, se podrán instalar instrumentos de medición específicos para ello.

Si las estaciones se encuentran en zonas con difícil acceso, se utilizan instrumentos registradores o totalizadores, que deberán instalarse simultáneamente con otro de lectura directa para verificar las lecturas del primero.

Resulta esencial que la ubicación de los instrumentos no provoque alteraciones

en las lecturas de los mismos. Si no se trata de una estación automática, se deberán realizar las lecturas a la misma hora.

102.1.3. Establecimiento de una red meteorológica local

Efectos a analizar

Termopluviométricos

- Procesos de inversión térmica en invierno.
- Movimientos convectivos térmicos en verano.
- Oscilaciones de temperatura muy significativas en zonas montañosas.
- Efecto foehn: Las masas de aire al ascender por la ladera montañosa se va enfriando, dejando precipitaciones a su paso y perdiendo la mayor parte de su humedad cuando llegan a su cota superior. Al descender por la otra vertiente constituyen un aire seco, creando zonas de *sombra pluviométrica* que resulta necesario identificar.

Relacionados con la radiación

En los valles surgen efectos de estancamiento de masas nubosas.

Relacionados con el viento

Brisas marinas y terrestres, vientos anabáticos y catabáticos.

Cuando el viento recorre distancias cortas, los niveles de contaminación suelen ser elevados (escasa dispersión de los contaminantes), por lo que el conocimiento de este tipo de datos resulta muy importante en zonas donde se estime que por la tipología o por las actividades desarrolladas en ellas, la contaminación atmosférica pueda ser significativa.

Una información adecuada se consigue estableciendo una red local de toma de datos meteorológicos, que se ha de diseñar teniendo en cuenta la mayor cantidad posible de información.

Recopilación de información

Para que la información obtenida sea representativa y útil, es necesario recoger los siguientes datos:

- Meteorológicos
- Topográficos
- Hidrológicos
- Contaminación atmosférica
- Consideraciones, demandas y carencias detectadas en la mayor parte de sectores o áreas posibles: Transportes, sanidad, turismo, industria, urbanismo.

Elaboración de mapas por sectores y señalización de los lugares que recogen el mayor número de informaciones

La información obtenida se sintetiza y se agrupa en mapas temáticos e indivi-

duales, estableciendo cada uno de los sectores que se encuentren dentro del área de influencia.

Se realizarán principalmente dos tipos de mapas:

- *Mapas de base*, que definirán las áreas de importancia para la ubicación de las estaciones en función de la información obtenida de:
 - Usos del suelo: Indican el grado de aprovechamiento del suelo y, en función de éste, se determinarán los usos de relevancia desde el punto de vista meteorológico.
 - Población: Los lugares con mayor densidad de población necesitarán un mayor número de estaciones meteorológicas.
 - Industria: En éstas zonas resulta vital la disponibilidad de este tipo de datos, sobre todo para estudios de contaminación atmosférica, pues es necesario conocer con la mayor exactitud posible las medidas de los vientos, dirección predominante, capa de mezcla, etc. Estos requerimientos hacen necesaria la existencia de una estación completa.
 - Topografía: Es necesario conocerla, y mejor gráficamente, para establecer correctamente las redes pluviométricas y termométricas.

Se han de tener en cuenta los valles, las montañas, las laderas a sotavento, y a barlovento, etc., que podrían crear efectos no deseados, como las canalizaciones de los vientos.

- Temperatura: Es importante representarla para detectar temperaturas máximas y mínimas que pudieran causar efectos negativos sobre cosechas, tráfico, etc.
- Pluviometría: Son muestras que determinarán los lugares de máximas y mínimas precipitaciones que pudieran resultar de gran utilidad para la consecución de series históricas.
- *Mapas añadidos*, que se superpondrán a los anteriores con el objetivo de obtener información complementaria.

Con ésta información se confirmará la ubicación óptima establecida sobre la base de los datos obtenidos anteriormente, o por el contrario, se detectarán aquellos puntos en los que las estaciones podrán ser desplazadas con el fin de rentabilizarlas al máximo.

Agrupación de la información por sectores

Según el tipo de red a definir, se agruparán unos datos u otros así:

Red completa de estaciones

Será necesaria la instalación de una estación completa en los supuestos indicados anteriormente: Zonas industriales, aquellas que tengan una densidad de habitantes importante, etc.

Red termopluiométrica de estaciones

Utilizaremos los datos obtenidos de los usos del suelo, y los adicionales de los mapas añadidos: De su superposición surgen unas áreas con unas prioridades que vendrán definidas por su importancia y por el número de usos.

Posteriormente se añaden la información pluviométrica y el mapa de temperaturas, lo que permitirá perfilar las áreas en las que se hace necesario instalar las estaciones termopluiométricas.

Una vez determinada la ubicación de las estaciones meteorológicas, puede ocurrir:

- En los casos en que ambas zonas estén muy próximas o que se encuentren prácticamente solapadas, es probable que se pueda eliminar una de las dos estaciones, si dan información redundante.
- Si se presenta el caso en que dos estaciones cubren zonas muy similares, se puede estudiar la posibilidad de variar la ubicación de una de ellas, teniendo en cuenta los márgenes permitidos por el estudio y por las normas del Instituto Meteorológico en cuanto a distancia entre estaciones.

Establecimiento de la densidad de estaciones

Se pueden seguir distintos criterios a la hora de establecer la densidad óptima, que será la mínima que aporte unos da-

tos aceptables. Éstos variarán en función del tipo de red que se quiera establecer: Termopluiométrica, de radiación o completa.

Estaciones termopluiométricas

El número mínimo de estaciones vendrá determinado por la siguiente información :

- *Precipitaciones y temperatura.* Se fijan los emplazamientos del máximo y del mínimo nivel, para poder realizar así una buena interpolación de los resultados, y entre estos puntos se ubican estaciones intermedias para cubrir la totalidad del territorio.
- *Condiciones topográficas.* Resulta importante destacar que en los casos en que existan áreas montañosas, debe quedar cubierta la mayor cantidad posible de cotas, lo que se traduce en un incremento muy importante de la densidad de estaciones, sobre todo cuando las pendientes son acusadas.
- *Clima*
- *Mapa de usos.* Informa sobre el número de aplicaciones que se va a dar a cada estación , buscando que las zonas más importantes dispongan de la mayor cantidad de información posible. Las que no requieran muchos usos, tendrán un radio de acción elevado.

Existe la posibilidad de incluir dentro de estas estaciones, estaciones de evaporación, para recoger información sobre los índices de pérdida en embalses y cuencas hidrográficas.

- *Estaciones de radiación.* Una estación completa de radiación solar determinará los siguientes parámetros: Radiación global, radiación neta, radiación difusa, radiación directa, radiación ultravioleta y radiación infrarroja.

Se debe considerar la instalación de al menos una estación que mida todos estos parámetros. Otras estaciones de apoyo medirán únicamente la radiación global, y en lugares de elevada afluencia turística, tanto en zonas de montaña como de playa, la radiación ultravioleta.

En este caso es importante que quede cubierta toda la región, por lo que se suele instalar una estación en cada cuenca hidrográfica.

- *Estaciones completas.* Tal como se indicó anteriormente, son imprescindibles en zonas urbanas con un número importante de habitantes, y lo mismo ocurre en los polígonos industriales.

En las zonas que no queden cubiertas, se han de instalar estaciones de continuidad.

- *Red de medidores de capas media y alta.* La red de media cota (de sódares), debe tener una precisión para los perfiles de los parámetros atmosféricos de al menos 50 m en altura. Resulta importante en las zonas urbanas e industriales (estudio de la dispersión de los contaminantes, altura de la capa de mezcla, magnitud de los vientos en altura, etc.) y fundamental en los aeropuertos.

Para la obtención de medidas de cota alta, se utilizan las estaciones de radio-sonda.

Estudio sobre el terreno y comparación con la red existente, para considerar la posibilidad de redefinir las ubicaciones

En este apartado se evidenciarán los puntos que no hemos considerado en nuestro estudio (accesibilidad del terreno, factores económicos, etc.), manifestándose por tanto algunas de las dificultades y carencias del mismo.

También podremos realizar una comparación de la red existente (si la hay) con la planteada en este diseño.

Conclusiones

Una red meteorológica local es solicitada habitualmente para:

- Disponer de información actualizada y de un flujo diario y constante de datos.
- Elaborar series históricas precisas en entornos locales.
- Estudios de contaminantes atmosféricos.
- Realización de proyectos urbanísticos costeros.

102.1.4. Estaciones meteorológicas automáticas

En una estación automática los instrumentos realizan de manera autóno-

ma las oportunas mediciones y las transmiten o registran de forma automática, por lo que un único operario puede realizar el seguimiento y control desde su oficina, y si cuenta con los medios adecuados para ello, puede trabajar con un conjunto amplio de estaciones meteorológicas.

Algunas de las ventajas que se pueden destacar en este tipo de estaciones son las siguientes:

- Permiten obtener datos de estaciones que se encuentren en zonas inaccesibles o de difícil acceso.
- Los datos obtenidos son almacenados de forma numérica, lo que facilita el tratamiento de los mismos a la vez que asegura una mayor precisión al no tener que ser obtenidos manualmente, lo que podría dar lugar a errores de medición.

Sin embargo, también presentan algunas desventajas, como son las asociadas al mal funcionamiento de algunos de los captadores, lo que hace necesario que se lleven a cabo controles con cierta frecuencia. También es imprescindible la verificación regular de la coherencia entre los valores medidos y los reales, lo que tiene que efectuarse mediante un técnico especializado.

Actualmente las estaciones meteorológicas automáticas son dirigidas a través de microprocesadores y de microordenadores, dando la posibilidad de realizar tareas múltiples a gran velocidad sólo con modificar el software. Anteriormente las estaciones no autónomas únicamente estaban dedicadas a tareas

específicas, con una programación fija que no se podía modificar.

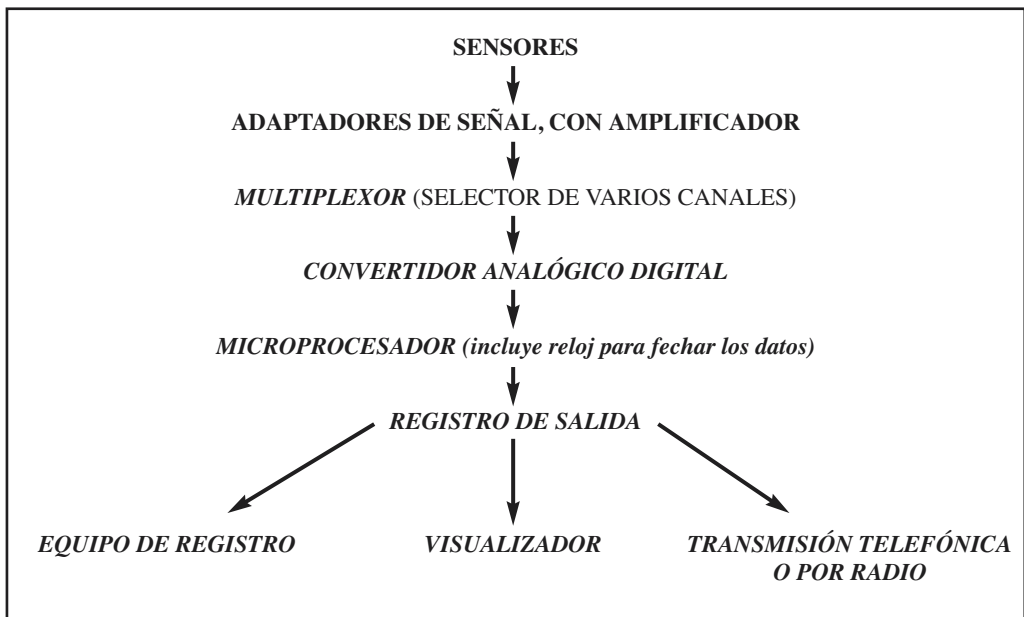
Existen varias clasificaciones posibles en las que se pueden agrupar estas estaciones meteorológicas, a saber:

- Según la forma en que son explotados los datos:
 - Estaciones climatológicas en las que los datos se recogen en diferido, pudiendo ser almacenados.
 - Sinópticas: los datos son consultados en tiempo real mediante un sistema de transmisión.
- Por su ubicación:
 - Marinas.

- Terrestres.
- Por su aplicación:
 - Aeronáuticas.
 - Microclimáticas.
 - De alerta, para aviso de la población.
 - Agrometeorológicas.
 - De control de la contaminación atmosférica.

De forma muy sintética, se podría esquematizar el funcionamiento de una estación meteorológica automática como se indica en el cuadro adjunto:

FUNCIONAMIENTO DE UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA



Algunas de las funciones que puede tener el microprocesador son: filtrado de datos, linealización y puesta en escala, control de la calidad de las medidas, conversión a unidades meteorológicas, selección de los valores extremos, cálculo de medias, etc.

Para asegurar la fiabilidad de los datos, se ha de disponer de sistemas de supervisión para detectar fallos en su funcionamiento.

Por último, para realizar una elección correcta de los sensores de la estación se han de valorar una serie de requisitos, como son los siguientes:

- Requisitos mecánicos (cápsula aneroide, láminas bimetálicas): deben estar acoplados a transductores para poder ser incorporados en la cadena de medida.
- Existencia de algoritmos que permitan pasar la señal a sus parámetros atmosféricos.
- Características funcionales del sensor: precisión, estabilidad y durabilidad.
- Adaptación de los sensores a los medidores automáticos.

Unas estaciones meteorológicas aceptan sensores que entregan señales analógicas, y otras, impulsos de conteo.

Para poder evaluar los niveles de contaminación atmosférica, es necesario conocer las condiciones meteorológicas en que se halla el medio en que se encuentran los contaminantes.

La evolución de las masas de aire, a nivel superficial y también en altura,

puede ser diagnosticada y seguida si se dispone de un número suficiente de sensores meteorológicos.

En el caso concreto de la Comunidad de Madrid, todas las estaciones remotas o automáticas tienen instalada en su parte superior, a unos 8 o 10 metros de altura, una torre meteorológica. Dicha torre dispone de sensores que aportan datos más o menos representativos sobre:

- Velocidad y dirección del viento
- Temperatura
- Humedad relativa
- Precipitación
- Radiación solar

102.1.5. Captación y gestión de datos

En las estaciones meteorológicas se recoge una cantidad de datos muy elevada, por lo que se hace imprescindible la aplicación de técnicas estadísticas para obtener información.

Así, podemos distinguir entre la *estadística descriptiva*, la *analítica* y la *inferencial*. La primera únicamente reúne y presenta el conjunto de datos obtenidos en la estación; los otros tipos realizan un tratamiento más o menos elaborado de los mismos, hasta llegar en algunas ocasiones a deducir leyes válidas para la muestra.

Existen dos conceptos fundamentales que resultan indispensables para comprender la mayoría de los análisis estadísticos básicos:

- a) La *población*, que es el conjunto de datos meteorológicos que adquieren un único valor cada año.
- b) La *serie climatológica o muestra aleatoria*, que es el subconjunto de esa población, y que debe estar formada al menos por los datos de 30 años consecutivos. En numerosas ocasiones no es posible disponer de estas series, por lo que hay que recurrir a series formadas por un número inferior de datos, que pueden llegar a dar problemas de representatividad de la población.

Para cada uno de los elementos climáticos existentes (temperatura, precipitación, humedad, nubosidad, etc.), se puede realizar una estimación del número mínimo de años necesarios para obtener distribuciones de frecuencias estables, que dependerán a su vez del lugar de dónde se quiera obtener la estadística (montaña, llanura, costa o islas). En ocasiones, si disponemos de series cortas de datos, es posible extrapolarlos, utilizando para ello series largas obtenidas de estaciones próximas.

Las series pueden ser *homogéneas*, si ha sido posible realizar en cada una de las ocasiones las mediciones en las mismas condiciones, o *heterogéneas*, si se han producido variaciones micro o macroclimáticas en el emplazamiento de la estación meteorológica, en los instrumentos de medida o en cualquiera de las condiciones en las que se han obtenido datos a lo largo del período de tiempo que constituye la serie.

Es importante que quede constancia en las estaciones meteorológicas de es-

te tipo de alteraciones, para que posteriormente sean consideradas en el análisis estadístico de los datos, ya que de una serie heterogénea no es posible conseguir información. Existen diversos métodos para detectar si la serie con la que nos encontramos es homogénea o no: El método de las diferencias, el del cociente y el test de las secuencias. Una vez detectada una serie heterogénea, únicamente se podrá corregir si disponemos al menos un tramo homogéneo de la misma (si se poseen varios, se utiliza el más reciente o el más largo), y de una serie homogénea que sirva para comparar.

La *representación gráfica* de los datos obtenidos en las estaciones meteorológicas facilita la comprensión y la interpretación de los resultados obtenidos. Existen para ello distintas funciones de distribución, y entre las más sencillas cabría destacar:

- *Distribución normal*: Es la utilizada más frecuentemente para ajustar distribuciones de frecuencia de precipitaciones, humedad y presión.

Se basa en el *teorema del límite central*, según el cual, las medias o sumas de un número suficientemente elevado de datos meteorológicos siguen una distribución normal (aunque en ocasiones la distribución de frecuencias de las precipitaciones anuales presenta una asimetría positiva).

Cuando esto no ocurre, se pueden realizar transformaciones mediante raíces cuadradas o cúbicas, para normalizar los datos.

- *Histograma: De frecuencias* (frecuencia de aparición de un determinado elemento), que da lugar a una función de densidad del elemento en cuestión, y de *frecuencia acumulada*.

En ambos casos, el procedimiento a seguir, a grandes rasgos, es el siguiente:

- Se toman como referencia los valores máximos y mínimos obtenidos por las variables medidas, y se realizan subdivisiones (nunca superiores a 15 ni inferiores a 5) en intervalos, denominados *intervalos de clase*.
- Cada una de las clases agrupará por tanto un conjunto de datos, que será representado por el valor central del conjunto o *marca de clase*.
- Se calcula la frecuencia de cada una de las clases.
- Se presenta el histograma uniendo mediante segmentos las *marcas de clase*, obteniendo de ésta manera el *polígono de frecuencias*. En ocasiones, se presenta también en forma de diagrama de barras, aunque es menos frecuente que la anterior presentación.

Otras de las distribuciones que se suelen utilizar, son la *Gamma incompleta*, la de *Gumbel*, aplicada para valores extremos y frecuentemente utilizada para dimensionamiento de redes de drenaje, y las *Cadenas de Markov*, que estudia series históricas con la finalidad de realizar predicciones del tiempo a medio y largo plazo con la mayor exactitud posible. Este modelo presupone la existen-

cia de una cierta persistencia, es decir, que las condiciones del día precedente determinarán de manera muy significativa las del día posterior (utilizando probabilidades de transición).

102.2. MODELO DE PREDICCIÓN METEOROLÓGICA PARA EL CONTROL DE EMISIONES

Para predecir la dispersión de los gases emitidos a la atmósfera, es necesario:

- Conocer el movimiento de las masas de aire y las variaciones de temperatura en el entorno del foco emisor, mediante un modelo de predicción meteorológica.
- Realizar una simulación del comportamiento del penacho en esas circunstancias, utilizando para ello un modelo de difusión atmosférica.

Una predicción meteorológica de la zona de estudio lo más exacta posible, se realiza teniendo en cuenta tanto las condiciones del entorno (fuera del área delimitada), como las existentes cerca del foco emisor, reseñando los factores topográficos que puedan afectar a los movimientos del aire dentro de esta zona.

Instituciones nacionales (como el Instituto Nacional de Meteorología en España) o internacionales, pueden facilitar predicciones meteorológicas de viento y temperatura a gran escala (con una resolución de 100 km.). Éstos datos, sin embargo, no resultan ser de gran utilidad

para describir el flujo de aire a una escala mucho menor (alrededor de 1 km.) en torno a un determinado foco emisor.

Es por ello por lo que se hace necesario obtener un modelo dinámico válido para un área limitada, que pueda generar campos de viento y temperatura tridimensional. Este modelo de predicción meteorológica a micro-meso escala, incluirá:

- Predicciones a gran escala, para determinar las condiciones del entorno.
- Descripción de los fenómenos más significativos a escala local, teniendo en cuenta los efectos de la topografía sobre el flujo de aire, grado de nubosidad y radiación solar.

En España existe desde hace algún tiempo un modelo en la Central Térmica de As Pontes, para el seguimiento y control de las emisiones de SO_2 en función de la predicción meteorológica. La planificación de los tipos de carbón que se han de consumir en la Central se realiza en función de las predicciones de este sistema.

El modelo está basado en la solución de diferencias finitas de las ecuaciones hidrotérmicas y de energía cinética turbulenta. La topografía de la zona es incorporada mediante un sistema de coordenadas del suelo.

Como condiciones iniciales se utilizan las suministradas por el INM en cuatro puntos separados entre sí 100 km., para 4 puntos isobáricos distintos. Mediante una interpolación cuadrática se obtiene un campo de vientos y temperatura para cada punto de la red tridimensional.

Los resultados obtenidos muestran que el campo de vientos existente sobre el nivel del suelo a 1.400 m, es el que transporta el penacho. A este nivel, el flujo de viento no se encuentra afectado por el suelo, por lo que la magnitud del viento permanece constante en todos los puntos, siendo influenciado en este punto por el viento geostrofico.

A alturas inferiores, el suelo influye sobre el módulo y la dirección del viento, y no transporta el penacho.

A lo largo del día, a medida que aumenta la temperatura del suelo se van sucediendo cambios notables en la velocidad, dirección y temperatura potencial del viento:

- Según subimos en altura, se observa un incremento en la velocidad, alcanzando un máximo de 20 m/s a 3.000 m. Además, según avanza el día, la velocidad también aumenta significativamente, desde 10 m/seg hasta casi 20 m/seg a las 16:00 horas.
- La dirección del viento también se ve modificada con la altitud (desde 270° a la altura del suelo, a 330° a casi 3.000 m) y sobre todo con la temperatura, alcanzando su máxima variación a las 16:00 horas.
- La temperatura potencial varía mucho también con la altitud, pero apenas presenta cambios a lo largo del día. Se detecta con frecuencia una inversión térmica alrededor de los 400 m, ascendiendo rápidamente hasta los 2.300 m y estabilizándose alrededor de los 2.500 m.

102.3. DISEÑO DE REDES DE VIGILANCIA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

En los años 70 del siglo pasado diversas organizaciones internacionales se preocuparon por conocer la situación mundial de la calidad del aire, con objeto de poder realizar previsiones para proteger la salud de las personas.

Así, en 1976 se celebraron reuniones entre expertos que consideraron los principios para el establecimiento de redes de vigilancia de la contaminación atmosférica en todos los países, adaptándose a las directrices básicas de la OMM dentro del Sistema Global de Vigilancia del Medio perteneciente al PNUMA.

Los Organismos que colaboraron en estos programas fueron los siguientes:

OMM	OCDE
OMS	OIEA
PNUMA	UE
	CIUC

A partir de sus directrices, actualizadas, indicamos a continuación un plan general para establecer una red de vigilancia, teniendo en cuenta los parámetros y factores incidentes.

Información y datos previos básicos

- Determinación de las causas de la contaminación.
- Agentes contaminantes básicos del aire.

- Fuentes contaminantes.
- Métodos de medida.
- Información demográfica del área.
- Información sanitaria del área.
- Simulación analógica.
- Información topográfica.
- Aplicación de fórmulas sobre la difusión.
- Información sobre la calidad del aire.
- Distribución más probable de la contaminación según los datos anteriores.
- Información sobre los residuos sólidos urbanos, agrícolas o industriales del área.

Organización y recursos

- Organismos responsables.
- Personal.
- Equipo material.
- Financiación.
- Control.
- Mantenimiento (estimación previa).
- Otros recursos.

Planificación y diseño

- Selección definitiva de los agentes contaminantes a comprobar.
- Selección definitiva del área de estudio.

- Número de los puntos de muestreo.
- Duración del muestreo.
- Frecuencia del muestreo.

Criterios para la localización e instalación de las estaciones de muestreo

- Condiciones de representatividad.
- Condiciones de comparabilidad.
- Requisitos físicos.
- Datos tecnológicos.
- Requisitos tecnológicos.
- Requisitos prácticos.
- Medidas discontinuas.
- Medidas continuas.
- Diseño definitivo de la red.

Elementos básicos complementarios en la planificación

- Necesidades de laboratorio.
- Control y garantía de calidad.
- Sistema de adquisición de datos.
- Transmisiones de datos.
- Sistema de manejo de datos.
- Presentación de los datos.
- Mantenimiento y repuestos.
- Unidades centrales.
- Estaciones remotas.

Tecnologías a aplicar.

- Redes autónomas.
- Redes manuales.
- Redes semiautomáticas.
- Redes automáticas.
- Redes basadas en la teledetección.
- Redes de vigilancia.
- Redes de alerta.
- Redes de configuración geométrica.
- Redes de configuración no regular.
- Redes de configuración mixta.
- Redes de control de emisiones.
- Redes de control de inmisiones.

En el caso de la Comunidad de Madrid, se ha establecido una Red general de control de la contaminación atmosférica, con una serie de sensores que permiten conocer la situación de la contaminación atmosférica con datos más o menos instantáneos, según el tipo de contaminante de que se trate.

Resulta importante señalar que muchos de estos sensores no aportan datos significativos o fiables debido principalmente a su emplazamiento en áreas estrictamente urbanas, que perturban la medida obtenida si hay presencia de árboles u otros elementos muy próximos a la estación.

En las estaciones automáticas se miden todos los contaminantes cuya vigilancia es obligatoria y según las técnicas de medida establecidas en la legislación vigente:

- SO₂: Fluorescencia ultravioleta.
- CO: Absorción infrarroja, sistema de correlación.
- NO_x: Quimioluminiscencia.
- Partículas: Absorción.
- Pb: Absorción atómica (captador de alto volumen).
- Partículas en suspensión: Gravimetría (captador de alto volumen).
- O₃.

Algunos de los analizadores de partículas, de Pb y de SO₂ son manuales, y suelen servir de analizadores de referencia o contraste respecto a los automáticos, debido a su fiabilidad y a su normalización a nivel internacional.

102.4. CONTROLES EUROPEOS

Líneas generales europeas

La Directiva 96/62/CE se ocupa de la evolución y gestión de la calidad del aire ambiente, y en la actualidad señala los siguientes contaminantes:

Grupo I: SO₂, NO₂, Pb, O₃, Partículas finas, Partículas en suspensión.

Grupo II: C₆H₆, CO, HC policíclicos aromáticos, Cd, As, Ni, Hg y otros.

La Comisión presenta y actualiza los valores límite, y establece los umbrales de alerta.

En esta línea cada país tiene la obligación de realizar mediciones, (en redes,

generalmente) en las ciudades y de establecer medidas para cada situación y alerta, como se indica en otros epígrafes de este capítulo.

Red de la Unión Europea de control de la contaminación atmosférica sobre la vegetación forestal

Se trata de una red en los países miembros que cubre cuadrículas forestales de 16 × 16 km, con puntos con un mínimo de 24 pies arbóreos. En ellos se señala una serie de datos ecológicos, climático y específicos del desarrollo forestal, controlándose las decoloraciones, las defoliaciones, los pies muertos, los daños bióticos y los daños abióticos.

Redes Europeas de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica

La OMS ha desarrollado la red BAP-MoN, que tiene en España (Observatorio de Izaña, Tenerife) una estación de referencia para el control de la contaminación de fondo, estación cuyos datos se consideran sin influencia de la contaminación local debido a su ubicación a gran altitud.

La red BAPMoN/EMEP mide la contaminación de fondo dentro del Convenio de Ginebra (Transporte a larga distancia de los contaminantes atmosféricos).

Los datos se envían al Centro Europeo de Coordinación Química, que los procesa y almacena.

La red EMEP de Europa dispone de 97 estaciones, de las que 6 están situadas en España.

102.5. CONTROLES GENERALES EN ESPAÑA

- Redes europeas
- Red Nacional de vigilancia y prevención de la contaminación atmosférica
- Redes de vigilancia de las Comunidades Autónomas
- Red de vigilancia de focos potencialmente peligrosos
- Red de contaminantes atmosféricos transfronterizos
- Red de vigilancia de la corrosión
- Redes urbanas en muchas ciudades (SO₂, partículas sedimentables, humos, NO_x, CO, hidrocarburos, aldehídos, etc.)

102.6. DISEÑO DE REDES DE INMISIÓN PARA ESTABLECIMIENTOS INDUSTRIALES

En base a las propuestas y guías establecidas por la EPA de Estados Unidos, aplicadas y seguidas en numerosos países, se describe un sistema de diseño para establecimientos industriales, según una serie de fases que tienen bastante similitud con las propuestas de los sistemas de la OMM y de la OMS, ya indicadas en otros epígrafes de este capítulo.

El programa del plan es el siguiente:

Identificación y caracterización meteorológica de la zona

Clases o estados meteorológicos:

- Ocurrencia de cada clase.
- Duración de cada clase.
- Variables de cada clase.
 - Temperatura.
 - Velocidad del viento.
 - Dirección del viento.
 - Altura de la capa de mezcla.
 - Humedad.
- Modelo de dispersión.
- Mapas de inmisión.

Identificación e idoneidad (representatividad, etc.) de los puntos de muestreo

- Capacidad de detección de concentración.
- Representatividad.
- Uso de índices de calidad del aire.
- División del territorio en cuadrículas y celdas.
- Identificación de los puntos de máxima capacidad de medida.
- Factores externos (zonas habitadas, áreas protegidas, etc.).

Determinación del territorio o área de influencia de la red

- Determinación de la zona de influencia de cada punto de medición en que las medidas son representativas.
- Análisis de las correlaciones de las concentraciones medidas en puntos próximos.
- Definición de puntos de corte o mínimos de coeficientes de correlación de cada zona de influencia.

Localización óptima de la red

- Dimensiones definidas de la red.
- Dimensiones previstas inicialmente.
- Dimensiones definitivas de la red.
- Eficiencia de la red.

Diseño final e influencia de los factores externos

- Factores de ubicación
 - Topografía
 - Orientación
 - Altitud
- Factores de infraestructura
 - Accesibilidad
 - Disponibilidad de energía eléctrica
 - Vías de comunicación en la red
- Factores sociales

- Identificación de puntos de muestreo sin interés de máxima capacidad de medida, pero de interés social por estar en núcleos habitados.
- Identificación de puntos de muestreo sin interés de máxima capacidad de medida, pero de interés social por estar en algún punto sensible por otros motivos.
- Diseño final.

102.7. SISTEMAS INTEGRADOS DE CONTROL Y PREDICCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La Unión Europea desarrolló a finales de los años 90 (1997) el EMMA o sistema integrado de control y predicción de la contaminación atmosférica en áreas metropolitanas, mediante el que se captan y se procesan informaciones meteorológicas, de emisión y de inmisión de territorios urbanos.

El Proyecto EMMA se integró en el Programa *Telematics for Environment* de la UE, y se orientó al diseño y desarrollo de un sistema de información para obtener y procesar datos de calidad del aire mediante tecnologías telemáticas de última generación.

El Plan se aplicó a la predicción de la contaminación atmosférica con 24 o 48 horas de antelación, y a la información al público.

Las características de este sistema integrado son:

- Integración de redes ya existentes.
- Optimización de la adquisición, explotación y tratamiento de los datos.
- Integración de modelos y procedimientos de control de calidad.
- Minimización de la instrumentación al integrar los modelos.
- Uso total de los indicadores de calidad del aire.

El EMMA integrado de control y predicción consiste en el siguiente sistema:

Adquisición de datos

- Captación de datos meteorológicos.
- Captura de contaminantes.
- Análisis de contaminantes.
- Captura de datos de los analizadores.
- Tratamiento preliminar de los datos in situ.
- Transmisión de los datos a la estación central.
- Validación.
- Integración.

Explotación de la base de datos de calidad del aire

- Consultas sobre datos.
- Modificaciones de datos instantáneos.
- Modificaciones de datos integrados.
- Cálculos estadísticos.

- Gráficos de evolución.
- Gráficos comparativos.

Emisiones

- Recopilación de la información.
- Integración de la información.
- Fuentes:
 - Puntuales.
 - Lineales.
 - De área.
- Emisiones del tráfico:
 - Datos del tráfico:
 - Itinerarios.
 - Internos.
 - Externos.
 - Periféricos.
 - Ejes urbanos fundamentales.
 - Matrices origen-destino.
 - Intensidad media diaria.
 - Modelo con software informático específico.
 - Verificación.
 - Factores de emisión.
 - Datos de tráfico.
 - Intensidad.
 - Velocidad media.
 - % de vehículos pesados.
 - Tipo de motor.

- Variables de la vía.
 - Longitudes.
 - Pendientes.
 - Tipo de vía.
 - Urbana.
 - Interurbana.
 - Metropolitana.
- Condiciones ambientales.
 - Temperatura.
 - Humedad.
 - Vientos.
- Situación temporal.
 - Día de la semana.
 - Día del mes.
 - Hora.
- Contaminantes.
 - CO.
 - NO_x.
 - SO₂.
 - COV.
 - Partículas.
- Tipos de emisión (fuentes).
 - Motores en frío.
 - Motores en caliente.
 - Tipos de consumo de combustibles (SO_x).
 - Velocidad.
 - CO disminuye con la velocidad.
 - NO_x aumenta con la velocidad.

- COV.
 - De los tubos de escape.
 - Evaporación:
 - Carter.
 - Depósito.
- Partículas.
 - Motores Diesel.

Modelos de predicción

- Modelización meteorológica.
 - Contorno inferior:
 - Balance de flujos de cantidad de movimiento.
 - Calor sensible.
 - Calor latente.
 - Radiación neta.
 - Vientos.
- Modelización del transporte.
 - Flujo superficial de contaminantes (velocidad de depósito × concentración):
 - Turbulencias atmosféricas.
 - Temperatura.
 - Radiación.
 - Topografía.
 - Vegetación.
 - Ubicación.
- Fiabilidad
- Química atmosférica: actividad química de los contaminantes

- Emisiones:
 - Tipos de contaminantes.
 - Errores.
 - Emisiones puntuales (edificios, fábricas).
 - Emisiones lineales (vías de comunicación).
 - Emisiones superficiales (difusas).
 - Cuantificación por factores de emisión.

Modelo EMMA

- Modelo meteorológico a mesoescala.
- Modelo de dispersión de contaminantes.
- Modelo fotoquímico CBM-IV.
- Modelo de emisiones.
- Método numérico SMVGEAR.
- Información de la calidad del aire (divulgación):
 - Paneles callejeros.
 - Internet.

102.8. SISTEMAS INTEGRALES REGIONALES DE MEDIDA Y CONTROL DE LA CALIDAD DEL AIRE

En principio, un sistema integral de este tipo consta de:

- Red de medida y control de la calidad del aire.

- Red de control de las emisiones.
- Inventario de emisiones.
- Control con estaciones móviles.
- Laboratorio de referencia.
- Sistemas de predicción.
 - La *red de medida y control* constará de:
 - Sensores de partículas.
 - Sensores de SO₂.
 - Sensores de NO_x.
 - Sensores de CO.
 - Sensores de O₃.
 - Sensores de ruido.

En general, con los sensores y el sistema de transmisión de datos se obtiene información cada 15-20 minutos, que se procesará y analizará.

La *red de control de emisiones* constará de:

- Medidores en continuo
- Transmisores

Estas instalaciones se ubicarán en los puntos más contaminados por estar ubicados cerca de industrias emisoras o en áreas donde se concentra la contaminación.

El *inventario de las emisiones* consistirá en el estudio de cada fuente fija (industrias, núcleos urbanos), de las fuentes móviles (automóviles) y de las fuentes difusas (agricultura).

Las *estaciones móviles* completarán las redes fijas controlando las emisiones en puntos conflictivos (industrias, fundamentalmente) o en zonas alejadas de la red.

El *laboratorio de referencia* realizará las siguientes funciones:

- Puesta a punto de métodos y técnicas de calibración.
- Puesta a punto de métodos y técnicas de preparación de muestras patrón.
- Calibración de los analizadores de referencia.
- Formación de personal.
- Centro de documentación.
- Certificación de instrumental.
- Realización de pruebas de calidad.
- Si el laboratorio se instala en Europa, es conveniente apoyarse en el ER-LAP, del JRC, de la Unión Europea.
- Los *sistemas de predicción* dispondrán de una red de captación, análisis y transmisión de datos, y de un sistema de procesamiento, con objeto de:
 - Predecir situaciones de contaminación.
 - Estimación de contaminación con 24 o 48 horas de antelación.
 - Sensibilización y activación de alarmas.
 - Declarar situaciones de emergencia.

102.9. EJEMPLO DE DISEÑO DE UN SISTEMA INTEGRAL DE PREDICCIÓN

102.9.1. Bases generales

En epígrafes anteriores hemos tratado lo referente a las redes de control y

predicción de la contaminación atmosférica.

En la actualidad, tanto el Estado como las Comunidades Autónomas, los Ayuntamientos y las propias empresas españolas y en el resto de la Unión Europea, y cuando la situación lo justifica, implantan sistemas de vigilancia de la calidad del aire mediante redes de estaciones que realizan controles y análisis en continuo, tanto de los posibles contaminantes presentes en el aire como de datos meteorológicos, con objeto de mantener un seguimiento de los niveles de contaminación atmosférica en todo momento.

En los últimos años se ha seguido avanzando al respecto, y se van completando estas redes con sistemas predictivos con el fin de conocer con antelación posibles situaciones límite, y poder tomar así las medidas oportunas para minimizar los efectos de excesos de concentración de contaminantes en el aire.

Estas medidas suelen estar previstas en niveles de emergencia, que dan lugar a acciones más o menos completas según la gravedad que señale el nivel que se va a alcanzar, como se ha indicado en otros capítulos de esta obra.

102.9.2. Composición de un sistema integral de predicción

Un sistema integral de predicción consta, por una parte, de un sistema convencional de vigilancia de la calidad del aire, y por otra, del sistema de predicción.

El sistema continuo de vigilancia de la calidad del aire está compuesto por:

- Sistema (red) de control y seguimiento en diferentes puntos.
- Medidores en continuo en cada punto.
- Sistemas de transmisores que envían los datos en tiempo real.
- Estación meteorológica en cada punto.
- Sistema informático centralizado, que registra y almacena los datos.

El sistema continuo de predicción consta de:

- Módulo de entrada de datos.
- Módulo de predicción.
- Módulo de gestión y presentación de datos y resultados.
- Módulo de gestión de alarmas.
- Módulo de planificación.

El sistema de predicción estará compuesto así por la serie de módulos indicada, que detallaremos a continuación.

El *módulo de entrada de datos* admitirá y procesará los siguientes datos:

- Delimitación del área de estudio:
 - Red de receptores, con altitud de cada uno.
 - Mapa de la zona.
 - Ubicación de los núcleos de población.
 - Estaciones de la red de control.
- Ubicación y características geométricas de los focos emisores.

- Caracterización de las emisiones.
- Caracterización de los componentes meteorológicos incidentes.

El *módulo de predicción* ejecutará de forma automática el modelo de dispersión, que predecirá la distribución espacial de la concentración media de cada contaminante en el territorio delimitado.

El *módulo de gestión y presentación de datos y resultados* proporcionará la siguiente información:

- Niveles de inmisión de cada contaminante.
- Niveles de inmisión de cada contaminante en la red predicho en el modelo de dispersión.
- Grado de ajuste y desviación entre el modelo y los datos analizados.
- Niveles de inmisión predichos en los núcleos de población.
- Isopletras o datos para obtenerlas sobre la cartografía de la zona.
- Datos de las emisiones:
 - Caudal.
 - Temperatura.
 - Concentración.
 - Condiciones de la medición.
- Validación.
- Condiciones climáticas y meteorológicas.
- Bases para informes.
- Registro histórico.

El *módulo de gestión de alarmas* realizará las siguientes acciones:

- Identificar situaciones críticas.
- Analizar situaciones de alarma.
- Causas de las situaciones de alarma.
- Gestión de la base de datos del módulo.

A partir de estos datos se puede realizar lo siguiente:

- Visualizar el mapa de la zona.
- Visualizar el punto que desató la alarma.
- Visualizar los parámetros meteorológicos.
- Visualizar las isopletas de concentración proyectadas sobre el mapa.
- Evolución instantánea de las situaciones meteorológica y de concentración.

El *módulo de planificación* realizará las siguientes funciones:

- Desarrollo de estrategias de control
- Desarrollo de estrategias de planificación de actuaciones según los datos previos.
 - Reducción de la circulación.
 - Reducción de carga.
 - Cambio de combustible.
- Determinación de la efectividad de las actuaciones.

* * *

Si el sistema integral de predicción es completo, deberá disponer además de un método o *modo de análisis*, con el que se realizarán simulaciones definiendo el usuario los datos de entrada de las emisiones y de las condiciones meteorológicas para cada situación que se quiera estudiar.

- En este modo, el usuario suministra los datos que crea de interés.
- El sistema los procesa (módulo de predicción) igual que en el otro modo.
- El módulo de gestión y presentación de datos realizará las mismas operaciones que en el otro modo.
- El módulo de gestión de alarmas también realizará las mismas operaciones que en el otro modo.

Mediante este modo de análisis se pueden realizar simulaciones introduciendo los datos meteorológicos y de concentración que se juzguen peligrosos por sobrepasar los límites legales de concentración. Con estas simulaciones se podrá establecer un plan estratégico de acciones a emprender en cada caso.

Se desarrollarán así con este modo una serie de fases de situaciones negativas cada vez más graves, y se establecerá el procedimiento de actuación para cada una, para poder disponer de esta manera del sistema de medidas a tomar más apropiado para cada situación de peligro.

CAPÍTULO 103

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS CLIMATOLÓGICOS PARA EL ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

103.1. FACTORES DE ANÁLISIS

Ya se han visto en otras Partes de este libro los componentes del clima que tienen relación directa con la contaminación atmosférica, y los diseños de las redes de control de los contaminantes atmosféricos, y en todos ellos los datos meteorológicos y climáticos son fundamentales, pues sin estos es imposible realizar modelos y planes de previsión de situaciones de contaminación.

El estudio de los componentes climáticos de un territorio nos dará las bases para conocer dos áreas fundamentales en el estudio de la contaminación atmosférica de ese territorio, a saber:

- El medio en que se desenvuelve esa contaminación.
- Las reacciones de ese medio ante la contaminación.

Por ello, un análisis climatológico para el estudio de la contaminación atmosférica tratará los siguientes factores:

- Temperatura.
- Humedad relativa.
- Presión atmosférica.
- Insolación (radiación solar).
- Precipitaciones verticales.
- Precipitaciones horizontales.
- Vientos (transporte y difusión):
 - Dirección.
 - Velocidad.
- Turbulencias atmosféricas (difusión):
 - De origen dinámico (por el relieve y rugosidad de la superficie del territorio).
 - De origen térmico (por el gradiente térmico vertical).
- Control de la capa límite (dispersión).
- Difusión.
- Estabilidad atmosférica (con el criterio de la contaminación).

**103.2. SITUACIONES
ATMOSFÉRICAS**

Bajo el criterio de la contaminación atmosférica se pueden distinguir, en función de la variación de la temperatura, cuatro tipos de situación atmosférica:

Tipo I: Atmósfera inestable

En ella, $-\frac{dT}{dz} > 0,98 \text{ }^\circ\text{C} / 100 \text{ m}$,

es decir, el descenso de la temperatura es superior al descenso adiabático.

Tipo N: Atmósfera neutra

En este caso,

$0,55 \text{ }^\circ\text{C} / 100\text{m} \leq -\frac{dT}{dz} \leq 0,98 \text{ }^\circ\text{C} / 100\text{m}$

O sea, el gradiente térmico vertical en este caso está comprendido entre el de la adiabática seca y el de la adiabática saturada (con presión normal a $z = 0$ y $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$).

Tipo S1: Atmósfera débilmente estable

$0 \text{ }^\circ\text{C} / 100\text{m} \leq -\frac{dT}{dz} \leq 0,55 \text{ }^\circ\text{C} / 100\text{m}$

El gradiente térmico vertical está comprendido entre el correspondiente a la adiabática saturada y la isoterma.

Tipo S2: Atmósfera fuertemente estable

$-\frac{dT}{dz} < 0 \text{ }^\circ\text{C} / 100 \text{ m}$

Es decir, este caso corresponde a una *inversión térmica*, en la que la transferencia vertical de masas de aire (y de contaminantes) es muy débil y los agentes contaminantes tienen una difusión muy baja, e incluso se acumulan al descender las masas de aire.

* * *

Aparte, pueden ocurrir fenómenos de *fumigación*, en que una capa inestable se desarrolla a partir del suelo en la base de la inversión térmica. Cuando el límite superior de esa capa inestable alcanza la masa de aire con contaminantes (un penacho de chimenea, por ejemplo), mientras persiste la parte superior de la inversión, se producirá un transporte intenso de contaminantes hacia el suelo.

103.3. CONTROLES Y MEDIDAS

Afinando en los factores a estudiar, hemos de indicar que un plan de estudio del clima aplicado a problemas de contaminación atmosférica, debe comprender:

- *Establecimiento de la climatología de referencia, a nivel regional.* Normalmente se deben utilizar series climatológicas de la red meteorológica del país que correspondan al territorio a analizar.

Las series debe incluir los parámetros citados al principio de este epígrafe.

Si hace falta, se pueden utilizar datos de radiosondeo, si existen.

– *Establecimiento de la climatología local*

- Medidas de datos locales en las estaciones que existan en la zona.
- Medidas complementarias de vientos en superficie.
- Campañas de mediciones de corta duración en períodos significativos.

- Factores específicos del clima local.

– *Control local de la contaminación atmosférica*

Si existe una red, se puede obtener información sobre los períodos críticos, etc.

Los parámetros de viento y de turbulencia atmosférica indicarán la capacidad de difusión de la atmósfera, y sentarán las bases para poder determinar las situaciones meteorológicas de contaminación fuerte.

CAPÍTULO 104

INDICES E INDICADORES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

104.1. BASES GENERALES

Desde hace muchos años se han intentado determinar métodos, baremos, sistemas, índices o indicadores que reflejen del modo más comprensible posible la calidad del aire a través de su composición, de la presencia de agentes extraños o de la concentración de estos, o mediante los efectos sobre determinados componentes del medio.

Así surgieron primero en el medio industrial los indicadores químicos de contaminación atmosférica, que reflejaban –algunos de ellos– por su simple presencia, la contaminación. Después se fué más allá y se determinó la concentración, y así se podía evaluar la gravedad de la situación.

Por otra parte, y mucho después, se empezaron a utilizar índices de contaminación atmosférica, de los cuales los más importantes se indican a continuación, y finalmente los indicadores biológicos y bioquímicos, utilizando básica-

mente receptores biológicos o bioquímicos muy sensibles, y muchos de ellos especializados. De estos también se da debida cuenta en la última parte del presente capítulo.

Por otra parte, en capítulos anteriores se han descrito numerosos indicadores de impacto referentes al efecto invernadero, a la degradación de la capa de ozono, a la toxicidad, a la ecotoxicidad y a la acidificación.

El último epígrafe de este capítulo se dedica a esos indicadores.

104.2. INDICES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Los índices que se señalan a continuación, son de gran utilidad para determinar el daño que los distintos contaminantes atmosféricos producen al medio natural (Seoánez, M., 1979):

Indice Oraqi

W. A. Thomas y otros (1971), mediante estudios realizados en el Oak Ridge National Laboratory de USA., junto con la *National Science Foundation*, propusieron un índice sencillo, el *Oraqui*, mediante el que se controla la calidad del aire. El *Oraqui*, es útil para los contaminantes siguientes:

- CO.
- SO₂ y derivados (óxidos).
- Oxidantes en general (incluidos en esta misma norma están los hidrocarburos).
- Partículas sólidas.
- NO₂ y derivados (óxidos).

Se fundamenta en las normas de calidad promulgadas por la EPA (1971 y posteriores), y se representa mediante la ecuación.

$$ORAQUI = \left(5,7 \sum_{i=1}^{i=5} C_i / S_i \right)^{1,37}$$

donde:

C_i = Concentración del contaminante i.

S_i = Norma EPA referente al contaminante i.

El coeficiente 5,7 y el exponente 1,37 se utilizan para calibrar el índice, de forma que, en ambientes no contaminados, ORAQI = 10, y en medios muy contaminados, puede pasar de 100, teniendo en cuenta el cuadro de normas, donde la concentración de fondo es la de ambientes no contaminados.

El índice se basa también en unos diagramas que representan las concentraciones de cada contaminante, adaptándose su escala a las normas EPA de calidad del aire dadas en el cuadro adjunto.

En los diagramas se marca el nivel en las escalas de la derecha, a lo que corresponde una cifra de la escala de la izquierda. En esta última, las normas EPA equivalen a 10 unidades en cada una. La suma se indica en la escala (6). Se une este punto con el 0 de la escala (8), y la escala (7) nos señala el índice ORAQI.

La escala (8) indica la participación aproximada de cada contaminante no controlado, de forma que el punto de la escala (6) se unirá con el correspondiente a la (8) de los contaminantes no estudiados.

NORMAS EPA DE CALIDAD DEL AIRE

Agente	Norma (24 h)		Concentración (en ppm, salvo para PS)	
	µg/m ³	ppm	Fondo	Urbana
Oxidantes (OX)	59	0,03	0,02	0,03
Partículas sólidas (PS)	150	---	37 µg/m ³	120 µg/m ³
SO _x	266	0,1	0,0002	0,05
NO ₂	400	0,2	0,001	0,04
CO	7.800	7	0,1	7

Factores estadísticos

Este tipo de índices se basa en la estratificación de todo contaminante según la importancia de su presencia en cada caso.

W.D. Shults y *J.J. Beauchamp* definieron en 1975 el factor de pesada como

$$W = \frac{\tau_i}{S_i - \mu_i}$$

S = Valor típico

τ_i = Desviación típica

μ = Valor medio

para una distribución normal y el contaminante A .

El índice W puede oscilar entre τ/S e ∞ cuando μ_i varíe de 0 a S . Asimismo, puede ser negativo si el promedio de los datos supera el valor típico, en cuyo caso el cálculo de este valor típico debe repetirse.

Si μ y τ corresponden a una distribución normal de concentraciones medias diarias del contaminante A , se puede esperar que el 84% de estas concentraciones será inferior a $\mu + \tau$, y en el 98% de ellas será inferior a $\mu + 2\tau$.

Las tablas que se suelen utilizar para expresar los factores W , refieren μ y τ a la distribución de C , donde C es la concentración media en veinticuatro horas del contaminante A .

Valoración de aerosoles

Vease capítulo 17.

104.3. INDICADORES E ÍNDICES QUÍMICOS, BIOLÓGICOS Y BIOQUÍMICOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

104.3.1. Bases de partida

La composición natural media de la capa inferior de la atmósfera, de importancia directa para el hombre y su medio ambiente, está siendo alterada por distintos componentes que, procedentes de las numerosas materias primas utilizadas, productos industriales y actividades humanas, acaban pasando a la atmósfera en forma de contaminantes.

El Grupo Intergubernamental sobre Vigilancia del Medio, de las Naciones Unidas ha aprobado una serie de criterios para seleccionar los contaminantes prioritarios indicadores de la calidad del aire.

Los criterios elegidos fueron los siguientes:

- La gravedad de los efectos reales posibles sobre la salud y el bienestar del hombre y sobre el clima, o sobre los ecosistemas terrestres o acuáticos, teniendo en cuenta la estabilidad de los ecosistemas en cuestión.
- La persistencia y resistencia a la degradación en el medio ambiente, así como la acumulación en el hombre y en las cadenas alimentarias.
- La posibilidad de que la transformación química en los sistemas físicos y biológicos origine sustancias secun-

darias más tóxicas o más perjudiciales que el compuesto original.

- Omnipresencia o movilidad.
- Frecuencia y magnitud de la exposición.
- El posible valor de la información obtenida para evaluar el estado.
- Posibilidad de utilizarlo, por su distribución generalizada, para realizar mediciones uniformes dentro de un programa mundial, regional o subregional.

Con estos criterios se eligieron, para la Red Mundial de Vigilancia, los siguientes contaminantes del aire: SO₂, partículas en suspensión, O₃, NO, NO₂, Pb, CO, CO₂, asbesto e hidrocarburos reactivos.

La calidad del aire basada en criterios higiénico-sanitarios y de protección al medio natural, se determinó midiendo los niveles de emisión e inmisión de contaminantes en la atmósfera.

Se entiende por nivel de emisión, la concentración máxima admisible de cada tipo de contaminante de los vertidos a la atmósfera, medida en peso o en volumen. El nivel de emisión puede también venir fijado por el peso máximo de cada sustancia contaminante vertida a la atmósfera sistemáticamente, en un período de tiempo determinado, o por unidad de producción.

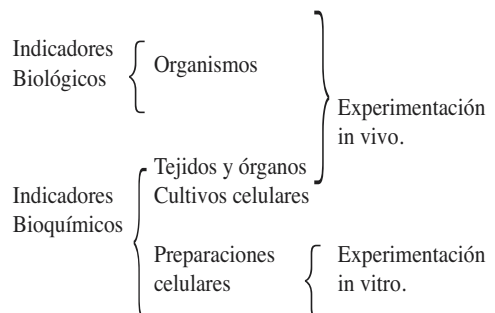
En cuanto a los niveles de inmisión, se entiende como tales a los límites máximos tolerables de presencia en la atmósfera de cada contaminante, aisladamente o asociado con otros.

Los niveles de emisión tolerables no deben ser nunca uniformes para todas las actividades, ya que en cada una de ellas varían las características del proceso, materias primas utilizadas, condiciones de las instalaciones y la composición de los efluentes.

104.3.2. Indicadores

Los indicadores químicos, biológicos y bioquímicos están siendo utilizados desde hace más de cien años para evaluar la calidad ambiental. Existe una serie de ventajas intrínsecas de los indicadores biológicos frente a los análisis químicos tradicionales, ya que los primeros responden a gran número de compuestos, y además se pueden observar en ellos los aspectos acumulativos a lo largo del tiempo. Su principal ventaja, además de las ya señaladas, es que los bioindicadores miden directamente los parámetros requeridos en un momento dado.

El número y tipo de bioindicadores es muy extenso, y se pueden clasificar jerárquicamente de la siguiente manera:



INDICADORES BIOLÓGICOS Y BIOQUÍMICOS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

- Tejidos y órganos:
 - Cerebro.
 - Sangre.
 - Hígado.
 - Pulmones.
- Respuestas de las especies vegetales.
- Presencia de determinadas especies de flora epifítica.
- Abundancia de determinadas especies de flora epifítica.
- Estado de coníferas.
- Estado o presencia de determinadas herbáceas.
- Estado de determinados cultivos agrícolas.
- Estado de fauna doméstica, incluidas abejas.
- Presencia y abundancia de entomofauna.
- Estado de fauna salvaje.

Por medio de estos indicadores podemos observar tanto aspectos biológicos, por ejemplo el crecimiento o muerte de los organismos, tejidos o células, como aspectos bioquímicos, tales como cambios químicos o enzimáticos.

Según descendemos en la jerarquía del cuadro anteriormente expuesto comprobamos que los test realizados para medir el grado de contaminación son menos fiables, ya que en los niveles inferiores podemos encontrar sustancias que, «in vitro» no son tóxicas, pues en condiciones normales no penetran en los organismos vivos debido a las barreras celulares o de los tejidos, o pueden perder su toxicidad por la acción enzimática.

A pesar de que los indicadores biológicos ofrecen resultados más fiables que los obtenidos por medio de indicadores

químicos, presentan una serie de desventajas económicas, pues requieren mayores inversiones, y por otra parte necesitan más tiempo para poder obtener datos reales que los métodos químicos.

Dados los problemas de tiempo y financiación que presenta la utilización de indicadores biológicos, actualmente se está generalizando el uso de indicadores bioquímicos, considerando como tales los tejidos animales y vegetales, la sangre y los preparados y cultivos celulares.

En los años 60 se trabajó intensamente en los tejidos vegetales como indicadores de calidad ambiental, observando los efectos del ozono, del flúor y del nitrato de peroxiacetilo (PAN) sobre la biosíntesis de la celulosa. Los resultados obtenidos en las experimentaciones mostraron en todos los casos una inhibición en la biosíntesis atribuible a la inactivación de enzimas. Posteriormente, y en ensayos realizados «in vitro», se comprobó que quedaban inactivadas por el P.A.N.

A pesar de lo concreto de este ejemplo, con él queremos demostrar la utilidad de los tejidos vegetales como indicadores, ya que presentan una respuesta a diferentes tipos de contaminantes, dando lugar a distintos efectos al cabo del tiempo.

Las investigaciones realizadas sobre tejidos animales han sido mucho más numerosas. Se ha estudiado, por ejemplo, el efecto de los plaguicidas sobre la acción enzimática del cerebro, lo que puede producir su muerte.

Otros tejidos animales utilizados frecuentemente para medir la calidad del

EXPERIENCIAS DE EFECTOS DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS SOBRE CULTIVOS CELULARES

Contaminante	Cultivo celular	Efecto
NO ₂	Hígado de ratón. Pulmones de rata y conejo.	Mortalidad celular y reducción en el consumo de oxígeno.
SO ₂	Hígado de ratón. Linfocitos humanos.	Inhibición del crecimiento. Daño a los linfocitos.
Plaguicidas	Hígado humano. Fibroplastos e hígado de ratón.	Inhibición del crecimiento.
Zinc	Epitelio de los peces.	Reducción del índice mitótico.

medio, han sido el hígado y los pulmones de gran número de micromamíferos.

La utilización de sangre como tejido indicador de la contaminación ambiental ha sido un gran acierto, pues no es necesario sacrificar los animales para extraer muestras.

En este caso se ha realizado gran número de investigaciones sobre sangre humana, como por ejemplo el examen de las modificaciones sufridas por los eritrocitos y el plasma humanos expuestos a plaguicidas organoclorados y carbamatos.

La gran dificultad que presenta este tipo de test, es que existe gran variabilidad individual en la actividad enzimática de este tejido, e incluso un mismo individuo presenta variaciones a lo largo del tiempo, lo que hace muy difícil la interpretación de los resultados obtenidos.

Descendiendo al siguiente nivel jerárquico de indicadores biológicos, los cultivos celulares, podemos resumir en la tabla adjunta algunas de las experiencias realizadas.

A pesar de que los cultivos celulares presentan respuesta a gran número de contaminantes, no han sido muy utilizados como indicadores bioquímicos.

Finalmente, y hasta la actualidad, el papel de los preparados celulares como indicadores de contaminación del aire ha sido relacionado con respuestas psicológicas a efectos biológicos, más que como el de indicadores de calidad ambiental. Este tipo de indicadores es utilizado principalmente para detectar la contaminación producida por plaguicidas.

Por lo que se refiere a los indicadores químicos de contaminación atmosférica, en la tabla adjunta se agrupan los productos de uso más común o los propios contaminantes, cuya presencia o concentración refleja la situación.

104.3.3. Bioensayos

El bioensayo consiste en la inspección de las plantas y evaluación de los daños, y proporciona un índice de daños muy útil e independiente de las condiciones ambientales.

PRODUCTOS INDICADORES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

- Partículas sólidas sedimentables
- Partículas sólidas no sedimentables
- Derivados del azufre:
 - SO₂
 - SH₂
- Derivados del flúor:
- Fluoruros gaseosos
- Fluoruros sólidos
- Acido fluorhídrico
- Derivados del nitrógeno:
 - Oxidos de nitrógeno (NO_x)
 - Amoníaco
- Aldehidos
- Derivados del carbono y vapores orgánicos:
 - CO
 - Parafinas
 - Cicloparafinas
 - Olefinas
 - Carburos acetilénicos
 - Hidrocarburos aromáticos
 - Hidrocarburos clorados
- Contaminantes específicos:
 - Vapores de mercurio
 - Partículas de silicio
 - Partículas de manganeso
 - Partículas de plomo
 - Partículas de cromo
 - Partículas de uranio
 - Radón (gas)
 - Acido crómico
 - Partículas y fibras de asbestos
 - Partículas y fibras de amianto
 - Berilio
 - Oxidos de zinc
 - Benzol
 - Cadmio
- Productos orgánicos:
 - Fenoles
 - Metanol
 - Cetonas
 - Cloruros de vinilo
 - Bromuro de metilo

El bioensayo, además de constituir un método para evaluar las pérdidas de cosechas, suministra otras clases de información, como:

- La fuente o fuentes de fitotóxicos.
- En las fuentes locales de contaminantes, permite valorar la efectividad de los equipos de control.
- Identificación de los contaminantes presentes, basándose en la respuesta característica de las plantas a fitotóxicos específicos.

Diversos autores han empleado el sistema de inspección de la cubierta vegetal como indicador de la calidad del aire:

- *Middleton* (1965) lo implicó para determinar el daño a plantas silvestres y cultivadas.
- *Benedict* (1955) determinó la respuesta de especies comunes de matorral ampliamente distribuida frente a los principales tipos de contaminantes.
- *Thomas* (1956), en un estudio sobre alfalfa y cereales, cuantificó dichas inspecciones empleando condiciones estandarizadas de crecimiento.
- *Todd* (1961) estudió los cambios clorofílicos como indicadores de los daños visibles de la contaminación.

Muchos estudios han puesto de manifiesto la sensibilidad de los líquenes a las impurezas atmosféricas, sobre todo al SO₂, cuya presencia determina la distribución de los líquenes, siendo uno de los primeros indicadores naturales de la calidad del aire. Es el componente algal el que muestra una extraordinaria sensi-

bilidad al anhídrido sulfuroso, que produce graves daños, bien por disminución temporal de la fotosíntesis o bien por necrosis de los tejidos.

La correcta evaluación y diagnóstico de los daños producidos por los contaminantes atmosféricos mediante el método de bioensayo, exige la consideración de diversos factores como:

- Sensibilidad relativa de las especies de plantas a los distintos agentes fitotóxicos.
- Distribución y relación geográfica de las plantas afectadas respecto a la fuente de contaminación.
- Condiciones de cultivo, enfermedades, ataques de insectos, etc.

104.3.4. Índice de pureza atmosférica (IPA)

De *Sloover y Leblanc* propusieron en los años 70 un control de calidad del aire basado en el estudio del estado ecológico de la flora epifítica.

Para ello, establecieron una serie de premisas entre las que destaca la de la máxima homogeneidad de los factores ecológicos en las estaciones de muestreo, salvo, naturalmente, el grado de contaminación atmosférica.

Para seleccionar las estaciones de muestreo deberán tenerse en cuenta las siguientes características (*Seoáñez, M., 1979*).

- Topografía.
- Orientación.

- Iluminación.
- Situación de los forofitos.
- Estaciones, en número superior a 30 (control estadístico).

Asimismo debe tenerse especial atención al seleccionar los forofitos; por una parte, en cada estación se tomarán 10 inventarios (cada forofito corresponde a un inventario). Por otra parte, los forofitos se muestrearán bajo las siguientes condiciones:

- Misma especie de forofito.
- Si no cumple la anterior condición, se tomarán especies de comportamiento similar.
- Igualdad de iluminación.
- Muestreo sobre troncos a altura comprendida entre 1 y 2m.
- Los soportes de las muestras (troncos) deberán ser verticales y del mismo diámetro.

Finalizada la toma de datos, se calculará el índice IPA según la fórmula:

$$\text{IPA} = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i f_i / 10, \text{ donde}$$

Q_i = Cortejo Medio Específico (CME).

n = Número total de especies presentes.

f_i = Frecuencia de la biomasa, valorada de 1 a 5.

El CME representa la media de especies que acompañan a la que es objeto de estudio en todas las estaciones en que esta última se presenta. Es, pues, un factor propio de cada especie en el área investigadora.

Una vez que se dispone del IPA, es posible conocer las especies liquénicas más sensibles a la contaminación atmosférica. Asimismo, un número suficiente de datos permitirá trazar unas curvas de isocontaminación y, con ellas, y a la vista de estudios paralelos realizados con analizadores de SO_2 , se podrá marcar una normativa específica para cada zona rural o urbana que padezca este tipo de perturbación. Con esta normativa será posible tomar medidas eficaces cuando los valores de la concentración de SO_2 alcancen límites no aceptables, de forma más real y natural que las que actualmente existen en los grandes núcleos urbanos, y que sólo tienen en cuenta la concentración de SO_2 y de otros contaminantes en el aire durante períodos de tiempo determinados, que oscilan de varios minutos a horas o días, dependiendo ello del tipo de red de análisis que se utilice.

104.4. TELEDETECCIÓN

104.4.1. Teledetección pura

Se puede definir la teledetección como la percepción de la naturaleza y propiedades de los objetos sin entrar en contacto físico con ellos, utilizando para ello, como única fuente de información, las propiedades de las ondas electromagnéticas que emite, refleja o refracta todo cuerpo cuya temperatura sea superior al cero absoluto, 0°K (o bien -273°C), según la Ley de *Stefan-Boltzmann*.

Los agentes contaminantes de la atmósfera son relativamente fáciles de

identificar mediante esta metodología, y si tomamos el punto de vista de las alteraciones de las masas vegetales, los estudios se centrarán en las capas bajas de la atmósfera.

Para los estudios de teledetección es conveniente agrupar los agentes contaminantes en dos categorías: los moleculares y los aerosoles.

a) *Agentes moleculares*

Son muchos gases contaminantes, como CO , NO_x , NH_3 , etc., y su presencia se manifiesta en bandas de absorción muy claras (entre 3 y 12μ) en los estudios mediante interferómetro. Al existir ventanas atmosféricas en estas longitudes de onda IR, es posible utilizar la teledetección para el reconocimiento de estos agentes.

Los sistemas interferométricos son muy variados, desde el espectrómetro de correlación de *Barringer* hasta los basados en los láser He-Ne (mezcla de helio y neón).

Un método muy útil es el puesto a punto por la NASA; consiste en un detector formado por un telescopio y un depósito que contiene el gas referencia, que es el que se busca en la atmósfera. La luz incidente se recoge mediante el telescopio, y se hace pasar el haz intermitentemente a través del depósito de la referencia; si el gas buscado está presente en la onda incidente, es absorbido por el depósito y los 2 haces que se obtienen (el que pasa por el depósito y el que no pasa) tienen diferente energía.

b) Aerosoles

Ya han sido definidos en el apartado correspondiente, y tienen la particularidad de que dispersan la luz, por lo que pueden ser detectados, y se puede calcular su concentración mediante medidas de la dispersión de la luz incidente. Asimismo influyen sobre el estado de polarización de los rayos luminosos.

El método Lidar de detección de aerosoles consiste en el barrido mediante un láser, y en captar la energía retrodifundida mediante un telescopio instalado cerca del foco emisor; a mayor contaminación más luz será difundida.

104.4.2. Fotografía

Los métodos de estudio que afectan directamente a las masas vegetales se basan más en sistemas fotográficos, pudiendo ser considerados estos también como una forma de teledetección, pues

con ellos se perciben propiedades del medio sin contactar con él.

Mediante la fotografía es posible distinguir diferencias de vitalidad en la vegetación, es decir, árboles sanos, enfermos, moribundos o muertos.

Para diagnosticar las perturbaciones, es muy útil la foto aérea, siempre que se disponga de aparatos de calidad y posibilidades adecuadas.

Inicialmente se debe conocer la reflexión de las partes aéreas (hojas o acículas) de los vegetales. Para ello puede ser válido un aparato *Beckman* (DK-2, para espectrografías), que se utilizará en laboratorio tomando fotos del espectro en muestras foliares recogidas, por ejemplo, a 2, 4, 6, 8 y 10 km del foco emisor.

En el espectro visible, generalmente no se observan diferencias de reflexión en las zonas correspondientes al verde oscuro (550 nanómetros).

CARACTERÍSTICAS DE LAS PELÍCULAS FOTOGRAFICAS Y OBSERVACIONES

Película	Sensibilidad	Filtro	Número	Zona espectral	Efectos esperados en el positivo
Pancromática	430-680 nm	Amarillo Rojo	GG 14 RG 1	500-680 620-680	Ninguno. Copas secas claras.
IR	670-800 nm	Rojo	RG 1	670-800	Copas sanas claras.
Color	Azul o rojo	Didym	BG 20	Azul o rojo	Diferencias de color entre pies sanos, enfermos y muertos
SN-Z-M (espectro zonal)	500-780 nm	Rojo	RG 1	620-780	Id., id.

En el IR ya se observan divisiones: cuanto más atacadas estén las acículas o las hojas, tanto menor será su reflexión entre 700 y 800 nm., debido a las alteraciones en la proporción de los parénquimas y de los espacios intercelulares.

En casos de contaminación aguda, los árboles pierden hojas o acículas, apareciendo mayor superficie de corteza de partes lignificadas. Las ramas muertas reflejan más luz en el rojo visible que en el infrarrojo.

En experiencias realizadas en las antiguas DDR y URSS hace 30 años se comprobaron los siguientes datos:

En general, mediante estudios con fotograffias, se puede indicar lo siguiente:

- Las fotos en blanco y negro dan diferencias de tonalidad difíciles de interpretar.
- Las fotos de árboles muertos se distinguen fácilmente.
- La película SN-2-M (espectro zonal) proporciona fotos en las que se pueden distinguir pies sanos, enfermos, moribundos o muertos, gracias a los colores verde oscuro, verde claro y verde azulado.
- La escala de trabajo más adecuada es variable, aunque se aconseja de 1/3.000 a 1/5.000.
- Las fotos espectrozonales dan gran información, incluso en días sin sol, y tienen las siguientes posibilidades:
 - Delimitar y localizar rápidamente zonas forestales o agrícolas contaminadas.
 - Permiten planificar, a tiempo, la lucha contra posibles perturbaciones.
- Los tratamientos estadísticos permiten completar los resultados en los vuelos y complementar los estudios de verdad-terreno.

Los daños invisibles por diversos agentes contaminantes pueden ser, pues, detectados antes de la aparición de necrosis y de alteraciones irreversibles, como se ha demostrado repetidas veces.

Otro ejemplo es el caso del ozono, con daños en vegetales detectables mediante foto IR. Las plantas dañadas sufren alteraciones en las células del mesofilo, y por ello es posible prever envejecimientos prematuros y daños en las cosechas.

Ventajas de la fotodetección con falso color

- Gran ahorro de tiempo y de personal
- Posibilita la evaluación de los posteriores tratamientos así como los más adecuados a aplicar.
- Se pueden diagnosticar los daños fisiológicos con anterioridad a su aparición.
- Se logra mayor rapidez en los diagnósticos cualitativos y cuantitativos, y resultan más acertados.
- Permite conocer, con mucha exactitud y rapidez la zona afectada.
- Permite la detección simultánea de varios focos separados.

CONTROL DE VEGETACIÓN CON FOTOGRAFIA EN FALSO COLOR

Objeto	Color normal	Falso-color
Follaje abundante frondosa	Verde	Magenta (granate-morado)
Follaje abundante conífera	Verde	Magenta a magenta azul oscuro
Coníferas jóvenes	Verde	Magenta
Coníferas viejas	Verde	Magenta azul oscuro
Follaje plantas (general)	Verde pálido	Rosa
Follaje enfermo	Amarillo-pardo	Malva
Follaje frondosa otoño	Amarillo	Amarillo brillante
Follaje seco muerto	Amarillo o rojo marrón	Amarillo a verde amarillento
Ramas defoliadas	Gris a marrón-negro	Verde
Ramas sin corteza defoliadas	Blancuzco	Plateado a verde plateado
Ramas sin corteza húmedas Verde	Gris oscuro	Verde; verde azulado; azulado

104.5. INDICADORES DE IMPACTO

- Indicadores de impacto de la acidificación del medio (fueron tratados en el capítulo correspondiente).
- Indicadores del efecto invernadero (fueron tratados en el capítulo correspondiente).
- Indicadores de impacto referente a la degradación de la capa de ozono. (fueron tratados en el capítulo correspondiente).
- Indicadores de impacto referentes a la toxicidad y a la ecotoxicidad (fueron tratados en el capítulo correspondiente).

DÉCIMOSEXTA PARTE

Prevención y control de la contaminación atmosférica en el medio urbano, en el medio industrial y en el medio rural

CAPÍTULO 105

MEJORAS Y TRATAMIENTOS DE LOS COMBUSTIBLES

105.1. COMBUSTIBLES BÁSICOS. DATOS Y BASES GENERALES

Los países desarrollados necesitan enormes cantidades de energía para mantener la producción de materiales, para sustentar el confort de la población y para los transportes.

Parte de esa energía proviene del consumo de combustibles que se consumen en centrales termoeléctricas (carbón, fuel, gas, biomasa), en las calderas de calefacción y de la industria (carbón, biomasa, fuel, gas), y en los transportes (motores de gasolina, motores Diesel, motores y turbinas de gas).

Los combustibles básicos son los que se han indicado en el capítulo correspondiente y que se resumen en la tabla adjunta.

Todos estos combustibles deben ser procesados de manera que por una parte se obtenga un rendimiento óptimo en su uso, y por otra se eviten al máximo las

emisiones de productos no deseados (SO_x , NO_x , etc.).

En otro orden de cosas, en capítulos anteriores se han indicado para el tratamiento de las emisiones atmosféricas en los procesos de explosión o de combustión (motores y calderas), las diferentes posibilidades de acción, como son las mejoras en los procesos, las mejoras en la combustión, el mejor diseño de los motores y calderas y las mejoras y tratamientos de los combustibles.

Evidentemente, y como hemos señalado repetidas veces, lo ideal es el tratamiento en la fuente (y si es antes, mejor), por lo que suministrar combustibles de buena calidad medioambiental debida a mejoras o tratamientos, es muy deseable.

105.2. COMBUSTIBLES SÓLIDOS

La mejora de la calidad de los carbones puede realizarse por la vía del uso de

COMBUSTIBLES BÁSICOS

Estado	Combustible	Tipo u origen
Sólido	Carbón	Antracita Hulla Lignito Turba
	Biomasa (sólida)	Residuos forestales Residuos agrícolas Residuos urbanos
Líquido	Petróleo	Gasolinas Gas-oil Fuel-oil
	Aceites vegetales (Biomasa procesada)	Colza Cilantro Oliva Palma Girasol Coco Lino Sésamo Cardos Ricino Cáñamo Algodón Hinojo Cacahuete Euforbia Soja Mostaza Almendra Adormidera
	Alcoholes	Etanol de: Maíz Arroz Sorgo Patata Trigo Remolacha Centeno Caña Avena Manzana Cebada Metanol de: Chopo Otros
Gas	Gas natural Propano Butano	De yacimientos
	Biogás	De purines De residuos urbanos De lodos de depuradora De industrias agroalimentarias: Destilerías Conservas Mataderos Cerveceras Papeleras De biomasa vegetal

material de mejor calidad, utilizando carbones de muy bajo contenido en azufre.

También puede mejorarse este combustible mediante tratamientos apropiados de preparación, eliminando previamente elementos indeseables que puedan perturbar la calidad de las emisiones de su combustión.

La primera vía es muy razonable, pero tiene los problemas propios de los materiales energéticos: frecuentemente los carbones propios son de alto contenido en azufre, por lo que si se quiere disponer de mineral de más calidad deberá importarse, con los consiguientes problemas que ello implica.

La segunda vía es apropiada siempre que se disponga de la tecnología, adecuada para reducir el contenido en azufre y el de materias volátiles.

La gestión de los carbones en esta línea mediante calibrados apropiados, homogeneización y lavado por una parte, y la preparación de combustibles derivados mediante refinado, aglomeración y mezclas por otra, unido a los procesos de desulfuración por diversos métodos, permiten obtener productos sólidos de combustión mucho mejores que hace pocos años.

Finalmente indicamos que los sistemas modernos de combustión, como las calderas de lecho fluido, y ciertos tratamientos eficaces de las emisiones, como pueden ser las instalaciones con electrofiltros, permiten completar mejoras de la calidad de las emisiones impensables hasta hace poco tiempo.

105.3. COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Las ideas indicadas en el epígrafe anterior son válidas para los combustibles líquidos de origen fósil en cuanto a las mejoras en su calidad medioambiental.

En lo referente a estos combustibles, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se deben utilizar combustibles fósiles de bajo contenido en azufre, pues el petróleo bruto, según su origen, puede contener entre el 0,03 y el 6% de azufre. El problema son los costos.
- Se debe realizar una desulfuración apropiada de estos combustibles, por vía catalítica de hidrogenación o por cualquier otra.
- La desulfuración debe efectuarse sobre productos destilados.
- Los tratamientos con hipoclorito sódico o cálcico en presencia de bauxita o de alúmina y a temperatura elevada, pueden ser viables.
- Los tratamientos con sosa o con potasa en caliente también pueden ser viables.
- La desulfuración por vía bioquímica es posible en ciertas condiciones.
- En los vehículos se pueden utilizar biocombustibles del tipo de ciertos alcoholes, como metanol o etanol, evitando los combustibles fósiles.
- Para luchar contra la corrosión y la acidez se puede inyectar amoníaco.
- También para luchar contra la corrosión se puede utilizar magnesio metal o MgO, que también evita los depósitos de hollines y alquitranes.
- La dolomía (carbonato doble de magnesio y de calcio) ejerce el mismo efecto que el MgO.

105.4. COMBUSTIBLES GASEOSOS

Las mejoras y los tratamientos de los combustibles gaseosos se basan más en su depuración y en la mejora de las instalaciones de incineración.

Los gases se deben depurar, sobre todo si están demasiado sucios, pues así emitirán menos contaminantes en la combustión.

Se deben controlar los derivados del azufre y los óxidos de nitrógeno en la combustión del gas natural y del propano.

Por lo que se refiere al *biogás*, las tendencias actuales son a una depuración, de manera que cumpla las normas que se exigen para el gas natural, por cualquiera de los métodos siguientes:

- Absorción en un líquido (lavado).
- Adsorción en un sólido.
- Separación por permeación (membrana) selectiva.
- Biotratamiento por bacterias anaerobias.
- Tamización molecular (adsorción específica para carburantes para vehículos).

GESTIÓN INDUSTRIAL Y URBANÍSTICA

106.1. GESTIÓN Y DESARROLLO DE ZONAS URBANAS O INDUSTRIALES. BASES GENERALES

Hasta hace no muchos años, el desarrollo de los núcleos de población se realizaba según el crecimiento natural de las diferentes zonas urbanas hacia sus periferias, según fuera la presión humana por demanda de zonas en función de los siguientes criterios:

- Paisajes de interés (montaña, mar, lagos, ríos, monumentos).
- Zonas verdes amplias (bosques).
- Zonas de bajo precio.
- Zonas bien comunicadas.
- Zonas industriales.
- Zonas en los ejes urbanos radiales básicos.

El problema de la contaminación atmosférica provocó que a partir de los años 60 y 70 del siglo pasado el desa-

rollismo a ultranza buscara, de forma todavía un poco tímida, mejorar el aire de las ciudades y de las zonas industriales.

Para ello se buscaron soluciones que, a lo largo de los años, acabaron basándose en las siguientes grandes líneas:

- Estudios del medio físico, climáticos y meteorológicos para definir zonas urbanizables.
- Mejoras en los combustibles industriales, urbanos y de automóviles.
- Mejoras en la combustión en calderas y motores.
- Mejoras en los procesos.
- Creación de zonas verdes urbanas y periurbanas.
- Creación de vías urbanas y periurbanas de descongestión.
- Búsqueda de acciones de menor emisión y de mayor difusión de contaminantes.

- Promulgación de leyes y normas al respecto.

El crecimiento vertical en las ciudades solamente se justifica en zonas de gran actividad económica, pues la concentración, desde el punto de vista medioambiental, complica las soluciones de mejora del aire, aunque bajo otros puntos de vista, la dispersión urbana encaja todo a causa del mayor costo de los servicios y de las comunicaciones.

Los estudios climatológicos y meteorológicos en redes urbanas son actualmente una base del análisis y control de la contaminación atmosférica urbana, que se completa con las redes de control de la contaminación atmosférica y con los sistemas de predicción, como se ha visto en otros capítulos.

106.2. LOS PLANES URBANÍSTICOS

Tradicionalmente, los planes de urbanismo se orientan a los usos y vocación del suelo, a los transportes y a los servicios comunes.

Así, se separan territorialmente las zonas industriales de las zonas urbanas, por lo que, teóricamente, la contaminación atmosférica será muy inferior en las zonas urbanas, cosa que a causa del tráfico y según sea la situación meteorológica puede no ser cierta en muchos casos.

Por eso, estos planes ya incluyen –o deben incluir– una serie de factores del medio físico y de orden climático y me-

teorológico que permiten optimizar el desarrollo y la ampliación o la ubicación de zonas urbanas o industriales bajo puntos de vista medioambientales, además de los tradicionales.

Con estas líneas, la mayoría de los países desarrollados planifican el sector urbanístico teniendo en cuenta el factor medioambiental de forma determinante en los nuevos desarrollos e implantaciones industriales y urbanas. En las zonas industriales y urbanas antiguas, el planeamiento tiende a reducir los efectos de la contaminación atmosférica buscando espacios amplios, tanto en las vías públicas como en la creación de nuevas plazas y parques urbanos.

Las zonas verdes son muy importantes en lo que se refiere a la contaminación atmosférica, pues su implantación o ampliación supone una mejora sustancial del medio:

- Evitan fuentes de emisión en el territorio que ocupan.
- Favorecen la difusión de los contaminantes.
- Emiten oxígeno (fotosíntesis).
- Captan CO₂.
- Depuran la atmósfera al captar muchas más partículas sedimentables que una superficie desnuda.
- Ejercen una acción bacteriana.
- Captan y asimilan algunos contaminantes.
- Captan y absorben otros contaminantes, y aunque sufren sus daños, evitan

que entren a las vías respiratorias del hombre.

En los planes urbanísticos se debe tener muy en cuenta el aislamiento de los edificios, tanto térmico como de entradas y salidas de aire (intercambio de gases), pues su importancia bajo el punto de vista de la contaminación atmosférica ya se ha visto en el capítulo correspondiente.

106.3. PROGRAMA Y MODELO DE DESARROLLO DE UNIDADES HABITACIONALES EN FUNCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE

106.3.1. Bases de partida y objetivos

La meta propuesta para los programas de desarrollo es elevar la calidad de vida de la población, siendo los puntos fundamentales cubrir las necesidades básicas de alimentación, vestido, vivienda, educación, trabajo, sanidad y protección del Medio Ambiente, todo ello dentro de un plan coordinado a nivel general.

Dentro de ese programa de desarrollo ocupan un lugar fundamental dos grandes temas: la vivienda y la protección del Medio Ambiente, estando estrechamente unidos dentro de la idea de protección ecológica humana y del entorno natural.

Las crisis económicas mundiales, no solo han puesto de manifiesto la impor-

tancia fundamental de la construcción como generadora de trabajo, sino también las graves situaciones a que puede llevar un mal uso de este potencial económico, puesto que el desarrollo urbano o el desarrollo rural son algo más que la construcción de viviendas. Si las unidades habitacionales no incluyen las mínimas dotaciones de equipamiento comunitario y de servicios urbanos, su inserción armónica en el ecosistema y en el medio físico y cultural, el desarrollo, la mejora del bienestar, la tranquilidad social y en definitiva la calidad de vida se habrán elevado muy poco, y los problemas habrán aumentado de forma tal que su solución será cada vez más costosa y difícil.

Por otra parte, hay que medir con exactitud y profundidad la posibilidad de asignar recursos a estos Programas, que si bien deben ser dirigidos por el Estado, no pueden ser realizados en su totalidad con cargo a los fondos de inversiones públicas. Es tarea de todos mejorar el hábitat, y consecuentemente, deberán contribuir con su esfuerzo personal a su construcción y mantenimiento en función de las posibilidades de cada año.

En años anteriores se han realizado grandes unidades habitacionales y pequeños núcleos de población en muchos países, careciendo de equipamiento y de servicios urbanos de forma parcial o total, o bien son insuficientes o deficientes. Del mismo modo, no se han tenido en cuenta ni la ubicación ni la adaptación al entorno ecológico, lo que ha creado problemas psicológicos, de paisaje,

de contaminación atmosférica y de las aguas, de bienestar físico y social y de equilibrios ecológicos de todo tipo.

El abastecimiento de agua potable, el drenaje, el saneamiento de aguas servidas, la recogida y tratamiento de basuras, el transporte colectivo, los centros escolares, los mínimos servicios de asistencia sanitaria, de zonas recreativas, de zonas verdes, etc., han sido aspectos mal atendidos, cuya implantación posterior resultará más costosa y difícil, con lo cual se van aplazando estas soluciones. Y no digamos lo que ocurre con las emisiones industriales y de los automóviles en lo que se refiere a control.

En consecuencia, es necesario dar un paso adelante en este terreno y dotar de equipamiento, servicios urbanos y adaptación del diseño de la vivienda y tejido urbano al entorno ecológico, climático, físico y cultural a las nuevas unidades habitacionales, a la vez que se programan las nuevas construcciones de viviendas.

106.3.2. Planteamientos básicos

A primera vista puede parecer que estas dotaciones mínimas de servicios, equipamiento y adaptación del diseño de la vivienda y tejido urbano pueden encarecer los programas de vivienda, de forma que los hagan inviables. En la práctica, esto no sucede así si se realizan los trabajos de forma adecuada, lo que exige una optimización de los mismos, y esto no se puede improvisar.

Este planteamiento requiere dar respuestas a las siguientes cuestiones:

- ¿Cuáles son los servicios y el equipamiento urbano?.
- ¿Cuál es la adaptación de la vivienda y del tejido urbano al entorno ecológico, climático, físico y cultural?.
- ¿Cuál es el sistema, tecnología o solución idónea?.
- ¿Cuál es su costo?.
- ¿Cómo y quién va a financiar, administrar y mantener?.

106.3.3. Áreas de actuación y desarrollo inicial

Es conveniente recordar que hay que considerar dos grandes áreas de actuación: el medio urbano y el medio rural, sin olvidar un tercer medio no menos importante en muchos casos, que es el medio indígena.

El campesino mantiene gran amor a la tierra y realiza, de forma sencilla, artesanal y doméstica, labores agrícolas, hortícolas, apícolas y de artesanía popular que complementan su economía familiar, al mismo tiempo que puede integrarse en las principales tareas productivas, tales como la industria maderera, la pesca, la construcción, las granjas, la industria azucarera y arrocería o la industria petrolera y petroquímica.

No sólo es necesario conservar estas pautas de conducta, sino potenciarlas. Esto requiere un ordenamiento de tales actividades y un cuidado del entorno físico y ecológico en que se desarrollan para aprovechar los recursos naturales

de forma equilibrada, que permita un desarrollo sostenido del medio rural y de las comunidades indígenas, y un arraigo de esta población en el medio rural.

Dotar de equipamiento comunitario y de servicios básicos y adaptar la vivienda y el tejido urbano al entorno ecológico, físico, climático y cultural en las nuevas unidades habitacionales, o en las existentes, mejora no solamente la calidad de vida de la población, sino que consolida y arraiga el mantenimiento de los patrones culturales en las diferentes regiones, lo que constituye una vía excelente para la creación de infraestructuras turísticas e industriales con un mínimo de deterioro de los ecosistemas y con inversiones limitadas.

Es también interesante la creación de pequeñas y medianas empresas, con tecnología propia si es posible, y establecerlas en pequeños núcleos de población, lo que además de potenciar la economía regional, serviría para evitar movimientos migratorios no deseados.

Lo primero que se debe acometer es evaluar los equipamientos básicos, los servicios mínimos comunitarios y la adaptación de la vivienda y del tejido urbano al entorno ecológico, climático, físico y cultural que deben integrarse en los programas de construcción de viviendas y desarrollo urbano.

106.3.4. Programa de actuación y modelo de desarrollo

Para realizar lo anteriormente expuesto, se ha de desarrollar un programa en el

que fundamentalmente se van analizando y articulando cada una de las disciplinas necesarias para la adecuación en tiempo y lugar de los conjuntos habitacionales ecológicos. Este programa, partiendo del nivel nacional de actuación, se va concretando hasta llegar al núcleo familiar. Se tienen en cuenta los valores autóctonos de la cultura para su inserción armónica con la realidad actual.

Dentro del planteamiento, se advierten los riesgos de una actuación indiscriminada que puede llevar a situaciones de deterioro ecológico y social de incidencia fuertemente negativa a corto, medio y largo plazo.

A continuación se detalla y se desarrolla el programa de trabajo, y en él se incide especialmente en los modelos mundiales de más interés donde se han llevado a cabo actuaciones de este tipo.

El planteamiento de este programa es abierto, y se citan en él diversas posibilidades, de forma que sirva como modelo para adaptarlo a múltiples casos concretos y específicos, y es el siguiente.

Dominio espacial del territorio

- Instrumentos para la organización del espacio.
- Disciplinas para la construcción.
- Régimen de protección.
- Organización de los desarrollos habitacionales:
 - Aglomeraciones y desarrollos rurales.

- Aglomeraciones y desarrollos urbanos.
- Arquitectura y paisaje.
 - Protección.
 - Asistencia.
 - Ordenamiento.

Desarrollo global de conjuntos habitacionales ecológicos

- Desarrollo ecológico habitacional a nivel nacional.
 - Áreas de defensa integral.
 - Áreas de protección histórico-artística.
 - Áreas turísticas.
- Desarrollo ecológico habitacional a nivel de conjuntos urbanos.
 - Integración en entorno físico y ecosistema.
 - Dotaciones en función del nivel social.
 - Adaptación a la vegetación autóctona.
 - Mantenimiento de las constantes del urbanismo popular.
 - Recuperación ecológica de viales y comunicación.
- Desarrollo ecológico habitacional a nivel de vivienda.
 - Diseño de elementos dotacionales que repercutan sobre la ecología.
 - Mantenimiento de las constantes de la arquitectura popular.

- Integración paisajística.
- Comunicación y privacidad.
- Adecuación social y cultura.
- Espacios privado, semiprivado y público.
- Protección y adecuación del entorno climático.

Planteamiento del desarrollo ecológico habitacional

- Ruido.
- Contaminación atmosférica
- Espacios verdes urbanos.
- Recuperación de hábitats degradados.
- El medio forestal periurbano.
- Efectos ecológicos de la construcción de unidades habitacionales en el medio natural.

Prospectiva ecológica para los equipamientos y tratamientos colectivos en general

- Residencial.
 - Tipos de espacios externos.
 - Juegos de niños.
 - Acceso para vehículos.
 - Acceso para servicios.
 - Diseño de detalles.
 - Planificación de recursos.
 - Rehabilitación.

- Construcción paisajística.
 - Modelos topográficos.
 - Tratamiento de la superficie.
 - Pavimentos.
 - Cercas y vallas.
 - Estacionamientos.
 - Servicios.
 - Mobiliario urbano.
 - Iluminación.
 - Espacios peatonales.
 - Espacios para vehículos.
 - Espacios para animales.
- Reducción de especies agrícolas.
- Degradación de áreas histórico-artísticas.
- Aglomeraciones.
- Concurrencia.
- Perspectivas de evolución.
 - Factores incidentes.
 - Económicos.
 - Sociales.
 - De desarrollo y empleo.
 - Consecuencias ecológicas.
- Problemática económica.
 - Consecuencias ecológicas.
 - Degradación ambiental.
 - Medidas correctivas.

Vivienda ecológica en función de los diferentes grupos de núcleos humanos

- En función del número de habitantes.
 - Comunidades indígenas.
 - Comunidades rurales.
- Comunidades urbanas.

Turismo y desarrollo de la vivienda ecológica integrada

- Situación actual.
 - Turismo y vivienda ecológica.
 - Exigencias de calidad de vida.
 - Impacto del turismo y adecuación habitacional:
 - Contaminación.

- Medidas protectoras:
 - Medidas de protección.
 - Planeamiento a plazo.

Impacto psíquico del Medio Ambiente en las áreas habitacionales

- El ambiente.
- La herencia ambiental.
- Adaptación y comportamiento.
- Adaptación temporal humana.
- Adaptación y cultura.
- Factores biológicos.
- Factores socioculturales.

- Psicología ambiental.
- Evaluación ambiental.
- Evaluación de características psicosociales de grupos e instituciones.
- Estructuración.
- Percepción ambiental.

Actividades del medio rural y su impacto ecológico

- Agrarias.
- Artesanales.
- Servicios.
- Residencial.
- Recreativa.

Espacios de ocio

- Parque Nacional.
- Parque Natural.
- Parque metropolitano.
- Parque urbano.
- Jardín de barrio.

Modelos de agrupaciones habitacionales ecológicas

- Conjunto de nueva creación para funcionarios de la administración.
- Viviendas sociales.
- Conjuntos turísticos.
- Poblados de concentración.

Modelos de desarrollo ecológico integrado para asentamiento habitacionales en zona rural.

- Modelos horizontales.
- Modelos verticales.
- Modelos económico-ambientales.

Modelos de desarrollo habitacional ecológico integrado

- Urbanismo y no contaminación.
- Política de defensa ambiental.
- Cooperación.
- Aspectos científicos.
- Evaluación de la población.
- Conjuntos habitacionales ecológicos.

106.4. IMPLANTACIÓN INDUSTRIAL

Al igual que hemos indicado al principio del capítulo, el desarrollo urbano e industrial se realizó teniendo en cuenta una serie de prioridades que han ido evolucionando en el tiempo, de forma que ahora, factores que no se tenían en cuenta, como la contaminación atmosférica, pasan a ser prioritarios.

Las zonas industriales se implantaban casi solo *bajo criterios económicos*: por razones de proximidad a las fuentes de materia primas o a los puntos de consumo, por facilidad de los transportes, por proximidad a una fuente de energía,

etc; *bajo criterios políticos*: desarrollo de zonas marginadas o favorables electoralmente (hemos comprobado que actualmente este concepto sigue vigente en algún caso), o , incluso, *bajo criterios estratégicos de seguridad*.

Actualmente esos criterios se basan en los siguientes factores:

- Económicos.
- Transportes (facilidad).
- Estratégicos.
- Seguridad.
- Contaminación atmosférica.
- Disponibilidad de materias primas.
- Disponibilidad de energía.
- Disponibilidad de mercados.
- Facilidad de gestión.
- Disponibilidad de mano de obra.
- Disponibilidad de servicios.
- Disponibilidad de actividades e industrias complementarias.
- Factores meteorológicos.
- Disponibilidad de suelo.
- Factores del medio físico.

106.5. CONDICIONANTES DE PLANEAMIENTO EN ZONAS INDUSTRIALES

106.5.1. Condicionantes básicos

En otra parte de esta obra se ha tratado del planeamiento general y se han

observado diversas situaciones del entorno de las zonas industriales y algo del interior, pero, ¿Qué ocurre realmente «intra zona industrial»? Si es solamente industrial, e independientemente de su edad, abandono o diseño inicial, el suelo es solo industrial. Si no lo es, por tratarse de industrias ubicadas en zonas urbanas o en otros casos, el suelo es compartido, aunque su vocación posiblemente no sea esa y es la situación llamada *de tolerancia*, muy frecuente en ciertas zonas de la España de tradición industrial.

Estas últimas situaciones dan lugar a muchos conflictos, pues las autoridades van limitando cada vez más la actividad hasta que casi siempre compensa o cerrarse o trasladarse a zonas de vocación industrial (que en unos años pueden tener los mismos problemas que antes por darse licencias de construcción en áreas cada vez más próximas a las zonas industriales).

Así pues, una zona industrial ha de cumplir con los siguientes condicionantes:

- Debe estar bastante aislada de las áreas residenciales.
- Debe tener accesos adecuados (transportes por carretera, por ferrocarril, aéreos, marítimos o fluviales).
- Debe tener superficies adecuadas.
- Debe tener servicios comunes (sanitarios, asistenciales, deportivos, sociales, de alimentación, etc.).
- Debe tener apoyo de masa laboral que viva relativamente cerca.
- Debe tener relativamente cerca actividades de apoyo (laboratorios, centros de enseñanza, etc.).

- Debe ubicarse en zonas en las que la contaminación atmosférica no acabe siendo un factor determinante.

106.5.2. Condicionantes específicos

- Reglamentos.
- Normas.
- Ordenanzas.

106.5.3. Condicionantes complementarios

Uso

- Tolerancia industrial en áreas mixtas.
- Restricciones a la industria en zonas urbanas:
 - Superficie.
 - Personal.
 - Potencia instalada.
 - Contaminación atmosférica.
 - Ruido.
 - Olores.
- Uso industrial en zonas puras (industriales)
- Restricciones a viviendas en zonas industriales
 - Solo viviendas para vigilancia
 - Oficinas limitadas

Volúmenes

- Edificabilidad sobre parcela neta.

- Alturas máximas.
- Retranqueos.
- Carga y descarga (espacios máximos y mínimos).

Sanidad

- Cumplir la Reglamentación existente.

Paisaje

Es variable en cada caso, pero siempre debe atenderse a lo expresado en los casos prácticos indicados en otros apartados de esta obra referente a ser atractivo, a ser susceptible de restauración, etc.

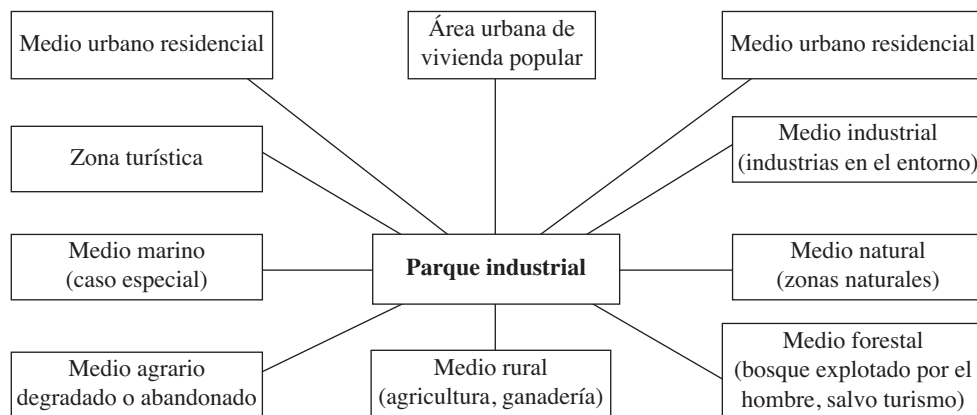
Logística

Depende de cada caso: será muy fuerte y básica en zonas portuarias, en aeropuertos (400.000 m² en la ampliación de Barajas, en Madrid, en 1997), en puertos secos, etc., y menos importante en otras áreas.

106.6. EL PAISAJE INDUSTRIAL COMO ELEMENTO INTEGRADOR

Una industria, un polígono o un parque industrial representan un medio artificial, casi siempre con un fuertísimo contraste con su entorno, dentro de las posibilidades que se indican en el cuadro adjunto.

POSIBLE ENTORNO DE UN ÁREA INDUSTRIAL



Si el contraste es muy fuerte, bien debido a diferencias notables de actividad, o bien porque la zona industrial está abandonada o muy degradada, habrá que actuar en todos los sectores de un transecto teórico que ocupe la línea que tiene como extremos la zona industrial por un lado y la correspondiente de su entorno por el otro.

Las actuaciones a poner en marcha tratarán de aproximar el conjunto del paisaje a lo natural o a lo agradable a la vista, dentro de las posibilidades que existan, que siempre son muchas.

El paisaje industrial ha de ser, pues, componente de un conjunto que integrará en toda la línea indicada *lo que se ve*, pasando lo más suavemente posible de un medio (extremo de la línea) a otro (el otro extremo).

Se tratará así de eliminar el trauma que supone el contraste violento entre un paisaje y otro.

La forma de actuar dependerá de cada caso, pero siempre teniendo en cuenta que la vegetación, la pintura y otros

muchos componentes que pueden aparecer en un paisaje industrial, han de servir para suavizar esos contrastes.

Las zonas industriales deberán ser tratadas según su estado (modernas, viejas o abandonadas), de forma que se verán con vegetación, limpias, con la contaminación controlada y con más atractivos en términos generales.

Las zonas de transición (áreas intermedias), si existen, deberán ser utilizadas en actividades comerciales o de otro tipo y deberán ser repobladas con mucha vegetación; asimismo deberán tener espacios libres amplios.

Las zonas inmediatas al extremo opuesto al área industrial deberán ser cubiertas en lo posible de vegetación, tanto como barrera anticontaminación como pantalla visual.

De esta forma, la transición de una zona a otra llevará pasos, áreas y actividades intermedias que evitarán esos contrastes que indicamos, y esto pasa siempre por el tratamiento del paisaje.

Debemos tener en cuenta (véase el cuadro adjunto) que el paisaje industrial está ubicado como mínimo en el centro del territorio, y que en pocos casos el otro extremo de la línea corresponde a una zona de poco contraste con la central, por lo que ese paisaje industrial es siempre el principal y es el que debe ser tratado más cuidadosamente, en forma radial hacia el exterior y en función de lo que haya al otro extremo del radio.

106.7. LOCALIZACIÓN DE ÁREAS INDUSTRIALES

Como hemos indicado, y si incluimos además las industrias aisladas, la industria se encuentra ubicada en alguna de las situaciones siguientes:

- Industria aislada en el medio rural
- Industria aislada en el medio natural
- Industria aislada dentro del casco urbano
- Industria localizada junto a otras del mismo sector dentro del casco urbano

- Industria localizada junto a otras de otros sectores
- Industria aislada en un parque industrial fracasado, donde no se ha establecido casi ninguna otra.
- Industria ubicada en un polígono industrial bien poblado de otras industrias
- Industria semiabandonada en el medio urbano
- Industria semiabandonada en el medio rural
- Industria semiabandonada en el medio natural
- Industria abandonada en el medio urbano
- Industria abandonada en el medio rural
- Industria abandonada en el medio natural

Entre todas estas posibilidades, existen además diversas variantes, que dependen de numerosos factores como el tipo de actividad industrial, el tamaño de la industria o su tecnología.

CAPÍTULO 107

CASOS PRÁCTICOS Y EJEMPLOS

107.1. CASO PRÁCTICO DE BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA EN LA COMBUSTIÓN. EMISIONES EN CHIMENEA

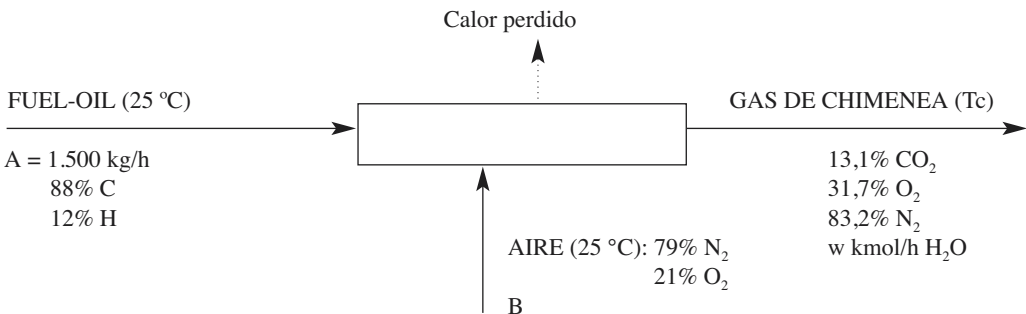
1.500 kg/h de fuel oil que contiene 88% en peso de C y 12% en peso de H, se queman en un horno, dando un gas de chimenea que contiene CO_2 , N_2 , O_2 y H_2O con la siguiente composición en base seca (libre del agua): 13,1% de CO_2 , 3,7% de O_2 y 83,2% de N_2 . El aire y el fuel-oil entran al horno a 25°C, y el horno pierde por las paredes 4,5 Kcal/h.

Se busca determinar el caudal molar del gas de chimenea producido, el agua

de combustión en el gas de chimenea por cada 100 kmol de gas seco, el exceso de aire empleado y la temperatura de salida del gas de chimenea.

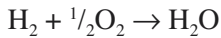
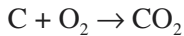
Datos

- Calores específicos en kcal/kmol °C:
 CO_2 : 10,2 N_2 : 7 O_2 : 7,3 H_2O : 8,3
- Entalpía de reacción: $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$
 $H^\circ = -94.502 \text{ kcal/alkg}^\circ\text{C}$
- Entalpía de formación del agua líquida a 25°C:
-68.320 kcal/kmol
- Calor latente de vaporización del agua a 25°C:
10.600 kcal/kmol



Base de cálculo 1 hora.

Reacciones que tienen lugar:



Ambas se dan al 100%, pues no aparece ni C ni H₂ en los gases de chimenea.

El agua se forma líquida y después se vaporiza, saliendo con vapor en el gas de chimenea.

Procedimiento

Paso previo: pasar la corriente A de kg/h a kmol/h.

a) kmoles de gas de chimenea producidos (C):

- 1) Subcorriente w: balance de H total.
- 2) Corriente C: balance de C total.

b) kmoles de H₂O vapor en el gas de chimenea por cada 100 kmol de gas seco:

- 3) w/(C - w) %.

c) Exceso de aire empleado (B_{exceso}):

- 4) Hallar B: balance total de N₂.
- 5) Hallar el O₂ estequiométrico necesario.
- 6) Hallar el O₂ en exceso: con B y el dato anterior.
- 7) Hallar el aire en exceso: con el % de O₂ en el aire (21%).

d) Temperatura del gas de combustión (T_c):

- 8) Balance entálpico en el horno

Cálculos

$$A = \frac{1.500 \cdot 0,88}{12} + \frac{1.500 \cdot 0,12}{2} = 290 \text{ kmol/h}$$

- 1. 180 = 2 · w
w = 90 kmol agua en chimenea.
- 2. 110 = 1 · 0,131 · (C - w)
C = 929,69 kmol/h
- 3. w/(C - w) · 100 = 10,72 kmol agua/kmol gas de chimenea seco.
- 4. 0,79 · B = 0,932 · (C - w)
B = 884,34 kmol/h
- 5. O₂ esteq = C_{en A} = 110 kmol/h
- 6. O₂ exceso = O_{2 en B} - O_{2 esteq} =
= 0,317 · (C - w) - O_{2 esteq} =
= 75,71 kmol/h
- 7. B_{exceso} = O_{2 exceso} / 0,21 =
= 360,53 kmol/h
- 8. La ecuación general del balance entálpico es:
$$Q = \Delta H_{entrada} + \sum \Delta H_{reacción} + \Delta H_{salida}$$

La T de referencia será de 25 °C.
Calculamos cada uno de los términos del balance:
a) Q = -4,5 kcal/h (signo negativo por ser calor cedido).
b)
$$\Delta H_{entrada} = \sum_{entran} n_i \cdot C_{p_i} \cdot (T_i - T_{ref.}) = 0,$$

por ser T_i = T_{ref} = 25 °C

$$c) \sum \Delta H_{reacción} = \Delta H_1 \cdot (at - kgC) + \Delta H_2 \cdot (n_{H_2O}) = -16.544 \cdot kcal / h$$

$$d) \Delta H_{salida} = \Delta H_{vaporiz} \cdot n_{H_2O} + \sum_{salida} n_i \cdot Cp_i \cdot (T_i - T_{ref.})$$

$$\Delta H_{salida} = (6.986,22 \cdot Tc + 724.699,5) \quad kcal / h$$

Sustituyendo todo en la ecuación del balance entálpico se obtiene: $Tc = 1.620 \text{ }^\circ\text{C}$

107.2. CASOS PRÁCTICOS DE PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

107.2.1. Información y datos de partida para estudios globales y de planificación del control de la contaminación atmosférica en un territorio

Datos meteorológicos

- Estaciones meteorológicas ubicadas en la zona.
- Parámetros meteorológicos que se miden.
- Períodos de tiempo en que se dispone de observaciones.
- Datos meteorológicos de los últimos diez años.
- Medias anuales de los últimos diez años.

- Medias mensuales de los últimos diez años.
- Temperaturas máximas absolutas anuales de los últimos diez años.
- Temperaturas máximas absolutas mensuales de los últimos diez años.
- Temperaturas mínimas absolutas anuales de los últimos diez años.
- Temperaturas mínimas absolutas mensuales de los últimos diez años.
- Humedad relativa media, en % anual, de los últimos diez años.
- Humedad relativa media, en % mensual de los últimos diez años.
- Precipitación total, en mm, anual, de los últimos diez años.
- Precipitación total, en mm, mensual, de los últimos diez años.
- Número de días despejados (total) de los últimos diez años.
- Número de días cubiertos (por mes) de los últimos diez años.
- Número de días de sol (por mes) de los últimos diez años.
- Viento en tierra y dirección dominante (por mes) en los últimos diez años.
- Condiciones topográficas de la zona que pueden favorecer la contaminación.

Vehículos automóviles y combustibles fósiles

- Número de vehículos puestos en circulación en el área en los últimos cinco años.

- Número de vehículos Diesel.
- Número de vehículos de gasolina.
- Parque de automóviles del área en el último año.
- Parque de autobuses del área en el último año.
- Parque de camiones del área en el último año.
- Parque de turismos del área en el último año.
- Parque de motocicletas del área en el último año.
- Parque de tractores del área en el último año.
- Número de habitantes por vehículo en la comarca en el último año.
- Número de vehículos por 1.000 habitantes.
- Número de habitantes por vehículo de turismo.
- Combustibles consumidos en la comarca en el último año.
- Tráfico de vehículos en las zonas más transitadas.
- Emisiones de contaminantes debidas a calefacción.
- Situación (de contaminación) del entorno de las zonas más transitadas.

Centrales térmicas

- Número y tipo de centrales térmicas.
- Potencia de las centrales.

- Localización geográfica y topográfica.
- Altura de chimeneas.
- Cálculo de emisiones.
- Tipos de combustibles.
- Estudios de difusión y dispersión de los penaches de que se disponga.
- Descripción de la situación medioambiental del entorno.

Fábricas de cemento

- Fábricas de cemento del área.
- Localización geográfica y topográfica.
- Producción de cemento de cada fábrica.
- Descripción de la situación medioambiental del entorno de cada una.
- Cálculo de emisiones.

Industrias siderometalúrgicas

- Industrias siderometalúrgicas del área.
- Producción.
- Localización geográfica y topográfica.
- Tipos de hornos que utilizan.
- Cálculo de emisiones.

Petroquímicas

- Industrias petroquímicas del área.
- Producción.

- Localización geográfica.
- Cálculo de emisiones.

Industria química

- Industrias químicas del área: inventario por actividades.
- Producción.
- Localización geográfica.
- Producción de SO_4H_2 .
- Fábricas.
- Cálculos de emisiones de cada industria.

Metálicas no férricas

- Industrias de metales no férricos.
- Producción.
- Cálculo de emisiones.

Nucleares

- Centrales nucleares.
- Industrias nucleares y derivadas.
- Emisiones.

Otras industrias y actividades

- Industrias no citadas pero con emisiones a la atmósfera.
- Industrias generadoras de malos olores.
- Cálculo de emisiones de cada industria.

Datos demográficos, sociales y otros

- Localización de núcleos urbanos del área.
- Tipo de núcleos (industriales, habitacionales, turísticos, agrarios).
- Formas de calefacción y consumo.
- Población del área y su distribución.
- Nivel de vida.
- Vehículos y tráfico dentro de los núcleos urbanos.
- Cálculo de emisiones.

107.2.2. Establecimiento de redes de control de contaminación atmosférica

Información y datos previos básicos

- Determinación de las causas de la contaminación.
- Agentes contaminantes básicos del aire.
- Fuentes contaminantes.
- Métodos de medida.
- Información demográfica del área.
- Información sanitaria del área.
- Simulación analógica.
- Información topográfica.
- Aplicación de fórmulas sobre la difusión.
- Información sobre la calidad del aire.

- Distribución más probable de la contaminación según los datos anteriores.
- Información sobre los residuos sólidos urbanos, agrícolas o industriales del área.

Organización y recursos

- Organismos responsables.
- Personal.
- Equipo material.
- Financiación.
- Control.
- Mantenimiento (estimación previa).
- Otros recursos.

Planificación y diseño

- Selección definitiva de los agentes contaminantes a comprobar.
- Selección definitiva del área de estudio.
- Número de los puntos de muestreo.
- Duración del muestreo.
- Frecuencia del muestreo.

Criterios para la localización e instalación de las estaciones de muestreo

- Condiciones de representatividad.
- Condiciones de comparabilidad.
- Requisitos físicos.

- Datos tecnológicos.
- Requisitos tecnológicos.
- Requisitos prácticos.
- Medidas discontinuas.
- Medidas continuas.
- Diseño definitivo de la red.

Elementos básicos complementarios en la planificación

- Necesidades de laboratorio.
- Control y garantía de calidad.
- Sistema de adquisición de datos.
- Transmisiones de datos.
- Sistema de manejo de datos.
- Presentación de los datos.
- Mantenimiento y repuestos.
- Unidades centrales.
- Estaciones remotas.

Tecnologías a aplicar

- Redes autónomas.
- Redes manuales.
- Redes semiautomáticas.
- Redes automáticas.
- Redes basadas en la teledetección.
- Redes de vigilancia.
- Redes de alerta.

- Redes de configuración geométrica.
- Redes de configuración no regular.
- Redes de configuración mixta.
- Redes de control de emisiones.
- Redes de control de inmisiones.

107.2.3. Plan de evaluación para casos de contaminación atmosférica. Análisis en emisiones e inmisiones

Bases de la evaluación y fuentes de emisión

- Origen natural.
- Origen industrial con fuentes múltiples y heterogéneas.
- Origen industrial con una sola fuente.
- Origen urbano con fuentes múltiples y heterogéneas.
- Origen urbano con una sola fuente.
- Origen agrario.

Análisis de las emisiones

- Análisis de las emisiones de las instalaciones fijas de combustión.
- Análisis de las emisiones en los transportes.
- Análisis de las emisiones de origen natural.
- Análisis de las principales emisiones.

- Determinación del monóxido de carbono.
- Determinación de partículas sólidas.
- Determinación de hidrocarburos.
- Determinación del dióxido de azufre.
- Determinación de los óxidos de nitrógeno.
- Determinación del flúor.
- Estudio de los sinergismos y similares:
 - Depósitos ácidos secos.
 - Lluvias ácidas.

Análisis de las inmisiones

- Análisis de los contaminantes principales:
 - Partículas sedimentables.
 - Partículas en suspensión.
 - Dióxido de azufre.
 - Monóxido de carbono.
 - Oxidos de nitrógeno.
 - Oxidantes.
 - Hidrocarburos.
 - Plomo.

Análisis de los contaminantes secundarios

- Ozono.
- Sulfuro de hidrógeno.

- PAN.
- PBN.
- PPN.
- Cloruro de carbonilo (fosgeno).
- Amoníaco.
- Cloro.
- Acido fluorhídrico.
- Aldehidos.
- Fenoles.
- Cianuros.
- Tricloroetileno.
- Metales.

Análisis automático urbano

Análisis en el medio natural (inmisión y recepción)

- Fauna doméstica:
 - Mamíferos.
 - Aves.
 - Otros.
- Fauna salvaje.
 - Mamíferos.
 - Aves.
 - Otros.
- Cultivos agrícolas.
- Masas forestales.
- Pastizales.
- Suelos.
- Aguas.

107.3. CASOS PRÁCTICOS DE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN ZONAS RURALES

107.3.1. Estudio de la contaminación atmosférica de un área industrial sobre su entorno agrario

Planteamiento general del problema

El estudio de la incidencia de la contaminación atmosférica en el entorno de un polo industrial o de una zona urbana, tiene gran interés por lo que se refiere a la calidad ecológica y sanitaria de la zona.

Generalmente, las zonas periurbanas se caracterizan por la abundancia de pequeños cultivos hortícolas que cubren, en parte, las necesidades de la urbe. Si esos cultivos se encuentran sometidos a perturbaciones ocasionadas por los agentes contaminantes atmosféricos, es razonable que se puede pensar que los alimentos originados en esas áreas puedan producir cierto grado de contaminación en los seres humanos que los consumen.

En lo que respecta a la ganadería, la contaminación atmosférica puede afectar a los pastizales y concentrarse los elementos contaminantes en el ganado que los consume, y a su vez en el hombre que consuma este ganado.

Finalmente, las masas forestales de los entornos de áreas industriales o de zonas urbanas pueden sufrir los efectos

de esa contaminación atmosférica, sobre todo las masas de coníferas, que son generalmente mucho más sensibles, como hemos indicado en muchas de nuestras publicaciones.

En el estudio que detallamos a continuación, hacemos mención del control de los agentes contaminantes de interés que afectan al medio natural, como son el SO_2 , el flúor, los metales pesados o las partículas sedimentables.

También se tienen muy en cuenta los bioindicadores de contaminación atmosférica, como los líquenes epífitos y los musgos.

El estudio que se detalla plantea, de forma general, la perturbación que causa la contaminación atmosférica en el medio agrario de un entorno urbano de gran concentración industrial; hecho que se repite, desgraciadamente, cada vez más frecuentemente en muchos países del mundo.

Agentes contaminantes controlados y sus efectos

SO_2

Las emisiones de SO_2 a la atmósfera han provocado muchas perturbaciones sobre las masas vegetales, y han sido objeto de numerosas investigaciones a partir de finales de los años 60 del siglo pasado.

Varias investigaciones han demostrado que ante una presencia continuada de SO_2 en el aire, aumenta el contenido to-

tal del azufre en los vegetales. En las plantas parece confirmarse que existe un equilibrio regulador del nivel de azufre, hecho que se manifiesta en las fracciones sulfitos-sulfatos: el desplazamiento es hacia la forma de sulfitos en presencia de luz y hacia los sulfatos en la oscuridad.

En cuanto a su distribución, parte del SO_2 se incorpora a la fracción mineral como sulfatos, parte aparece en la fracción orgánica como aminoácidos y proteínas del azufre, y parte, finalmente, se elimina al exterior mediante los sistemas normales de intercambio de gases de las hojas.

Cuando se superan los mínimos de toxicidad en los niveles de concentración atmosférica del SO_2 , los mecanismos antes descritos se ven desbordados, y empiezan a aparecer las dosis necróticas características de la presencia del gas, y otros daños más o menos visibles.

En lo que se refiere a las masas forestales, la acción del SO_2 es un fenómeno conocido antes que los problemas causados en las masas agrícolas, y las perturbaciones no han cesado de agravarse a medida que los países han desarrollado su potencial demográfico e industrial (casos múltiples en Centroeuropa).

En España, el problema se acentúa a causa de la frecuente coincidencia geográfica de las concentraciones urbano-industriales con áreas de repoblación forestal intensiva.

En el estudio que detallamos se trata fundamentalmente de la perturbación causada en ciertas coníferas, sobre todo

en los *Pinus*, y dentro de ellos en el *Pinus radiata*, especie de particular interés por ser una de las más utilizadas en repoblaciones para producción de madera y pasta de papel en el norte de España.

En lo que se refiere al control de especies agrícolas, se han estudiado especies de pastizal, algún matorral común, manzanos, ciruelos y especies hortícolas.

Flúor

El elemento es un agente contaminante de primer orden en el medio agrario, debido a que puede causar graves perturbaciones, tanto al material vegetal como al animal.

En el primer caso, las perturbaciones pueden ser de mortalidad y desaparición de especies, y en el segundo puede ser la aparición de fluorosis, sobre todo en la fauna doméstica herbívora.

Los resultados mostraron que en el entorno del cinturón industrial objeto de este estudio se puede considerar que el área está contaminada. A ambas orillas de la ría presente y en la proximidad del cinturón, hay también mucha vegetación débilmente contaminada, mientras que la vegetación no contaminada solamente aparece ya en zonas alejadas hacia el interior de la provincia que estamos tratando.

Parece comprobado que el nivel de contaminación es superior a las 40 ppm, valor que se considera como límite máximo aconsejable para forrajes utilizados en la alimentación ganadera.

Metales pesados

Sabemos que los metales pesados, debido a su efecto acumulativo, pueden provocar riesgos a causa de su paso en las cadenas tróficas por medio de numerosas especies de aves, anfibios y mamíferos.

En este sentido, consideramos como de gran interés el estudio de la presencia de estos agentes contaminantes en el medio natural del entorno de un área de gran actividad industrial y urbana.

En el estudio que estamos detallando, se consideró del mayor interés el control de ciertos metales pesados en las vías de comunicación, fundamentalmente carreteras.

Los metales pesados que se controlaron fueron: zinc, cobre, cromo, níquel, plomo y cadmio.

Los resultados mostraron que el contenido en zinc y cobre es muy elevado, pudiendo ser de cinco a ocho veces superior al borde de las carreteras que a 40 y 80 metros.

Por lo que se refiere a los demás elementos, la contaminación es muy elevada hasta los 20 metros del eje de la carretera, a partir de los cuales disminuye muy perceptiblemente. La importancia de esta contaminación hace necesaria la toma de medidas prácticas encaminadas a reducir o eliminar sus efectos, puesto que puede plantear gravísimos problemas para los consumidores de vegetales de estas áreas.

Partículas sedimentables

En el mismo estudio se consideró de cierto interés controlar las partículas sedimentables que se depositan en los alrededores de la zona industrial y urbana. El resultado no fue demasiado amplio debido a la escasez de medios y a la falta de instalaciones suficientes y de puntos de muestreo adecuados.

De todos modos, se observó la presencia, perceptiblemente abundante, de ciertos productos contaminantes, como metales y partículas derivadas de hidrocarburos, es decir, de material debido a la actividad antrópica, y no de origen natural.

Contaminantes en mezcla

En el estudio se incluyó el control —mediante criptógamas—, de agentes contaminantes, es decir, se hizo uso de vegetales como bioindicadores de contaminación atmosférica. Se orientaron los estudios fundamentalmente al control de los metales pesados en conjunto, y se controlaron cobre, zinc, plomo, cadmio, cromo y níquel. Asimismo se tuvo en cuenta la presencia de derivados del azufre.

El uso de este tipo de bioindicadores es eficaz para el control, no solamente de los metales pesados que acabamos de referir, sino del dióxido de azufre y del flúor y otros agentes contaminantes clásicos, como se ha indicado en los capítulos correspondientes en esta obra.

*Tecnologías aplicadas en el estudio**SO₂*

La tecnología aplicada se basó en la selección de tres grandes parcelas en el entorno de la zona industrial y urbana, y de una parcela testigo, de condiciones ecológicas similares, y separada suficientemente de la zona como para que no recibiera influencia ninguna de ella.

En el control se utilizaron siete especies vegetales, y se realizaron muestreos mensuales, durante el mismo día.

Se buscaron unas parcelas de control coincidentes con un nivel de contaminación conocido por la red automática de control de contaminación.

Se muestrearon hojas de los verticilos superiores y de la mayor edad posible, con la tecnología clásica del muestreo de este tipo de material.

A las 24 horas de cada muestreo se realizaron los estudios de sulfitos-sulfuros, y el control del azufre total se efectuó dentro de un plazo de 30 días.

En los análisis de sulfitos-sulfatos se repitieron los procesos seis veces, y se obtuvieron las medidas correspondientes.

La tecnología aplicada fue, por una parte, la técnica fotosensible de sulfitos-sulfuros, y por otra el análisis del azufre total.

Los análisis del azufre total se efectuaron mediante la tecnología de *Chapman y Pratt*, clásica para este tipo de actividades.

Masas forestales

Para el control de masas de *Pinus radiata* se orientaron los estudios al control y análisis de ciertos elementos de los aparatos asimilador y reproductor, como son las acículas, las piñas, los piñones y las alas de los piñones.

Para la realización del estudio se eligieron dos parcelas: una localizada en una zona directamente influida por la contaminación, y la otra situada en una zona sin contaminación ninguna, y con especies de *Pinus radiata* de la misma edad que los de la parcela contaminada, unos 16 años.

Las muestras que se tomaron fueron de acículas de sombra y de verticilos inferiores.

Se seleccionaron al azar 50 unidades de cada parcela, a las que se midieron longitud y peso, y se estableció su comparación mediante la *t* de *Student*.

En lo que se refiere al aparato reproductor, se tomaron varias docenas de muestras de piña en una y otra parcela, y en las dos se muestrearon verticilos completos. Las piñas eran de edad de cuatro años, y en ellas se midió peso, longitud y anchura.

En las parcelas se analizaron del orden de los 800 piñones en cada una, semillas que fueron pesadas.

Se estudiaron 310 alas de piñón en cada parcela en lo que se refiere a la superficie, y se utilizó siempre, en cuanto al método estadístico, la prueba de significación estadística de comparación de medidas de *Student*.

Los resultados indicaron que ambos aparatos, asimilador y reproductor, están fuertemente afectados por el SO_2 . Asimismo se observaron descensos en la productividad debidos al menor tamaño de las acículas contaminadas.

Se comprobó que el poder reproductor era inferior al observarse una proporción de piñones vacíos muy superior en la zona contaminada a la de la zona testigo, y también se observó un peso de piñones inferior.

Se observó que las alas de los piñones eran de menor superficie, lo que implica un menor poder de diseminación y reproducción.

Flúor

Se tomaron muestras de cinco especies vegetales, y se realizaron dos muestreos grandes y 236 análisis; el método que se utilizó es el oficial potenciométrico descrito en el JAOAC.

La tecnología aplicada es: recogida de las muestras, secado durante 24 horas a 80° , molido en seco con molino de martillos, extracción secuencial del flúor mediante ácido nítrico y KOH, adición de 1 ppm del flúor como agente complejante, control del potencial mediante electrodo selectivo del ión flúor y comparación con curva patrón.

Los resultados indican que los valores son elevados, como acabamos de reflejar en anteriores apartados, por lo que se deberá hacer un uso muy controlado del material vegetal utilizado co-

mo alimento para hombres o animales, y debería fijarse un contenido limitado de flúor en el material utilizado para alimento.

Metales pesados

La tecnología aplicada es la siguiente: en primer lugar se seleccionaron seis puntos de muestreo en el entorno del área industrial y urbana, correspondientes a distintas intensidades de tráfico, oscilantes entre una gran circulación y una débil.

Los muestreos se realizaron en distancias de 1 a 80 metros de las carreteras.

Se utilizaron siete especies vegetales para el control y los análisis se realizaron, por una parte, mediante espectrofotometría de absorción atómica con equipo Pye-Unicam, con método de análisis a base de curvas de calibrado, y utilizando también, por otra parte, un espectrofotómetro Perkin-Elmer, con corrector de deuterio, analizándose siete metales.

Una vez recogidas las muestras vegetales, se secaron en estufa, se trituraron y se calcinaron, recogiendo seguidamente en CIH concentrado; se filtraron y se llevaron al analizador.

Con la tecnología aplicada —que creemos es la más avanzada para los estudios de metales pesados—, se obtuvieron los datos que hemos indicado en apartados anteriores.

Partículas sedimentables

La tecnología aplicada para estudiar las partículas sedimentables se basó en la captura de material mediante un *Standard-Gauge*, con superficie de recogida conocida y con un depósito conteniendo un líquido de mantenimiento del material.

Se desecó el líquido y se estudiaron las partículas depositadas a base de análisis microscópico por una parte y, por otra, de análisis microquímico y de control de pequeñas partículas.

Los resultados se han indicado en apartados anteriores y, aunque el estudio no fue demasiado profundo, puede ser de gran utilidad y muy informativo en trabajos posteriores.

Análisis mediante líquenes epífitos y musgos

Se seleccionaron cinco especies de criptógamas, de las cuales tres eran líquenes y dos musgos.

El material se llevó al laboratorio, se separaron los trozos de corteza de los líquenes, y se eligieron las partes verdes de los musgos.

Se introdujo el material en bolsas de malla de nylon, y se colgaron las bolsas a una altura adecuada en siete puntos de muestreo, siendo uno de ellos el punto testigo.

Los puntos de muestreo se localizaron, como es natural, en el área, y una vez recogidas las muestras, se secaron en estufa de aire forzado y molidas.

Se secó el material tratado con diversos productos químicos, y se recogió el residuo con ácido clorhídrico.

Los metales pesados se analizaron mediante espectrofotómetro de absorción atómica con corrector de deuterio, y se expresaron los resultados en partes por millón de materia seca.

Así, se analizaron seis metales pesados y, además, se obtuvo una orientación para el control del SO₂.

Se observó al final del estudio que eran bastante más sensibles los musgos que los líquenes y, asimismo, que la contaminación era bastante fuerte en los puntos muy próximos a las carreteras.

Nota. Este ejemplo ha sido tomado en casi su totalidad de nuestra publicación «*Planificación y control de la contaminación ambiental*». Mariano Seoáñez. Mapfre, 1985.

107.3.2. Ejemplo de estudio de contaminación atmosférica de origen industrial sobre una plantación agrícola

Planteamientos del problema

En los años 80, en un momento dado se recibió en nuestro laboratorio una serie de muestras vegetales y de suelos pertenecientes a una plantación industrial de gladiolos, en la que los propietarios observaban pérdidas alarmantes en la cantidad, y sobre todo en la calidad, de la producción.

Los propietarios manifestaban que las técnicas de cultivo, las semillas y todo el proceso agrario eran las mismas que en años anteriores, y que no encontraron ninguna enfermedad o plaga a la que achacar las anomalías observadas.

Se estudiaron las muestras, sobre las que no se conocía ningún dato de muestreo, vertidos, orientación, hora de recogida, etc., etc., en lo que se refiere al material vegetal, y lo mismo ocurrió con los suelos, de los que no se conocía el lugar exacto de recogida, el método de muestreo, etc.

A pesar de estas circunstancias, se efectuaron análisis muy completos sobre las muestras recibidas y se observaron cantidades anormalmente elevadas de flúor e indicios de SO₂.

Propuesta de actuación

A la vista del problema, se propone la siguiente secuencia de actuaciones:

- Realizar una visita a la zona (estudio de verdad-terreno), con objeto de observar el medio y su entorno, para determinar posibles influencias extrañas debidas a aguas contaminadas por vertidos industriales, a contaminación atmosférica, a carencias en el suelo, etc.
- Realizar muestreos por parte de especialistas en puntos adecuados y con metodologías adecuadas.
- Analizar y obtener las conclusiones oportunas a la vista de los análisis y de las actuaciones anteriores.

Estudio de verdad-terreno

En la visita realizada se observó que la plantación de gladiolos ocupaba una superficie de unas 5 Has., en una zona de Levante, con suelo de gran calidad y con agua de riego normal y de uso en otras muchas explotaciones agrarias de la zona.

El suelo era llano, típico de huerta levantina, con una fábrica de decapado de metales colindante con la finca.

Se tomaron muestras de los siguientes elementos:

- Partes aéreas de herbáceas silvestres de márgenes de caminos en 8 puntos.
- Partes aéreas de gladiolos en 25 puntos de la finca.
- Suelos en 10 puntos.
- Aguas de riego en 3 puntos.
- Partículas sedimentadas sobre tejas, sobre chapas metálicas y sobre bloques de hormigón (15 muestras).
- Algunos ejemplares de entomofauna (9 ejemplares).
- Testigos vegetales a 1,5 km del area de estudio, con características ambientales similares a las del problema, pero en zona deshabitada.
- Interpretación de los resultados y conclusiones, vientos, etc.

Estudio climatológico

Se tomaron tanto los datos climáticos de dos estaciones próximas como las fi-

chas agroclimáticas de tres puntos cercanos.

Esta información orientó algo en cuanto a temperaturas, pluviometría y vientos, aunque este último factor se consideró en la visita de verdad-terreno y con observaciones posteriores más detalladas a nivel de finca.

Análisis de laboratorio y gabinete

En la visita de verdad-terreno ya se empezó a sospechar una posible relación entre la fábrica próxima y el problema de los gladiolos, por lo que los análisis se orientaron, al igual que los realizados con las primeras muestras recibidas, a investigar la posible presencia de F y de SO₂ y además a estudiar la probable incidencia de metales pesados como Cu, Cr, Mu, Fe, Ni, Cd, Pb y Zn.

Análisis macroscópico

Se observaron algunas alteraciones en los vasos de las nerviaduras foliares, que estaban semicerrados en los gladiolos y en la mayoría de las muestras vegetales.

El parénquima lagunar estaba hipo-desarrollado.

En muchas muestras se observaron partículas sólidas en la superficie del haz, principalmente hollines, restos orgánicos y materiales del suelo (arenas, etc.).

Las características de las partículas depositadas en tejas, chapas metálicas y demás era parecida.

La observación global de las muestras vegetales indica un manifiesto subdesarrollo.

Análisis microscópico

El análisis microscópico revela síntomas de degeneración en muchos estomas de los vegetales, tanto en las células oclusivas como en las circundantes.

La abertura estomatal está casi siempre cerrada u obstruida.

El parénquima lagunar está anormalmente desordenado y con espacios intercelulares muy grandes.

Los estomas de los testigos no manifiestan estas anomalías.

La observación microscópica de las muestras de suelo no manifiesta la presencia de sustancias extrañas.

La observación de las aguas indica presencia de una microflora y microfauna normales, sin manifestaciones extrañas dignas de mención. Se pueden incluir en la Clase II de la clasificación de Liebmann: aguas ligeramente contaminadas.

Análisis de suelos

Los análisis de las muestras de suelos identificaron estos como Franco-arcillo-arenosos, con un contenido en M.O. del 2,5 al 2,9%, con elementos gruesos (en % > 2mm) entre el 1 y el 2,5% y arena gruesa (0,2 mm < ϕ < 2 mm) del 52 al 61%. El contenido en limo (USA) + arcilla osciló entre el 40 y el 42%.

No se observaron cantidades anómalas de los metales pesados estudiados, ni de F ni de S total.

Análisis químico

a) Métodos

Metales pesados: absorción atómica

S: azufre total (oxidación por calor, precipitación, turbidimetría, etc.)

SO₂: revelado con Pb(CH₃COO)₂, Zn(CH₃COO)₂ y Na₂(Fe(CN)₅N) 2H₂O

F: Electrodo selectivo

b) Resultados

En metales pesados no se observaron anomalías dignas de mención en ninguna de las muestras, salvo el Cu en una muestra de vegetación silvestre próxima a un camino, en la que el contenido fue elevadísimo.

En F, el contenido en casi todas las muestras vegetales osciló alrededor de 819 ppm, mientras que en los testigos nunca subió de 402 ppm. En la entomofauna la diferencia en el mismo sentido fue siempre ligera, pero esto ocurrió con todas las muestras.

En S se observó un contenido ligeramente superior al normal en los vegetales, y nada extraño en las partículas sedimentadas ni en la entomofauna.

Estudio complementario de verdad-terreno

En una segunda visita a la zona se observó, mediante la propia visita y por consultas a la población de la zona, que el sentido del viento es bastante constante gran parte del año, de la fábrica a la explotación agraria.

Asimismo se observó que la parte más afectada por el F coincide con la zona ubicada a sotavento de la fábrica, a cierta distancia de la linde.

Se instaló en la zona un analizador semiautomático (barboteo y electrodo) para muestras de aire, y se mantuvo a lo largo de 3 días en diversos puntos de la finca.

El análisis reveló la ligera presencia de F en la inmisión en todo momento a sotavento de la fábrica, aumentando en ciertas zonas donde, presumiblemente, el viento arrastraba con más frecuencia el halógeno.

También se observó la opacidad anómala de varios cristales de ventanas de la fábrica.

Conclusiones

Se trata de una clara contaminación por F atmosférico sobre los vegetales estudiados, con prácticamente nula incidencia sobre el suelo o sobre las aguas del entorno de los puntos de emisión.

La contaminación por F es rotunda, revelada por:

- Los análisis químicos de las muestras vegetales, comparados con los de los testigos.
- Los estudios macroscópicos.
- Los estudios microscópicos.
- El estado de los cristales de algunas ventanas de la fábrica.
- La coincidencia de mayor incidencia en todas las zonas ubicadas a sotavento de la fábrica.

107.3.3. Plan de análisis ambiental de las posibles alteraciones sobre viñedos provocadas por emisiones de SO₂ de una industria papelera

Planteamiento del problema y bases de partida

- Localización de la zona.
- Datos generales de la industria.
- Datos generales del medio receptor.

Contaminación atmosférica de la industria papelera (sulfato)

- Digestión.
- Primera evaporación.
- Horno recuperador.
- Segunda evaporación.
- Estufa de lodos.

- Aguas residuales.
- Tanque de mezclado.

Legislación vigente

- UE.
- Nacional.
- Autonómica.
- Normativa local.

Climatología

- Parámetros básicos.
- Datos específicos.
- Difusión y dispersión.

Síntomas en la vegetación acompañante

Síntomas en la vid

Repercusiones sobre otros componentes del medio agrario

Forma de acción

Sinergismos

Metodologías de muestreo

Metodologías de análisis

Resultados

107.3.4. Programa correspondiente al estudio sobre la contaminación agraria provocada por las emisiones de flúor de dos industrias del norte de España realizado por nosotros a finales de los años 70

Antecedentes

- Informes previos.
- Análisis de primeras muestras.
- Planificación del estudio.

Datos de partida

- Datos demográficos:
 - Zona 1.
 - Zona 2.
- Datos pluviométricos:
 - Zona 1.
 - Zona 2.
- Descripción de las plantas industriales:
 - Industria 1.
 - Materias primas.
 - Productos elaborados.
 - Procesos.
 - Vertidos.
 - Emisiones:
 - Identificación.
 - Cuantificación.

- Tratamientos existentes.
- Errores.
- Nuevas tecnologías de tratamiento a instalar.
- Industria 2.
 - Materias primas.
 - Productos elaborados.
 - Procesos.
 - Vertidos.
 - Emisiones.
 - Identificación.
 - Cuantificación.
 - Tratamientos existentes.
 - Errores.
 - Nuevas tecnologías de tratamiento a instalar.
- Características generales del proceso de intoxicación fluorósica en animales.
 - Proceso general.
 - Industrias que lo provocan.
 - Signos clínicos.
 - Lesiones.
 - Sistemas de control.
- Características generales del proceso de intoxicación por flúor atmosférico en vegetales.
 - Absorción.
 - Acumulación.
 - Efectos:
 - Masas forestales.
 - Cultivos.
 - Praderas.
- Suelos.
 - Análisis.
 - Asimilabilidad del F.
- Aguas continentales.
 - Muestreos.
 - Análisis de campo.
 - Parámetros.
 - Fluoruros (método *Spands*).
 - Análisis de laboratorio.
 - Dosis.
 - Concentraciones de F:
 - Agua.
 - Flora.
 - Fauna ictícola.
 - Usos del agua.
- Fluorosis en animales.
 - Análisis cronológico.
 - Censos.
 - Animales afectados.
 - Focos.
 - Incidencia.
 - Extensión.
- Ecología vegetal.
 - Enfermedades.
 - Plagas.

- Vegetales.
 - Análisis fotográfico.
 - Estudios macro.
 - Estudios micro.
 - Identificación de zonas.
 - Análisis químico.
 - Métodos (*Melton*).
 - Especies.
 - Puntos de muestreo.
 - Zonas de muestreo (parcelas).
 - Resultados.
 - Previsión de controles futuros.
 - Muestreo estático.
 - Muestreo dinámico.
 - Red de control.
- Conclusiones y recomendaciones***
- Confirmación de la presencia de F.
 - Intoxicación ganadera.
 - Variaciones en la incidencia.
 - Cartografía de las zonas agrícolas afectadas.
 - Cartografía de las zonas forestales afectadas.
 - Incidencia en el medio agroforestal.
 - Incidencia en el suelo.
 - Incidencia en aguas.
 - Errores en la industria.
 - Indemnizaciones:
 - Ganadería.
 - Medio agrícola.
 - Medio forestal.
 - Gestión de los pastos (nueva).
 - Gestión ganadera (nueva).
 - Gestión forestal (nueva) y reforestación.
 - Gestión agrícola (nueva).
 - Encalados de corrección.

DECIMOSÉPTIMA PARTE

Gestión de la contaminación atmosférica en la empresa

CAPÍTULO 108

ESTRATEGIAS Y RESPONSABILIDADES MEDIOAMBIENTALES DE LA EMPRESA

En este capítulo desarrollaremos los temas que se indican en su título con un enfoque general medioambiental y no solo circunscrito a la contaminación atmosférica.

En este sentido se considera que tanto la acción de la empresa como las responsabilidades, incluyen en todo momento la contaminación atmosférica y todo lo que ella entraña.

108.1. ESTRATEGIAS MEDIOAMBIENTALES BÁSICAS DE LA EMPRESA

108.1.1. Crisis medioambiental y conciencia ecológica

La degradación continua y creciente del medio ambiente es evidente: deforestación, recalentamiento del planeta, destrucción de especies animales y vegetales, destrucción de la capa de ozono, desertificación, contaminación del agua,

del aire y del suelo, etc. Como resultado de esta *crisis medioambiental*, se ha ido formando en estos últimos años una nueva conciencia ecológica; se han ido desarrollando normativas medioambientales cada día más estrictas, cuyo incumplimiento se traduce en multas y sanciones, y, además, comienzan a elaborarse medidas internacionales que afectan a todas las empresas: ecoetiquetas, fondos de indemnización, ecoimpuestos (sobre el CO₂, sobre los residuos, sobre la energía), etc.

Las empresas deben asumir su responsabilidad y su papel en la protección del medio ambiente respetando la normativa ambiental vigente, incluyendo esta *conciencia ecológica* como parte de su filosofía y política empresarial a través de una serie de estrategias medioambientales prácticas y eficaces: establecimiento de un programa de control y vigilancia de la contaminación; desarrollo de un programa de ecoauditorías; demanda de subvenciones o ayudas financieras para la protección del medio;

fabricación de productos de menor coste medioambiental y de ecoproductos; uso de ecoetiquetas; información y transparencia; pólizas de seguros de riesgos medioambientales, etc.

La Unión Europea facilita estos enfoques, y precisamente España lleva varios años con problemas por estas causas.

A finales de 2001 el Estado Español promovió una Ley para que las industrias se adapten a la reducción de las emisiones, de manera que se cumpla el Protocolo de Kioto y se dejen de emitir en nuestro país del orden de los 3 millones de Tm de CO₂/año.

108.1.2. Responsabilidad

Queremos insistir sobre el concepto actual de responsabilidad de la empresa enfocado en dos direcciones. Un primer aspecto sería la prevención y protección cara al futuro, de un medio ambiente hasta ahora bastante degradado y castigado. Esto implica un deber de control y vigilancia de aquellas actividades susceptibles de atentar contra el medio, la salud pública, los bienes o la propiedad, como por ejemplo todas las relacionadas con la emisión de productos peligrosos. El segundo aspecto se refiere al deber de reparación de los daños efectuados, según el criterio *Quien contamina, paga*, de forma que una vez demostrada la falta y la relación de causalidad daño producido-actividad productora, la empresa deberá indemnizar a los afectados, restaurar y sanear los ecosistemas dañados, y por último asumir las sanciones admi-

nistrativas, civiles o penales derivadas de su actuación.

En este sentido, la evolución que están experimentando las empresas es rápida y su estrategia es el paso de la acción curativa a la acción preventiva, ya que no hay que olvidar que resulta más costoso curar que prevenir.

La responsabilidad de la empresa estará pues orientada, no ya a la corrección e indemnización por daños (responsabilidad pasada), sino a la vigilancia, al control y a la prevención (responsabilidad futura).

108.1.3. Ayudas y fondos

La empresa puede beneficiarse de una serie de ayudas públicas o privadas, a nivel nacional o comunitario, si su finalidad es la protección del medio ambiente en cualquiera de sus facetas: recuperación y rehabilitación del medio degradado, investigación de nuevas metodologías más limpias y de menor coste medioambiental, fabricación de productos verdes o de ecoproductos, minimización en la producción de residuos, reducción de otros impactos (ruido, vibraciones, gases, radiaciones, presiones, calor, etc.), desarrollo de programas de utilización racional de la energía, etc.

En este sentido, la Unión Europea posee gran cantidad de instrumentos que aportan a las empresas este tipo de ayudas económicas.

Todos estos programas están coordinados por el Instrumento Financiero pa-

ra el Medio Ambiente creado en 1991; a continuación citamos y comentamos algunos de ellos:

- Programas de investigación y desarrollo tecnológico:
 - STEEP (ciencia y tecnología para la protección del medio ambiente).
 - ECLAIR (investigación y desarrollo tecnológico en el sector agroindustrial).
 - JOULE (energías no nucleares y utilización racional de la energía).
- Acciones comunitarias para el medio ambiente (ACE).
- Acciones para la conservación de la naturaleza (ACNAT).
- Fondos estructurales.
 - FEDER (fondo europeo del desarrollo regional).
 - FEOGA (fondo europeo de orientación y de garantía agrícola).
 - FSE (fondo social europeo).

Existen además otras entidades, como los bancos, que también optan por una política medioambiental dinámica, creando fondos, ayudas y créditos para financiar algunas de las iniciativas de la empresa en favor del medio ambiente. En este sentido, el Banco Mundial posee desde 1987 un Departamento de medio ambiente; el Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo (BERD) tiene como objetivos la reconstrucción y el desarrollo de los países del antiguo bloque soviético, siendo el medio ambiente una de sus prioridades. El Banco Europeo de Inversiones (BEI) lleva trabajando desde los años 60, desarrollando una política medioambiental, funda-

mentalmente en lo que se refiere al sector aguas. Financia exclusivamente aquellos proyectos relacionados con la protección y la recuperación del medio, otorgando ayudas de hasta un 10% del proyecto.

108.1.4. Seguros

En el mercado de los seguros también se está produciendo una transformación paralela a la evolución progresiva de la sensibilización y responsabilización de las empresas, y a su necesidad de obtener la cobertura y protección suficientes ante riesgos medioambientales derivados de su actividad. Hasta ahora, las pólizas de seguros de responsabilidad civil no cubrían, en su mayoría, aquellos accidentes o daños relacionados con el medio ambiente, y particularmente con la contaminación. Sin embargo, los esfuerzos son cada día mayores y ya existen algunas iniciativas en este sentido. Cuanto mayor sea la responsabilidad de una empresa respecto al medio ambiente, mayor es su necesidad y su demanda de cobertura y seguridad. En Estados Unidos la compañía de Seguros AIG (American International Group) lanzó al mercado en julio de 1991 una póliza de seguros para la restauración del medio ambiente. En Francia, cincuenta sociedades aseguradoras tienen como objetivo la cobertura de los riesgos de impacto sobre el medio ambiente, proporcionando contratos de seguros específicos.

108.1.5. Auditorías

Otra de las estrategias medioambientales de la empresa es el desarrollo de un programa de ecoauditorías. La ecoauditoría, tratada más ampliamente en otro capítulo de esta obra, es un instrumento de análisis de la repercusión ambiental derivada de la actuación de la empresa, que le permite su adaptación a la legislación ambiental vigente y la implantación de una sólida política de protección del medio ambiente.

108.1.6. Información

La información y la transparencia han de ser objetivos prioritarios de la política medioambiental de cualquier empresa.

El Estado y las autoridades competentes tienen la obligación de poner a disposición de todas las empresas la información acerca de la situación y el estado del medio ambiente, sin que exista ninguna diferencia que favorezca la desigualdad en la competencia de las empresas. Esta información será suministrada a través de la publicación de artículos periódicos y descriptivos, aunque determinada información confidencial concerniente a la defensa nacional, a la seguridad pública, ciertos secretos comerciales o industriales, o cualquier investigación judicial, etc., puedan ser retenidas.

Por otra parte, la empresa debe asumir la importancia de la información, de la transparencia y del diálogo frente a la

opinión pública, al personal y a los trabajadores de sus instalaciones, a sus clientes, a los accionistas, al vecindario, a las autoridades y a las asociaciones ecologistas y de protección del medio ambiente.

La empresa no debería tener nada que ocultar, de modo que la difusión voluntaria de esta información demostrará su buena voluntad y su responsabilidad en relación con el medio ambiente, fomentando una conciencia ambiental y mejorando su imagen, permitiendo el desarrollo sano y viable de la empresa.

En muchos casos, la empresa puede desconocer parcialmente la situación medioambiental de alguno de sus centros de protección e instalaciones. Para solucionarla existen ciertos instrumentos, ya mencionados, como las ecoauditorías, los diagnósticos ambientales, las evaluaciones de impacto ambiental, los estudios de riesgos, etc., que satisfacen estas necesidades de conocimiento, facilitando el control interno de la empresa.

108.1.7. Control y vigilancia

La vigilancia y el control de la contaminación son factores imprescindibles para que la actuación medioambiental de cualquier actividad industrial o empresarial sea correcta en cualquiera de sus etapas: construcción, creación, apertura, y por supuesto, durante su funcionamiento.

Se trata, por tanto, de desarrollar el control de la contaminación, considerando todos los vertidos, emisiones y resi-

duos producidos en la instalación en todos y cada uno de los sectores, analizando todas las posibles consecuencias, efectos o impactos sobre el medio ambiente y sobre la salud de las personas.

Debe ser una vigilancia integral, controlando en su totalidad las sustancias contaminantes derivadas del funcionamiento de la actividad y sus efectos globales sobre el medio y sobre el hombre, con objeto de reducir y limitar dichas emisiones y vertidos, y alcanzar una situación medioambiental óptima.

En este sentido, podemos distinguir tres líneas básicas de actuación:

- Análisis de las sustancias químicas, de las materias primas y de los productos utilizados y elaborados, adoptando el principio *de la cuna a la tumba*, estableciendo las mejores medidas de prevención y protección del medio ambiente.
- Identificación de las fuentes de contaminación. Búsqueda de tecnologías alternativas más limpias y de menor coste ambiental.
- Aproximación al entorno. Análisis y caracterización del ecosistema industrial (geografía, ecología, topografía, clima, fauna, flora, paisaje, etc.).

Los instrumentos de control de la contaminación son muy variados y citaremos algunos a modo de ejemplo:

- Investigación y desarrollo de nuevos procesos y tecnologías *verdes*, más limpias, cuyo coste ambiental sea sensiblemente menor a los actuales.

- Ecoauditorías, estudios de impacto ambiental, diagnósticos ambientales, etcétera.
- Instrumentos económicos y fiscales.
- Minimización de residuos.
- Cumplimiento de la normativa y legislación ambiental vigentes.
- Ingeniería medioambiental aplicada.
- Control de calidad.
- Contratación de personal técnico especializado.
- Contratación de asesorías medioambientales.

108.1.8. Ecoetiquetas y ecoproductos

En estos últimos años se ha incrementado considerablemente la demanda de productos *verdes*, ecoproductos o productos respetuosos con el medio ambiente, motivada por la nueva conciencia ecológica. Esta presión de los consumidores ha inducido cambios en el mercado: las listas de productos vinculados al medio ambiente son interminables y las leyendas de sus etiquetas muy variadas, en un intento de los fabricantes y vendedores de promocionar y diferenciar sus productos amparándose en su calidad en lo que se refiere al medio ambiente. Ahora aparecen características como: *productos ecológicos, amigos del medio ambiente, biodegradables, sin fosfatos, sin CFC, sin plomo, no testados con animales, fotodegradables, reciclado, reciclable, etc.*

Sin embargo, la insuficiencia de información al respecto es grande y la reglamentación escasa. En algunos casos, incluso, el producto no tiene nada de ecológico excepto su publicidad. Los abusos de este estilo deben suprimirse quedando clara la necesidad de transparencia y de verdadera información al público.

En Alemania funciona desde hace bastantes años un precursor de la actual ecoetiqueta denominado *Angel Azul*, que es una garantía del compromiso del producto con el medio ambiente. De todas maneras, y a pesar de que la experiencia es interesante, este sistema tiene algunos fallos, puesto que la concesión del *Angel Azul* se realiza en función de un único criterio, como por ejemplo el ruido, sin tener en cuenta la incidencia total del producto sobre el medio ambiente.

Actualmente se entiende por ecoproducto aquel que es respetuoso con el medio ambiente en todas las etapas de su vida, *de la cuna a la tumba*. Dictaminar que un producto es ecológico no es tan sencillo como parece, ya que realmente existen pocos productos totalmente inocuos para el medio. Es necesario hacer un ecobalance para conocer los costos ambientales de un producto, sumando los impactos positivos y negativos de éste sobre el medio (atmósfera, agua, suelo, paisaje, etc.) y sus repercusiones ecológicas, considerando todas las etapas del proceso y del ciclo de vida global de ese producto: elección y utilización de las materias primas o distintos materiales que lo componen, fabricación, distribución, embalaje, consumo,

almacenamiento, transporte, eliminación, transformación en residuos, etc.

Los productos cuyo coste ambiental sea reducido serán así diferenciados del resto a través de la ecoetiqueta o etiqueta ecológica, garantía para el ciudadano de que su incidencia sobre el medio es mínima o prácticamente nula. Un producto verde debe reunir las mismas prestaciones que el producto normal al que sustituye y un precio similar (la diferencia no debería exceder del 10%), ya que no se trata de un producto de lujo destinado a un sector del público, sino que debe ser asequible para todos.

La responsabilidad y la necesidad de proteger y respetar el medio ambiente, así como la creciente demanda de productos verdes y de información y transparencia por parte del ciudadano, deben ser motivos suficientes para que las empresas se animen y pongan en marcha programas de minimización de la utilización de recursos naturales, materias primas, agua y energía, programas de reducción de las emisiones, vertidos y residuos, programas de limitación de cualquier otro daño, etc., a fin de conseguir productos más limpios y ecológicos.

En Europa, la etiqueta ecológica es ya una realidad. El Sistema Comunitario de Concesión de la Ecoetiqueta entró en vigor en Julio de 1993, con unos criterios comunes para todos los Estados miembros.

Actualmente la aplicación de la ecoetiqueta es una iniciativa voluntaria. Sin embargo, las empresas no deberían dejar pasar la oportunidad de utilizar ésta co-

mo instrumento de información al consumidor, proponiéndole productos realmente ecológicos y demostrando su compromiso con el medio ambiente.

La ecoetiqueta europea podrá ser conseguida por cualquier fabricante o industrial que lo desee previa solicitud y autorización, consignando el logotipo (una flor envuelta en doce estrellas) en el producto elaborado. La concesión de la etiqueta oficial europea reside en un Organismo Competente en cada Estado miembro. En España el Organismo Competente es AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación).

Estos Organismos determinarán en cada caso conforme a los requisitos y criterios establecidos previamente por la Comisión Europea, la concesión o denegación de la ecoetiqueta, haciendo llegar a dicha Comisión y al resto de los Estados miembros un informe completo, para evitar así la distribución anárquica o descontrolada de la etiqueta.

Este sistema se basa en el Reglamento del Consejo de la Comunidad Económica Europea 880/92, de 23 de marzo de 1992, publicado el 11 de abril del mismo año en el Diario Oficial de las Comunidades Europeas (DOCE), siendo sus puntos principales los que a continuación se resumen:

- La Comisión de la UE definirá los criterios ecológicos para cada categoría de productos en función del principio *de la cuna a la tumba*.
- Cada Estado miembro designará un Organismo Competente responsable

de recibir las peticiones de concesión, de evaluar cada caso en función de los criterios definidos y de asignar o denegar la ecoetiqueta oficial europea, todo ello en un plazo de 30 días.

- El solicitante al cual se le conceda la ecoetiqueta podrá disfrutar de ésta, a partir de la firma del contrato de utilización, y durante un tiempo determinado, exigiéndose como mínimo una revisión cada tres años. También debe satisfacer las tarifas adecuadas (trámites de solicitud, y tarifas anuales de utilización de la ecoetiqueta).
- La Comisión de las Comunidades Europeas publicará periódicamente en su Diario Oficial las categorías de productos que pueden solicitar la ecoetiqueta, y los criterios ecológicos establecidos para ello; los nombres y direcciones de los Organismos Competentes; y por último, una lista de los productos a los que se ha otorgado la ecoetiqueta, así como sus fabricantes e importadores.

108.2. RESPONSABILIDADES Y GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LA EMPRESA

El desarrollo genera una serie de daños y perturbaciones, y entre ellos la contaminación, que es una amenaza constante para el medio ambiente. Las empresas, sometidas a una enorme presión por el mercado, los precios y las normativas, tienden a maximizar su producción, sus ventas y sus beneficios. Por

estas causas, muchas veces no desarrollan programas de minimización de los daños medioambientales derivados de sus actividades y de su producción.

Sin embargo, muchas industrias han empezado a comprometerse en serio, aceptando su responsabilidad y lanzándose voluntariamente a la defensa y protección del medio ambiente, estableciendo y aplicando sus propios programas de gestión medioambiental, entendiéndola no ya como una obligación, sino como una iniciativa para la mejora de su situación medioambiental presente y futura.

La defensa del medio ambiente debe ser una tarea común y privada, nacional e internacional y, de hecho, es una de las actuales prioridades de la Unión Europea.

En la tercera revolución ecológica, en la que estamos inmersos, la empresa se ve afectada de lleno, pues su responsabilidad es muy grande. Se trata, así, de buscar soluciones, y dentro de éstas lo más razonable es conciliar industria y medio ambiente, frenando de alguna manera éste ritmo acelerado de alteración de los equilibrios ecológicos cuyas expresiones más visibles son la extracción de materias primas, el consumo de agua y energía, la contaminación o la extinción de especies.

108.3. RESPONSABILIDAD DE LA EMPRESA Y AUTORREGULACIÓN

Las empresas están tomando conciencia de su responsabilidad en materia

de medio ambiente por causas muy numerosas, como la presión continua de la Administración (UE, nacional, etc.), la opinión pública y los consumidores, por la posibilidad de mejorar su imagen, y en consecuencia sus mercados, aumentando así sus beneficios, por la normativa ambiental a que deben ajustarse, por la competencia, etc.

Como consecuencia de esta preocupación ecológica, asociada a las exigencias legales y éticas de la sociedad y a su propia responsabilidad, la empresa, especialmente el sector industrial, está experimentando un cambio, integrándose en el medio ambiente con una actitud cada vez más dinámica y activa, estableciendo una serie de compromisos ecológicos y de protección de los ecosistemas.

En este sentido, numerosas empresas han empezado a comprometerse seriamente, aceptando su responsabilidad y lanzándose voluntariamente a la defensa y protección del medio ambiente, estableciendo prácticas y medidas para reducir los impactos medioambientales desde la base, siempre desde una estrategia preventiva. Algunas de las posibilidades que se presentan a las empresas para este fin son:

- Integración del medio ambiente en la estrategia global de la empresa.
- Instauración de códigos de buena práctica o buena conducta medioambiental.
- Cumplimiento de la legislación ambiental vigente.

- Puesta en marcha de normas voluntarias sin obligación legal.
 - Análisis del impacto medioambiental derivado de las actividades desarrolladas por la empresa.
 - Creación de un departamento de medio ambiente y selección de personal especializado (responsables y técnicos medioambientales).
 - Promoción de programas de información y formación ambiental de sus empleados, trabajadores, responsables de departamento y directivos.
 - Mejora ambiental de sus productos y servicios: productos con coste ambiental de fabricación mínimo, productos verdes o ecológicos, productos con posibilidades de reciclado, etc.
 - Ahorro energético.
 - Ahorro y adecuada selección de materias primas.
 - Vigilancia de la contaminación y establecimiento de un registro de todos los datos relativos a su control.
 - Gestión de los residuos: identificación, transporte, almacenamiento y tratamiento.
 - Gestión de los vertidos: caracterización y tratamiento.
 - Gestión de las emisiones: caracterización y tratamiento.
 - Programas de reducción de vertidos, residuos y emisiones contaminantes.
 - Revisión de los programas de control de la contaminación.
 - Investigación de nuevas tecnologías y nuevos productos de bajo coste medioambiental y alta rentabilidad económica.
 - Modificaciones de los procesos productivos más contaminantes: desarrollo de tecnologías limpias, medioambientalmente adecuadas, según el enfoque BATNEEC (*Best Available Technology not Entailing Excessive Costs*).
 - Recuperación, reciclado y reutilización de productos y subproductos.
 - Incorporación del concepto de calidad ambiental del producto.
 - Estudios de prospección de riesgos. Evaluación anticipada de nuevos riesgos medioambientales.
 - Participación activa en las campañas de mejora ambiental promocionadas por la Administración u otros organismos públicos o privados.
 - Información periódica al público acerca de la situación medioambiental de la empresa.
 - Asistencia técnica medioambiental externa: asesorías, diagnóstico medioambiental, ecoauditorías, ingeniería ambiental, etc.
- Cualquier empresa que desee mejorar su situación medioambiental, concretada en alguna de las medidas citadas, necesitará de un conjunto de instrumentos para su puesta en práctica. Dichos instrumentos destacan, en la actualidad, por su carácter voluntario, lo que permite a cada empresa desarrollar una estrategia de gestión medioambiental a su medida.

Efectivamente, la política medioambiental de la UE en los últimos años, fundamentalmente a partir del V Programa (1993-2000), *Programa Comunitario de Política y Actuación en materia de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*, se ha caracterizado por un alejamiento progresivo del tradicional concepto de *orden y mando* y por un impulso paralelo de los instrumentos voluntarios. Hasta ahora, el uso de la regulación directa había sido prioridad común de la UE, pero el V Programa ha comenzado a potenciar otro tipo de instrumentos, de carácter voluntario, en base a la noción de *responsabilidad compartida*, lo que exige una participación más amplia y activa de todos los agentes involucrados en la protección del Medio Ambiente: poderes públicos, empresas y público en general, cosa que se confirma con el Programa General o VI Programa a partir de 2001.

La nueva tendencia viene marcada por la voluntariedad de ciertos aspectos normativos particulares (desregulación), y por la autorregulación de las empresas en función de las nuevas necesidades y exigencias del mercado. La Administración interviene estableciendo una legislación medioambiental básica, que desarrolla los requisitos mínimos a cumplir por productos y empresas, a fin de garantizar la protección medioambiental. Las empresas, por su parte, presionadas por las exigencias y por las necesidades del mercado, se autoregulan a través de ecoinstrumentos voluntarios, mejorando su gestión medioambiental.

La empresa, consciente de su responsabilidad en la protección del medio am-

biente, pero también agobiada por la presión legislativa, es partidaria de esta nueva postura de la Administración Europea, solicitando no sólo el perfeccionamiento de la legislación, sino también una pauta y una pausa que le permitan asimilar la reglamentación existente para poder aplicar ésta en las mejores condiciones (fundamentalmente en el caso de las PYMES), al tiempo que, voluntariamente, emplea otros instrumentos de gestión medioambiental. La idea es que el desarrollo empresarial de estos instrumentos se realice según criterios de mercado, de forma que la propia competitividad provoque un *efecto dominó*, que se desencadenará cuando las primeras empresas, buscando ventajas competitivas, comiencen a hacer uso de estos instrumentos.

De esta forma, la calidad medioambiental será función de la demanda, ya que, al menos inicialmente, serán los propios consumidores y otras partes interesadas (clientes, accionistas, grupos ecologistas, compañías de seguros, bancos, consumidores, etc.) las que impondrán al sector empresarial la disciplina a seguir, penalizando aquellos productos, servicios o empresas que no cumplan las exigencias medioambientales del momento.

Para garantizar la credibilidad de las empresas, la tendencia actual de los ecoinstrumentos es hacia la normalización, de forma que un organismo competente, tras un determinado proceso evaluador, acredita la calidad medioambiental de ciertos productos o servicios, o bien valida la política medioambiental de una empresa.

La posibilidad de adherirse a estos sistemas voluntarios, certificados por organismos más o menos reconocidos, normalmente privados e independientes de la Administración, en base a ciertas normas estándares elaboradas por consenso de todas las partes interesadas, permite a la empresa un mayor desarrollo en el campo de la gestión medioambiental, al tiempo que reduce la responsabilidad de la Administración, que recae en otros agentes. El establecimiento de niveles adecuados de protección medioambiental será competencia de organismos privados en colaboración -en mayor o menor grado- con la Administración, de forma que dichos organismos concretarán los niveles que el poder legislativo establece en normas marco.

Por otra parte, el desarrollo de directrices y procedimientos uniformes facilita el tráfico mercantil, la información y la interpretación de la situación medioambiental real de cualquier empresa, aportando una referencia y garantía de la calidad de los productos, servicios o prestaciones de la misma, lo que satisfará las inquietudes de todos aquellos grupos que estén interesados en el buen hacer de las empresas.

108.4. RESPONSABILIDAD CIVIL, CONTAMINACIÓN Y ASEGURAMIENTO

El Artículo 73 de la Ley de Contrato de Seguro dice que *el asegurador se obliga, dentro de los límites establecidos en la Ley y en el contrato, a cubrir el*

riesgo a cargo del asegurado de la obligación de indemnizar a un tercero los daños y perjuicios causados por un hecho previsto en el contrato de cuyas consecuencias sea civilmente responsable el asegurado conforme a derecho.

Con este artículo se establece una figura que garantiza el cumplimiento de las posibles responsabilidades que pueden contraer los causantes de emisiones, vertidos, depósitos de residuos o de cualquier otra acción que dañe al medio ambiente.

En estas actuaciones de las empresas, los partícipes son cuatro, a saber:

- El asegurado.
- El tercero, que sufre el daño.
- El asegurador.
- El Estado.

Cada uno de ellos tiene sus intereses, a veces contrapuestos, y aquí surgen los problemas de las partes: *El Estado*, como responsable del equilibrio de las fuerzas sociales; *el Asegurado*, como responsable del hecho, como motor del desarrollo a causa de su actividad y como quien recibe la imposición del aseguramiento; *el Asegurador*, que tiene el compromiso de cubrir las indemnizaciones (convenidas con el asegurado o impuestas por el Estado), y finalmente *el Tercero*, que sufre el daño y que tiene derecho a que el asegurado tenga una garantía que cubra las indemnizaciones a que puede haber lugar.

Los riesgos medioambientales que debe cubrir el aseguramiento, en lo que

se refiere a las actuaciones que dañen al medio ambiente, son:

- Daños físicos (corporales).
- Daños materiales.
- Daños al medio (bajo el punto de vista ecológico).
- Perjuicios (pérdidas) por interrupción.
- Costes de emergencias.
- Costes de prevención.
- Costes de minimización.
- Costes de limpieza.
- Costes de restauración.
- Costes de defensa jurídica.

108.5. RESPONSABILIDAD DE LA EMPRESA EN MATERIA DE MEDIO AMBIENTE

108.5.1. Generalidades

Las empresas, en general, suelen ser conscientes de que tienen una responsabilidad en materia de medio ambiente, pero casi nunca saben desde y hasta donde alcanza esa responsabilidad. A veces, incluso se plantean si deberían tener una conciencia ecológica.

La preocupación ecológica surge primariamente por las exigencias legales, y después por las exigencias del mercado y de los avances técnicos de los procesos.

En este sentido, en la Unión Europea aparecen conceptos como la *responsabi-*

lidad compartida y otros –tratados en otros capítulos de esta obra–, manteniendo los principios de *el que contamina, paga* y la *prevención* y la *precaución*, que unidos al desarrollo de diferentes instrumentos de carácter obligatorio o voluntario (EIA, licencias, SG-MA, etc.), constituyen el espíritu general de la responsabilidad empresarial en materia de medio ambiente.

En este capítulo se desarrollan básicamente los aspectos jurídicos de las responsabilidades, tratándose la mayoría de los posibles casos que pueden ocurrir a las empresas en la vida práctica.

108.5.2. Responsabilidad civil

Citamos en este caso los artículos 1902 al 1910 del Código Civil, que se ocupan de diversas responsabilidades que, en algún caso, pueden afectar a una empresa, directa o indirectamente.

Artículos 1902-1910:

Los artículos 1902 y 1903 regulan la responsabilidad civil por el hecho propio y ajeno, respectivamente.

Los artículos 1906-1910 regulan los daños producidos por determinados objetos, que actúan de forma independizada de la mano del hombre, pues, son daños causados por el animal o la cosa.

En resumen, en estos artículos se trata de la responsabilidad por lo que uno hace, por lo que hace otro por el que uno debe responder y por lo que hacen los animales o las cosas que uno tiene bajo su custodia.

Así el artículo 1905 se refiere al poseedor de animal, el 1906 al dueño de una finca o titular de un derecho de caza, el 1907 al propietario de un edificio en ruina y que no lo repara, el 1908 al propietario de máquinas por su explosión, humos, caída de árboles y emanaciones de cloacas, el 1909 a los arquitectos por defectos de construcción y el 1910 al cabeza de familia que habita en una casa de la que han sido arrojadas cosas.

En todos estos casos, se trata de una responsabilidad civil objetiva.

108.5.3. Responsabilidad penal

El Código Penal trata en el Libro II, Cap. II, Sección II, de los Delitos contra la Salud Pública y el Medio Ambiente, en sus artículos 341 al 348 bis b).

En estos artículos se detallan prácticamente todas las posibilidades de delito en que se puede incurrir, en lo que se refiere a responsabilidades penales en materia de medio ambiente.

108.5.4. Responsabilidad industrial

La Ley 21/1992 de 16 de julio, de Industria, tiene, entre otros fines, el de establecer la responsabilidad industrial.

En su Título V, Artículos 30 a 38, trata de las infracciones y sanciones. En el artículo 33 trata de los sujetos responsables de las infracciones, a saber:

- Propietarios, directores o gerentes.

- Proyectistas, directores de obra y colaboradores.
- Fabricantes, vendedores o importadores de aparatos.
- Organismos y laboratorios.

108.5.5. Responsabilidad por actividades

La responsabilidad corresponde al titular de la actividad o al propietario de las sustancias contaminantes, como principio, pero existen excepciones por manipulación de dichas sustancias. Estas normas tienen una finalidad última: que exista siempre un responsable civil.

El ejercicio de ciertas actividades exige un seguro de responsabilidad civil.

De los daños por construcciones e instalaciones contaminantes responden, solidariamente con el inmitente, los técnicos y los contratistas.

108.5.6. Objetivación de la responsabilidad

La responsabilidad por los daños medioambientales tiende a ser objetiva, y no requiere culpa del autor del daño: una vez producido, recae sobre el autor la carga de la prueba de que obró con la diligencia adecuada a las circunstancias de la actividad dañosa. El cumplimiento de los estándares administrativos no agota la diligencia exigible. Podemos afirmar que la producción de daños revela la falta de diligencia.

108.5.7. Relación de causalidad

La actividad del demandado debe ser la causa del daño. Si falta relación de causalidad, no habrá lugar a responsabilidad, aunque resulte probada la conducta contaminante.

En el caso de daños medioambientales, el juez puede presumir que la actividad del demandado es causa del daño, ya que los efectos nocivos de una actividad contaminante pueden propagarse en el espacio y confluir en una zona con otros, y resultaría imposible, en caso contrario, la posibilidad de resarcimiento.

Por otra parte, el nexo causal queda roto si entre el acto y el daño media una situación de naturaleza completamente imprevisible e inevitable, es decir, de fuerza mayor, pero si el hecho es previsible y está asociado al riesgo de la actividad, se tratará de un caso fortuito, que debe ser previsto por quien realiza las actividades arriesgadas.

Se rompería, en algún caso, el nexo causal en el caso de un tercero que no sea auxiliar ni dependiente del demandado, siempre que quien realiza la actividad arriesgada extreme la diligencia, impidiendo que la actuación de un tercero pueda desencadenar daños.

La culpa de la víctima rompe el nexo causal si es exclusiva pero no si concurre con la propia del autor (hecho que realzaría la indemnización).

108.5.8. Vías procesales y responsabilidad

Si la actividad dañosa es delictiva, la responsabilidad civil se decidirá en el procedimiento penal, salvo que la acción se reserve para un ulterior procedimiento civil. Normalmente, la responsabilidad comprende la reparación de daños y la posterior indemnización de daños y perjuicios.

Aunque la condenada sea la Administración, la reparación podrá ser in natura o por equivalente (costes de reposición y prevención).

Si el inmitente no tenía intención de causar daños, la indemnización no comprenderá todos los daños, sino sólo los que fueran consecuencia previsible de la actividad. Sólo existen límites cuantitativos a la indemnización en los daños por accidentes nucleares o en los producidos por hidrocarburos.

La Administración puede reclamar indemnizaciones por daños a bienes ambientales, pero no por daños a bienes de los particulares.

Si la competencia pública se ejercita correctamente, los perjudicados resultarán claramente favorecidos, pues se les exime de afrontar ellos un procedimiento civil, y se pone a su disposición la vía de apremio administrativa.

108.5.9. Responsabilidad y canon por contaminación

La responsabilidad por daños a particulares es independiente de que el inmi-

tente haya cumplido las órdenes previstas de restauración en las diferentes leyes.

A su vez, también es independiente de la satisfacción de los costes de restauración, incluido el satisfecho mediante el canon de vertido.

108.5.10. Prescripción

El código dispone un plazo de prescripción de un año de la acción para exigir responsabilidad civil, que se computa desde el día en que ocurrió la misma.

Deben distinguirse las siguientes posibilidades:

- Daños permanentes, originados por la subsistencia de los efectos de uno o varios actos dañosos instantáneos.
- Los daños que se producen continuamente por la persistencia de la actividad generadora de la inmisión.
- Los daños sucesivos en una cadena sucesiva de actos dañosos instantáneos.

Sólo en el caso de daños continuados, el plazo de prescripción anual no comienza a computarse hasta la producción de resultado dañoso definitivo, lo que no va a suceder mientras la actividad siga causando daños. En caso de agravación interior, el Tribunal Supremo entiende que el daño se constituiría como nuevo, con su propio plazo de prescripción.

108.5.11. Responsabilidad en Servicios Públicos

La Administración responde más rigurosamente que los particulares, pues lo hace aunque el servicio público haya funcionado adecuadamente (Art. 106.2. Constitución Española). Pese a esto, la Administración no es responsable de todo daño derivado de actividades con incidencia medioambiental; para ello, se requiere que la responsabilidad sea imputable a la Administración. Distinguiamos entre las siguientes situaciones:

1. No existe responsabilidad por la no realización de fines medioambientales.
2. La Administración responde de los daños causados por fuentes de riesgo que manipula directamente, siempre que aquellos sean realización de riesgo típico creado por el servicio público, con independencia de que este haya funcionado correctamente.
3. Si el daño no constituye la realización de un riesgo típico del servicio, entonces la Administración sólo es responsable si el servicio no funciona normalmente.
4. El otorgamiento de licencias como servicio público de intervención en actividades con incidencia medioambiental, no es de un por qué un criterio de imputación de responsabilidad.
5. En caso de actividades públicas por un tercero, la Administración sólo responderá: a) si es quien dirige la actividad del tercero; b) si el daño está causado por el cumplimiento de una

orden o condición impuesta por la Administración, o proyectos realizados por ella; c) si la autorización administrativa no resulta contraria a estándares normativos medioambientales.

108.5.12. Responsabilidad penal de los funcionarios públicos

El sujeto activo de los delitos contra el Medio Ambiente, son no sólo los particulares sino también los funcionarios públicos (art. 329 CP). La acción delictiva consiste en una acción u omisión (licencias ilegales, etc.). Se dan dos tipos de comportamiento:

- La conducta activa: el funcionario que informa favorablemente la concesión de licencias manifiestamente ilegales.
- La conducta omisiva: el incumplimiento de las obligaciones derivadas de la actividad inspectora de la Administración.

108.5.13. Responsabilidad Civil Objetiva en la Unión Europea

En la creación de la CEE en 1957, no se incluyó ningún capítulo dedicado a la política ambiental comunitaria.

Por ello, no existirá una verdadera política medioambiental hasta 1986, con la aprobación del Acta Única Europea. No obstante, se desarrollaron programas de acción a partir de 1972, en que se realizó una cumbre de Jefes de Estado en París.

Surge así el principio que supone que toda persona física o jurídica, ya sea de Derecho público o privado, responsable de una contaminación, debe pagar los gastos de las medidas necesarias para evitar o reducir esa contaminación, y debe cumplir con las normas y medidas que permitan alcanzar los objetivos de calidad exigidos.

A estos efectos, la recomendación 75/436 establece una serie de pautas, a fin de que los Estados miembros imputen de forma homogénea los costes originados al llevar a cabo la reducción de la contaminación, toda vez que la existencia de legislación distinta en los diferentes Estados miembros podría suponer distorsiones a la libre competencia y afectar a los intercambios entre los Doce.

108.5.14. El libro verde sobre la reparación del daño ecológico

Este libro apareció el 14 de mayo de 1993 con la idea de exponer los instrumentos más propicios para cubrir los costes derivados de la restauración de los daños causados al medio natural.

Concibe la Responsabilidad Civil como un instrumento capaz de imputar la responsabilidad de los costos de la restauración del ambiente, teniendo así, además, un carácter disuasorio, toda vez que supone la certeza de que se responderá financieramente si se causa algún daño o deterioro.

El papel de la Comisión y el Tribunal de Justicia

El Tratado de la Unión ofrece a la Comisión, como órgano de gestión y fiscalización, la posibilidad de que ante un incumplimiento de un Estado miembro, poner en marcha el procedimiento del artículo 169: Presentación de un dictamen motivado.

Si el Estado no se atuviera al dictamen anterior, y el Tribunal de Justicia declarara que este Estado miembro ha incumplido alguna de sus obligaciones, el Estado estará obligado, tras la sentencia del Tribunal de Justicia, a adoptar las medidas necesarias para su ejecución, y en caso de no hacerlo, podrá ser sancionado con una suma de tanto alzado o con una suma coercitiva.

108.5.15. Responsabilidad Civil Objetiva en España

Existen diversos instrumentos de Derecho privado. El Código Civil, en su artículo 590, habla de relaciones de vecindad. En su artículo 7.2 aparece la figura del abuso del derecho. El artículo 1902 considera al Medio Ambiente como un bien patrimonial, y por lo tanto existe la obligación de repararlo.

El artículo 1908 es más concreto, y trata supuestos de humos excesivos o emanaciones de cloacas.

En estos supuestos hablamos de Responsabilidad Subjetiva, basada en la culpa o negligencia del autor. La Responsabilidad Objetiva existirá en supuestos

expresamente contemplados por la Ley, como la energía nuclear (Ley 25/1964), caza (Ley de 1970), residuos tóxicos (Ley 20/86, Real Decreto 833/1988, Ley 1998), minas (Ley 22/73), etc., y otros supuestos que por concurrir causas muy especiales, la jurisprudencia de nuestro Tribunal Supremo ha aplicado este sistema de responsabilidad por riesgo, como es el caso del artículo 1908.3.

Competencias de los Tribunales civiles

La jurisdicción civil no sólo tendrá primacía en los conflictos entre personas físicas y jurídicas de naturaleza privada, sino que será más atractiva en aquellos supuestos derivados de actos en los que la Administración no actúa como poder en el ejercicio del *ius imperi*.

La jurisdicción contencioso-administrativa sólo podrá actuar en aquellos casos en los que se deduzcan pretensiones contra los actos de la Administración sujeta al derecho administrativo.

Tendencia objetivadora de la Responsabilidad Civil por daño ambiental

La doctrina jurisprudencial viene mostrando una profunda evolución del sistema de responsabilidad civil tradicional, que ha tenido lugar a partir de la revolución industrial y tecnológica. Se trata de la tutela aquiliana del Medio Ambiente y de cierta tendencia a la objetivación de la anterior responsabilidad.

En la mayoría de los casos no se trata de una verdadera responsabilidad objetiva, sino de un cambio en la concepción tradicional de la responsabilidad a través de la introducción en una pluralidad bastante amplia de supuestos, de la teoría del riesgo cuya circunstancia principal será la inversión de la carga de la prueba (derivada de la presunción de culpa).

Otros elementos «en mutación» de la Responsabilidad Civil

- a) *Daño ambiental*: Necesario, porque si no se produce, no existirá nada que reparar. El concepto abarca gran número de supuestos, desde patrimoniales a morales con *dannum emergens* y *lucrum cessans*. Este daño debe cumplir los requisitos de ser cierto, personal y directo.
- b) *Antijuridicidad de daño ambiental*: Nuestro Código Civil, en el artículo 1902, no menciona la antijuridicidad como requisito indispensable para apreciar la Responsabilidad Civil.
- c) *La relación de causalidad*: Es uno de los elementos más conflictivos a la hora de exigir responsabilidad por daño ambiental, ya que resulta difícil probar el nexo causal entre la actividad del sujeto, sea o no culposa o diligente, y el daño producido (las causas son múltiples e imposibles de determinar aisladamente). Para ello, se exige una indiscutible certeza probatoria y una apreciación del nexo causal como competencia exclusiva del juez.
- d) *La reparación del daño ambiental*: Con esto nos referimos tanto a medidas reparadoras *in natura* como de indemnización y prevención.
- e) *La legitimación activa*: Está legitimada para reclamar un daño, cualquier persona que lo haya sufrido. Existen tres sujetos susceptibles de tener legitimación activa: La Administración (como garante de los intereses colectivos), los particulares (en un solo caso, cuando dicho daño se haya producido en su propiedad) y las asociaciones (cuando estén legalmente habilitadas para la defensa y promoción de los daños e intereses legítimos del ambiente).
- f) *Plazo de prescripción*: La acción indemnizatoria propia de la responsabilidad civil extracontractual es, con carácter general, de un año, a contar desde que lo supo el agraviado (art. 1968.2 Código Civil). No obstante, determinadas leyes establecen plazos especiales. El cómputo del plazo se altera por la existencia de un procedimiento penal, comenzando el plazo de prescripción de la acción civil cuando se le notifica al interesado el sobreseimiento de la causa penal.

108.5.16. Responsabilidad Civil derivada de la penal

La Ley prevé la imposición de una pena para quienes de un modo más o menos directo, atentan contra el Medio Ambiente, explotando irracionalmente

ciertos recursos naturales o contaminándolos.

No se puede castigar dos veces a una misma persona por un mismo delito (no bis in idem) aplicando una sanción administrativa y otra penal, aunque el hecho cometido signifique una infracción administrativa y otra penal. La infracción administrativa debe considerarse absorbida o incluida por la infracción penal tal como ha reconocido el Tribunal Constitucional en su sentencia 2/1981 del 30 enero.

La consecuencia de la imputación de un delito o falta a una persona es la im-

posición de una pena mediante sentencia dictada por un juez o tribunal. La pena es el contenido de la responsabilidad penal. Las consecuencias de la infracción penal no se limitan a la responsabilidad penal; (intervienen el Estado y el delincuente), sino que el delito o falta puede haber generado daños o perjuicios a sus víctimas, naciendo la responsabilidad civil derivada de esa infracción penal que relaciona al delincuente con los perjudicados, y que consiste en restituir lo sustraído, reparar los daños y/o indemnizar los perjuicios. El trámite procesal puede acompañar al penal sin necesidad de iniciar un proceso civil específico.

CAPÍTULO 109

LOS INSTRUMENTOS DE ACCIÓN

En este capítulo hacemos las mismas observaciones que en el anterior: los instrumentos se describen bajo un punto de vista general de la contaminación, que siempre incluye la contaminación atmosférica.

109.1. ANÁLISIS AMBIENTAL Y PLANIFICACIÓN

109.1.1. Los grandes temas de ecología y desarrollo

El foro Internacional VII Centenario de la Universidad Complutense sugirió, en 1993, los problemas básicos del Medio Ambiente en Función del Desarrollo, y fueron:

- Efecto invernadero.
- Adelgazamiento de la capa de ozono.
- Deforestación.
- Biodiversidad.
- Problemas medioambientales propios de cada país.

Estos problemas generales son consecuencia de un desarrollo desordenado y sin control que sigue primando en gran parte del mundo.

Lo que buscamos es otra cosa: mejorar la calidad de vida de las personas sin dañar al Medio Ambiente.

Aquí surgen los dilemas Norte-Sur, Países industrializados-Países en vías de desarrollo, Ricos-Pobres.

¿Quién se desarrolla a costa de lo que sea? ¿Quién mantiene una producción gigantesca de contaminación o la frena? ¿Se puede ayudar a otros países? ¿Utilizan estos países apropiadamente los recursos que les han sido asignados? ¿Cómo se consigue que la población de este país coma todos los días?

Hay que buscar una respuesta apropiada a estas preguntas, y las contestaciones adecuadas deben incluir los puntos antes citados: el desarrollo, la protección del medio y la justicia social.

109.1.2. Planificación, desarrollo sostenible y economía

La macroeconomía no tiene dimensión medioambiental, pero a escalas inferiores, mirando la economía como una unidad dentro de un ecosistema, sí debe considerarse el Medio Ambiente, y sobre todo sus componentes.

Al transformarse el capital natural-renovable (recursos renovables) y no renovable (recursos no renovables)- en capital de producción humana (bienes de producción y bienes de consumo), estamos asistiendo a un proceso de crecimiento económico.

En este proceso, de actividad que se incrementa si hay crecimiento, aumenta a la vez la producción de residuos: es la transformación de los recursos en bienes, con generación de residuos, que son «divueltos» al medio.

Este proceso deberá buscar las mejores condiciones de transformación, que se corresponden con la *escala óptima* de *H.E. Daly*, que es aquella por la que el beneficio de producción marginal del capital de producción añadido es igual al coste medioambiental marginal del capital natural.

Para ello se sugiere desarrollar al mismo tiempo el análisis económico, el análisis ecológico, el técnico y el ético-social.

Seguidamente, y en función de estos análisis, se debe realizar una planificación apropiada que lleve al resultado final adecuado, que es el desarrollo sostenible.

109.1.3. Desarrollo y uso integral de los recursos en función del Medio Ambiente

Se trata de realizar estudios y análisis que lleven a optimizar el uso integral de los recursos en función del Medio Ambiente, es decir, una vez instrumentado el plan, se trata de cumplirlo según las líneas indicadas en el epígrafe anterior.

Para cumplir estos planes, deben estar muy claros los objetivos, y estos son, básicamente, los siguientes:

- Uso y aprovechamiento de los recursos.
- Desarrollo.
- Protección del Medio Ambiente.
- Elevación del nivel de vida.
- Cortar la emigración.

Una vez fijados los objetivos, el plan ha de basarse en una programación de actividades:

- *Información:*
 - Información sobre el territorio.
 - Información sobre sus recursos.
 - Información sobre todos los sectores implicados.
- *Actividades a potenciar o a desarrollar:*
 - Actividades compatibles con los recursos.
 - Actividades compatibles con la población.
 - Actividades diversas.
- *Planes de ordenación del desarrollo:*
 - Zonificación.

- Normativa.
 - Anteproyectos.
- *Análisis económico.*
- *Evaluación de los impactos ambientales.*
- *Financiación.*

109.2. LA LEGISLACIÓN

Véase la Parte correspondiente.

109.3. INSTRUMENTOS PARA LA GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL EN LA EMPRESA

109.3.1. Ecobalance o análisis del ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida (ACV) o ecobalance es un método analítico que permite evaluar los impactos sobre el Medio Ambiente de un producto, considerando todo su ciclo de vida, es decir *de la cuna a la tumba*. Como tal análisis, implica el estudio de una amplia gama de factores en cada etapa de la vida del producto, desde la selección de las materias primas a partir de las cuales se ha fabricado hasta que se elimina del mercado y se convierte en residuo, pasando por las fases de fabricación, distribución y consumo.

109.3.2. Declaración o informe anual

La publicación anual de un informe medioambiental permite a la empresa le-

gitimizar su política medioambiental, transmitiendo al público cual es la situación de sus instalaciones o de sus productos, las acciones realizadas en el último año, los objetivos planificados para el siguiente y la eficacia de su sistema de gestión medioambiental. Al ser un informe publicado periódicamente, el consumidor puede *evaluar*, a escala temporal, las mejoras medioambientales realizadas.

109.3.3. Auditorías y diagnósticos medioambientales

La auditoría medioambiental o AMA es un proceso de evaluación sistemática, documentada, periódica y objetiva de la eficacia de la organización del sistema de gestión y de los procedimientos destinados a la protección del medio ambiente, que tiene por objeto facilitar el control medioambiental y la adecuación de las políticas medioambientales de la empresa.

El objetivo general de una AMA es la identificación de cualquier problema - existente o potencial- relacionado con el Medio Ambiente, tomando siempre como base de partida la normativa medioambiental vigente. Sin embargo, dependiendo de la situación de la empresa, los objetivos de la AMA pueden ser más o menos precisos o estar más o menos limitados.

En líneas generales, los objetivos fundamentales comunes a cualquier AMA son:

- Conocer el estado medioambiental de la empresa, globalmente, es decir de

todas sus actividades e instalaciones, o bien parcialmente, si la auditoría está dirigida a un determinado centro de producción, a un determinado sector, a su producto, etc.

- Proporcionar cobertura legal a la empresa. La AMA permite identificar y documentar el grado de cumplimiento de la normativa medioambiental aplicable a la instalación o a la empresa. Uno de los problemas que suelen tener las empresas que solicitan una AMA, es el incumplimiento de la legislación medioambiental vigente o incluso el desconocimiento de la situación legal de su actividad.
- Informar a grupos interesados y para comunicar como se gestiona la problemática medioambiental en la empresa.
- Ecogestión empresarial. La AMA es un instrumento capaz de mejorar los resultados de la empresa en materia de medio ambiente y de implantar las bases de un adecuado sistema de gestión medioambiental.

La AMA surgió como un instrumento de aplicación voluntaria. El propio Reglamento Comunitario de Ecogestión y Ecoauditoría (Reglamento UE 1836/93), pensado para ser obligatorio en ciertos establecimientos industriales, es finalmente voluntario como consecuencia de la fuerte presión ejercida por el sector industrial durante la fase de discusión previa a la aprobación del Reglamento. Parece ser que esta situación cambiará en un futuro no muy lejano, en el que la AMA será un requisito administrativo para ciertas actividades, tal

como lo es, hoy día, la evaluación de impacto ambiental.

Independientemente del Reglamento europeo y de su condición de no obligatoriedad, la AMA está comenzando a exigirse como requisito fundamental para ciertas operaciones o en ciertas situaciones. Efectivamente, la AMA se ha convertido en un buen justificante, en una garantía escrita de la situación medioambiental de una empresa y de cómo ésta gestiona su problemática medioambiental.

Como consecuencia, a pesar de su actual carácter no reglamentario, ciertos países europeos exigen auditorías para situaciones tales como la obtención de permisos o licencias, de subvenciones, de contratos, para optar a concursos públicos, para la obtención de seguros medioambientales, etc.

En esta tesitura, la AMA se convierte en un instrumento fundamental para que las empresas afronten con competitividad una nueva etapa, por lo que se refiere a su gestión medioambiental. Así, la AMA aporta a la empresa una serie de beneficios, que varían de situación a situación, pero que la convierten en rentable, tales como:

- Ayuda a la conservación del Medio Ambiente y al cumplimiento de leyes, normas y estándares.
- Facilita la puesta en marcha por las empresas de sistemas internos de protección medioambiental.
- Da transparencia a la gestión medioambiental de la empresa.

- Facilita la comunicación externa y la comunicación interna a todos los niveles.
- Amplía el conocimiento sobre el estado de salud medioambiental de prácticas e instalaciones.
- Proporciona ventajas frente a la competencia, tales como el prestigio y una buena imagen.
- Incentiva a la innovación tecnológica.
- Mejora el rendimiento y la utilización de los recursos.
- Proporciona a la empresa una base de datos disponible para otras funciones.

109.3.4. Sistemas de ecoetiquetado

La ecoetiqueta o etiqueta ecológica es un logotipo que se otorga a ciertos productos, garantizando al consumidor que su incidencia sobre el medio ambiente es mínima, siempre en relación a ciertos productos de la misma categoría, es decir, con las mismas características de finalidad y uso. La ecoetiqueta garantiza que la industria mantiene sus compromisos fabricando productos «menos perjudiciales» para el Medio Ambiente en base a unos criterios ecológicos comunes para esa categoría de productos, determinados previamente por un organismo oficial competente, con la participación de la Administración y de otros grupos de interés (industriales, consumidores y ecologistas).

Uno de los principales objetivos de los sistemas de ecoetiquetado es facilitar

la información, la capacidad de selección y el criterio objetivo de los consumidores. El éxito de estos programas depende de la respuesta del propio consumidor. En efecto: la base del sistema consiste en la elección final del producto de consumo por el comprador según sus exigencias medioambientales.

109.3.5. Sistemas de gestión ambiental

La mejor herramienta o estrategia medioambiental de una empresa es, sin duda, el desarrollo de un sistema de gestión ambiental (SGM), con unos objetivos o principios medioambientales a medida de la situación de la empresa. Dichos objetivos se deben ir revisando periódicamente, y según se vayan cumpliendo se sustituirán por otros más estrictos.

La implantación de un SGM varía en cuanto a procedimiento y complejidad en función del tipo de sistema de certificación escogido. Efectivamente: la implantación de un SGM puede realizarse de acuerdo a unas normas o reglas que existen para ello, tanto a nivel nacional (UNE 77 801 94; BS 7750; IS 310), europeo (Reglamento 1836/93) o internacional (ISO 14.001). Se trata de un conjunto de normas técnicas que sirven de ayuda a todas aquellas empresas que quieran mejorar su situación respecto al Medio Ambiente, implantando, auditando y certificando/validando su SGM.

Cualquier SGM consta de cuatro grandes fases generales:

1. *Planificación*: Desarrollo de las metas y objetivos medioambientales y establecimiento de las estrategias para alcanzarlos y de los recursos para llevarla a cabo. La planificación marca el rumbo medioambiental de la organización y configura la política empresarial en materia de Medio Ambiente.
2. *Organización*: Establecimiento de la estructura organizativa (funciones, responsabilidades y autoridad) para coordinar eficazmente los recursos asignados al SGM.
3. *Aplicación*: Puesta en práctica del SGM establecido.
4. *Control*: Marco necesario para mejorar el SGM establecido en base a la identificación de los errores cometidos y para evitar que la organización se desvíe de los objetivos y metas medioambientales fijados. Los elementos clave de esta fase son la evaluación de los resultados obtenidos, la determinación de las acciones realizadas, el diagnóstico de nuevos problemas y el establecimiento y desarrollo de medidas correctoras. Asimismo, juegan un importante papel las auditorías medioambientales del SGM.

Además de tener en cuenta estas cuatro fases, la implantación de un SGM debe realizarse siempre en base a unos requisitos específicos, que varían ligeramente de un sistema de certificación a otro, y que a continuación enunciamos.

El primer paso a dar por la empresa es marcar una *política medioambiental*

de mejora continuada compatible con la política de la organización. Una vez establecida ésta, se debe realizar una *evaluación medioambiental* como diagnóstico de la situación de la empresa. Dicha evaluación se refleja por escrito en una *declaración medioambiental*. A partir del conocimiento real de la situación, se establecen unos *objetivos medioambientales*, cuantificables y dimensionados en el tiempo. Para conseguir los objetivos, se establece un *programa medioambiental* escrito que recoge las actividades o estrategias a desarrollar para la consecución y puesta en práctica de esos objetivos.

Con una periodicidad determinada, se establecerán *auditorías medioambientales* como mecanismos para la evaluación de la eficacia del sistema de gestión medioambiental, para la consecución de los objetivos medioambientales y para corregir desviaciones de la situación en un momento dado, según lo establecido por el compromiso escrito de la empresa recogido en el programa y en su política medioambiental.

El resultado escrito de esta auditoría es una *declaración medioambiental*, que una vez examinada por el organismo en cuestión y si se cumplen los requisitos, deberá ser distribuida al público. Se trata de un informe final de una auditoría o ciclo de ellas, donde se recogen las posibles desviaciones del SGM. Es una comprobación de que las intenciones se han materializado en resultados reales.

Por último, se deben destacar las ventajas que aporta la implantación de un SGM en cualquier empresa, especial-

mente si éste está certificado según algunas de las normas existentes. Efectivamente: está demostrado que aquellas organizaciones empresariales que ya han adoptado un SGM, han obtenido un mayor rendimiento de su actividad y unas evidentes mejoras competitivas.

109.3.6. Evaluaciones de impacto ambiental

Uno de los instrumentos más adecuados para la preservación del Medio Ambiente, recomendado por los organismos nacionales e internacionales (EPA, PNUMA, OCDE, UE), es la Evaluación de Impacto Ambiental (a partir de ahora EIA), que sin ser un freno para el desarrollo y el progreso, garantiza la acción preventiva y de corrección, en la fuente misma, de las alteraciones del Medio Ambiente.

La EIA es un procedimiento jurídico-administrativo que tiene por objeto la identificación, predicción, interpretación y comunicación de los impactos ambientales que una determinada actuación producirá en caso de ser ejecutada, así como la prevención, corrección y valoración de los mismos, todo ello con el fin de ser aceptada, modificada o rechazada por la Administración Pública competente.

Dentro de los instrumentos de gestión medioambiental existe una clasificación, según el estadio temporal de su aplicación, en dos tipos definidos: preventivos y correctivos (*D. Gomez Orea*, 1994). Los primeros se ponen en prácti-

ca cuando se abordan nuevos planes o proyectos, mientras que los segundos se aplican a actividades en funcionamiento. La EIA se encuentra entre los instrumentos preventivos ya que su finalidad es identificar, predecir, interpretar, prevenir y comunicar los efectos medioambientales de una determinada actuación en fase de proyecto.

La EIA nace en EE.UU. con la Ley de Política Ambiental de 1969, *National Environmental Policy Act* (NEPA). En aquel momento se define el concepto de EIA y se institucionaliza dicha actividad.

La EIA surge como consecuencia de la inadaptación de los métodos tradicionales de evaluación de proyectos, que no contemplaban la protección del medio físico, ni el uso racional de los recursos, ni los aspectos sociales de los mismos. Al no poseer los responsables públicos y privados una información real y completa en este sentido, se requerían nuevas metodologías que facilitaran la toma de decisiones, introduciendo en el proceso de evaluación los efectos medioambientales significativos derivados del proyecto en cuestión.

La EIA se convierte en un instrumento de verificación de la conformidad medioambiental de la actividad evaluada, proporcionando una información previa sobre el medio receptor de la misma, determinando su capacidad de acogida ante dicha acción y facilitando las siguientes decisiones:

- La elección racional de la mejor alternativa, si existieran varias, en cuanto al proyecto.

- La localización idónea de la instalación, si existieran varios lugares alternativos.
- La determinación de las medidas correctoras para anular los impactos evitables y minimizar los impactos residuales.

El papel de la EIA en los procesos de decisión sobre materia medioambiental es claro: Se trata de un instrumento de análisis de los pros y de los contras de las diferentes opciones, de modo que la decisión sobre la viabilidad y la conveniencia de un determinado proyecto será tomada con un conocimiento real y completo del problema.

De esta forma se valoran proyectos de todo tipo, como la construcción de un puerto o de un aeropuerto, el establecimiento de una industria química, el trazado de una vía de comunicación, la construcción de un embalse, la instalación de un vertedero, la de una central térmica o nuclear, etc.

En Europa, la EIA hace su aparición en los primeros Programas de Acción en materia de Medio Ambiente en 1973, 1977 y 1983, fundamentalmente en éste último año, que es cuando comienza a hablarse de prevención. Se introducen unos principios generales de evaluación de las repercusiones medioambientales en los procedimientos de autorización de ciertos proyectos, de forma que esta autorización sólo se otorgaba tras la indicada prospección ambiental.

En 1985 se adoptó la Directiva 85/337/CE, de 27 de junio de 1985, por la que se establecen los criterios genera-

les para la evaluación de impactos, así como los proyectos de evaluación obligatoria (Anexo I) y aquellos que serán contemplados como estimen los Estados miembros al trasponer la Directiva (Anexo II).

Después, tras más de 10 años desde su promulgación y con un cumplimiento muy desigual en los diferentes Estados miembros, dicha Directiva fué modificada por la Directiva 97/117/CE del Consejo, de 3 de marzo de 1997.

La Directiva 85/337/CE se traspuso a la legislación española mediante el Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental, en el que se indican los proyectos que deberán someterse al procedimiento de EIA. Dicha Ley se desarrolla mediante el Reglamento aprobado por el Real Decreto 1131/88, de 30 de septiembre. En él se indican los procesos administrativos y los requerimientos necesarios para ejecutar las EIA.

Como consecuencia de la aparición de la Directiva 87/117/CE, la legislación española se modifica también para adaptarse a las nuevas exigencias de la misma.

Posteriormente se ha ampliado la lista de proyectos de evaluación obligatoria y, aparte, en España, las Comunidades Autónomas pueden exigir estudios complementarios o equivalentes, totales o parciales (control de olores, limitación de ruidos, etc.).

La actual legislación española regula la obligación de someter a evalua-

ción de impacto ambiental una serie de actuaciones mediante la ejecución del denominado estudio de impacto ambiental (EsIA), sobre la base de una información exhaustiva proporcionada por el titular del proyecto, por la Administración, por las autoridades competentes y por la opinión pública involucrada. Posteriormente, dicho estudio de impacto ambiental se remitirá al órgano administrativo de medio ambiente competente, que autorizará el proyecto esta-

bleciendo las condiciones necesarias, o bien lo denegará.

En este sentido, conviene distinguir dos aspectos de fácil confusión: la evaluación de impacto ambiental (EIA) como procedimiento jurídico-administrativo, y el estudio de impacto ambiental (EsIA), estudio técnico-científico encaminado a identificar los impactos medioambientales derivados de una actuación concreta.

DECIMOCTAVA PARTE

Análisis económico de la contaminación atmosférica

CAPÍTULO 110

ECONOMÍA, DESARROLLO Y MEDIO AMBIENTE

110.1. DESARROLLO ECONÓMICO Y MEDIO AMBIENTE

El Medio Ambiente y el desarrollo económico no son términos contradictorios. Esto señalamos los técnicos del Medio Ambiente y lo hemos indicado repetidas veces, tanto en esta obra como en otras de nuestras publicaciones (véanse los tres primeros tomos de la Colección Ingeniería del Medio Ambiente. Ed. Mundi Prensa).

En España y en los demás países de la Unión Europea las preocupaciones como el desempleo o el desarrollo económico están ascendiendo constantemente en las consultas de opinión.

Muchos establecen el dilema desarrollo económico o protección del *Medio Ambiente*, e incluso, cuando aparecen problemas económicos serios, opinan que las acciones de protección del Medio Ambiente deben relegarse a un segundo plano, pues deben considerarse

como un lujo para épocas de bonanza (véase la evolución y el retraso de medidas limitantes de las emisiones a la atmósfera en USA, Reino Unido y Alemania en las últimas crisis energéticas y económicas).

Según *J. Theis* (Centre de Prospective et de Veille Scientifique. M.E.), la preocupación por la calidad de vida y por el Medio Ambiente está ligada al crecimiento económico: la demanda sobre el Medio Ambiente crece más rápidamente que la tasa de crecimiento si esta última es elevada, pero también decrece más rápidamente si la tasa disminuye.

Si se plantea sacrificar algunas de las preocupaciones graves a cambio de proteger el medio ambiente, es decir, si se pone un precio a pagar por una calidad del Medio Ambiente, las encuestas que reflejamos en esta obra indican la realidad a la hora de decidir.

La verdad es que los antecedentes siempre fueron de lucha contra el crecimiento económico, mostrándolo como

un enemigo del Medio Ambiente y por el contrario el medio ambiente, al amenazar al desarrollo económico, provoca destrucción de empleo. La realidad se ha visto como muy otra: un desarrollo sostenible y selectivo genera empleo, protege el medio ambiente e incluso el tratamiento adecuado de este último convierte la acción en una fuerza generadora de actividad industrial y de empleo (R. Roqueplo, 1986), como ocurre en la mayoría de los países de la Unión Europea.

Sin embargo, la opinión pública, a pesar de la presión de los medios de comunicación sobre la fuente de puestos de trabajo que suponen las actividades de protección del Medio Ambiente, tiene una visión pesimista, sobre todo en el sector no universitario, y sigue considerando el desarrollo (generador de empleo) y el medio ambiente (naturaleza intacta, etc.) como entidades casi antagónicas.

En España, las cifras que se manejan para el sector medioambiental, en su totalidad, rondan el millón de puestos de trabajo, incluyendo tanto las actividades directas como las indirectas. Esto significa un peso muy importante como actividad claramente generadora de empleo, y como consecuencia se convierte en un pilar del desarrollo económico.

Parece claro que dentro del desarrollo de un país, vale más prevenir que curar en lo que se refiere al Medio Ambiente: la prevención de la contaminación atmosférica siempre es mucho más rentable que la instalación de costosísimos sistemas de restauración del medio (reforestación de bosques contaminados, salud humana, etc.).

Es el caso de la anticontaminación versus descontaminación (véase nuestra publicación *Ecología Industrial*. Mundi Prensa, 1998).

110.2. PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO ECONÓMICO

La situación o, más bien, la evolución económica de los países, hace que las prioridades de la población puedan cambiar en el tiempo.

En unos países lo primero es comer, en otros la inseguridad personal, en otros, el desempleo, en otros los aspectos sanitarios, en otros la inmigración, etcétera.

Como es lógico, despuntan las necesidades elementales sobre las demás: primero comer, y hoy, no dentro de dos meses, etc.

Seguidamente, los valores se jerarquizan en la misma línea, y queda al final el medio ambiente como un lujo de último escalón, a tenerlo en cuenta una vez estén cubiertas o controladas otras preocupaciones más acuciantes.

A partir de estas ideas vemos que el Medio Ambiente y la calidad de vida están totalmente ligados al crecimiento y al desarrollo económicos.

Si el crecimiento económico es fuerte, la demanda de calidad, de protección y de restauración del Medio Ambiente es más fuerte; si ese desarrollo y crecimiento económico están a la baja, el as-

pecto medioambiental disminuye en su demanda mucho más que lo que baje el económico, es decir: el valor del Medio Ambiente está por encima o por debajo en el mismo sentido que vaya el desarrollo económico.

En las consultas extranjeras o en los sondeos que hemos realizado sobre los sacrificios que está dispuesta a realizar la población para proteger el Medio Ambiente, siempre dominan las prioridades económicas y de otra índole si el nivel económico es bajo, y toman importancia las medioambientales a medida que sube el nivel económico.

En esta idea, siempre tendrá más importancia el desempleo, por ejemplo, y más si algunos lo asocian en parte con las exigencias de calidad del Medio Ambiente, y no digamos los factores indicados al principio del epígrafe.

110.3. PRIORIDADES ENTRE LA ECONOMÍA Y EL MEDIO AMBIENTE

En el pensamiento general de la población, se manifiesta una opinión muy amplia de que la economía y el Medio Ambiente son dos conceptos poco menos que opuestos:

Si queremos desarrollo económico, olvidemos el Medio Ambiente. Si queremos luchar contra el desempleo, demos absoluta prioridad al desarrollo económico.

Se ha escrito mucho (empezando por la OCDE en 1978, etc.) sobre la genera-

ción de empleo como consecuencia de la realización de actividades de protección del Medio Ambiente. Se ha demostrado esta realidad en Alemania, en Holanda y en otros países, pero el concepto antitético prosigue en Francia y en España, aunque entre nosotros la idea va cambiando y ya se vislumbra —con hechos— que, efectivamente, las actividades en el sector (empresas especializadas, enseñanza, Administración, departamentos de medio ambiente en las industrias, etc.) generan empleo.

En nuestros sondeos, los Universitarios opinan que no aceptan el desarrollo económico a costa del Medio Ambiente, pero tampoco aceptan el otro extremo. Al final ven razonable un crecimiento económico (generador de empleo) en función del Medio Ambiente.

No aceptan el desempleo; en esto son radicales, como es lógico, igual que en los demás países; sin embargo, ya son capaces de matizar con el crecimiento económico, como indicamos: crecimiento pero teniendo en cuenta el Medio Ambiente.

En Dinamarca, Alemania y Holanda son muchos los que anteponen el Medio Ambiente al desarrollo económico (34, 31 y 31%, respectivamente, en 1993), pero la vía del crecimiento económico que tenga en cuenta el Medio Ambiente es aceptada mayoritariamente en todos los países de la Unión Europea (del 61 al 79% de los consultados en 1993), incluidos esos tres.

De todas maneras debemos tener en cuenta, al analizar las opiniones en estos

países, que llevan bastantes años sufriendo problemas de contaminación propia y transfronteriza: contaminación atmosférica, de los ríos y de las costas, numerosos vertederos urbanos e industriales incontrolados o controlados, etc., y es natural que la población esté muy sensibilizada a este respecto. A ello habrá que añadir su elevado nivel de vida como factor que potencia el interés por el Medio Ambiente, como ya hemos indicado.

110.4. INSTRUMENTOS ECONÓMICOS

Ya hemos indicado que se plantean diversas teorías económicas medioambientales, con diferentes tendencias.

Está claro que no parece existir otra vía real más que aceptar que no debemos tratar de eliminar la contaminación (contaminación cero), sino que se debe encontrar un óptimo social que mejore la calidad del medio ambiente respecto a un óptimo individual, ya que alcanzar un nivel de contaminación cero supone costos inaceptables socialmente.

Como la contaminación no se puede eliminar mientras las actividades económicas estén absorbiendo recursos naturales, habrá que intentar buscar sistemas que la reduzcan, como son:

- Reducción o eliminación de emisiones a la atmósfera.
- Reciclado de productos y materiales.
- Fabricación de productos más duraderos.

- Recuperación de productos.
- Mejora de procesos de forma que consuman menos recursos naturales.
- Uso ampliado de recursos naturales renovables.
- Tratamientos de la contaminación.

Debemos señalar al respecto que depurar el aire es dejarlo limpio extrayendo los contaminantes, es decir, estamos ante hechos de trasladar y concentrar contaminantes, no de eliminar. Lo mismo ocurre en la depuración del agua y en otros sectores.

Aparte de los sistemas indicados, el Estado deberá apoyar con diversos métodos estas líneas, interviniendo sobre la economía de mercado por dos vías:

- a) *Controles directos*. Se marcan límites a ciertas emisiones, vertidos y depósitos, lo que conlleva actividades jurídicas punitivas (de política, administrativas, penales, etc.).
- b) *Medidas dentro del mercado*. Se imponen tasas a las actividades contaminantes de las empresas, lo que tiene carácter coactivo.

Dentro de todas las posibilidades de actuación, las básicas son las siguientes:

Impuestos

Pueden cargarse a cualquiera de estas dos vías:

- a) *A actividades contaminantes*. En este caso, es bastante complicado fijar el nivel del impuesto sin conocer el

nivel de producción que sería admisible desde el punto de vista de la protección del medio ambiente.

Además, se debe disponer de una normativa de niveles de contaminación que sea socialmente aceptable.

- b) *A una evaluación de costo social.* En este segundo caso también es difícil cuantificar el costo social, y la única forma de orientarse es realizar en cada situación un análisis costo/beneficio.

En ambos casos, el impuesto aumenta los costos de producción del bien causante de la contaminación, por lo que internaliza el coste externo de la contaminación en la estructura contable de la empresa, quien en consecuencia ha de revisar su estrategia de maximización del beneficio a un precio más elevado con volúmenes de transacción más bajos.

Subvenciones

Los apoyos de este tipo sirven como incentivos para instalar equipos para la descontaminación y para realizar estudios de previsión (anticontaminación).

Si existen unos niveles (normas) preestablecidos de límites de concentración de contaminantes, se pueden conceder subvenciones según el grado de contaminación.

Por otra parte, habrá que buscar las vías de financiación de esas subvenciones. Por el momento, la Unión Europea ha establecido diversos fondos de apo-

yo, que se completan con ayudas provenientes del Gobierno Central, de las Comunidades Autónomas y de algunos Ayuntamientos.

Certificados

Este sistema, propuesto en varios países, da derecho al industrial a realizar una actividad contaminante determinada, limitada en el tiempo y en el volumen, con un principio equivalente al de comercio internacional: el Estado subasta licencias de importación, lo que hace que vaya subiendo su precio hasta la eliminación de las rentas de esas importaciones.

En el equivalente medioambiental, el número de certificados que se subastan disminuye según sea la importancia de los daños achacados a la actividad económica, lo que hace que se incremente el costo que tiene que pagar el causante de la contaminación.

Se debe tener en cuenta que también hay que valorar el costo social, para lo cual es necesario establecer el correspondiente procedimiento administrativo.

Depósitos para el uso de recursos no renovables

Los industriales que utilicen estos recursos y que contaminen, deberán depositar ciertas cantidades de dinero, que les serán reembolsadas cuando demuestren que hacen un uso correcto de esos recursos, de forma que no contaminan el medio ambiente.

CAPÍTULO 111

COSTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

111.1. BASES GENERALES

La contaminación atmosférica implica una serie de perturbaciones económicas tangibles e intangibles que se traducen en costos y cargas financieras de equipos de depuración, de daños a la salud, etc., como ya hemos indicado, que se trasladan a costes de la gestión sanitaria, a costos por daños y mantenimiento de los materiales, y a costos por daños a la vegetación y a la fauna.

Estos costos afectan a los productos y a la competitividad de muchas estructuras productivas.

Las inversiones en este campo vendrán condicionadas por los costos: si llega un momento en que los costos de las instalaciones de tratamiento se igualan con el valor de los daños sufridos, puede compensar no hacer nada, y no digamos si los superan.

En este capítulo se estudiarán los niveles óptimos de control de la contaminación atmosférica, los costos básicos y

definidos, los costos de las emisiones y finalmente los costos de la gestión medioambiental de la empresa.

111.2. NIVELES ÓPTIMOS DE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Para definir un nivel óptimo de control de la contaminación atmosférica, relacionamos los costos externos con los gastos de tratamiento de los contaminantes.

Lo mismo que indicábamos antes, la actividad económica contaminante se detendrá cuando el crecimiento de los gastos de tratamiento se compense exactamente con una disminución de los costos externos. Antes, compensa descontaminar; después será más caro descontaminar que sufrir los daños, y aquí es donde debe incidir directamente la normativa legal en cuanto a límites de emisión, etc., en lo que se refiere a la contaminación atmosférica.

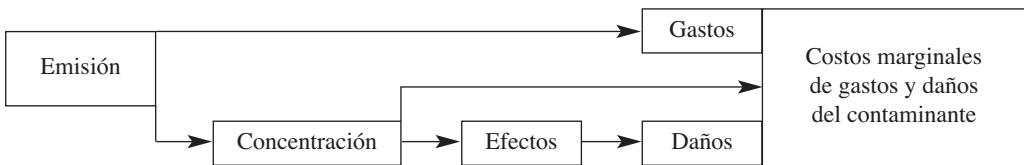
Se trata, en resumidas cuentas, de determinar la estrategia que permita alcanzar un nivel óptimo de control de la contaminación al menor costo posible.

Ciertos autores establecen un modelo en el que se reflejan las relaciones entre las emisiones, las concentraciones controladas, los costos estimados de daños y los gastos de tratamiento.

Se parte de la base de que solo hay un agente contaminante, o varios, pero referidos a uno solo (en unidades equivalentes, por ejemplo).

En el esquema adjunto se indica el modelo técnico-económico y las relaciones entre los daños y el tratamiento.

**MODELO BÁSICO DE CONTAMINACIÓN
(RELACIÓN DAÑOS-COSTES DE TRATAMIENTO)**



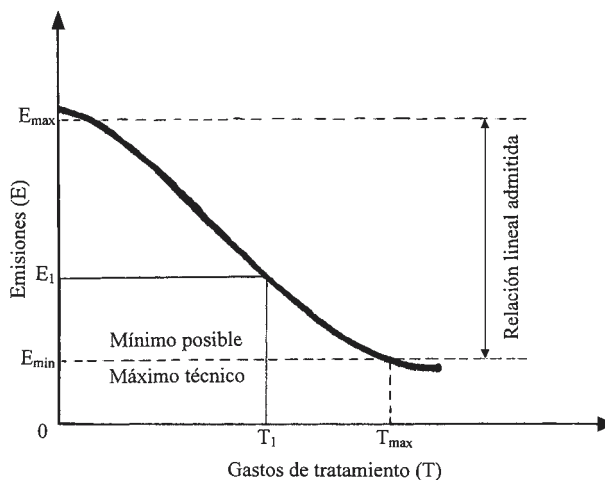
La relación emisiones-gastos de tratamiento indica el costo suplementario que supone reducir las emisiones.

En el gráfico adjunto se muestra esa relación.

Se puede establecer una relación lineal si nos encontramos entre un máximo de emisiones tolerable y un mínimo.

Las emisiones serán máximas si no existe control.

RELACIÓN EMISIONES-GASTOS DE TRATAMIENTO



En el dibujo, E_1 es la situación real y T_1 son los gastos correspondientes.

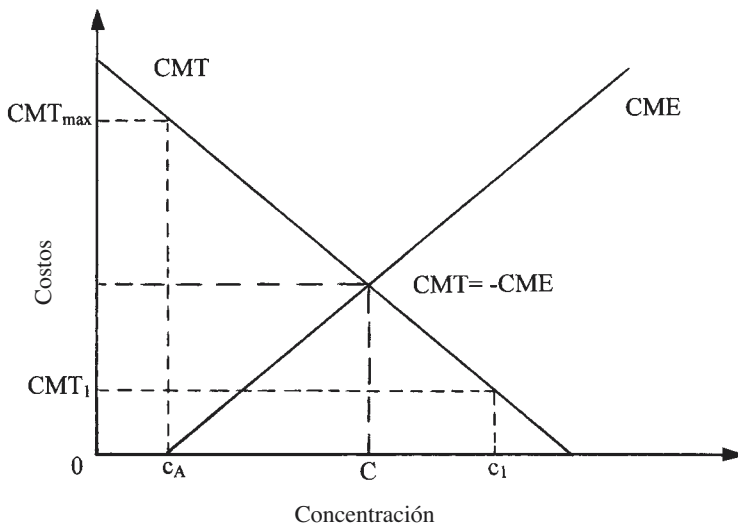
E_{\min} es el mínimo posible de emisión debida a la actividad en la zona de que se trate, con un T_{\max} como nivel de gasto asociado al máximo técnico.

Por otra parte, se pueden establecer las relaciones emisión-concentración y concentración-daños, con las curvas correspondientes.

A partir de estos análisis y de otros similares, se puede desarrollar un modelo general de daños y de gastos de tratamiento de los contaminantes atmosféricos.

En este modelo se comprueba que el aumento de los gastos de tratamiento se compensa ampliamente con la disminución de los costos externos, como se puede observar en la figura adjunta,

COSTO MARGINAL EXTERNO Y GASTO MARGINAL DE TRATAMIENTO



donde:

CME = Costo marginal externo.

CMT = Costo marginal de tratamiento de los contaminantes.

Para una concentración de contaminantes c_1 se tiene un CME superior al CMT .

Normalmente, $CME > CMT$

Así, se puede reducir la concentración del contaminante hasta C , con lo que se llegará a que $CME = -CMT$.

Si se sigue reduciendo la concentración, el CMT ya superará al CME , por lo que C establecerá el nivel óptimo económico de contaminación.

Sobre estos análisis debemos señalar que se debe tener en cuenta, independientemente de las curvas y de los niveles óptimos de control, que estamos en un medio dinámico, pues la atmósfera, aún dentro de unos límites, es un medio cambiante, y particularmente en los factores meteorológicos, que son los que más nos afectan, que pueden existir sinergismos (asimilables en las curvas), y que pueden presentarse efectos acumulativos y efectos irreversibles, cosa que, por desgracia, suele ser bastante frecuente.

111.3. LOS COSTOS DEL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

En principio, los costos de este control dependen de los siguientes factores:

- Límites del nivel de contaminación atmosférica que se quieren alcanzar.
- Límites legales que marca la Norma.
- Técnicas de tratamiento.
- Evolución de la tecnología.
- Normas de calidad del medio.

Tanto los beneficios que se consiguen con los tratamientos de los contaminantes atmosféricos, como los daños que provoca su acción, dependen, como es lógico, de la calidad del aire.

Aquí topamos con algo que ya hemos indicado repetidas veces a lo largo de esta obra: ¿Cuáles son los beneficios reales, tanto tangibles como intangibles?

En función de esos beneficios los costos o, mejor, el nivel de costos, serán asumidos o no por la población. Cuanto mejor se vean esos beneficios, más alto será el nivel de costos que aceptará la población para tratar las emisiones.

Por otra parte, los daños se encuentran en la misma situación: hay unos daños tangibles y visibles y otros invisibles.

Si la población los percibe, aceptará mejor los gastos en su control, cosa que no ocurre si se le dice que existen pero no los toca.

Ya hemos indicado los daños a la salud y a los materiales en otros capítulos y las tecnologías de tratamiento, quedando así la posible inversión en tratamiento pendiente de estos costos.

Al final, de lo que se trata es de conseguir unos niveles de calidad del aire conformes con las exigencias sociales y legales al menor costo posible.

111.4. LOS COSTOS BÁSICOS Y DEFINIDOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN FUNCIÓN DE LAS LIMITACIONES LEGALES

En principio se trata de reducir la contaminación atmosférica mediante medidas técnicas por una parte, y con medidas de actividad de policía por otra, todo ello dentro de una normativa legal que trata de que el contaminador asuma los costos de esa reducción de la conta-

minación atmosférica (principio de que *el que contamina paga*).

Se busca además, en otro concepto, reducir el consumo de materias primas, reciclar y recuperar, de manera que la contaminación atmosférica se vea reducida por esta otra vía.

Entre todas ellas surgen, como es lógico, los instrumentos económicos de regulación, y entre ellos los impuestos y los incentivos.

Por otra parte, insistimos en que para comparar es necesario valorar, y esta valoración en el tema de la contaminación atmosférica es muy compleja.

En general, para evaluar y calcular costos existen varios métodos convencionales, como son:

- Método de los costes evitados o producidos.
- Método del coste de viaje.
- Método de los precios hedónicos.
- Método de la valoración contingente.
- Sistemas multicriterio.

Con el método más apropiado a cada caso se calculan los costes y se realizan las valoraciones.

Con estas valoraciones se desarrollará un modelo donde se identificarán los niveles óptimos de control de la contaminación atmosférica, de acuerdo con todo lo indicado.

111.5. COSTOS DE LA GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL EN LA EMPRESA (ORIENTADA A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA)

A la hora de estudiar la situación medioambiental de una empresa, un aspecto muy especial es la realización de un análisis de costos del proceso. No cabe duda que conforme ha ido avanzando el nivel industrial de los países, estos costos asociados a la gestión medioambiental han ido creciendo, pues la normativa que regula temas como las emisiones gaseosas o el tratamiento de los residuos, se ha ido haciendo cada vez más estricta, obligando al empleo de lavadores de gases, filtros, incineradores, depuradoras, vertederos controlados, y en general al uso de toda clase de sistemas de depuración industrial.

Por otra parte, cuando se realiza un análisis de costos, se puede desglosar en etapas de carácter temporal. El número de etapas es variable y será función de la precisión que se quiera obtener. En este apartado, a diferencia de la clasificación indicada según los costos básicos, supondremos cuatro niveles sucesivos, que serán:

- Costos inmediatos.
- Costos eventuales.
- Costos encubiertos.
- Costos imprevisibles.

a) Costos inmediatos

Los costes inmediatos se refieren a los que se derivan directamente de la

evaluación del proceso industrial. La relación de estos costos debe analizarse y presentarse sectorialmente y de la manera más específica posible. En este grupo deben incluirse conceptos tales como el costo operativo de la infraestructura instalada, con el fin de tratar los residuos producidos.

Este costo operativo comprende:

- Filtros, lavadores de gases, ciclones, separadores, sistemas de combustión de gases o de partículas, etc.
- Costos de mantenimiento.
- Gastos de laboratorio en concepto de muestreo y análisis de las sustancias tratadas (sondas de captación, muestreadores, etc.).
- Contratación de servicios ajenos a la empresa para el manipulado de los contaminantes tratados (recogida y transporte).
- Impuestos derivados del tratamiento.
- Licencias, permisos y seguros necesarios para llevar a cabo la operación.

b) Costos eventuales

En los costos eventuales se engloban aquellos que pueden surgir como resultado de infracciones de la normativa vigente en lo referente a Medio Ambiente.

La naturaleza de estos costos comprende, entre otros:

- Costos jurídicos debidos a demandas presentadas contra la empresa.

- Saneamiento de áreas naturales cuyo equilibrio ha sido perturbado por las emisiones producidas por la empresa.
- Indemnización a miembros del personal de la planta que hayan podido verse afectados al tratar las emisiones.
- Indemnizaciones y subvenciones a habitantes de poblaciones cercanas que hayan podido ver dañada su salud o degradados sus bienes a causa de las actividades de la empresa (casos típicos que producen los SO_x , el F, etc.).
- Contribución solidaria a la instalación o renovación de la infraestructura que necesite otra compañía para el tratamiento de las emisiones.

A la hora de evaluar estos costos, es importante un conocimiento profundo de la legislación medioambiental vigente, a fin de poder identificar los aspectos de la empresa que podrían estar en desacuerdo con ésta y poder cuantificar las penas económicas que en cada caso serán aplicadas.

c) Costos encubiertos

El tercer apartado, de costos encubiertos, se refiere a aquellos que no pueden evaluarse analizando el programa de gestión medioambiental, aunque es importante contar con ellos a la hora de realizar el análisis de costes.

Algunos de los costos de este tipo podrían ser:

- Costes derivados de una disminución de la producción, que puede ser debi-

- da al requerimiento de una mayor cantidad de recursos destinados al tratamiento de las emisiones.
- Tasas de tipo administrativo incluidas en los trámites burocráticos necesarios.
 - Costos debidos a períodos en que parte del personal se encuentre enfermo por causa de las emisiones.
 - Costos producidos por la renovación de los permisos, licencias y seguros necesarios para el tratamiento de las emisiones.
 - Gastos debidos a la aplicación de medidas de seguridad y de medidas destinadas a garantizar un grado de higiene aceptable, etc.

d) Costos imprevisibles

Clasificamos como costos imprevisibles aquellos que no son derivados del programa de gestión medioambiental, cuya evaluación se presenta muy difícil de realizar.

Entre otros factores que pueden producir este tipo de costos, señalamos:

- La actuación de grupos verdes o ecologistas, que pueden presentar denuncias contra la actuación de la empresa.
- Contenciosos con los sindicatos a que está adscrito el personal de la empresa, debidos a situaciones de falta de seguridad o higiene.

- Respuesta negativa de los consumidores ante la postura de la empresa, lo que puede provocar una caída en la venta de los productos.

En la mayoría de los casos, cuando una empresa ha de hacer frente a la corrección de problemas medioambientales derivados de sus actividades, lo primero que busca es que las medidas a tomar para el control de la contaminación le supongan, por un lado, unos costes mínimos, y por otro, la menor perturbación posible sobre sus actividades, es decir, aquellas soluciones que le supongan un mínimo esfuerzo global.

111.6. COSTOS MEDIOAMBIENTALES DE LA EMPRESA

Son los gastos que sufre la empresa a causa de los aspectos medioambientales que estén relacionados con ella.

La carga de estos costos se suele hacer en las partidas de gastos generales, distribuyéndola entre los componentes de la empresa (secciones, departamentos, procesos o productos), sin analizar cual es la participación real de cada componente de la empresa en esos gastos.

Los costos medioambientales pueden clasificarse como se indica en la tabla adjunta.

COSTOS MEDIOAMBIENTALES

Costos Internos	Prevención	Evaluación	De sistemas de gestión medioambiental De reglamentos De riesgos Del ciclo de vida del producto Estudio de proveedores		
		Implantación	De sistemas de gestión medioambiental De sistemas de tratamiento de las emisiones		
		Equipos de control	Emisiones Vertidos Residuos sólidos Ruido		
		Formación	Seminarios Cursos, Congresos		
		Información	Folletos Libros TV Radio Conferencias Mesas redondas		
	Mala gestión	Emisiones	Producción en exceso		
		Materias primas	Consumo en exceso		
		Envases y embalajes	Uso inapropiado Mala calidad medioambiental		
		Imagen	Ante clientes y proveedores, con efectos graves en cuenta de resultados		
	Legales	Legislación vigente	Permisos Cánones Licencias Seguros		
		Responsabilidades	Sanciones Restauración Indemnizaciones Derechos de propiedad		
	Costos externos	Sociales	Pérdida de valor	De uso De opción De existencia	Real De posible uso Por estar ahí
			Intangibles indirectos	Riesgos potencias Impactos potenciales	
		Del cliente	Proviene de los impactos medioambientales de la empresa proveedora.		

CAPÍTULO 112

CONSECUENCIAS ECONÓMICAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica, por el mero hecho de afectar a la salud humana o a los materiales, o por dañar a la vegetación y a la fauna, perturba la situación económica del sector implicado, como se ha indicado en los capítulos anteriores.

Los costos sanitarios se ven fuertemente incrementados por pérdidas de rendimiento, por ausentismo laboral y por otras anomalías que son todas consecuencia de la contaminación atmosférica.

Los estudios realizados, de los que algunos se incluyen en las citas bibliográficas de la Parte correspondiente de esta obra, muestran que las perturbaciones básicas sobre la salud son:

- Molestias por olores.
- Irritación de las vías respiratorias.
- Irritación de ojos.
- Alteraciones de la función pulmonar.
- Sinergismos en asma y catarros.

- Bronquitis crónica y aguda.
- Riesgos de cáncer de pulmón.
- Riesgos de enfermedades cardiovasculares.
- Perturbaciones del sistema nervioso central.
- Alteraciones enzimáticas.
- Aumento de la tasa de mortalidad.

Estas perturbaciones se han comprobado fundamentalmente en empresas e institutos de investigación de Francia (PAARC), Alemania (Renania del Norte, Westfalia, etc.), Estados Unidos (NRC), Suiza (IMSP de Ginebra, SMS de Basilea, etc.).

Los factores básicos que afectan a la salud son:

- Intensidad de las emisiones.
- Cantidad.
- Proximidad.
- Carácter del agente contaminante.

- Condiciones ambientales (clima, altitud, topografía).
- Medidas de protección posibles.
- Sensibilidad al agente contaminante a nivel individual.
- Sinergismos.

Por lo que se refiere a las cosechas, al bajar en su rendimiento sufren una perturbación económica directa que es posible evaluar con mayor o menor exactitud con fórmulas o sistemas de cálculo indicados en la bibliografía (Seoáñez, M. 1978, etc.). Los pastizales y las masas forestales también se ven afectados desde el punto de vista económico, al sufrir pérdidas en producción, crecimiento, reproducción y de calidad general de los productos. Por otra parte, la contaminación atmosférica afecta además indirectamente a la economía de las explotaciones agrarias al debilitar a la vegetación y hacerla más propensa de lo normal a ataques de enfermedades y plagas, y en consecuencia, al hacerse necesaria la toma de precauciones adicionales de tipo fitosanitario que de otro modo no existirían.

Al degradarse una masa forestal o unos pastizales de un área de interés turístico o paisajístico, automáticamente empieza a perderse su principal punto de atracción, con lo cual el daño económico, difícil de cuantificar, se manifiesta en todos los sectores relacionados, como pueden ser hostelería, servicios, alimentación, combustibles, etc.

Por lo que se refiere a los materiales, las consecuencias económicas de su degradación son evidentes. Existen

industrias que por su tipo de actividad generan gases químicamente muy activos, que si no son tratados antes de la emisión, corroen materiales metálicos y destruyen materiales de construcción, con el costo anual de mantenimiento y restauración que ello implica. A pesar de esto, muchas industrias en España asumen este gasto sin considerar que su amortización, tanto en inversión directa como en inversión indirecta (imagen de la empresa), puede ser rapidísima.

En otro orden de cosas, una contaminación atmosférica elevada en una zona determinada provoca un decrecimiento del valor del suelo al disminuir la demanda para el establecimiento de nuevas actividades, al rechazar tanto la dirección de la empresa como sus trabajadores una ubicación nada atractiva y de mala imagen de partida.

Un caso típico es la pérdida de valor del suelo en zonas residenciales donde las aguas residuales, al circular sin tratar por arroyos próximos, generan unos olores tales, que provocan un fuerte rechazo por parte de la población y por parte de los habitantes potenciales.

Finalmente, y este es un tema importante en muchos casos, la emisión de contaminantes, aparte de la mala imagen que transmite, puede generar demandas, denuncias, multas, sanciones y actividades judiciales muy negativas para la empresa que los genera desde todos los puntos de vista, incluido, por supuesto, el económico.

CAPÍTULO 113

MODELO Y PLAN DE ESTUDIO ECONÓMICO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN UN TERRITORIO

113.1. BASES GENERALES DEL PLAN

Lo mismo que se realizan estudios de ordenación del territorio, planes de optimización del uso de los recursos, inventarios medioambientales, o análisis ambiental territorial, a veces puede ser muy importante realizar en zonas industriales, en zonas urbanas o en áreas con especiales circunstancias de contaminación atmosférica, estudios que definan tanto la situación de la calidad del aire en el territorio como una valoración económica de los costos que supondría una mejora del ambiente atmosférico.

Un estudio de este tipo puede ser útil para cualquiera de las siguientes acciones:

- Procesos generales de toma de decisiones a nivel territorial.
- Planeamiento de inversiones en descontaminación.

- Planeamiento de inversiones en anti-contaminación.
- Definición de prioridades en la inversión.
- Subvenciones y ayudas.
- Desarrollo de normativas.
- Planeamiento en desarrollo integral del territorio.
- Planes de descontaminación.

El Plan tiene pues una serie de objetivos que pueden conseguirse mediante la ejecución de un programa como el que se desarrolla a continuación.

113.2. PROGRAMA DEL ESTUDIO

- Análisis del medio físico:
 - Superficie.
 - Topografía.
 - Climatología.
- Análisis socioeconómico:
 - Población.

- Datos demográficos.
- Núcleos urbanos.
- Actividades industriales.
 - Núcleos industriales.
 - Industrias aisladas.
- Turismo y ocio.
- Infraestructura de transporte.
 - Aeropuertos.
 - Ferrocarriles.
 - Infraestructura de carreteras.
 - Puertos.
- Análisis de la contaminación atmosférica.
 - Control.
 - Redes de control de inmisión.
 - Control de las emisiones.
 - Contaminantes.
 - Cartografía de la contaminación atmosférica.
 - Daños.
 - Salud humana.
 - Flora.
 - Fauna.
 - Materiales.
 - Turismo.
- Análisis económico.
 - Análisis económico de la mortalidad.
 - Análisis económico de la movilidad (tratamientos sanitarios).
 - Costes y valoración de los daños en el medio forestal.
 - Costes y valoración de los daños en la agricultura.
 - Costes y valoración de los daños en la ganadería.
 - Costes y valoración de los daños en los materiales.
 - Edificios.
 - Infraestructura.
 - Vehículos.
 - Mobiliario urbano.
 - Áreas residenciales.
 - Pinturas.
 - Material metálico.
 - Naves e instalaciones industriales.
 - Valoración de daños sobre el turismo y ocio.
 - Pérdida general de bienestar.
- Diseño del plan de inversiones.
- Definición de prioridades.

DECIMONOVENA PARTE

Legislación y normativa vigente

CAPÍTULO 114

LÍNEAS GENERALES DE LA LEGISLACIÓN MEDIOAMBIENTAL

En esta Parte se desarrolla una visión integral sobre la legislación y normativa vigentes en materia de contaminación atmosférica, para lo cual consideramos imprescindible realizar previamente un análisis global sobre los aspectos del Derecho Medioambiental que tienen especial incidencia en el tema que nos ocupa, como son:

- El Derecho constitucional.
- El Derecho basado en el Derecho Romano.
- El Derecho Internacional.
- La Costumbre.
- El Derecho Penal.
- La Responsabilidad Civil.

114.1. EL DERECHO CONSTITUCIONAL

114.1.1. El Problema general

En las ideas del Profesor G. Escobar (1995), una Constitución (la española),

en el tema del Medio Ambiente, tiene una función que ocupa tres áreas básicas y relacionadas entre sí: reconocer un derecho subjetivo del que todos son titulares, determinar una labor específica, propia de los poderes públicos, y delimitar el Medio Ambiente como materia competencial, que ha de ser tratada de forma coordinada por los Organos responsables (en la cita, al ser el caso de España, se refiere a la Unión Europea, a la Administración Central del Estado, a las Comunidades Autónomas y a la Administración Local o Municipal).

Las últimas Constituciones desarrolladas en el mundo (desde 1975), tiene todas referencias al Medio Ambiente.

La función programática de una Constitución, al tener una serie de objetivos de gran importancia social (función social, bien común, etc.), ha de incluir los problemas medioambientales como un elemento más que ha de tutelar el Estado (depende de la política estatal, defiende la seguridad de las generaciones futuras, etc.).

El Derecho Constitucional ha de tener en cuenta, pues, el Medio Ambiente, regulando solamente los aspectos esenciales (bien común y necesidades básicas de la población), y dejando la posibilidad de enfoque a diversas opciones de articulación de la política medioambiental.

114.1.2. La Constitución Europea

Hemos realizado un pequeño análisis de Derecho comparado de las Constituciones de Alemania, Grecia, Portugal, Italia, Suiza, Colombia, Holanda y España.

En ellas observamos, como ya hemos indicado, que el tema medioambiental se tiene en cuenta solamente desde los años 70, y es probable que esto indujera a hacer la referencia en el Acta Única Europea en 1985 y a introducir, en el Tratado de la Unión Europea de 1992, algunas modificaciones importantes.

La normativa europea incluye tres aspectos:

- Objetivos y principios para la política comunitaria.
- Procedimientos de toma de decisiones.
- Distribución de competencias.

Desde 1992 se promueve un *crecimiento sostenible y no inflacionista que respete el Medio Ambiente* (Art. 2) y una política del medio ambiente (Art. 3.K).

Según el Artículo 130 R del Tratado de la Unión Europea, los objetivos de la

política medioambiental de la Comunidad son la conservación, la protección y la mejora de la calidad del Medio Ambiente, la protección de la salud de las personas; la utilización prudente y racional de los recursos naturales y el fomento de medidas a escala internacional destinadas a hacer frente a los problemas regionales o mundiales del Medio Ambiente.

Asimismo, este Artículo 130 R indica que la política medioambiental de la Comunidad tendrá como objetivo alcanzar un nivel de protección elevado, teniendo presente la diversidad de situaciones existentes en las distintas regiones de la Comunidad.

La configuración de la política medioambiental de la Unión Europea determina tres principios básicos que son:

- Principio de cautela y acción preventiva.
- Principio de corrección de los atentados al Medio Ambiente preferentemente en la fuente misma.
- Principio de *quien contamina, paga*.

114.1.3. Concepto constitucional de Medio Ambiente

Según los textos de los países citados en el epígrafe anterior, el Medio Ambiente es interpretado así:

- El Medio Ambiente parece algo que debe ser defendido y restaurado mediante el uso racional de todos los recursos naturales.

- El Medio Ambiente es un bien que puede ser dañado, reparado no (siempre) o restaurado.
- Medio Ambiente y recursos naturales son cosas diferentes, pero están muy relacionados: el Medio Ambiente solo puede defenderse mediante la utilización racional de los recursos naturales.
- En la Constitución Española (art. 45) se define como la preservación de las propiedades de aquellos bienes o recursos naturales que resulten imprescindibles para el mantenimiento del equilibrio ecológico.

En estas ideas y matizando bastante, creemos que se pueden orientar las líneas medioambientales hacia una protección o restauración del medio físico en que vivimos y del medio socioeconómico en que nos desenvolvemos, incluyendo en estos dos conceptos todos los componentes bióticos, abióticos, sociales, culturales y económicos presentes en cada caso.

114.1.4. Tareas y funciones del Estado

Las líneas básicas de actuación de los poderes públicos son:

Prevención

Ha de prevalecer siempre la política preventiva sobre la represiva, lo que exige el mantenimiento de una política medioambiental activa, y una tutela de los bienes medioambientales que los proteja.

Restauración

Se ha de buscar la reparación de los daños causados al medio mediante el restablecimiento del equilibrio ecológico, intentando volver a la situación inmediatamente anterior a la agresión, aunque con los matices correspondientes de qué situación y calidad del medio se debe conseguir en cada caso.

Sanción

Cuando existen unas normas deberán existir unas sanciones, y en este caso esas sanciones serán penales o administrativas, y siempre en la línea de reparar el daño causado.

Las matizaciones aquí son muy importantes, pues pueden presentarse situaciones como las siguientes:

- Límites entre el injusto penal y el injusto administrativo. En este caso una ley general del Medio Ambiente resuelve cualquier disfuncionalidad (véase el Sistema Nacional Ambiental o Ley 99 de diciembre de 1993 y Decretos reglamentarios de Colombia).
- Determinación exacta de la conducta punible. Las Leyes y Reglamentos por una parte, y la definición constitucional de medio ambiente por otra, darán la orientación sobre los bienes jurídicos que se protegen.
- Obligación de reparar el daño causado.

Se deben separar el sujeto sancionado y el sujeto obligado a reparar el daño causado. Además, la Administración de-

be tener una responsabilidad ilimitada en caso de daños al medio ambiente (art. 45 y art. 106. 2. de la Constitución Española; Constituição Portuguesa; Umweltrechts de Alemania, etc.).

* * *

En otro orden de cosas, no se puede olvidar que las funciones del Estado son:

- Legislación.
- Administración.
- Jurisdicción.

Estas funciones, desarrolladas en actuaciones completas dentro del mandato a los poderes públicos de protección del Medio Ambiente, completan lo antes indicado referente a las tareas del Estado.

114.1.5. Competencias

Cada comunidad de países (Unión Europea, EE.UU., CEI, etc.) y cada país, deben concretar siempre a qué organización o a qué órgano específico se asignan las competencias correspondientes en materia de Medio Ambiente.

En el caso de la Unión Europea, las competencias ordinarias se distribuyen así:

- Unión Europea.
- Organización central de cada Estado.
- Comunidades Autónomas.
- Provincias.
- Municipios.

El reparto de las competencias suelen venir influido por diversos principios constitucionales, que en el caso europeo (y español, por supuesto) son:

- Principio de solidaridad (entre Comunidades).
- Principio de igualdad de derechos y obligaciones.
- Principio de unidad de mercado (libre circulación, etc.).

En cada país deben existir diversas materias competenciales en Medio Ambiente agrupadas según este esquema (basado en los casos de los países citados):

- Materias de competencia exclusiva del Estado.
 - Igualdad de los habitantes.
 - Ordenación y planificación de la economía.
 - Tráfico.
 - Pesca.
- Materias de competencia exclusiva de las Comunidades Autónomas.
 - Ordenación territorial.
 - Agricultura.
 - Caza y pesca continental.
- Materias de competencia compartida.
 - Montes.
 - Minas.
 - Energía.
 - Obras públicas.
 - Aguas.
 - Infraestructura.

Siguiendo la misma línea, las funciones en materia de Medio Ambiente deben distribuirse así:

- Órganos centrales del Estado
 - Organización administrativa.
 - Legislación básica.
 - Ejecución.
- Comunidades Autónomas
 - Legislación de desarrollo.
 - Normas adicionales de protección.
 - Ejecución.
- Administración Local (Ayuntamientos y Municipidades)
 - Servicios diversos.
 - Complementar a las otras Administraciones.
 - Diversas funciones relacionadas:
 - Recogida de residuos sólidos.
 - Aguas residuales.
 - Tratamiento de residuos sólidos.
 - Incendios.
 - Lo que no realicen las otras Administraciones.
 - Reglamentos (Ordenanzas).
 - Ejecución.

114.2. EL DERECHO BASADO EN EL DERECHO ROMANO

Este Derecho se basa, en lo que afecta al Medio Ambiente, en la primacía de la *propiedad privada* (del Estado, colectiva o individual), lo que permite una gran libertad de acción sobre el patrimonio de que se dispone.

La orientación fundamental existente es la de la gestión de un buen *pater familiae*, de forma que se eviten los abusos y se conserve el patrimonio para las generaciones futuras.

Por otra parte, además del citado concepto de propiedad privada, existe el de la *rex nullius* o tierras libres (sistema que desapareció hace tiempo en Europa y en otros muchos países). Al descubrirse y colonizarse América, este concepto jurídico afectó inmediatamente a todos los territorios y sirvió de pretexto para la apropiación de tierras por los colonizadores, sobre todo por los no dependientes de la Corona Española.

Lo mismo ocurrió más tarde en África, pero más acentuado.

El resultado fué la generalización de la deforestación de muchas zonas y la multiplicación de otras muchas actuaciones negativas.

Al final, y en época reciente, muchos de estos territorios fueron colocados bajo la tutela del Estado como Parques Nacionales, Parques Naturales, Reservas Naturales, Reservas Forestales, Reservas Territoriales (USA), Dominios Públicos de costas, etc., y de esta forma su protección se garantiza mediante la legislación propia de cada país.

El Derecho basado en el Derecho Romano se ha desarrollado para la legislación de la tierra en América Latina y ha servido de sustento para la privatización del suelo en muchos países.

Este Derecho se apoya en instrumentos que rigen la propiedad (herencia, código civil, cesión, registro), la gestión del medio agrario y, últimamente, la gestión del medio ambiente (legislación ya existente en casi toda América Latina).

La identificación de la propiedad se realiza mediante catastros y los cambios se ejecutan a través del sistema jurídico de los notarios.

El sistema jurídico que comentamos tiene algunas características negativas, como son, entre otras, que por una parte se desenvuelve mediante procedimientos tan detallados y precisos que en muchos casos impide realizar proyectos de desarrollo en zonas que los necesitan. Por otra parte, su funcionamiento tiene costos, tanto para el sistema catastral como para los cambios de propiedad.

Todo ello dificulta y complica las actividades de desarrollo, pues en muchos casos los agricultores carecen de medios, no solo ya para regularizar legalmente la propiedad de sus tierras, sino simplemente para adquirir algún territorio, y en el otro sentido la precisión y detalle del sistema paraliza proyectos que pueden ser de gran interés.

Se pueden citar como ejemplos los ejidos de México (propiedad del suelo), el código de Haití (prohibición de limpieza del monte en grandes pendientes y control de ella) o el sistema de Madagascar (pobreza extrema del campesino).

Ante esta situación, muchos países están realizando catastros actualizados, como son los casos de Guatemala, Costa de Marfil o Madagascar, de forma que se pueda identificar tanto a los usuarios del suelo como sus derechos.

A partir de esta clarificación de la propiedad, ya se puede realizar una gestión patrimonial adecuada del Medio Ambiente, pues esto permite a los res-

ponsables tener una visión de conjunto a largo plazo para planear la gestión de los ecosistemas, dar respuestas técnicas adaptadas a la conservación de los recursos y mantener un equilibrio entre los intereses de los propietarios privados y el interés general propio de los ecosistemas afectados.

114.3. EL DERECHO INTERNACIONAL

El caso del Medio Ambiente a nivel internacional es una muestra de la debilidad jurídica del tema en muchísimas situaciones problemáticas.

Ahora tenemos 260 Tratados multilaterales y 1.100 Tratados bilaterales. Como dijo hace años un autor francés (BD-PA-SCETAGRI, 1992), esta inflación de textos es síntoma de su debilidad jurídica.

Como caso palpable del cinismo internacional citamos, para oprobio de muchos países, la exportación de residuos de países industrializados a países en vías de desarrollo, hasta el extremo de que este acto ha intentado ser controlado por el PNUMA (Convención de 1989 de Basilea), por la OUA (Consejo de 1988 de Addis-Abbede) y por la OCDE, para evitar mayores males ante el alcance del proceso.

En este sentido se citan tres principios básicos para el Derecho Internacional:

- Consentimiento del país importador (esto se presta a múltiples actos de corrupción).

- No discriminación en la normativa de la circulación de los residuos a países fuera de las áreas industrializadas.
- Instalaciones apropiadas en los países receptores (!!).

Los esfuerzos del PNUMA en este sentido han llegado hasta reunir comités de expertos buscando la adopción de textos sobre responsabilidades internacionales sobre daños al Medio Ambiente.

Por otra parte, la responsabilidad civil objetiva a nivel internacional ha avanzado algo más, existiendo una serie de Convenios, Tratados, etc., que regulan ciertas actividades, de las que las referentes al mar son el mejor ejemplo (véase el epígrafe correspondiente a Responsabilidad Civil).

114.4. LA COSTUMBRE

La costumbre es un factor muy importante en muchos países (sureste asiático, África, etc.), sobre todo cuando se basa en componentes culturales y cuando existen formas específicas de organización social.

Así, muchas sociedades consideran los componentes medioambientales (aire, agua, suelo, vegetación, fauna) como un patrimonio que viene de los antepasados y que se debe legar a los sucesores, por lo que solamente se puede disponer de un derecho de uso.

Por otra parte, *a nivel territorial*, cada colectividad dispone de un espacio que es función de los antecedentes histó-

ricos, de la forma de vida, de las etnias y de las presiones de los gobiernos modernos que controlan los países.

El *uso de los recursos* lo controlan la costumbre y los límites de las colectividades próximas, en lo que se refiere al uso del agua (si no es abundante), a la caza, a la pesca, a la agricultura, a la ganadería o a la recogida de productos.

En las sociedades americanas la influencia de los gobiernos centrales y regionales es muy grande, y suele afectar (y chocar con frecuencia) a la costumbre en materia de gestión del medio. Como es lógico, los Gobiernos tratan de modernizar y adaptar estas sociedades a nuevos conceptos para mejorar su calidad de vida, y en esto pueden tener problemas muy complejos y específicos en cada situación.

Hay que tener en cuenta que el concepto autóctono del espacio varía mucho entre una sociedad europea, norteamericana o japonesa, y una sociedad rural de cualquier país en vías de desarrollo. En estos últimos, cada grupo humano tiene organizadas las reglas de gestión del medio y las relaciones que mantiene con ese medio.

Las relaciones con el medio dependen de cada caso, según sea la actividad predominante (caza, pesca, agricultura, ganadería, minería, montes, etc.) o si existen condiciones ambientales extremas (frío, altitud, sequía, falta de materia orgánica, etc.).

La percepción del espacio y del medio ambiente condicionan, pues, las normas que genera la costumbre en muchos

países, y esto hay que tenerlo siempre en cuenta en cualquier actividad de protección y mejora del Medio Ambiente.

La costumbre puede originar situaciones en las que las dimensiones o los aspectos políticos adquieren una importancia fundamental. Estos casos pueden ser:

- Características especiales de las relaciones socioeconómicas internas.
- Prerrogativas de algunos responsables, que unas veces aumentan y otras disminuyen ante el desarrollo de proyectos.
- Características especiales de las relaciones sociopolíticas externas. Legitimidad de las ocupaciones del suelo, límites territoriales.

114.5. EL DERECHO PENAL

Ya hemos indicado repetidas veces a lo largo de nuestra carrera profesional que es más fácil (y más barato) escribir, proponer, planificar o enseñar, que ejecutar, realizar, construir y cumplir.

En este sentido, la mayoría de los países planean y proponen acciones de protección al Medio Ambiente, pero si estos países están en el grupo de los industrializados y tal actuación va a suponerles pérdidas económicas o electorales, hoy por hoy ninguno de ellos está dispuesto a sacrificarse, y en el otro extremo, en los países en vías de desarrollo, si estas acciones se proponen, casi nunca se realizan por falta de interés político o por falta de medios.

Ahí están las citas de otros epígrafes de este capítulo referentes a la exportación de residuos sólidos, o la política mundial de la energía.

Así se llega a problemas locales, a problemas nacionales, a problemas transfronterizos y a problemas a nivel mundial, en los que los protagonistas son pocos y muy concretos y en los que las responsabilidades son totalmente diferentes, injustas y asombrosas si se analizan bajo el punto de vista del técnico medioambiental.

¿Por qué tal industria sí y la otra no?
¿Por qué tal país sí puede y el mío no?

Hablan los autores (*J. Terradillos*) de que la situación apuntada al principio, referente a grandes y buenos propósitos y después pobres resultados, es muy posible que también ocurra en el Derecho Penal.

Si tomamos como modelo el Código Penal español desarrollado en 1995, los autores tienen en cuenta la mayoría de los problemas apuntados, siendo bastante realista en su concepción y realización (inviabilidad actual de una política mundial conservacionista, o por lo menos de muy difícil aplicación, etc.), aunque parece que la sistemática es bastante deficiente (*L. Rodríguez Ramos*), y cita epígrafes como *delitos contra los recursos naturales y el Medio Ambiente* (!!) o habla de caza y pesca, y no de daños a animales y plantas.

El Código Penal español desarrolla los siguientes puntos:

- *Delitos sobre la ordenación (ordenamiento, planeamiento, aménagement) territorial.*
 - Construcciones no autorizadas en lugares públicos o en zonas de especial interés.
 - Edificación no autorizable en suelo no urbanizable.
 - Funcionario o autoridad que informe injustamente a favor de edificación o licencia contrario a las normas urbanísticas vigentes.
 - Sujetos activos: Promotor, Empresario de las obras, Técnico Director, Funcionario Público, Autoridad.
- *Delitos sobre el patrimonio histórico y el Medio Ambiente.*

Dentro de este epígrafe el Código Penal español incluye los *delitos contra los recursos naturales y el medio ambiente.*

 - El objeto jurídico de la protección es el equilibrio de los sistemas naturales.
 - Los artículos de este epígrafe tratan de contaminación del medio, de daños a los espacios naturales protegidos y del delito ecológico en general.
 - *Delitos relativos a la protección de la flora y fauna.*
 - Atentados contra la flora y fauna amenazadas.
 - Introducción de especies de flora o fauna no autóctonas (si perjudican el equilibrio ecológico, contraviniendo las Leyes).
 - Utilización de medios con eficacia destructiva en la caza o pesca.
 - Caza o pesca no autorizadas.
 - Tráfico ilegal de especies protegidas.
- *Delitos relativos a los incendios forestales*
 - Seguridad colectiva.
 - Alteraciones graves del equilibrio ecológico.
 - Incendios agravados (por beneficio económico).
 - Incendios en bienes propios.
 - Imprudencias.
- *Delitos relativos a la energía nuclear y radiaciones ionizantes*
 - Sujetos activos: Imprudentes (delincuencia de sujetos de alto poder económico), terroristas, autoridad administrativa.
 - Criminalidad de cuello blanco.
 - Coordinación internacional.
 - Bienes jurídicos protegidos.

114.6. LA RESPONSABILIDAD CIVIL

Este tema se ha desarrollado más ampliamente en los capítulos referentes a la gestión medioambiental de la empresa, y allí remitimos al lector.

Aquí trataremos exclusivamente sobre la responsabilidad civil objetiva.

Como causa previa indicamos que el desarrollo de los países ha llevado a la proliferación de actividades mineras, industriales, urbanas, turísticas, etc., que conllevan siempre riesgos de producir daños.

Esta evolución trae como consecuencia la necesidad de una normativa legal sobre responsabilidades, que se enfoca a través de la responsabilidad civil, llevando agregada la responsabilidad obje-

tiva, de forma que aquellas existen, haya o no pruebas de culpa del agente.

A continuación desarrollamos en una sencilla tabla los sectores y áreas de res-

ponsabilidad civil objetiva, desde el punto de vista del Derecho Internacional, del de la Unión Europea y del caso de España.

LA RESPONSABILIDAD CIVIL OBJETIVA EN MATERIA DE MEDIO AMBIENTE

Responsabilidad civil objetiva por daños al Medio Ambiente en el Derecho Internacional

- Contaminación del mar por hidrocarburos.
 - Por uso del mar.
 - Por accidentes.
- Contaminación del mar por radiactividad.
- Convenio de Basilea sobre control del transporte de residuos peligrosos.
- Convenio del Consejo de Europa sobre responsabilidad civil por daños. resultantes de actividades peligrosas para el Medio Ambiente.
 - Otros Convenios relativos a la protección del Medio Ambiente por responsabilidades.

Responsabilidad civil objetiva por daños al Medio Ambiente en el Derecho de la Unión Europea

- Directiva de la UE sobre responsabilidad civil por daños y perjuicios causados al Medio Ambiente por los residuos.
 - Libro verde sobre la reparación del daño ecológico.
 - Actuaciones de la Comisión (de la UE).
 - Actuaciones del Tribunal de Justicia (de la UE).

Responsabilidad civil objetiva por daños al Medio Ambiente en el caso de España

- Regulación del tema de la energía nuclear.
- Regulación de la caza.
- Regulación de los residuos peligrosos.
- Ley de protección del Medio Ambiente Atmosférico.
- Ley de aguas.
- Ley de costas.
- Ley de conservación de los espacios naturales.
- Ley de minas.
- Acciones de los Tribunales Civiles.
- Reparación de daños medioambientales.
- Determinación del individuo responsable.

CAPÍTULO 115

LEGISLACIÓN SOBRE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA UNIÓN EUROPEA

115.1. BASES GENERALES

La defensa del clima se enfrenta a problemas de alcance mundial, entre los que destacan el aumento, por intervención del hombre, de la concentración de gases de larga actividad como el CO₂, que contribuyen al llamado efecto invernadero y a la progresiva destrucción de la capa de ozono a causa de los CFC.

La protección del ambiente atmosférico también es una tarea internacional. Como ya se ha mencionado, debido a la enorme movilidad y difusibilidad de los gases contaminantes, se generan en un punto y los efectos pueden aparecer a cientos de kilómetros del foco emisor. Como consecuencia de esto, tienen gran importancia los resultados obtenidos en convenios internacionales, como el de Ginebra de 1979, sobre Contaminación Atmosférica Transfronteriza.

La Unión Europea desarrolla un sistema, que aparece en la Directiva 62/1997, de 27 de septiembre, de Eva-

luación y Gestión de Calidad del Aire. En dicha Directiva se obliga a los Estados Miembros a establecer un límite de inmisión que implique la mejora de la calidad del aire. Este nivel no podrá rebasar, bajo ningún concepto, los valores límite y los umbrales fijado por la Unión, excepto los *límites de exceso tolerados* (valores que pueden ser excedidos en atención a cada Estado Miembro). Los niveles de emisión hay que considerarlos con el único objetivo de evitar el riesgo de sobrepasar aquellos y limitar la duración de las situaciones excepcionales.

La UE obliga a los países miembros a proteger las zonas donde no se superen los valores límites de inmisión, principio de standstill, por el cual exige el cumplimiento de las normas para evitar la degradación, en este caso de la calidad del aire.

Para controlar la contaminación por establecimientos industriales fue necesario desarrollar una Orden Ministerial, OM

de 18 de octubre de 1976, sobre la Prevención y la Corrección de la Contaminación atmosférica de Origen Industrial.

La Unión Europea controla este sector a través de la siguiente secciones:

- Por una parte, en relación a sectores industriales concretos.
- Por otra, de una forma general, contemplada en la Directiva 84/360, de 17 de julio, que establece el iter, procedimiento básico al que deben ajustarse las Autoridades Administrativas de los estados miembros para proceder a la autorización del establecimiento de las industrias que aparecen en su Anexo I:
 1. Industria de la energía
 - 1.1. Coquerías
 - 1.2. Refinerías de petróleo crudo (con exclusión de las empresas que fabrican únicamente lubricantes a partir del petróleo crudo)
 - 1.3. Instalaciones de gasificación y licuefacción del carbón
 - 1.4. Centrales térmicas (con exclusión de las centrales nucleares) y otras instalaciones de combustión de una potencia nominal calorífica de más de 50 MW
 2. Producción y transformación de metales
 - 2.1. Instalaciones de calcinación y sinterización de una capacidad de más de 1 000 t por año de minerales metálicos
 - 2.2. Instalaciones integradas de producción de fundición y de aceros brutos
 - 2.3. Fundiciones de metales férricos que tengan instalaciones de fusión de una capacidad total superior a 5 t
 - 2.4. Instalaciones de producción y de fusión de metales no férricos que tengan instalaciones de una capacidad total superior a 1 t para los metales pesados o 0,5 t para los metales ligeros
 3. Industrias de productos minerales no metálicos
 - 3.1. Instalaciones de fabricación de cemento y producción de cal por hornos rotatorios
 - 3.2. Instalaciones de producción y de transformación de amianto y fabricación de productos a base de amianto
 - 3.3. Instalaciones de fabricación de fibras de vidrio o fibra mineral
 - 3.4. Instalaciones de fabricación de vidrio (ordinario y especial) de una capacidad anual superior a 5 000 t
 - 3.5. Instalaciones de fabricación de cerámica de construcción, en particular de ladrillos refractarios, tubería cerámica, ladrillos para muros y solado y tejas de cubierta
 4. Industria química

- 4.1. Instalaciones químicas para la producción de olefinas, derivados de olefinas, monómeros y polímeros
- 4.2. Instalaciones químicas para la fabricación de otros productos orgánicos intermedios
- 4.3. Instalaciones para la fabricación de productos químicos inorgánicos de base
- 5. Eliminación de residuos
 - 5.1. Instalaciones de incineración de residuos tóxicos y peligrosos
 - 5.2. Instalaciones de tratamiento de otros residuos sólidos y líquidos por incineración
- 6. Industrias diversas
 - Instalaciones de fabricación de pasta de papel por método químico de una capacidad de producción de 25 000 t o más al año.
 - (1) Los umbrales mencionados en el presente Anexo se refieren a las capacidades de producción.

**115.2. DIRECTIVA 96/61/CE
DEL CONSEJO DE 24 DE
SEPTIEMBRE DE 1996,
EN ESPAÑA, RELATIVA
A LA PREVENCIÓN Y AL
CONTROL INTEGRADOS
DE LA CONTAMINACIÓN.
DOCE N.º L 257
DE 10.10-1996**

Esta Directiva abarca fundamentalmente la contaminación de origen indus-

trial y cómo afecta a los diferentes sectores de contaminación. Se define el concepto de contaminación como: *La introducción directa o indirecta, mediante la actividad humana, de sustancias, vibraciones, calor o ruido en la atmósfera, el agua o el suelo que puedan tener efectos perjudiciales para la salud humana o la calidad del medio ambiente, o que puedan causar daños a bienes materiales, o deteriorar o perjudicar el disfrute u otras utilizations legítimas del medio ambiente.*

La Directiva define términos como instalación industrial y qué actividades son potencialmente contaminantes.

También se define el concepto de sustancia: *Los elementos químicos y sus compuestos, con la excepción de las sustancias radiactivas, de los organismos modificados genéticamente y de los olores.*

Las principales sustancias contaminantes de las que es necesario fijar los valores límite de emisión se recogen en el Anexo III de dicha Directiva.

Por otra parte, en el sentido de prevención y control de las sustancias contaminantes se fijan los valores límite de emisión, valor que viene definido como: *la masa expresada en relación con determinados parámetros específicos, la concentración o el nivel de emisión cuyo valor no debe superarse dentro de uno o varios períodos determinados.* La Directiva no establece los valores límite, sino que la entidad competente al otorgar el permiso de explotación, es la que determina los valores límite de emisión de las

sustancias contaminantes; en cambio, la fijación de los valores límite de emisión en el ámbito comunitario, viene determinado en el artículo 18.

Valores límite de las emisiones comunitarias

1. *A propuesta de la Comisión, el Consejo fijará, de conformidad con los procedimientos previstos por el Tratado, valores límite de emisión para:*
 - *las instalaciones que se indican en el Anexo I excepto los vertederos cubiertos por las categorías 5.1 y 5.4 de dicho Anexo, y*
 - *las sustancias contaminantes a que se refiere el Anexo III con respecto a las cuales se evidencie la necesidad de acción comunitaria a partir, en especial, del intercambio de información que establece el artículo 16.*
2. *A falta de valores límite de emisión comunitarios definidos en aplicación de la presente Directiva, los valores límites de emisión pertinentes, tal como se fijan en las Directivas enumeradas en el Anexo II y otras normativas comunitarias, se aplicarán a las*

instalaciones enumeradas en el Anexo I en cuanto valores límite de emisión mínimos con arreglo a la presente Directiva.

Sin perjuicio de los requisitos de la presente Directiva los requisitos técnicos aplicables respecto de los vertederos cubiertos por las categorías 5.1 y 5.4 del Anexo I serán fijados por el Consejo a propuesta de la Comisión, con arreglo a los procedimientos establecidos en el Tratado.

Esta Directiva establece las obligaciones y las responsabilidades del titular en el momento de concederle el permiso de explotación. Una vez concedido el permiso, los Estados miembros deberán adoptar las medidas necesarias para garantizar que el titular cumple con las condiciones establecidas en el permiso, no sólo durante la instalación sino también durante la explotación.

La transposición de esta Directiva a la normativa española, supone un avance en la lucha contra la contaminación, ya que establece unas obligaciones para las instalaciones dependiendo de su incidencia en el medio ambiente, y además prevé la compatibilidad con nuevas tecnologías de control y de prevención.

RESUMEN COMPARATIVO ENTRE LAS DIRECTIVAS DE LA IPPC Y EL DERECHO ESPAÑOL

DIRECTIVAS CITADAS EN LA IPPC	DERECHO INTERNO ESPAÑOL
<p>Dir. 89/369/C.E.E.; Prevención de la contaminación atmosférica procedente de las nuevas instalaciones de incineración de residuos municipales.</p> <p>Dir. 84/429/C.E.E.; Reducción de la contaminación atmosférica procedente de instalaciones existentes de incineración de residuos.</p>	<p>R.D. 1088/1992, de 11 de septiembre: nuevas normas sobre la limitación de emisiones de determinados agentes contaminantes procedentes de instalaciones de incineración de residuos municipales.</p>
<p>Dir. 94/67/C.E.E.; Incineración de residuos peligrosos.</p>	<p>R.D. 1217/1997, de 18 de julio (B.O.E. n.º 189, 8.8.97).</p>
<p>Dir. 88/609/C.E.E.; Limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión cuya última modificación la constituye la Directiva 99/66/C.E.</p>	<p>R.D. 646/1991, de 22 de abril; nuevas normas sobre la limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión.</p> <p>R.D. 1800/1995, de 3 de noviembre por el que se modifica el Real decreto 646/1991. (se fijan las condiciones para el control de los límites de emisión de SO₂, para el refino de petróleo).</p>

115.3. ANEXO I: CATEGORÍAS DE ACTIVIDADES INDUSTRIALES CONTEMPLADAS EN EL ARTÍCULO 1

Los valores umbral mencionados más adelante se refieren, con carácter general, a capacidades de producción o a rendimientos. Si un mismo titular realiza varias actividades de la misma categoría en la misma instalación o en el emplazamiento, se sumarán las capacidades de dichas actividades.

1. Instalaciones de combustión

- 1.1. *Instalaciones de combustión con una potencia térmica de combustión superior a 50 MW.*
- 1.2. *Refinerías de petróleo y de gas.*

1.3. *Coquerías.*

1.4. *Instalaciones de gasificación y liquefacción de carbón.*

2. *Producción y transformación de metales*

2.1. *Instalaciones de calcinación o síntesis de minerales metálicos incluido el mineral sulfurado.*

2.2. *Instalaciones para la producción de fundición o de aceros brutos (fusión primaria o secundaria), incluidas las correspondientes instalaciones de fundición continua de una capacidad de más de 2,5 toneladas por hora.*

2.3. *Instalaciones para la transformación de metales ferrosos:*

- a) *laminado en caliente con una capacidad superior a 20 toneladas de acero en bruto por hora;*

b) forjado con martillos cuya energía de impacto sea superior a 50 kilojulios por martillo y cuando la potencia térmica utilizada sea superior a 20 Mw;

c) aplicación de capas de protección de metal fundido con una capacidad de tratamiento de más de 2 toneladas de acero bruto por hora.

2.4. Fundiciones de metales ferrosos con una capacidad de producción de más de 20 toneladas por día.

2.5. Instalaciones:

a) para la producción de metales en bruto no ferrosos a partir de minerales, de concentrados o de materias primas secundarias mediante procedimientos metalúrgicos, químicos o electrolíticos;

b) para la fusión de metales no ferrosos, inclusive la aleación, incluidos los productos de recuperación (refinado, moldeado en fundición) con una capacidad de fusión de más de 4 toneladas para el plomo y el cadmio o 20 toneladas para todos los demás metales, por día.

2.6 Instalaciones para el tratamiento de superficie de metales y materiales plásticos por procedimiento electrolítico o químico, cuando el volumen de las cubetas destinadas al tratamiento empleadas sea superior a 30 m³.

3. Industrias minerales

3.1. Instalaciones de fabricación de cemento clínker en hornos rotatorios con una capacidad de producción superior a 500 toneladas diarias, o de

cal en hornos rotatorios con una capacidad de producción superior a 50 toneladas por día, o en hornos de otro tipo con una capacidad de producción superior a 50 toneladas por día.

3.2. Instalaciones para la obtención de amianto y para la fabricación de productos a base de amianto.

3.3. Instalaciones de fabricación de vidrio incluida la fibra de vidrio, con una capacidad de fusión superior a 20 toneladas por día.

3.4. Instalaciones para la fundición de materiales minerales, incluida la fabricación de fibras minerales con una capacidad de fundición superior a 20 toneladas por día.

3.5. Instalaciones para la fabricación de productos cerámicos mediante horneado, en particular de tejas, ladrillos refractarios, azulejos, gres cerámico o porcelanas, con una capacidad de producción superior a 75 toneladas por día, y/o una capacidad de horneado de más de 4 m³ y de más de 300 kg/m³ de densidad de carga por horno.

4. Industria química

La fabricación, a efectos de las categorías de actividades de la presente Directiva, designa la fabricación a escala industrial, mediante transformación química de los productos o grupos de productos mencionados en los puntos 4.1 a 4.6

4.1. Instalaciones químicas para la fabricación de productos químicos orgánicos de base, en particular:

a) hidrocarburos simples (lineares o cíclicos, saturados o insaturados, alifáticos o aromáticos);

- b) *hidrocarburos oxigenados, tales como alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos orgánicos, ésteres, acetatos, éteres, peróxidos, resinas, epóxidos;*
 - c) *hidrocarburos sulfurados;*
 - d) *hidrocarburos nitrogenados, en particular, aminas, amidas, compuestos nitrosos, nítricos o nitratos, nitrilos, cianatos e isocianatos;*
 - e) *hidrocarburos fosforados;*
 - f) *hidrocarburos halogenados;*
 - g) *compuestos orgánicos metálicos;*
 - h) *materias plásticas de base (polímeros, fibras sintéticas, fibras a base de celulosa);*
 - i) *cauchos sintéticos;*
 - j) *colorantes y pigmentos;*
 - k) *tensioactivos y agentes de superficie.*
- 4.2. *Instalaciones químicas para la fabricación de productos químicos inorgánicos de base como:*
- a) *gases y, en particular, el amoníaco, el cloro o el cloruro de hidrógeno, el flúor o fluoruro de hidrógeno, los óxidos de carbono, los compuestos del azufre, los óxidos del nitrógeno, el hidrógeno, el dióxido de azufre, el dicloruro de carbonilo;*
 - b) *ácidos y, en particular, el ácido crómico, el ácido fluorhídrico, el ácido fosfórico, el ácido nítrico, el ácido clorhídrico, el ácido sulfúrico, el ácido sulfúrico fumante, los ácidos sulfurados;*
 - c) *bases y, en particular, el hidróxido de amonio, el hidróxido potásico, el hidróxido sódico;*
 - d) *sales como el cloruro de amonio, el clorato potásico, el carbonato potásico (potasa), el carbonato sódico (sosa), los perboratos, el nitrato argéntico;*
 - e) *no metales, óxidos metálicos u otros compuestos inorgánicos como el carburo de calcio, el silicio, el carburo de silicio.*
- 4.3. *Instalaciones químicas para la fabricación de fertilizantes a base de fósforo, de nitrógeno o de potasio (fertilizantes simples o compuestos).*
- 4.4. *Instalaciones químicas para la fabricación de productos de base fitofarmacéuticos y de biocidas.*
- 4.5. *Instalaciones químicas que utilicen un procedimiento químico o biológico para la fabricación de medicamentos de base.*
- 4.6. *Instalaciones químicas para la fabricación de explosivos.*
- 5. Gestión de residuos**
- Sin perjuicio de lo dispuesto en el artículo 11 de la Directiva 75/442/CEE, y en el artículo 3 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a los residuos peligrosos:*
- 5.1. *Instalaciones para la valorización o eliminación de residuos peligrosos de la lista, contemplada en el apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE, tal como se definen en los Anexos II A y II B (operaciones R1, R5, R6, R8 y R9) de la Directiva 75/442/CEE del Consejo, de 15 de julio de 1975, relativa a los residuos*

de la Directiva 75/439/CEE del Consejo, de 16 de junio de 1975, relativa a la gestión de aceites usados(2) de una capacidad de más de 10 toneladas por día.

5.2. *Instalaciones para la incineración de los residuos municipales, tal como se definen en las Directivas 89/369/CEE del Consejo, de 8 de junio de 1989, relativa a la prevención de la contaminación atmosférica procedente de instalaciones existentes de incineración de residuos municipales, y 89/429/CEE del Consejo, de 21 de junio de 1989, relativa a la reducción de la contaminación atmosférica procedente de instalaciones existentes de incineración de residuos municipales de una capacidad de más de 3 toneladas por hora.*

5.3. *Instalaciones para la eliminación o aprovechamiento de los residuos no peligrosos, tal como se definen en los Anexos II A y B de la Directiva 75/442/CEE en las rúbricas D8, D9, con una capacidad de más de 50 toneladas por día.*

5.4. *Vertederos que reciban más de 10 toneladas por día o que tengan una capacidad total de más de 25 000 toneladas con exclusión de los vertederos de residuos inertes.*

6. Otras actividades

6.1. *Instalaciones industriales destinadas a la fabricación de: a) pasta de papel a partir de madera o de otras materias fibrosas, b) papel y cartón con una capacidad de producción de más de 20 toneladas diarias.*

6.2. *Instalaciones para tratamiento previo (operaciones de lavado, blan-*

queo, mercerización) o para el tinte de fibras o productos textiles cuando la capacidad de tratamiento supere las 10 toneladas diarias.

6.3. *Instalaciones para el curtido de cueros cuando la capacidad de tratamiento supere las 12 toneladas de productos acabados por día.*

6.4.

a) *mataderos con una capacidad de producción de canales superior a 50 T/día;*

b) *tratamiento y transformación destinados a la fabricación de productos alimenticios a partir de: materia prima animal (que no sea la leche) de una capacidad de producción de productos acabados superior a 75 T/día, materia prima vegetal de una capacidad de producción de productos acabados superior a 300 T/día (valor medio trimestral);*

c) *tratamiento y transformación de la leche, con una cantidad de leche recibida superior a 200 T/día (valor medio anual).*

6.5. *Instalaciones para la eliminación o el aprovechamiento de canales o desechos de animales con una capacidad de tratamiento superior a 10 T/día.*

6.6. *Instalaciones destinadas a la cría intensiva de aves de corral o de cerdos que dispongan de más de: a) 40.000 emplazamientos para las aves de corral; b) 2.000 emplazamientos para cerdos de cría (de más de 30 kg) o c) 750 emplazamientos para cerdas.*

- 6.7. *Instalaciones para el tratamiento de superficie de materiales, de objetos o productos con utilización de disolventes orgánicos, en particular para aprestarlos, estamparlos, revestirlos y desgrasarlos, impermeabilizarlos, pegarlos, enlazarlos, limpiarlos o impregnarlos, con una capacidad de consumo de más de 150 kg de disolvente por hora o de más de 200 T/año.*
- 6.8. *Instalaciones para la fabricación de carbono (carbón sintetizado) o electrografito por combustión o grafitación.*

115.4. ANEXO II:

LISTA INDICATIVA DE LAS PRINCIPALES SUSTANCIAS CONTAMINANTES QUE SE TOMARÁN OBLIGATORIAMENTE EN CONSIDERACIÓN SI SON PERTINENTES PARA FIJAR VALORES LÍMITE DE EMISIONES

Atmósfera

1. Óxidos de azufre y otros compuestos de azufre.
2. Óxidos de nitrógeno y otros compuestos de nitrógeno.
3. Monóxido de carbono.
4. Compuestos orgánicos volátiles.
5. Metales y sus compuestos.
6. Polvos.

7. Amianto (partículas en suspensión, fibras).
8. Cloro y sus compuestos.
9. Flúor y sus compuestos.
10. Arsénico y sus compuestos.
11. Cianuros.
12. Sustancias y preparados respecto de los cuales se haya demostrado que poseen propiedades cancerígenas, mutágenas o que puedan afectar a la reproducción a través del aire.
13. Policlorodibenzodioxina y policlorodibenzofuranos.

115.5. NORMATIVA VIGENTE

La normativa vigente a nivel comunitario es la siguiente:

Directiva 70/220, de 20 de marzo de 1970, relativa a las medidas que deben adoptarse contra la contaminación del aire causada por los gases procedentes de los vehículos con motores de explosión. DOCE n.º L 76, de 06-04-1970.

Esta Directiva fue modificada por la Directiva 74/290 de 28 de mayo de 1974, Doce n.º L159 de 15-06-1974, nuevamente modificada por Directiva 77/102 de 30 de noviembre de 1976, DOCE n.º L 32, de 03-02-1977; modificada, a su vez, por Directiva 78/665 de 14 de julio de 1978, DOCE n.º L 223 de 14-08-78, modificada por Directiva 88/76 de 3 de diciembre de 1987, DOCE n.º L 36, de 09-02-88, nuevamente modificada por la Directiva 88/436 de 16 de junio de 1988,

DOCE n.º L 214, de 06-08-88; nuevamente modificada por la Directiva 89/458 de 18 de julio de 1989, DOCE n.º L 03-08-89 y L 270 de 19-09-89, modificada de nuevo por la Directiva 91/441, de 26 de junio, DOCE n.º L 242, 30-08-91 y finalmente modificada por Directiva 93/59, de 28 de junio de 1993, DOCE n.º L 186 de 1993.

Directiva 72/306/CEE, de 2 de agosto de 1972, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre las medidas que deben adoptarse contra las emisiones de contaminantes procedentes de los motores diesel destinados a la propulsión de vehículos. DOCE n.º L 190, de 20-08-72.

Directiva 75/324, de 20 de mayo de 1975, sobre los generadores de aerosoles. DOCE n.º L 147 de 09-06-75.

Directiva 75/716/CEE, de 24 de noviembre de 1975, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre el contenido de azufre de determinados combustibles líquidos. DOCE n.º L 307, de 27-11-75, modificada por la Directiva 87/219, de 30 de marzo de 1987, DOCE n.º L 91, de 03-04-87.

Directiva 87/537, de 28 de junio de 1977 sobre medidas que deben adoptarse contra las emisiones de contaminantes procedentes de tractores agrícolas o forestales de ruedas equipados con motores diesel, DOCE n.º L 220, de 29-08-77 modificada por la Directiva 92/55, de 22 de junio de 1992, DOCE n.º L 225, de 10-08-92.

Directiva 78/611, de 29 de junio de 1978 relativa a la aproximación de las

legislaciones sobre el contenido en plomo de las gasolinas, DOCE n.º L 197, DE 22-07-78, modificada por la Directiva 85/210 de 20 de marzo de 1985 (DOCE n.º L 96, de 03-04-85), modificada ésta última por la Directiva 87/416 de 21 de julio de 1987, DOCE n.º L 225 de 13-08-87.

Directiva 80/779/CEE, de 15 de julio de 1980, relativa a los valores límite y a los valores guía de calidad atmosférica para el anhídrido sulfuroso y las partículas en suspensión.

Decisión del Consejo 80/327/CEE relativa a los clorofluorcarbonos en el medio ambiente, DOCE n.º I 90, de 03-04-90.

Decisión del Consejo, de 26 de marzo de 1980, relativa a los clorofluorcarbonos en el medio ambiente.

Decisión del Consejo 81/462/CEE, de 11 de junio de 1981, sobre Contaminación transfronteriza: Conclusiones del convenio sobre contaminación transfronteriza a gran distancia. DOCE n.º L, 171.

Decisión del Consejo 82/459/CEE, de 24 de junio de 1982, por la que se establece un intercambio recíproco de informaciones y de datos procedentes de las Redes y de las Estaciones aisladas que miden la contaminación atmosférica en los Estados Miembros (DOCE n.º L 210, de 19-7-82).

Directiva 82/795, de 15 de noviembre de 1982 relativa a la consolidación de medidas de precaución referentes a los clorofluorcarbonos en el medio ambiente. DOCE n.º L 329, de 25-11-82.

Directiva 82/884/CEE, de 3 de diciembre de 1982, relativa al valor límite para el plomo contenido en la atmósfera. DOCE n.º L 378, de 31-12-82.

Directiva 84/360/CEE, de 28 de junio de 1984, relativa a la lucha contra la contaminación atmosférica procedente de las instalaciones industriales. DOCE n.º L 188, de 16-07-1984.

Directiva 85/203/CEE, de 7 de marzo de 1985, relativa a las normas de calidad del aire para el dióxido de nitrógeno. DOCE n.º L 87, de 27-03-85.

Directiva 85/210/CEE, de 20 de marzo de 1985, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros referente al contenido en plomo de la gasolina. DOCE n.º L 96, de 03-04-85.

Reglamento (CEE) 3528/86, de 17 de noviembre, relativo a la protección de los bosques en la Comunidad contra la contaminación atmosférica (DOCE n.º L 326, de 21-11-86).

Observaciones:

– Afectado por los Reglamentos (CEE) 1696/87 y 1697/87, de 10 de junio, por los que se establecen determinadas modalidades de aplicación del Reglamento 3528/86 (DOCE n.º L 161, de 22-06-87). [Reglamento 1696/87, a su vez modificado por Reglamento 29950/89 (DOCE n.º L 287, de 05-10-89).

– Modificado por Reglamento (CEE) 1613/89, de 29 de mayo, sobre bosques y silvicultura (DOCE n.º L 165, de 15-06-89).

– Complementado por Reglamento (CEE) 1615/89, de 29 de mayo, por el que se crea un sistema europeo de información y comunicación forestal (EFICS). (DOCE n.º L 165, de 15-06-89).

– Modificado por Reglamento (CEE) 2157/92, (DOCE n.º L 217, de 31-07-92).

– Afectado por Reglamento (CEE) 926/93, de 1 de abril, por el que se modifica el Reglamento (CEE) 1696/87 (DOCE n.º L 100, de 26-04-93).

– Reglamento (CE) 836/94, de 13 de abril, por el que se establecen determinadas modalidades de aplicación del Reglamento 3528/86 (DOCE n.º L 97, de 15-05-94)

– Reglamento (CE) 1091/94, de 20 de abril, por el que se establecen determinadas modalidades de aplicación del Reglamento (CEE) 3528/86 (DOCE n.º L 125, de 18-05-94)

– Modificado por Reglamento (CE) 307/97, de 17 de febrero, (DOCE n.º L 51, de 21-02-97)

– Reglamento (CE) 1390/97 de la Comisión, de 18 de julio, por el que se modifica el Reglamento (CE) 1091/94 por el que se establecen determinadas modalidades de normas para la aplicación del Reglamento (CEE) 3528/86 (DOCE n.º L 190, de 19-08-97).

– Reglamento (CE) 2278/1999 de la Comisión, de 21 de octubre de 1999, por el que se establecen determinadas disposiciones de aplicación del Reglamento (CEE) 3528/86 (DOCE n.º L 279, de 29-10-99).

Directiva 87/217/CEE, de 19 de marzo de 1987, sobre la prevención y la reducción de la contaminación del medio ambiente producida por el amianto. DOCE n.º L 85, de 23-03-1987.

Reglamento n.º 3322/88 sobre determinados clorofluorcarbonos y halones que agotan la capa de ozono, DOCE n.º L 297 de 31-10-88.

Resolución 88/C 285/01 de 14 de octubre de 1988 relativa a la limitación de la utilización de clorofluorcarbonos y halones, DOCE C 285 de 09-11-88.

Directiva 88/609/CEE, de 24 de noviembre de 1988, sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión. DOCE n.º L336, de 07-12-1988.

Directiva 88/77/CEE, 3 de diciembre de 1987, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre las medidas que deben adoptarse contra la emisión de gases procedentes de motores diesel destinados a la propulsión de vehículos. DOCE n.º L36, de 09-02-88, modificada por Directiva 91/542 de 1 de octubre, DOCE n.º L 295 de 25-10-91.

Recomendación 89/349 de 13 de abril de 1989 sobre la reducción de clorofluorcarbonos utilizados en la industria de aerosoles, DOCE n.º L 144, de 27-05-89.

Directiva 89/369/CEE, de 8 de junio de 1989, relativa a la prevención de contaminación atmosférica procedente de nuevas instalaciones de incineración de

residuos municipales. DOCE n.º L163, de 14-06-1989.

Directiva 89/427, de 21 de junio de 1989 DOCE n.º L 201 de 14-07-89 que modifica la Directiva 80/779 de 15 de julio de 1980 relativa a los valores límite y a los valores guía de calidad atmosférica para el anhídrido sulfuroso y las partículas en suspensión, DOCE n.º L 229, de 30-08-80.

Directiva 89/429/CEE, de 21 de junio de 1989, relativa a la reducción de la contaminación atmosférica procedente de las instalaciones existentes de incineración de residuos municipales. DOCE n.º L 203, de 15-07-1989.

Directiva 89/49, de 17 julio de 1989 por la que se adaptan al progreso técnico las Directivas 70/157, 70/220, 70/245, 72/306, 80/1268 y 80/1269 relativas a vehículos a motor, DOCE n.º L 238 de 15-08-89.

Recomendación 90/437, de 27 de junio de 1990 sobre la reducción de los clorofluorcarbonos utilizados por la industria de espuma de plástico en la Comunidad, DOCE n.º L 227 de 21-08-90.

Recomendación 90/438, de 27 de junio de 1990 sobre la reducción de los clorofluorcarbonos utilizados por la industria de la refrigeración en la Comunidad, DOCE n.º L 227 de 21-08-90.

Reglamento (CEE) 594/91, de 4 de marzo de 1991, relativa a las sustancias que empobrecen la capa de ozono, DOCE n.º L 67 de 14-03-91, modificado por el Reglamento 3952/92, de 30 de diciembre de 1992, DOCE n.º L 405 de 31-12-92.

Directiva 91/441/CEE, de 26 de junio de 1991, por la que se modifica la Directiva 70/220/CEE relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre las medidas contra la contaminación atmosférica provocada por los gases de escape de los vehículos de motor.

Directiva 92/72/CEE, de 21 de septiembre de 1992, relativa a la contaminación atmosférica por ozono. DOCE n.º L 297 de 13-10-92.

Directiva 93/12/CEE, de 23 de marzo de 1993, relativa al contenido en azufre de determinados combustibles líquidos. DOCE n.º L 74 de 1993.

Reglamento (CEE) 2047/93, de la Comisión, de 27 de julio, por el que se autoriza el comercio de sustancias que destruyen el ozono y productos que contienen dichas sustancias con países y organizaciones que no sean partes en el protocolo de Montreal, relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono DOCE n.º L 185, de 28-07-93.

Decisión de la Comisión de 23 de febrero de 1996, por la que se conceden contingentes de importación de ciertos productos durante el período del 1 de enero al 31 de diciembre de 1996, y, por otra parte, por la que se conceden contingentes de producción e importación del bromuro de metilo hasta el 31 de diciembre de 1996. DOCE n.º L 89, de 10-04-96.

Decisión del Comité Mixto del EEE 13/96 de 01-03-1996, por la que se modifica el Anexo XX.

(Medio Ambiente del Acuerdo EEE. UNION EUROPEA. DOCE.L-124, de 23-05-1996).

96/511/CE Decisión de la Comisión, 29-07-1996, relativa a los cuestionarios previstos en las Directiva.

80/779/CEE, 82/884/CEE, 84/360/CEE y 85/203/CEE del Consejo. UNION EUROPEA. DOCE.L-213, de 22-08-1996.

Los Estados miembros utilizarán los cuestionarios como base para la elaboración de informes sectoriales: 80/779/CEE relativa a los valores límite y a los valores guía de calidad atmosférica para el anhídrido sulfuroso y las partículas en suspensión. 82/884/CEE relativa al valor límite para el plomo contenido en la atmósfera. 84/360/CEE relativa a la lucha contra la contaminación atmosférica procedente de instalaciones. 85/203/CEE relativa a las normas de calidad del aire para el dióxido de nitrógeno.

Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa al control integrado de la Contaminación. DOCE L 275/1996, de 10-10-1996.

Esta Directiva, conocida como Directiva IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control), establece un marco general en virtud del cual se requiere una autorización previa para la explotación de ciertas instalaciones).

96/62/CE Directiva del Consejo, de 27-09-1996, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente. UNION EUROPEA. DOCE.L-296, de 21-11-1996.

El objetivo general de la Directiva es definir los principios básicos respecto a:

– *Definir y establecer los objetivos de calidad del aire ambiente de la Comunidad.*

– *Evaluar la calidad del aire ambiente de los Estados miembros.*

– *Disponer de información adecuada sobre la calidad del aire ambiente y procurar que el público tenga conocimiento de la misma.*

– *Mantener una buena calidad del aire ambiente.*

En el anexo I se relaciona la lista de contaminantes atmosféricos que se tienen que tener en cuenta en la

evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente:

I) Contaminantes regulados por las Directivas existentes:

- 1. Dióxido de azufre*
- 2. Dióxido de nitrógeno*
- 3. Partículas finas*
- 4. Partículas en suspensión*
- 5. Plomo*
- 6. Ozono*

II) Otros contaminantes:

- 7. Benceno*
- 8. Monóxido de carbono*
- 9. Hidrocarburos policíclicos aromáticos*
- 10. Cadmio*
- 11. Arsénico*
- 12. Níquel*
- 13. Mercurio*

Rectificación de la Directiva 96/69/CE, de 8 de octubre, por la que se modifica la Directiva 70/220/CEE, relativa a la aproximación de las legislaciones de

los Estados miembros en materia de medidas contra la contaminación atmosférica por las emisiones de los vehículos a motor DOCE n.º L 282, de 01-11-96. DOCE n.º L 83, de 25-03-97.

Decisión 101/97/CE, del Consejo, de 27 de enero, por el que se establece un intercambio recíproco de información y datos de las redes y estaciones aisladas de medición de la contaminación atmosférica en los Estados Miembros (DOCE n.º L 35, de 05-02-97).

Reglamento (CE) 307/97, de 17 de febrero, por el que se modifica el Reglamento (CE) 3528/86, relativo a la protección de los bosques en la Comunidad contra la contaminación atmosférica (DOCE n.º L 51, de 21-02-97).

Decisión del Comité Mixto del EEE 36/97, de 29-05-1997 por la que se modifica el Anexo XX

(Medio Ambiente) del Acuerdo EEE. UNION EUROPEA. DOCE.L-270, de 02-10-1997.

Decisión de la Comisión de 16 de diciembre de 1997 sobre la distribución de las cantidades de las sustancias reguladas que se autorizan para usos esenciales en la Comunidad en 1998 de conformidad con el Reglamento (CE) n.º 3093/94 del Consejo relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono (DOCE n.º L 10, de 16-01-98).

Directiva 97/20/CE, de 18 de abril, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 72/306/CEE, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre medidas

que deben adoptarse contra las emisiones contaminantes procedentes de los motores diesel destinados a la propulsión de vehículos (DOCE n.º L 125, de 16-05-97).

Decisión 283/97/CE, de 21 de abril, sobre métodos de medición armonizados para determinar la concentración en masa de dioxinas y furanos en las emisiones atmosféricas conforme al apartado 2 del art. 7 de la Directiva 94/67/CE relativa a la incineración de residuos peligrosos (DOCE n.º L 113, de 30-04-97).

Decisión 414/97/CE, de 19 de junio, sobre la distribución de las cantidades de las sustancias reguladas que se autorizan para usos esenciales en la Comunidad en 1997 de conformidad con el Reglamento (CE) 3093/94, relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono (DOCE n.º L 175, de 03-07-97).

Reglamento (CE) 1390/97 de la Comisión, de 18 de julio, por el que se modifica el Reglamento (CE) 1091/94 por el que se establecen determinadas modalidades de normas para la aplicación del Reglamento (CE) 3528/86 del Consejo para la aplicación de los bosques de la Comunidad contra la contaminación atmosférica (DOCE n.º L 190, de 19-08-97).

Decisión de la Comisión de 16 de diciembre de 1997, sobre la distribución de las cantidades de sustancias reguladas que se autorizan para usos esenciales en la Comunidad en 1998, de conformidad con el Reglamento (CE) 3093/94, del Consejo, relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono (DOCE n.º L 19, de 16-1-98).

Directiva 97/68/CE, del parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 1997, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre mediadas contra la emisión de gases y partículas contaminantes procedentes de los motores de combustión interna que se instalen en las máquinas móviles no de carretera (DOCE n.º L 59, de 27-2-98).

Decisión de la Comisión de 25 de febrero de 1998 sobre un cuestionario destinado a la elaboración de los informes que deben presentar los Estados miembros sobre la aplicación de la Directiva 94/67/CE del Consejo relativa a la incineración de residuos peligrosos (aplicación de la Directiva 91/692/CEE del Consejo). DOCE n.º L 67, de 07-03-98.

Decisión del Consejo de 23 de marzo de 1998, relativa a la celebración por la Comunidad europea del protocolo del convenio de 1979, sobre contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia relativo a nuevas reducciones de las emisiones de azufre (DOCE n.º L 326, de 3-12-98).

Decisión 76/98 31-07 por la que se modifica el anexo XX (Medio ambiente) del Acuerdo EEE. UNION EUROPEA. DOCE.L-172, de 08-07-1999.

Decisión 97/98 de 25-09-1998 por la que se modifica el anexo XX (Medio ambiente) del Acuerdo EEE. UNION EUROPEA. DOCE.L-189, de 22-07-1999.

Directiva 98/69/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de octu-

bre de 1998, relativa a las medidas que deben adoptarse contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor y por la que se modifica la Directiva 70/220/CEE del Consejo (DOCE n.º L 350, de 28-12-98).

Observaciones:

– *Rectificación a esta Directiva (DOCE n.º L 104, de 21-4-99).*

Directiva 98/70/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de octubre de 1998, relativa a la calidad de la gasolina y el gasóleo y por la que se modifica la Directiva 93/12/CEE, del Consejo (DOCE n.º L 350, de 28-12-98).

Decisión 1999/24/CE, del Consejo, de 14 de diciembre de 1998, por la que se aprueba un programa plurianual de medidas tecnológicas para el fomento de la utilización limpia y eficiente de combustibles sólidos (DOCE n.º L 7, de 13-1-99).

Decisión 1999/58/CE, de la Comisión, de 11 de enero de 1999, por la que se conceden cuotas de importación de los clorofluorocarburos totalmente halogenados 11, 12, 113, 114 y 115, otros clorofluorocarburos totalmente halogenados, halones, tetracloruro de carbono, 1, 1,, 1-tricloetano, hidrobromofluorocarburos y bromuro de metilo durante el periodo de 1 de enero al 31 de diciembre de 1999, y, por otra parte, por la que se conceden cuotas de comercialización de hidroclorofluorocarburos durante el periodo de 1 de enero al 31 de diciembre de 1999 (DOCE n.º L 19, de 26-1-99).

Decisión 1999/59/CE, de la Comisión, de 11 de enero de 1999, sobre la distribución de las cantidades de las sustancias reguladas que se autorizan para usos esenciales en la Comunidad en 1999 de conformidad con el Reglamento (CE) 3093/94, del Consejo, relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono (DOCE n.º L 19, de 26-1-99).

Recomendación 1999/125/CE, de la Comisión, de 5 de febrero de 1999, sobre reducción de las emisiones de CO2 producidas por los automóviles (DOCE n.º L 40, de 13-2-99).

Directiva 1999/13/CE, del Consejo, de 11 de marzo de 1999, relativa a la limitación de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) debidas al uso de disolventes orgánicos en determinadas actividades e instalaciones (DOCE n.º L 85, de 29-3-99).

Observación:

– *Rectificación a esta Directiva (DOCE n.º L 188, de 21-7-99).*

Decisión 1999/296/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, por la que se modifica la Decisión 93/389/CEE relativa a un mecanismo de seguimiento de las emisiones de CO2 y de otros gases de efecto invernadero en la Comunidad (DOCE n.º L 117, de 5-5-99).

Directiva 1999/32/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa a la reducción del contenido de azufre de determinados combustibles líquidos y por la que se modifica la Directiva 93/12/CEE (DOCE n.º L 121, de 11-5-1999).

Directiva 1999/30/CE del Consejo, de 22 de abril de 1999, relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente (DOCE n.º L 163, de 29-6-99).

Reglamento (CE) 1545/1999 de la Comisión, de 14 de julio de 1999, que modifica el Reglamento (CE) 1091/94 por el que se establecen determinadas modalidades de normas para la aplicación del Reglamento (CEE) 3528/86 del Consejo relativo a la protección de los bosques de la Comunidad contra la contaminación atmosférica (DOCE n.º L 180, de 15-7-99).

Decisión 1999/601/CE de la Comisión, de 1 de septiembre de 1999, por la que se modifica la Decisión 1999/551/CE en lo que respecta a la revisión de las medidas de protección respecto de la contaminación por dioxinas [notificada con el número C(1999) 2880] (DOCE n.º L 232, de 2-9-99).

Reglamento (CE) 2278/1999 de la Comisión, de 21 de octubre de 1999, por el que se establecen determinadas disposiciones de aplicación del Reglamento (CEE) 3528/86 del Consejo relativo a la protección de los bosques en la Comunidad contra la contaminación atmosférica (DOCE n.º L 279, de 29-10-99).

Directiva 1999/96/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de diciembre de 1999 relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre las medidas que deben adoptarse contra la emisión de gases y partículas contaminantes procedentes de

motores diésel destinados a la propulsión de vehículos, y contra la emisión de gases contaminantes procedentes de motores de encendido por chispa alimentados con gas natural o gas licuado del petróleo destinados a la propulsión de vehículos y por la que se modifica la Directiva 88/77/CEE del Consejo.

Directiva 1999/100/CE de la Comisión, de 15 de diciembre de 1999, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 80/1268/CEE del Consejo relativa a las emisiones de dióxido de carbono y al consumo de combustible de los vehículos de motor (DOCE n.º L 334, de 28-12-99).

Directiva 1999/101/CE de la Comisión, de 15 de diciembre de 1999, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 70/157/CEE del Consejo relativa al nivel sonoro admisible y el dispositivo de escape de los vehículos de motor (DOCE n.º L 334, de 28-12-99).

Directiva 1999/102/CE de la Comisión, de 15 de diciembre de 1999, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 70/220/CEE del Consejo relativa a las medidas contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor (DOCE n.º L 334, de 28-12-99).

Informe especial n.º 5/99 sobre la cooperación transfronteriza de Phare (1994-1998), acompañado de las respuestas de la Comisión.

Decisión 2000/22/CE de la Comisión, de 16 de diciembre de 1999, sobre la distribución de las cantidades de las sustancias reguladas que se autorizan

para usos esenciales en la Comunidad en 2000 de conformidad con el Reglamento (CE) 3093/94 del Consejo relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono (DOCE n.º L7, de 12.1-00).

Decisión 2000/379/CE de la Comisión, de 14 de diciembre de 1999, por la que se conceden cuotas de importación de los clorofluorocarburos totalmente halogenados 11, 12, 113, 114 y 115, otros clorofluorocarburos totalmente halogenados, halones, tetracloruro de carbono, 1,1,1-tricloroetano, hidrobromofluorocarburos y bromuro de metilo durante el período del 1 de enero al 31 de diciembre de 2000, y, por otra parte, por la que se conceden cuotas de comercialización de hidroclofluorocarburos durante el período del 1 de enero al 31 de diciembre de 2000 (DOCE n.º L139, de 10.6-00).

Directiva 2000/25/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de mayo de 2000, relativa a las medidas que deben adoptarse contra las emisiones de gases contaminantes y de partículas contaminantes procedentes de motores destinados a propulsar tractores agrícolas o forestales y por la que se modifica la Directiva 74/150/CEE del Consejo (DOCE n.º L 173, de 12.7-00). No se incluye el texto.

Directiva 2000/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 6 de junio de 2000 relativa a las inspecciones técnicas en carretera de los vehículos industriales que circulan en la Comunidad.

Reglamento (CE) 2037/2000 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29

de junio de 2000, sobre las sustancias que agotan la capa de ozono (DOCE n.º L 244, de 29.9-00).

Reglamento (CE) 2038/2000 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 28 de septiembre de 2000, que modifica el Reglamento (CE) 2037/2000 sobre las sustancias que agotan la capa de ozono, en cuanto a los inhaladores dosificados y las bombas de infusión (DOCE n.º L 244, de 29.9-00).

Reglamento (CE) 2039/2000 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 28 de septiembre de 2000, que modifica el Reglamento (CE) 2037/2000 sobre las sustancias que agotan la capa de ozono, en cuanto al año de referencia para la asignación de cuotas de hidroclofluorocarburos (DOCE n.º L 244, de 29.9-00).

Posición común (CE) n.º 47/2000, de 10 de octubre de 2000, aprobada por el Consejo de conformidad con el artículo 251 del tratado constitutivo de la Comunidad Europea, con vistas a la adopción de una Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo que modifica la Directiva 70/200/CEE del Consejo sobre medidas contra la contaminación atmosférica causada por los vehículos de motor (DOCE C 329, de 20.11-00).

Decisión 2000/646/CE del Consejo, de 17 de octubre de 2000, sobre la aprobación de la enmienda al Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono (DOCE n.º L 272, de 25.10-00).

Dictamen del Comité de las regiones sobre: la Propuesta de Directiva del Par-

lamento Europeo y del Consejo relativa a los límites máximos nacionales de emisión de determinados contaminantes atmosféricos y la Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo relativa al ozono en el aire ambiente (DOCE C 317, de 6.11-00).

Directiva 2000/69/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de noviembre de 2000, sobre los valores límite para el benceno y el monóxido de carbono en el aire ambiente (DOCE n.º L 313, de 13.12-00).

Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de diciembre de 2000, relativa a la incineración de residuos (DOCE n.º L 332, de 28.12-00).

Decisión 2001/59/CE de la Comisión, de 5 de enero de 2001, por la que se autoriza al Reino de los Países Bajos a disfrutar de una exención temporal que permita el uso de clorofluorocarburos (CFC) hasta el 31 de diciembre de 2002 en mecanismos de liberación de sustancias para dispositivos herméticamente sellados destinados a ser implantados en el cuerpo humano para liberar dosis precisas de medicamento de conformidad con el apartado 1 del artículo 4 del Reglamento (CE) 2037/2000 del Parlamento Europeo y del Consejo sobre las sustancias que agotan la capa de ozono (DOCE n.º L 21, de 23-01-01).

Directiva 2001/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de enero de 2001, por la que se modifica la Directiva 70/220/CEE del Consejo, sobre me-

didias contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor.

Directiva 2001/09/CE de la Comisión, de 12 de febrero de 2001, por el que se adapta al progreso técnico la Directiva 96/96/CE del Consejo sobre la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros relativas a la inspección técnica de los vehículos a motor y de sus remolques (texto pertinente a efectos del EEE).

Decisión de la Comisión, de 13 de febrero de 2001, sobre la distribución de las partículas reguladas que se autorizan para usos esenciales en la Comunidad en 2001 de conformidad con el Reglamento (CE) n.º 2037/2000 del Parlamento Europeo y del Consejo sobre las sustancias que agotan la capa de ozono (DOCE L n.º 118 de 27 de abril de 2001).

Directiva 2001/11/CE, de la Comisión de 14 de febrero de 2001, por la que se adapta el progreso técnico la Directiva 96/96/CE sobre la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros relativas a la inspección técnicas de los vehículos a motor y sus remolques –Control de funcionamiento de limitadores de velocidad de los vehículos comerciales (DOCE C n.º 48 de 17 de febrero de 2001).

2001/379/CE: Decisión del Consejo, de 4 de abril de 2001, relativa a la aprobación, en nombre de la Comunidad Europea, del Protocolo al Convenio de 1979 sobre contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia en materia de metales pesados.

Directiva 2001/27/CE de la Comisión de 10 de abril, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 88/77/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre las medidas de que deben adoptarse contra la emisión de gases y partículas contaminantes procedentes de motores de encendido por compresión destinados a la propulsión de vehículos y la emisión de gases contaminantes procedentes de motores de encendido por chispa alimentados con gas natural o gas licuado del petróleo (DOCE L n.º 107 de 18 de abril de 2001).

Decisión 2001/628/CE de la Comisión de 30 de abril de 2001, sobre la asignación de las cantidades de sustan-

cias reguladoras de conformidad con el Reglamento (CE) 2037/2000 del Parlamento Europeo y del Consejo sobre sustancias que agotan la capa de ozono, en el período comprendido entre 1 de enero y el 31 de diciembre de 2001.(DOCE L, 14 de agosto de 2001).

Directiva 2001/63/CE de la Comisión de 17 de agosto, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 97/68/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre medidas contra la emisión de gases y partículas contaminantes procedentes de los motores de combustión interna que se instalen en la máquinas móviles no de carretera (DOCE L, 23 de agosto de 2001).

CAPÍTULO 116

LEGISLACIÓN SOBRE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN EL ESTADO ESPAÑOL

116.1. EXPLICACIÓN GENERAL

La regulación vigente de todas las actividades contaminantes o susceptibles de contaminar la atmósfera se encuentra en la Ley 38/1972, de Protección del Ambiente Atmosférico.

Como ya se ha indicado en otro capítulo, en el artículo 1.2 de la Ley 38/1972, de 22 de Diciembre de Protección del Ambiente Atmosférico, la contaminación atmosférica es: *La emisión de cualquier producto al aire que el mismo no sea capaz de absorber, asimilar o difundir provocando, por ello, daños de diversidad de bienes jurídicamente protegidos.*

Esta Ley estaba incluida en el Reglamento, todavía vigente, de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas, de 30 de noviembre de 1961, aprobado por el Decreto 2414/1961 de 30 de noviembre. El artículo 3 del citado Reglamento clasifica las actividades molestas, insalubres, nocivas y peligrosas que producen emisiones a la atmósfera:

Molestas: Serán calificadas como molestas las actividades que constituyan una incomodidad por los ruidos o vibraciones que produzcan o por los humos, gases, olores, nieblas, polvos en suspensión o sustancias que eliminen.

Insalubres: Se calificarán como insalubres las que den lugar a desprendimiento o evacuación de productos que puedan resultar directa o indirectamente perjudiciales para la salud humana.

Nocivas: se aplicará la calificación de nocivas a las que, por las mismas causas pueden ocasionar daños en la riqueza agrícola, forestal pecuaria o piscícola.

Peligrosas: Se consideran peligrosas las que tengan por objeto fabricar, manipular, expender o almacenar productos susceptibles de originar riesgos graves por explosiones, combustiones radiaciones u otros de análoga importancia para las personas o los bienes.

En el artículo 11 de la mencionada Ley se citan las empresas que necesitan

autorización de funcionamiento. Dicho artículo dice:

En relación con el emplazamiento de esta clase de actividades, se estará a lo que se dispone el artículo 4 y habrá de tener se en cuenta para la concesión de las licencias, y en todo caso para su funcionamiento, que las chimeneas, vehículos y demás actividades que puedan producir humos, polvo o ruidos deberán dotarse exclusivamente de los elementos correctores necesarios para evitar molestias al vecindario.

En el artículo 18 del Reglamento se mencionan las actividades que requieren medidas correctoras:

Las actividades calificadas como insalubres, en atención a producir humos, polvo, nieblas, vapores o gases de esta naturaleza, deberán obligatoriamente estar dotadas de las instalaciones adecuadas y eficaces de precipitación del polvo, o de depuración de los vapores o gases, en seco, en húmedo o por procedimiento eléctrico.

En ningún caso la concentración de gases, vapores, humos, polvo y neblinas en el aire en el interior de las explotaciones podrá sobrepasar de las cifras que figuran en el anexo número 2.

116.2. CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE CONTAMINANTES PERMITIDAS EN EXPLOTACIONES INDUSTRIALES

A continuación se muestran en tablas las concentraciones según dicha Ley.

CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE GASES Y VAPORES PERMITIDAS EN EL AMBIENTE INTERIOR DE LAS EXPLOTACIONES INDUSTRIALES

Gases y vapores		
Sustancias	ppm	mg/m ³
Acetaldehído (aldehído acético)	200	360
Amilo, acetato (acetato de amilo)	200	1.50
Acético, ácido	10	25
Acético, anhídrido	5	20
Acetona	1.000	2.400
Acroleína	0,5	1,2
Alfílico, alcohol	2	5
Alilo, cloruro (cloruro de alilo)	5	15
Iso-Amil, alcohol	100	360
Amoníaco	100	70
Anilina	5	19
Arsina	0,05	0.2
Azufre, bióxido (anhídrido sulfuroso)	5	13
Azufre, monocloruro	1	6
Benceno	35	110
Bromo	0,1	0,7
1,3- Butadieno	1.000	2.200
n-Butanol	100	300
Butanol terciario	100	300
Butanona (etil-metilcetona) . .	200	590
Butil-celloseve (éter butílico del glicol etilénico)	50	240
Butil-metil-cetona (hexanona)	100	410
n-Butilo-acetato	200	950
Carbitol (éter etílico del glicol dietilénico)	50	270
Carbono, bisulfuro (sulfuro de carbono)	20	60
Carbono, dióxido (anhídrido carbónico)	5.000	9.000

Gases y vapores		
Sustancias	ppm	mg/m ³
Carbono, monóxido (óxido de carbono)	100	110
Carbono, tetracloruro	25	160
Celloseve (éter etílico del glicol etilénico)	200	740
Celloseve, acetato	100	540
Cianhídrico, ácido	10	11
Ciclohexano	400	1.400
Ciclohexanol	50	200
Ciclohexanona	50	200
Ciclohexeno	400	1.350
Ciclopropano	400	690
Clorhídrico, ácido	5	7
Clorhidrina, etilénica	5	16
Cloro	1	3
2-Clorobutadieno	25	90
Cloroformo	50	240
1-Cloro-1-nitropropano	20	100
Cresol	5	22
o-Diclorobenceno	50	300
p-Diclorobenceno	75	450
Diclorodifluórometano (freón 12)	1.000	4.950
1,1-Dicloroetano	100	400
1,2-Dicloroetano	100	400
1,2-Dicloroetileno	200	790
Dicloroetílico, éter	15	90
Diclorometano	500	1.750
Dicloromonofluórometano (freón 21)	1.000	4.200
1,1-Dicloro-1-nitroetano	10	60
1,2-Dicloropropano	75	350
Diclorotetrafluóretano (freón 114)	1.000	7.000
Dimetil, sulfato (sulfato de dimetilo)	1	5
Dimetilanilina	5	25
Dioxano	100	360
Estibamina	0,1	0,5

Gases y vapores		
Sustancias	ppm	mg/m ³
Estireno, monómero de	100	425
Etanol (alcohol etílico)	1.000	1.900
Etil eter (éter etílico)	400	1.200
Etil-benceno	200	870
Etileno, óxido	50	90
Etilo, acetato (acetato de etilo)	400	1.400
Etilo, bromuro (bromuro de etilo)	200	890
Etilo, cloruro (cloruro de etilo)	1.000	2.600
Etilo, formiato (formiato de etilo)	100	300
Etilo, silicato (orto silicato de etilo)	100	850
Fenol (ácido fénico)	5	19
Flúorhídrico, ácido	3	2
Formol	5	6
Fosfamina	0,05	0,07
Fósforo, tricloruro	0,5	3
Fosgeno	1	4
Gasolina	500	2.000
Heptano	500	2.000
Hexano	500	1.800
Isoforona	25	140
Mesitilo, óxido (óxido de mesitilo)	25	100
Metanol (ácido metílico)	200	260
Metil cellosolve	25	80
Metil cellosolve, acetato	25	120
Metil-ciclohexano	500	2.000
Metil-ciclohexanol	100	470
Metil-ciclohexanona	100	460
Metil-isobutil-cetona (haxona)	100	410
Metilo, acetato (acetato de metilo)	200	610
Metilo, bromuro (bromuro de metilo)	20	80

Gases y vapores

Sustancias	ppm	mg/m ³
Metilo, cloruro (cloruro de metilo)	100	210
Metilo, formiato (formiato de metilo)	100	250
Monoclorobenceno	75	350
Mononitrotolueno	5	30
Nafta de alquitrán	200	800
Nafta de petróleo	500	2.000
Níquel carbonilo	0,001	0,007
Nitrilo acrílico	20	45
Nitrobenceno	1	5
Nitroetano	100	310
Nitrógeno, óxidos (expresado en NO ₂)	5	9
Nitroglicerina	0,5	5
Nitrometano	100	250
2-Nitropropano	50	180
Octano	500	2.350
Ozono	0,1	0,2
Pentano	1.000	2.950
2-Pentanona (metil-propilcetona)	200	700
iso-Propanol	400	980
iso-Propil, éter	500	2.100
Propilo, acetato (acetato de propilo)	200	840
Selenhídrico, ácido	0,05	0,2
Sulfhídrico, ácido	20	30
1,1, 2,2-Tetracloroetano	5	35
Tetracloroetileno	100	670
Tolueno (toluol)	200	750
Toluidina	5	22
Trementina, esencia (aguarrás)	100	560
Tricloroetileno	100	520
Triclorofluórometano (freón 11)	1.000	5.500
Vinilo, cloruro (cloruro de vinilo)	500	1.300
Xileno (xilol)	200	870

CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE HUMOS, POLVOS Y NEBLINAS PERMITIDAS EN EL AMBIENTE INTERIOR DE LAS EXPLOTACIONES INDUSTRIALES

Humos, polvos y neblinas	
Sustancias	mg/m ³
Antimonio	0,5
Arsénico	0,5
Bario (compuestos solubles)	0,5
Cadmio, óxidos (humos)	0,1
Cianuros	5
Clorodifenilo (42 por 100 de cloro)	1
Clorodifenilo (54 por 100 de cloro)	0,5
Crómico, ácido y cromatos (CrO ₃)	0,1
Dinitrotolueno	1,5
Fluoruros	2,5
Fósforo (amarillo)	0,1
Fósforo, pentacloruro	1
Fósforo, pentasulfuro	1
Hierro, óxidos (humos)	15
Yodo	1
Magnesio, óxidos (humos)	15
Manganeso	6
Mercurio	0,1
Mercurio (compuestos orgánicos)	0,01
Pentaclorofenol	0,5
Pentacloronaftaleno	0,5
Plomo	0,15
Selenio, compuestos de	0,1
Sulfhídrico, ácido	1
Teluro	0,1
Tetrilo	1,5
Tricloronaftaleno	5
Trinitrotolueno	1,5
Cinc, óxidos (humos)	15

CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE POLVO MINERAL EN SUSPENSIÓN PERMITIDAS EN EL AMBIENTE INTERIOR DE LAS EXPLOTACIONES INDUSTRIALES

Polvo mineral en suspensión	
Sustancias	Millones de partículas por m³ de aire
Amianto	175
Antracita	350
Antracita (acarreo a la mina)	530
Carborundo	1.765
Cemento Portland	1.765
Corindón	1.765
Mica	1.765
(menos del 5% de sílice libre)	
Pizarras	1.765
(menos del 5% de SiO ₂ libre)	
Polvos inertes no fibrógenos	1.765
Silicatos, en SiO ₂ :	
Con más del 50% de SiO ₂ libre	175
Con 5 a 50% de SiO ₂ libre	700
Con menos de 5% de SiO ₂ libre	1.765
Esteatita	700
(menos de 5 % SiO ₂ libre)	
Polvo silíceo	700
(menos de 5% de SiO ₂ libre)	

116.3. LEGISLACIÓN BÁSICA

El conjunto de leyes que indicamos a continuación forma la legislación básica estatal, la cual tiene que adoptar cada una de la Autonomías, desarrollando normas más estrictas para su protección.

La Ley de Protección del Ambiente Atmosférico se desarrolló en el Reglamento dictado por el Decreto 833/1975 que ha ido adaptándose y modificándose a las imposiciones de la Unión Europea.

Así se hace notar en los Decretos 1613/1981, de 1 de agosto, Normas de Calidad del Aire en lo referente a la contaminación por SO₂ y partículas y el 717/1987, de 27 de mayo, Nuevas Normas de Calidad del Aire en lo referente a la contaminación por NO₂ y Plomo.

El Real Decreto 1494/1995 de 8 de septiembre, sobre contaminación atmosférica por ozono.

La Orden de 10 de agosto de 1976, por la que se establecen las Normas Técnicas para el análisis y valoración de los contaminantes de naturaleza química presentes en la atmósfera.

La Orden de 18 de octubre de 1976 acerca del progresivo aumento del desarrollo industrial.

El Decreto 3025/1974, de 9 de agosto, acerca de vehículos automóviles.

El Decreto 2204/1975, de 23 de agosto, sobre la Composición y Calidad de combustibles.

El Real Decreto 1081/1991, de 2 de febrero, por el que se establecen las normas para la prevención de la Contaminación del medioambiente producida por el amianto.

El Real Decreto 646/1991, de 22 de abril, por el que se establecen nuevas normas sobre la limitación de emisiones a la atmósfera de determinados Agentes Contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión.

El Real Decreto 1088/1992, de 11 de septiembre, por el que se establecen nuevas normas sobre la limitación de las

emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de Instalaciones de Incineración de Residuos Municipales.

La Ley básica, Ley de Protección del Ambiente Atmosférico, establece las pautas de actuación del Gobierno y de la Administración para prevenir, vigilar y corregir las situaciones de contaminación atmosférica. Para ello utiliza dos herramientas:

1. Establecimiento de los niveles de emisión e inmisión. Esta herramienta es una medida de anticontaminación.
2. La puesta en marcha de medidas correctoras. Para ello es necesario la caracterización de las zonas contaminadas para poder declararlas como zonas de atmósfera contaminada y establecer las medidas de emergencia pertinentes. Esta medida es de descontaminación.

Para realizar el establecimiento de los niveles existe una serie de normas:

Normas de emisión: Indican los límites de producción de sustancias nocivas a la atmósfera. Permite la detección del foco que está cometiendo la infracción para aplicarle las sanciones pertinentes. Los niveles de emisión establecidos no son fijos y están sujetos a revisiones futuras.

Normas de inmisión: límites de admisión de los contaminantes en el aire sin alterar su calidad. Los valores de inmisión permiten diferenciar las áreas contaminadas para aplicar a las más vulnerables medidas más estrictas.

Los niveles de emisión carecen de uniformidad debido a:

- Las características del proceso.
- Las materias primas utilizadas.
- Las condiciones de la instalación.
- La composición de las emisiones.

En la tabla adjunta se muestran los niveles y valores de inmisión.

VALORES DE INMISIÓN

Contaminante	Período de referencia	Valor límite	Indicador considerado	Observaciones
Partículas (PTS) R.D. 1321/1992	Anual (1 abril a 31 marzo)	150 µg/m ³	Valores medio diarios	
		300 µg/m ³	Percentil 95 de las medias diarias	
Partículas (humos negros -HN-) R.D. 1321/1992	Anual (1 abril a 31 marzo)	80 µg/m ³	Mediana de los promedios diarios	* No se deben sobrepasar más de tres días consecutivos
		250 µg/m ³ *	Percentil 98 de las medias diarias	
	Período invernal (1 octubre a 31 marzo)	130 µg/m ³	Mediana de las medias diarias	
Dióxido de azufre R.D. 1321/1992	Anual (1 abril a 31 marzo)	80 µg/m ³ (si HN > 40 o PTS >150)	Mediana de los valores medios diarios	* No se deben sobrepasar durante más de 3 días consecutivos
		120 µg/m ³ (si HN ≤40 o PTS ≤ 150)		
		250 µg/m ³ * (si HN >150 o PTS > 350)	Percentil 98 de todos los valores medios diarios	
		350 µg/m ³ * (si HN ≤ 150 o PTS ≤ 350)		
	Período invernal	130 µg/m ³ (si HN > 60 o PTS > 200)	Mediana de los valores medios diarios	
		180 µg/m ³ (si HN ≤ 60 o PTS ≤ 200)		
Dióxido de nitrógeno R.D. 717/1987	Anual (1 enero a 31 diciembre)	200 µg/m ³	Percentil 98 de las medias horarias o períodos inferiores a la hora	Dato válido si missing < 25%
Monóxido de carbono D. 833/1975	Media hora	45 µg/m ³	Concentración máxima	Emergencia de primer grado *, de segundo ** y total ***
	8 horas	15 µg/m ³	Media	
	Día	34 µg/m ³ * 46 µg/m ³ ** 60 µg/m ³ ***	Media	
Ozono R.D.1494/1995	8 horas	110 µg/m ³	Media	Umbral de protección de la salud
	1 hora	180 µg/m ³	Media	Umbral de información a la población
	1 hora	360 µg/m ³	Media	Umbral de alerta a la población

La definición legal de *umbral de imisión* aparece en el artículo 2 de la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico y aparece como: *los límites máximos tolerables de presencia en la atmósfera de cada contaminante, aisladamente o asociado con otros en su caso*. Para determinar estos valores hay que individualizar los contaminantes en función de los períodos de exposición, considerando como valores límites (los que pueden ser superados como medida de protección de la salud humana).

Se denominan *valores guía* los valores que previenen las situaciones que alteran el estado de salud y obtienen una calidad deseable. Los *valores de referencia* son aquellos que si se exceden implican una enorme alteración de las condiciones ambientales para la salud humana, siendo necesaria la puesta en marcha de una situación de emergencia.

La adopción de los mejores medios prácticos para atajar la contaminación está en función de:

- Los procesos de fabricación.
- Los avances en la tecnología de anti-contaminación.
- La evolución del mercado internacional de los productos.
- Las soluciones a la crisis energética y al abastecimiento de las materias primas.

Esta normativa debe ser completada con otras disposiciones, reglamentos y demás. Entre éstas cabe destacar el Reglamento sobre instalaciones de combustión, las normas de homologación de

los quemadores, las normas de calidad y de utilización de los combustibles y carburantes, las normas de cálculo de la altura de las chimeneas para conseguir una dispersión adecuada de las emisiones y las normas de analítica de contaminantes.

Como control de la normativa es necesario desarrollar unos mecanismos de vigilancia y de información del estado de la atmósfera. Para ello, la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico crea la Red Nacional de Vigilancia y Prevención de la Contaminación Atmosférica que actúa conjuntamente con las estaciones de la Red de Vigilancia de la Contaminación Transfronteriza a Gran Distancia.

El Reglamento 1210/90 y la Decisión 82/459 establece la Agencia Europea del Medio Ambiente y constituye la Red Europea de Información y de Observación del Medio Ambiente.

Para aplicar toda esta normativa es necesario contar con los medios económicos y humanos para garantizar el éxito de la defensa de los intereses sociales.

Zonas especiales

Existen dos factores fundamentales a tener una especial consideración:

- El área geográfica delimitada en la que la contaminación es constante y grave, y es lo que llamamos zonaje. En los artículos 5 y siguientes de la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico y en los artículos del 14 al

32 del Decreto 833/1975 se establecen las pautas para declarar una zona de atmósfera contaminada. Esta declaración también se plasma en los artículos 5 y siguientes del Real Decreto 1613/1985.

- La excesiva acumulación temporal de agentes contaminantes lo que implicaría la activación de una situación de emergencia. Esta situación de emergencia se produce cuando se rebasan excesivamente los niveles de inmisión fijados por los organismos gubernamentales. En el artículo 7.1 de la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico y en el artículo 33 del Decreto 833/1975 hacen referencia a la declaración de la situación de emergencia. Esta formalización se llevará a cabo por el organismo competente de la cada Comunidad Autónoma. Todas las medidas que se vayan a tomar tienen que estar reflejadas en un plan de actuación elaborado por el organismo de la comunidad autónoma.

Normativa sectorial

La Ley de Protección del Ambiente Atmosférico regula la contaminación atmosférica desde una perspectiva de prevención. Sectorialmente, esta prevención habría que considerarla en dos fuentes:

1. Vehículos automóbiles.
2. Contaminación por establecimientos industriales.
3. Calefacción.

Las emisiones procedentes de los vehículos son muy importantes debido al creciente número de los mismos.

El control de las emisiones producidas por los **vehículos automóbiles** viene determinado por las siguientes normas:

- Decreto 3025/1974, de 9 de agosto, sobre la limitación de la Contaminación Atmosférica producida por los Vehículos Automóbiles
- Real decreto 2116/1985, de 9 de octubre, sobre la Homologación de vehículos Automóbiles de Motor en lo que se refiere a la emisión de los gases contaminantes.
- Orden 3 de septiembre, sobre el cumplimiento de la Directiva 88/76 CEE, sobre emisiones de gases de escape procedentes de vehículos.
- Orden de 16 de octubre de 1992, sobre el cumplimiento de la Directiva 91/441/CEE, sobre Emisión de gases de escape procedentes de vehículos automóbiles.
- Directiva 99/13 relativa a la limitación de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes liberados en la atmósfera por el uso de disolventes orgánicos en determinadas actividades e instalaciones. Se pretende reducir 2/3 el uso de COV liberados a la atmósfera por el uso de disolventes industriales y que, junto con el óxido de nitrógeno y la luz solar, provocan el nebluno.

Una de las principales fuentes de contaminación de atmosférica y acústica el tráfico rodado. El control se realiza

mediante la realización de la Inspección Técnica de Vehículos que se llevará a cabo periódicamente y que verifica el estado de funcionamiento del vehículo y de los sistemas correctores.

El permiso definitivo de la instalación de las industrias corresponde a las autoridades municipales, según dice el Reglamento de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas. La autorización definitiva para una actividad potencialmente contaminante se otorgará si hay establecidas un dispositivo de medidas correctoras y preventivas para dispersar los humos, polvos o vapores hasta alcanzar los niveles legales permitidos.

La licencia abarca todo el ciclo de vida de la instalación, tanto en el funcionamiento como en las sucesivas ampliaciones o modificaciones.

El control del cumplimiento legal se basa en la comprobación de: *Las emisiones de contaminantes a la atmósfera y su incidencia sobre el Medio Ambiente; la eficacia, funcionamiento y mantenimiento de las instalaciones correctoras implantadas por la Empresa para mejorar la calidad de las emisiones; y el correcto diseño, montaje y uso de las instalaciones de fabricación que pudieran tener incidencia sobre el medio ambiente- y -cuantos extremos técnicos o administrativos condicionen la autorización de funcionamiento de una instalación a los efectos de emisión de contaminantes a la atmósfera.*

La calefacción es otro sector contaminante que hay que considerar. Ésta se controla por:

- Decreto 2204/1975, que controla la calidad de los combustible empleados.

- Orden de 10 de diciembre de 1975, que obliga al sometimiento de los combustibles a las prescripciones técnicas de homologación.
- Realización de una labor de inspección periódica y de control.

116.4. LEY DE PROTECCIÓN DEL AMBIENTE ATMOSFÉRICO

Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de protección al ambiente atmosférico (BOE n.º 96, de 22 de abril de 1975; c.e. BOE n.º 137, de 9 de junio de 1975)

En su virtud, a iniciativa de la Comisión Interministerial del Medio Ambiente, con el informe de la Organización Sindical, de conformidad con el dictamen del Consejo de Estado, a propuesta del Ministro de Planificación del Desarrollo y previa deliberación del Consejo de Ministros en su reunión del día 24 de enero de 1975, DISPONGO:

TÍTULO PRIMERO

Competencias administrativas

Artículo 1

Como órgano promotor y de coordinación de las actuaciones en materia de defensa contra la contaminación atmosférica actuará la Comisión Interministerial del Medio Ambiente con las atribuciones que le confiere el Decreto 888/1962, de 12 de abril.

Artículo 2

Los Ministerios, Corporaciones Locales y Organismos Autónomos, independiente-

mente de las competencias que las Leyes les otorgan, tendrán en cuanto a la defensa contra la contaminación atmosférica las siguientes atribuciones:

1. Será competencia del Ministerio de la Gobernación de vigilancia, evaluación y estudio de la evolución de la contaminación atmosférica en los ambientes exteriores, coordinando la labor de los Ayuntamientos que posean una red propia de vigilancia de la contaminación.

Los Gobernadores civiles, sin perjuicio de las facultades que con carácter general les confiere el Ordenamiento jurídico, tendrán las competencias que les atribuye la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, y este Reglamento en cuanto a la declaración de zonas de atmósfera contaminada y de situaciones de emergencia.

2. Compete a los Ministerios de Industria y Agricultura, según la actividad industrial de que se trate, la propuesta al Gobierno de fijación de los niveles máximos de emisión de contaminantes a la atmósfera para cada actividad industrial, la recomendación o, si procede, la imposición en cada caso particular de las técnicas más adecuadas para reducir las emisiones contaminantes al mínimo posible compatible con los imperativos económicos, así como la vigilancia del cumplimiento de los niveles de emisión exigidos y su medición.

Para la aplicación de lo dispuesto anteriormente se estará a lo que regula el Decreto-ley de 1 de mayo de 1952, y el Decreto 508/1973, de 15 de marzo, sobre competencias de los Ministerios de Industria y Agricultura en materia de industrias agropecuarias y forestales.

3. Será competencia del Ministerio de Obras Públicas la adopción de las medidas necesarias para evitar la contaminación producida por las siguientes actividades:

a) Movimientos de tierra, obras y demoliciones como consecuencia de las actividades de dicho Ministerio.

b) Manipulaciones de minerales y otras materias contaminantes en zonas portuarias.

c) Construcción y reparación de obras públicas, consecuencia de las actividades de dicho Ministerio.

d) Explotación de canteras y extracción de áridos y arenas, así como su fabricación artificial, realizados por dicho Ministerio o con su autorización y destinadas a obras públicas.

4. Las Corporaciones Locales velarán por el cumplimiento dentro de sus respectivas demarcaciones territoriales de las disposiciones legales sobre la materia, que regula este Reglamento, adaptando a las mismas las Ordenanzas municipales. Los Alcaldes, independientemente de su facultad de otorgar las licencias de instalación o apertura, modificación o traslado de los establecimientos o actividades industriales, vigilarán el cumplimiento de las citadas Ordenanzas, y cuando dispongan de servicios adecuados en las zonas declaradas, total o parcialmente, de atmósfera contaminada, podrán realizar la vigilancia y medición de los niveles de emisión.

Artículo 3

Los métodos de análisis y de medición de los niveles de inmisión y de emisión deberán cumplir las instrucciones que dicten los Ministerios de la Gobernación e Industria, respectivamente, previo informe de la Comisión Interministerial del Medio Ambiente.

TÍTULO II

Vigilancia de la calidad del aire

CAPÍTULO PRIMERO

Niveles de inmisión (*)*Artículo 4*

1. De conformidad con lo establecido en el artículo 2 de la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico, los niveles de inmisión, criterios de ponderación e índices de contaminación en las inmisiones para las situaciones admisibles, así como para la declaración de zonas de atmósfera contaminada y en situación de emergencia, serán las que se detallan en el Anexo I de este Decreto.

2. Dichos niveles podrán ser modificados por el Gobierno a propuesta de la Comisión Interministerial del Medio Ambiente, previo informe de la Organización Sindical.

Artículo 5

El control de las situaciones de hecho, en relación con los niveles de inmisión establecidos, se llevará a cabo en todo el ámbito nacional por el Ministerio de Gobernación, mediante la Red de Vigilancia y Previsión a que se refiere el artículo 10 de la mencionada Ley, y cuyas características se desarrollan en el capítulo siguiente del presente Decreto.

CAPITULO II

Red Nacional de Vigilancia y Previsión de la Contaminación Atmosférica*Artículo 6*

Se crea la Red Nacional de Vigilancia y Previsión de la Contaminación Atmosférica a que se refiere el artículo 10 de la Ley

38/1972, de 22 de diciembre, que dependerá administrativamente del Ministerio de la Gobernación.

Artículo 7

1. Esta Red estará constituida por un Centro Nacional, radicado en la Dirección General de Sanidad, los Centros de Recepción de Datos de las Regiones Meteorológicas que las necesidades impongan, adscritos a las Jefaturas Provinciales de Sanidad que se designen y todos los Centros de Análisis de la Contaminación Atmosférica pertenecientes al Estado, a la Provincia, al Municipio o a los particulares, de los que dependerán los sistemas sensores y equipos métricos, así como los laboratorios de análisis.

2. Se entiende por Región Meteorológica una región definida por límites geográficos naturales a la cual corresponden determinados valores normales de los principales elementos meteorológicos.

Artículo 8

Al Centro Nacional de Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica corresponderá:

a) Requerir, con la periodicidad que se determine, de los Centros de Recepción de Datos el envío de información obtenida en los Centros de Análisis de la Contaminación Atmosférica por las estaciones sensoras y equipos métricos integrados en la Red Nacional, sobre aquellos contaminantes de los que, figurando en el Anexo I de este Decreto, se generen en la zona de influencia de las Estaciones conjugándolas cuando se determine, con los correspondientes datos sobre microclimas y con parámetros de tipo sanitario.

b) Realizar estudios evolutivos de la contaminación, sistematizando la informa-

ción que reciba, de manera que se facilite la interpretación posterior de la misma.

c) Analizar periódicamente el curso de los estados de contaminación en base a la incidencia higiénica y sanitaria de los niveles alcanzados, relacionándolos con los tiempos de exposición y las secuencias con que se presentan y estudiar su nocividad sobre los bienes materiales.

d) Suministrar los datos obtenidos, hayan sido ponderados o no previamente, a fin de presentar a los Organismos competentes y particulares interesados las diversas situaciones del estado de la contaminación, así como las condiciones de morbilidad y mortalidad humanas ocasionadas por la contaminación atmosférica.

e) Interpretar la información elaborada a fin de presentar a los Organismos competentes, en cada caso, el posible cuadro de opciones o alternativas decisorias con respecto a las declaraciones de la zona de atmósfera contaminada o de situaciones de emergencia, y la adopción de medidas concretas con respecto a focos emisores singularizados.

f) Proponer al Gobierno, previo informe de la Comisión Interministerial del Medio Ambiente, los criterios y normas relativos a las instalaciones, procedimientos y métodos de medidas de la Red Nacional, así como para el tratamiento de la información obtenida. Asimismo, velará por la idoneidad de los sistemas empleados y la calidad de las mediciones.

Artículo 9

Los Centros de Recepción de Datos estarán encargados de la coordinación y ordenación de los Centros de Análisis de la Contaminación Atmosférica comprendidos en su Región Meteorológica Natural, así como de informar a las autoridades responsables del

estado de la contaminación del aire, por el medio de comunicación más rápido a su alcance, en las situaciones de emergencia, tanto de hecho como previsibles, que pudieran presentarse.

Artículo 10

Las mediciones obtenidas por los Centros de Análisis de la Contaminación Atmosférica serán suministradas, de oficio y con la periodicidad que se determine, al Centro de Recogida de Datos de que dependa, salvo en las situaciones de emergencia, que los comunicarán inmediatamente de conocerse. Todo ello sin perjuicio de lo previsto en el artículo 76 de este Decreto.

Artículo 11

1. La Red se extenderá a todo el territorio nacional y funcionalmente integrará a todos los Centros de Análisis de la Contaminación Atmosférica existentes en la actualidad o que se creen en el futuro, siempre que aquellos satisfagan los mínimos condicionantes técnicos que se establecen reglamentariamente.

2. Formarán parte de la Red todos los Centros de Análisis de la Contaminación Atmosférica pertenecientes al Estado, Provincia o Municipio, cualquiera que sea su dependencia orgánica y régimen administrativo o económico.

3. En las zonas declaradas de atmósfera contaminada o en las que se alcance con frecuencia situaciones de emergencia será obligatorio para los correspondientes Municipios la creación de un Centro de Análisis de la Contaminación Atmosférica.

4. Podrán también incorporarse a la Red Nacional aquellos sistemas de medición que, perteneciendo a empresas o instituciones privadas, cumplan las normas técnicas ade-

cuadas y soliciten su inclusión, teniendo, a partir de ese momento, el carácter de Centros de Análisis de la Contaminación Atmosférica. Dicho carácter lo perderán cuando no cumplan las referidas normas técnicas o las obligaciones exigibles, así como a petición propia a partir del momento de su aceptación por la Administración.

5. Los datos correspondientes a emisiones serán transmitidos a los Centros de Recepción de Datos.

Artículo 12

1. En las zonas consideradas de atmósfera higiénicamente admisible, entendiéndose por tales las que no hayan sido declaradas zonas de atmósfera contaminada será tarea preceptiva de la Jefatura Provincial de Sanidad correspondiente la vigilancia y previsión de la contaminación.

2. Los Ayuntamientos que traten de instalar equipos de medición con carácter voluntario, deberán hacerlo de acuerdo con las normas que desarrolla este Decreto, al efecto de poder considerarlos como Centros de Análisis de la Contaminación Atmosférica.

3. Los particulares interesados serán autorizados a incorporarse a la Red Nacional en cualquier caso, si bien habrán de adecuar sus instalaciones a las mismas condiciones técnicas que las oficiales.

4. Para las estaciones de la Red nacional se podrán imponer las servidumbres forzosas que se estimen necesarias en cada caso, previa la indemnización que corresponda legalmente.

Artículo 13

1. Según las características de las estaciones y el número de parámetros susceptibles de ser medidos, éstas se clasificarán en cuatro categorías:

Primera categoría.—Corresponderá a aquellas estaciones cuyos sistemas sensores permitan la medición continua de uno o varios contaminantes y de los necesarios parámetros de microclima. Estarán dotados de registrador incorporado o transmisor a distancia, pero en ambos la información recogida será susceptible de comunicarse en forma inmediata al Organismo encargado de la previsión de la contaminación.

Segunda categoría.—Serán aquellas que como mínimo puedan suministrar valores promedio de 24 horas para los contaminantes: Dióxido de azufre, partículas en suspensión, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y plomo. Suministrarán mediciones periódicas de monóxido de carbono. Junto con los datos medidos habrán de incorporarse los datos promediados meteorológicos de la estación más próxima.

Tercera categoría.—Dispondrán sistemas específicos para un contaminante individualizado, en promedio de 24 horas, junto con la posibilidad de analizar el contenido de dióxido de azufre y partículas en suspensión.

Cuarta categoría.—Corresponderá a aquellas estaciones que aporten los valores promedios de 24 horas de dióxido de azufre y partículas en suspensión.

En cada uno de los sistemas compuestos por estaciones de las distintas categorías así definidas para una localización específica, se deberá contar con el número de elementos sensores que reglamentariamente se determine a fin de que las zonas de influencia correspondientes a cada sensor recubran totalmente el lugar sometido a vigilancia.

2. Solamente serán aceptables para la Red Nacional de Vigilancia y Previsión de la Contaminación Atmosférica los datos obtenidos siguiendo las técnicas patrón pre-fijadas para cada contaminante por el Mi-

nisterio de la Gobernación, previo informe de la Comisión Interministerial del Medio Ambiente.

3. Tanto los sistemas para la captación y posterior determinación en el laboratorio de los niveles de contaminación como los de medición continua con registrador incorporado o transmisor a distancia deberán ajustarse a las normas que reglamentariamente se establezcan por el Ministerio de la Gobernación, previo informe de la Comisión Interministerial del Medio Ambiente, para la técnica analítica de que se trate.

TÍTULO III

Régimen especial en las zonas de atmósfera contaminada

CAPITULO PRIMERO

Características de la zona de atmósfera contaminada

Artículo 14

Cualquier núcleo de población, lugar o área territorial determinada será declarado zona de atmósfera contaminada, de conformidad con lo establecido en el artículo 5, apartado I de la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico, cuando se alcancen los niveles señalados a estos efectos en el Anexo I de este Decreto para los óxidos de azufre y partículas en suspensión o sus mezclas, o bien se rebasen para los demás contaminantes que en él se indican los valores de concentración media en 24 horas durante 15 días en el año, o diez en un semestre, aun cuando se observen los niveles de emisión autorizados por el Gobierno. La necesaria información sobre la situación de la calidad del aire deberá ser suministrada por la Red Nacional de Vigilancia y Previsión de la

Contaminación Atmosférica, con datos que comprendan, al menos, un período de seis meses.

Artículo 15

En las zonas declaradas de atmósfera contaminada se hará pública la delimitación territorial con la precisión necesaria, en la que serán de aplicación las medidas del régimen especial de protección aplicables.

Artículo 16

Cualquier persona, natural o jurídica, pública o privada, podrá dirigirse por escrito motivado al Alcalde, Gobernador civil o Director general de Sanidad expresando razonadamente la situación de contaminación y solicitando la tramitación del expediente para la declaración, si procede, de zona de atmósfera contaminada.

CAPÍTULO II

Declaración de zona de atmósfera contaminada

Artículo 17

La Dirección General de Sanidad o el Gobernador civil, en su caso, cuando se dirijan a ellos las peticiones a que se refiere el artículo anterior, si las estiman justificadas, las remitirán al Alcalde o Alcaldes de la zona denunciada, a fin de que inicien la tramitación del expediente.

Artículo 18

El Alcalde o Alcaldes a que se refieren los dos artículos anteriores incorporarán al expediente el informe de los servicios contra la del Ayuntamiento respectivo, cuando existieren, y el acuerdo del Ayuntamiento Pleno, dando su parecer sobre el particular.

Artículo 19

Cumplido cuanto antecede, el Alcalde o Alcaldes de los Municipios afectados remitirán el expediente al Gobernador civil de la provincia respectiva, el cual, oída la Comisión Provincial de Servicios Técnicos, lo hará llegar al Ministerio de la Gobernación para que, previo informe de la Dirección General de Sanidad, lo remita a la Comisión Interministerial del Medio Ambiente, la cual, oída la Organización Sindical, elevará su propuesta al Consejo de Ministros para que adopte la resolución pertinente.

Artículo 20

Cuando el Ministerio de la Gobernación, a la vista del informe que faciliten los Servicios de la Red Nacional de Vigilancia y Previsión de la , considere justificada la iniciación de declaración de zona de atmósfera contaminada, solicitará informe del Ayuntamiento o Ayuntamientos interesados, elevándose la correspondiente propuesta al Consejo de Ministros conforme al procedimiento establecido en los artículos 18 y 19.

Artículo 21

El expediente se concluirá en plazo no superior a tres meses contados a partir de la fecha de la denuncia o de la orden de iniciación de aquél. Cuando al iniciar el expediente no se disponga de los datos a que se alude en el artículo 14, el plazo señalado se contará a partir del momento en que disponga de ellos la Red Nacional de Vigilancia, la que cada tres meses informará al interesado sobre el estado del mismo.

CAPITULO III

**Efectos de la declaración
de zona de atmósfera contaminada***Artículo 22*

1. La declaración de zona de atmósfera contaminada acordada por el Gobierno implicará la adopción de las medidas que el Gobernador civil imponga de entre las señaladas en el artículo 6, número 2, de la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico y las que el Gobierno acuerde al formular la declaración según el apartado tres del mismo, así como la organización y mantenimiento de los Centros de análisis de los previstos en la Red Nacional de Vigilancia y Previsión, por el Ayuntamiento o Ayuntamientos afectados, de modo independiente o mancomunado, o, en su caso, por agrupación forzosa según el procedimiento previsto en la Ley de Régimen Local.

2. Al mismo tiempo dará derecho a los beneficios que el Gobierno determine a propuesta del Ministerio de Hacienda, de acuerdo con lo establecido en el artículo 11 de la citada Ley de Protección del Ambiente Atmosférico.

Artículo 23

Por el Gobierno, a propuesta de la Comisión Interministerial del Medio Ambiente, se podrán establecer unos límites de emisión más estrictos que los de carácter general, exigiéndose a los titulares de los focos emisores la adopción de los sistemas o medidas correctoras que, de acuerdo con el estado de la técnica, aseguren la reducción de la emisión de contaminantes a la atmósfera, según prescribe el artículo 3, número 2, de la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico. Asimismo, el Gobierno podrá, además, prohibir la instalación o ampliación de aquellas actividades que expresamente determine

en cada zona de atmósfera contaminada, de acuerdo con el artículo 6, número 3, de dicha Ley.

Artículo 24

La cesación de la declaración de atmósfera contaminada será decretada por el Gobierno, a propuesta de la Comisión Interministerial del Medio Ambiente, oída la Organización Sindical y previo informe del Ministerio de la Gobernación, de la Comisión Provincial de Servicios Técnicos respectiva y de la Corporación o Corporaciones locales interesadas. La cesación de la declaración de atmósfera contaminada llevará implícitas las obligaciones y derechos a que dio lugar la declaración.

CAPÍTULO IV

Régimen especial en las zonas declaradas de atmósfera contaminada

Artículo 25

En las zonas declaradas de atmósfera contaminada será de aplicación el régimen especial que a continuación se indica, al cual deberán adaptarse las ordenanzas municipales que determina el artículo 9 de la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico.

Artículo 26

Los Centros de Análisis de la a que se refiere el artículo 22 de este Decreto reunirán las características técnicas que se expresan para los de primera categoría en el artículo 13 del mismo.

Artículo 27

Los municipios cuyos términos municipales estén declarados parcial o totalmente como de atmósfera contaminada vendrán

obligados a establecer, con carácter específico, un Servicio de Lucha contra la , en el que se integrará el Centro de Análisis de la , exclusivamente dedicado en el ámbito municipal a estudiar, tramitar, informar y proponer, en su caso, las resoluciones adecuadas en todos aquellos aspectos, salvo los estrictamente fiscales, que se deriven o sean consecuencia de la declaración de zona de atmósfera contaminada. En estos Servicios, que serán independientes, mancomunados o, en su caso, por agrupación forzosa según el procedimiento previsto en la Ley de Régimen Local, se integrarán los Centros de Análisis de la a los que corresponde la vigilancia y medición de los niveles de emisión.

Artículo 28

El Gobernador civil, previo informe de la Comisión Provincial de Servicios Técnicos y oídos los Ayuntamientos afectados, podrá imponer, a tenor de las circunstancias concurrentes, todas o algunas de las medidas siguientes:

a) La obligación de que en las instalaciones fijas debidamente singularizadas por actividades, Empresas, sectores económicos o áreas se utilicen combustibles o fuentes de energía de menor poder contaminante, cuyas características serán fijadas por el Ministerio de Industria, y de que los quemadores utilizados en ellas cumplan las condiciones que reglamentariamente establezca dicho Departamento.

b) La obligación de que en las instalaciones industriales que determine el Ministerio competente por razón de la actividad se disponga de una reserva de combustibles especiales que cubra sus necesidades de consumo durante un mínimo de seis días para ser utilizadas si se declarase y mientras dure la situación de emergencia prevista en el artículo 7 de la Ley de Protección del Ambien-

te Atmosférico, como medida transitoria y previa al paro o limitación de horario en el funcionamiento de la instalación.

c) La prohibición de instalar nuevos incineradores de residuos sólidos urbanos que no cumplan los límites de emisión especialmente fijados para la zona, así como la obligación de instalar elementos correctores adecuados en los incineradores existentes que no cumplan las condiciones señaladas.

d) La obligación de que los generadores de calor que se instalen durante la vigencia del régimen especial, utilicen fuentes de energía no contaminantes o combustibles especiales y dispongan en todo caso de instalaciones adecuadas para impedir o aminorar la contaminación.

e) La adopción de las medidas necesarias dentro del perímetro afectado para disminuir los efectos contaminantes producidos por el tráfico urbano o interurbano.

f) La aplicación con carácter general de normas más eficaces para la disminución o depuración previa de las emisiones y, en su caso, la más adecuada dispersión a la salida de los focos emisores.

Artículo 29

1. A los efectos previstos en el apartado a) del artículo precedente, las centrales térmicas e industrias grandes consumidoras de combustibles -entendiéndose por tales aquellas con instalaciones de combustión con potencia calorífica global superior a dos mil termias por hora- situadas en zonas de atmósfera contaminada dispondrán de una reserva de combustible limpio para asegurar su funcionamiento durante seis días por lo menos.

2. Se definen como combustibles limpios la energía eléctrica, el gas natural, los gases licuados de petróleo, los gases manufacturados, los combustibles líquidos con

bajo índice de azufre y los combustibles sólidos con las limitaciones en contenido de azufre, cenizas y volátiles que se fijen por el Ministerio de Industria.

3. Dicho combustible se utilizará en situación de emergencia o cuando se prevea que va a producirse la misma.

Artículo 30

En las zonas de atmósfera contaminada quedará terminantemente prohibido el suministro y utilización de combustible de alto poder contaminante, de acuerdo con las normas que se dicten al efecto.

Artículo 31

El Gobierno adoptará las medidas adecuadas para garantizar el suministro de combustibles limpios en las zonas en que su consumo sea obligado.

Artículo 32

En las zonas de atmósfera contaminada se exigirá a las industrias existentes una más intensa dispersión de los contaminantes, pudiéndose establecer para ello, entre otras alternativas, la modificación de las alturas de las chimeneas.

TÍTULO IV

Situaciones de emergencia

CAPÍTULO PRIMERO

Caracterización de las situaciones de emergencia

Artículo 33

Cualquier núcleo de población, lugar o área territorial determinada será declarado

en situación de emergencia, de conformidad con el artículo 7 de la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico, cuando se alcancen los niveles señalados a estos efectos en el Anexo I de este Decreto para los óxidos de azufre, partículas en suspensión o sus mezclas, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono, o bien se tripliquen para los demás contaminantes que en él se indican los valores de contaminación media de 24 horas, aun cuando se observen los niveles de emisión autorizados por el Gobierno, tanto si son motivados por causas meteorológicas como accidentales. La información necesaria sobre el estado de la calidad del aire deberá ser suministrada por la Red Nacional de Vigilancia y Prevención de la .

Artículo 34

En el área territorial afectada se harán públicos y con la precisión necesaria los límites en que será de aplicación el régimen de protección aplicable, mediante procedimientos normalizados.

CAPÍTULO II

Declaración de la situación de emergencia

Artículo 35

1. En las localidades en que sea racionalmente previsible alcanzar la situación de emergencia, habida cuenta las especiales condiciones atmosféricas del lugar y las circunstancias de concentración industrial, así como en los casos en que se hubiera presentado anteriormente la situación de hecho, el Gobernador civil, a su iniciativa o a propuesta de la corporación o Corporaciones Locales afectadas, previo informe de la Comisión Provincial de Servicios Técnicos y de acuerdo con el régimen esta-

blecido en los artículos 17 al 20, ambos inclusive, adoptará las medidas expresadas en el título anterior y establecerá un plan de actuación previo tendente a paliar los efectos perjudiciales del potencial riesgo que comportan tales situaciones anómalas, así como el cumplimiento de las previsiones señaladas en los artículos 6 y 7 de esta disposición. Asimismo se determinarán expresamente aquellas actividades, instalaciones y servicios que por constituir insustituibles servicios asistenciales, hospitalarios o análogos, o por los superiores e irreparables daños y perjuicios que pudieran inferir al bien común, serán eximidas de cumplir parcial o totalmente las previsiones del plan.

2. Las normas de actuación específicas para la situación de emergencia se atenderán a lo previsto en el artículo 8 de la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico, en el sentido de que determinadas actividades podrán ser eximidas, con carácter general, total o parcialmente, del estricto cumplimiento de las medidas previstas en el reglamento aplicable a las zonas en situación de emergencia.

3. Dichas normas específicas serán dictadas, con el informe de la Comisión Interministerial del Medio Ambiente y de la Organización Sindical, por el Ministerio competente por razón de la actividad.

Artículo 36

Detectadas por el Centro o Centros de Análisis de las condiciones de emergencia de hecho, y cuando concurren circunstancias meteorológicas o de otro tipo que hagan prever que en corto plazo de tiempo se alcanzarán, se pasará la información, tal como se considera en el artículo 9 de este Reglamento, al Gobernador civil correspondiente.

CAPÍTULO III

Actuaciones en los estados de emergencia

Artículo 37

1. Alcanzadas las motivaciones supuestas en el artículo anterior, el Gobernador civil podrá, de oficio, ejecutar la declaración, siendo de aplicación automática las previsiones establecidas en el artículo 55.

2. En las localidades en que se produzcan emisiones que den lugar a frecuentes situaciones de emergencia será de aplicación el régimen especial establecido para las zonas de atmósfera contaminada.

Artículo 38

Atendiendo a la gravedad de la emergencia, el Gobernador civil adoptará, al tiempo de la declaración o durante el episodio, todas o algunas de las siguientes medidas:

a) En cuanto a los focos emisores de contaminación a la atmósfera, con excepción de los vehículos de motor.

Disminución del tiempo o modificación del horario de funcionamiento en las instalaciones y actividades que contribuyan a la contaminación o suspensión del funcionamiento de aquellas que no hayan ajustado sus niveles de emisión a lo que establece el artículo 3 o no hayan observado las prescripciones del artículo 6 de la ley de Protección del Ambiente Atmosférico.

Para la adopción de dichas medidas el Gobernador civil solicitará el informe de los Ministerios competentes por razón de las actividades implicadas.

b) En cuando a los vehículos de motor.

Limitar o prohibir la circulación de toda clase de vehículos con las excepciones necesarias para garantizar la atención de los ser-

vicios sanitarios, de incendios, de seguridad y orden público y de defensa nacional.

Artículo 39

1. Cuando se declare la situación de emergencia, la Delegación Provincial del Ministerio competente, por razón de la actividad, procederá inmediatamente a estudiar las causas de origen industrial que hayan podido contribuir a dicha perturbación en la zona y propondrá a la Superioridad las acciones a tomar.

2. Cuando se declare la situación de emergencia, las industrias calificadas como potencialmente contaminadoras deberán comunicar a la Delegación Provincial del Ministerio competente, por razón de la actividad, por el medio más rápido disponible, haber adoptado las medidas previstas para estos casos, haciendo mención especial de las eventuales emisiones anormales de contaminantes que hayan podido coincidir con la situación de emergencia, quien dará cuenta al Gobernador civil.

Artículo 40

Desaparecidas las causas que provocaron la situación de emergencia, la Autoridad que la declaró determinará el cese de la misma, quedando sin efecto las medidas adoptadas.

TÍTULO V

Control de las emisiones

CAPÍTULO PRIMERO

Actividades industriales potencialmente contaminadoras de la atmósfera

Artículo 41

A los efectos previstos en el artículo 3, número 3, de la Ley de Protección del Am-

biente Atmosférico, se califican como actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera las incluidas en el Catálogo que aparece en el Anexo II del presente Decreto y cualquier otra actividad de naturaleza similar.

Artículo 42

1. Se entiende por actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera aquellas que por su propia naturaleza o por los procesos tecnológicos convencionales utilizados constituyen o pueden constituir un foco de contaminación atmosférica sistemática.

2. A los efectos del presente Decreto, se entiende por contaminación sistemática la emisión de contaminantes en forma continua o intermitente y siempre que existan emisiones esporádicas con una frecuencia media superior a doce veces por año, con una duración individual superior a una hora, o con cualquier frecuencia, cuando la duración global de la emisión sea superior al 5 por 100 del tiempo de funcionamiento de la planta.

3. Se entiende por contaminantes de la atmósfera, entre otros, las materias que se relacionan en el Anexo III del presente Decreto.

Artículo 43

Previo acuerdo del Gobierno, a propuesta de la Comisión Interministerial del Medio Ambiente y previo informe de la Organización Sindical, los Ministerios competentes por razón de la actividad de que se trate deberán modificar, completar y perfeccionar el Catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera conforme lo aconsejan la experiencia adquirida y las innovaciones que se hayan presentado en los procesos productivos.

CAPÍTULO II

Niveles de emisión

Artículo 44

Se entiende por nivel de emisión la concentración máxima admisible de cada tipo de contaminante en los vertidos a la atmósfera, medida en peso o volumen, según la práctica corriente internacional, y en las unidades de aplicación que correspondan a cada uno de ellos. El nivel de emisión puede también venir fijado por el peso máximo de cada sustancia contaminante vertida a la atmósfera sistemáticamente en un período determinado o por unidad de producción.

Artículo 45

1. De acuerdo con lo previsto en el artículo 3, número 3, de la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico, en el Anexo IV de este Decreto se establecen con carácter general las características límites a que deberán sujetarse las emisiones de humos, hollines, polvos, gases y vapores contaminantes procedentes de las principales actividades industriales potencialmente contaminadoras, cualquiera que sea su localización.

2. El Gobierno, a propuesta del Ministerio competente por razón de la actividad, determinará unos niveles más estrictos que los establecidos con carácter general para determinadas actividades industriales, atendiendo a su localización, así como al tipo y volumen de contaminantes emitidos.

Artículo 46

1. Los titulares de actividades potencialmente contaminadoras están obligados a respetar los niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera que se indican en el

Anexo IV del presente Decreto, sin necesidad de un acto de requerimiento o sujeción individual.

2. Dichos niveles de emisión deben entenderse sin dilución previa con aire, salvo casos específicos debidamente justificados y autorizados.

3. Los límites de las emisiones a la atmósfera de otros contaminantes u otras actividades no especificadas en el Anexo IV de este Decreto serán establecidos, en cada caso particular, por el Ministerio competente por razón de la actividad, previo informe de la Organización Sindical.

4. Las emisiones de aquellos contaminantes no especificados en el Anexo III serán tales que los niveles de inmisión resultantes cumplan lo prescrito para los mismos en el Anexo I de este texto legal sobre normas técnicas de niveles de inmisión o, en su defecto, no deberán rebasar la treintava parte de las concentraciones máximas permitidas en el ambiente interior de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas, aprobado por Decreto de 30 de noviembre de 1961.

Artículo 47

El índice opacimétrico de los humos emitidos por las instalaciones de combustión durante su funcionamiento se registrará por lo dispuesto al respecto para cada actividad en el Anexo IV de este Decreto.

Artículo 48

1. Los niveles de emisión señalados en la columna dos del Anexo IV serán de aplicación para las nuevas instalaciones.

2. En el caso de industrias ya existentes, serán de aplicación los niveles de emisión de la columna uno de dicho Anexo, debiendo adaptarse a dichas condiciones técnicas en la

forma y plazos que determine el Ministerio competente por razón de la actividad, de acuerdo con las circunstancias que concurren en cada caso particular, en función de los perjuicios producidos, las posibilidades tecnológicas y los condicionantes socioeconómicos.

3. Asimismo, a título indicativo y para tenerlo en cuenta en la planificación de aplicación de medidas correctoras, se indican en la columna tres los niveles de emisión previstos para 1980.

Artículo 49

Cuando las circunstancias lo aconsejen y resulten directa y gravemente perjudicados personas o bienes localizados en el área de influencia del foco emisor o se rebasen en los puntos afectados los niveles generales de inmisión vigentes, el Ministerio competente por razón de la actividad deberá exigir a los titulares de los focos contaminantes la adopción de los mejores medios prácticos disponibles para la reducción de los volúmenes de emisión de contaminantes o mejorar su dispersión, sin perjuicio de lo dispuesto en el Reglamento de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas.

Artículo 50

En las actividades de construcción y explotación de canteras se tomarán las medidas más adecuadas para evitar la emisión de polvos.

Artículo 51

En los parques de almacenamiento de aire libre de materiales a granel se tomarán las medidas adecuadas para evitar que la acción del viento pueda levantar el polvo. A tal fin, se aplicarán las medidas correctoras oportunas, como mantener el material constante-

mente humedecido, cubrirlo con fundas de lona, plástico o de cualquier otro tipo o se protegerá mediante la colocación de pantallas cortavientos.

Artículo 52

Cuando se trate de centrales térmicas autorizadas, en su día, a quemar carbones u otros combustibles de baja calidad, con el fin de suplir deficiencias energéticas, el Gobierno podrá admitir que los niveles de emisión establecidos en el Anexo IV sean rebasados si siguen persistiendo las causas originales y así lo aconsejan razones de interés local, fundamentalmente de base social y siempre que no superen los niveles de inmisión fijados.

Artículo 53

En casos de extrema gravedad en que no sea técnicamente posible aplicar elementos correctores adecuados, y en consecuencia fuese necesario suspender o trasladar una determinada actividad industrial, se estará a lo dispuesto en las normas previstas al efecto, dictadas de conformidad con lo estipulado en el artículo 11 de la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico.

Artículo 54

A medida que la experiencia lo aconseje o los avances tecnológicos lo permitan, los niveles de emisión establecidos en el Anexo IV de este Decreto serán revisados por el Gobierno a propuesta del Ministerio o Ministerios competentes por razón de la actividad.

TÍTULO VI

Régimen especial de las actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera

CAPÍTULO PRIMERO

Instalación, ampliación, modificación o traslado de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera

Artículo 55

No se podrá instalar, ampliar o modificar ninguna actividad calificada como potencialmente contaminadora de la atmósfera cuando, a juicio del Ministerio competente por razón de la actividad, oídos la Comisión Provincial de Servicios Técnicos respectiva o, en su caso, la Comisión Central de Saneamiento y los Ayuntamientos afectados, el incremento de contaminación de la atmósfera previsto, en razón de las emisiones que su funcionamiento ocasione, rebase los niveles de inmisión establecidos.

Artículo 56

1. Las actividades industriales calificadas como potencialmente contaminadoras de la atmósfera para su instalación, ampliación, modificación o traslado deberán cumplir las condiciones precisas para limitar la contaminación atmosférica, debiendo ajustarse a lo prescrito en el presente Decreto, sin perjuicio de lo impuesto en el Régimen General de instalación, ampliación y traslado de industria.

2. Cuando se trate de proyectos correspondientes a instalaciones comprendidas en el grupo A del Catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera, la competencia para enjuiciar e informar los proyectos sobre medidas correctoras y condiciones de funcionamiento correspon-

derá a los Servicios Centrales de los Ministerios competentes por razón de la actividad.

3. Los proyectos de instalaciones comprendidas en el grupo B de dicho Catálogo requerirán el juicio e informe de los Servicios Provinciales de los Ministerios competentes por razón de la actividad. Cuando se trate de instalaciones clasificadas en el grupo primero del artículo 2 del Decreto 1775/1967, de 22 de julio, los mencionados Servicios Provinciales remitirán al Centro directivo competente de su Departamento el citado informe.

4. Los proyectos de instalaciones comprendidas en el grupo C de dicho Catálogo, así como las instalaciones que por razón de la importancia de sus emisiones a la atmósfera resulten asimilables al mismo, podrán instalarse, ampliarse, modificarse o trasladarse libremente en lo que se refiere a los aspectos de contaminación atmosférica, sin más requisito que la declaración formal ante la Delegación Provincial del Departamento correspondiente de que el proyecto se ajusta a las disposiciones legales sobre emisión de contaminantes a la atmósfera que les sean de aplicación, lo cual será verificado durante la inspección previa a la puesta en marcha, de acuerdo con lo previsto en el presente título.

Artículo 57

Los informes a que se refieren los números 2 y 3 del artículo anterior tendrán carácter vinculante para la concesión de la licencia municipal de apertura de industrias potencialmente contaminadoras de la atmósfera, así como para la adopción de las medidas correctoras pertinentes, y serán causa de denegación de aquélla siempre que de ellos se desprenda que se rebasan los niveles de inmisión establecidos.

Artículo 58

Las nuevas industrias deberán cumplir los niveles de emisión establecidos en el Anexo IV del presente Decreto.

Artículo 59

1. En el proyecto de instalación, ampliación o modificación de industrias se adoptarán los procedimientos de dispersión más adecuados -chimeneas o temperaturas y velocidad de salida de los gases- para que los contaminantes vertidos a la atmósfera, respetándose siempre los niveles de emisión exigidos, se dispersen de forma que no se rebasen en el ambiente exterior de la factoría los niveles de calidad de aire establecidos en el Anexo I de este Decreto, para lo cual se habrá de tener presente en los cálculos el nivel de contaminación de fondo de la zona.

2. La adopción de los procedimientos de dispersión más adecuados se atenderá a las normas vigentes del Ministerio del Aire, en lo que a servidumbre de tráfico aéreo se refiere.

Artículo 60

Los informes del Ministerio competente por razón de la actividad a que se refiere el artículo 56 de este Decreto determinarán las modificaciones y comprobaciones que se crean necesarias para mejorar la calidad de las emisiones contaminantes, pudiéndose llegar a la reducción de la capacidad de producción proyectada objeto de la solicitud, fijación de las características límites de los combustibles y materias primas, así como a otros condicionamientos que se juzguen oportunos.

Artículo 61

No se autorizará la ampliación de ninguna industria que no satisfaga los niveles de

emisión que les sean aplicables, salvo que, junto con el proyecto de ampliación, presente otro de depuración de los vertidos ya existentes, adoptando aquellos equipos anticontaminantes que técnica y económicamente sean viables para la instalación existente, o bien cuando las nuevas instalaciones correspondientes a la ampliación de una planta ya existente se ajusten a los niveles de emisión más estrictos que los exigidos con carácter general para las nuevas industrias, de forma que el promedio de las emisiones de la línea de fabricación ampliada no rebase las correspondientes a una totalmente nueva.

Artículo 62

En la calificación e imposición de medidas correctoras de las industrias o actividades que efectúa la Comisión Provincial de Servicios Técnicos, como trámite previo a la licencia municipal de apertura, se tendrán en cuenta todas las normas a que se refieren los artículos anteriores.

Artículo 63

1. Las licencias y autorizaciones de los Ayuntamientos y Organismos que sean necesarias para la instalación, ampliación o modificación de industrias no podrán ser denegadas por razones de protección del ambiente atmosférico cuando se prevea el mantenimiento de los niveles de inmisión establecidos y se respeten los de emisión que les sean aplicables.

2. En aquellos Ayuntamientos que dispongan de Centro de Análisis de la Contaminación Atmosférica será preceptivo el informe del dicho Centro sobre el nivel de la contaminación de fondo existente en la zona.

3. Cuando por imperativos de la defensa o de alto interés nacional el Gobierno acuerde la localización de una industria u

otra actividad potencialmente contaminadora de la atmósfera, la decisión será vinculante para las Corporaciones y Organismos que deban otorgar las licencias y autorizaciones correspondientes, sin perjuicio de sus competencias en ámbito diferente al de la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico.

CAPÍTULO II

Autorización de puesta en marcha y funcionamiento

Artículo 64

No se autorizará la puesta en marcha total o parcial de ninguna actividad que vierta humos, polvos, gases y vapores contaminantes a la atmósfera de las comprendidas en el Catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera que figura como Anexo II de este Decreto si previamente no se han aprobado e instalado los elementos necesarios para la adecuada depuración hasta los límites legales vigentes o, en su caso, los condicionamientos impuestos específicamente en la autorización administrativa y comprobado posteriormente la eficacia y correcto funcionamiento de los mismos.

Artículo 65

1. La autorización de puesta en marcha podrá tener un carácter provisional y así se hará constar en ella cuando, por la naturaleza del caso, se precisen ensayos posteriores o experiencia de funcionamiento para acreditar que la instalación funcionará con las debidas garantías en cuanto a la emisión de contaminantes.

2. En el caso previsto en el número anterior, después de haber completado el programa de pruebas y análisis de emisión de con-

taminantes a la atmósfera durante el tiempo especificado en la autorización provisional de instalación o ampliación, el titular de la industria habrá de solicitar la autorización de puesta en marcha definitiva.

Artículo 66

Cualquier modificación que una industria incluida en los grupos A y B del Catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera desee introducir en las materias primas, maquinaria, proceso de fabricación o sistema de depuración de efluentes gaseosos, que pueda afectar a la emisión de contaminantes a la atmósfera, deberá ser puesta en conocimiento de la Delegación Provincial del Ministerio competente por razón de la actividad, y del Ayuntamiento respectivo, y seguirá el trámite de autorización similar al previsto para la instalación, ampliación y modificación de industrias.

Artículo 67

1. A los efectos del presente Decreto, se entiende por inspección todo acto de comprobar las emisiones de contaminantes a la atmósfera y su incidencia sobre el medio ambiente; la eficacia, funcionamiento y mantenimiento de las instalaciones correctoras implantadas por la Empresa para mejorar la calidad de las emisiones; y el correcto diseño, montaje y uso de las instalaciones de fabricación que pudieran tener incidencia sobre el medio ambiente.

2. También se incluye dentro del concepto de inspección todo acto de comprobar cuantos extremos técnicos o administrativos condicionen la autorización de funcionamiento de una instalación a los efectos de emisión de contaminantes a la atmósfera.

CAPÍTULO III

Control, inspección y vigilancia de funcionamiento de las instalaciones

Artículo 68

Sin perjuicio de las funciones atribuidas a las Corporaciones Locales por el artículo 2, apartado D, de este Decreto, corresponde a las Delegaciones Provinciales de los Ministerios competentes por razón de la actividad, con la asistencia, en su caso, de las Entidades Colaboradoras de la Administración previstas en el capítulo IV del presente título, la vigilancia del cumplimiento de las condiciones impuestas en la autorización de funcionamiento de las instalaciones potencialmente contaminadoras de la atmósfera y, en general, el ejercicio de las tareas de inspección previstas en el mismo.

Artículo 69

1. Todas las instalaciones calificadas como potencialmente contaminadoras serán inspeccionadas por el Ministerio competente por razón de la actividad -por lo menos una vez al año y siempre que se haya presentado denuncia fundamentada o se presuma que la contaminación puede ser excesiva, incómoda o perjudicial-, quien podrá ser asistido para esta función por las Entidades Colaboradoras de la Administración a que hace referencia el capítulo IV del presente título, todo ello sin perjuicio de las funciones de policía atribuidas a los Ayuntamientos por la Ley de Régimen Local.

2. Las denuncias presentadas por los Ayuntamientos y Jefaturas de Sanidad tendrán absoluta prioridad y deberán ser evaluadas en un plazo máximo de quince días.

Artículo 70

1. Las inspecciones a que se refiere el artículo anterior comprenderán las verificaciones siguientes:

a) Comprobación de que continúan cumpliéndose satisfactoriamente las condiciones establecidas en las autorizaciones administrativas y las demás legalmente exigibles.

b) Comprobación de que se respetan los niveles de emisión impuestos a la industria, así como la incidencia autorizada sobre la calidad del aire.

2. Si las verificaciones previstas en el número precedente fuesen negativas, la industria será sometida a un régimen de vigilancia intensa en tanto no cesen las causas que motivaron el juicio desfavorable, sin perjuicio de lo dispuesto en los artículos 71 y 88 del presente Decreto.

Artículo 71

En los supuestos de manifiesto peligro de contaminación, los Organismos competentes podrán adoptar las medidas que juzguen necesarias, requiriendo al titular de la instalación para que a la mayor brevedad corrija las deficiencias observadas en la misma.

Artículo 72

1. En todos los casos en que el Ministerio competente por razón de la actividad lo estime conveniente, y sea técnica y económicamente posible, podrá exigirse la instalación de aparatos de control con registro incorporado o indicador para vigilar continua y periódicamente la emisión de sustancias contaminantes. Dichos aparatos serán propiedad de las Empresas y se montarán en el lugar que la Delegación Provincial del Ministerio competente designe, y serán manejados por la persona en quien esta Delegación delegue. La información obtenida se transmitirá a la Red Nacional de Vigilancia.

2. Las industrias del grupo A del Catálogo de actividades potencialmente contaminadoras deberán efectuar por lo menos una

vez cada quince días una medición de los contaminantes vertidos a la atmósfera. Asimismo deberán efectuar semanalmente un balance estequiométrico del azufre y halógenos de los combustibles y materias primas utilizados en procesos y en servicios. Estos balances estarán a disposición de la correspondiente Delegación Provincial del Ministerio competente por razón de la actividad.

3. Las industrias clasificadas en el grupo B del catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera deberán efectuar controles periódicos de sus emisiones.

Artículo 73

1. Las instalaciones de centrales térmicas, fábricas de cemento, siderurgia, metalurgia no férrea, refinerías de petróleo, fabricación de ácido sulfúrico y fertilizantes y otras que, a juicio del Ministerio de Industria, constituyan grandes focos contaminadores por el volumen de emisiones, que se encuentren en funcionamiento, deberán disponer de aparatos que permitan determinar la concentración en el medio ambiente exterior de anhídrido sulfuroso, materias sólidas en suspensión y sedimentales y otros contaminantes específicamente señalados para cada actividad por el Ministerio de Industria. La información obtenida será transmitida a la Red Nacional de Vigilancia.

2. A tal fin, el industrial interesado ubicará estaciones de medida en varios círculos concéntricos alrededor de la actividad potencialmente contaminadora, a distancias prefijadas, en número y lugares que señale el Ministerio de Industria, de acuerdo con las características del proyecto y los condicionamientos geográficos y meteorológicos de la zona.

3. No se autorizará la puesta en marcha de dichas instalaciones si no llevan incorpo-

rados los aparatos a que se refiere el número 1 de este artículo.

4. La instalación de las estaciones de medida podrá acogerse a los beneficios previstos en los artículos 10, números 5 y 11 de la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico.

5. Se exceptúan de la obligación impuesta en los números 1 y 2 de este artículo las plantas industriales que a juicio del Ministerio competente por razón de la actividad utilicen tecnologías manifiestamente limpias.

Artículo 74

1. Los aparatos de medida de las emisiones de contaminantes a la atmósfera deberán corresponder a tipos previamente homologados y contrastados por el Ministerio de Industria. La verificación periódica de los mismos por los servicios técnicos oficiales se realizará conforme a las normas que dicte al efecto dicho Departamento.

2. El Ministerio de Industria podrá concertar con laboratorios oficiales autorizados la labor de contrastación de los aparatos de medida.

Artículo 75

1. La responsabilidad de las mediciones periódicas llevadas a cabo en las instalaciones clasificadas como potencialmente contaminadoras de los grupos A y B del Catálogo corresponderán a los titulares de las mismas, si bien podrán encomendar dicha labor a las Entidades Colaboradoras de la Administración a que se refiere el capítulo IV de este título.

2. Las inspecciones oficiales serán llevadas a cabo por los servicios provinciales del Ministerio competente por razón de la actividad, así como por los Ayuntamientos

correspondientes, quienes podrán recabar la ayuda de las Entidades Colaboradoras de la Administración.

Artículo 76

1. De acuerdo con lo previsto en el artículo 10, número 4, de la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico, las Delegaciones Provinciales de los Ministerios competentes en materia de lucha contra la contaminación atmosférica recibirán, de oficio, la información procedente de la Red Nacional de Vigilancia y Previsión de la Contaminación Atmosférica.

2. A la vista de los valores de inmisión de cada zona, las citadas Delegaciones Provinciales y los Ayuntamientos llevarán a cabo las comprobaciones necesarias para verificar la parte atribuible de los mismos a las actividades industriales de la zona y tomar, en su caso, las disposiciones oportunas para la eventual corrección de las anomalías observadas e incoación, si hubiera lugar, del correspondiente expediente sancionador.

Artículo 77

En cuando afecta al campo de aplicación del presente Reglamento, los funcionarios de los Ministerios competentes por razón de la actividad y el personal oficialmente designado para realizar la inspección y verificación de las instalaciones potencialmente contaminadoras de la atmósfera, en el ejercicio de sus funciones, gozarán de la consideración de «Agentes de la Autoridad» a efectos de lo dispuesto en la legislación penal.

Artículo 78

Las Empresas industriales deberán comunicar a la Delegación Provincial del Ministerio competente por razón de la actividad y Ayuntamientos respectivos, con la mayor

urgencia posible, las anomalías o averías de sus instalaciones o sistemas de depuración de los efluentes gaseosos que puedan repercutir en la calidad del aire de la zona.

Artículo 79

Las industrias potencialmente contaminadoras de los grupos A y B del Catálogo que tengan una plantilla de personal superior a 250 personas dispondrán de un servicio dedicado a la resolución de los problemas que sean susceptibles de plantear sobre la calidad del medio ambiente exterior.

CAPÍTULO IV

Entidades colaboradoras de la Administración

Artículo 80

En el ejercicio de las funciones inspectoras, en materia de contaminación, los Organismos que las tienen atribuidas podrán contar con la asistencia de Entidades Colaboradoras creadas en el seno de Organismos y Entidades de carácter público. El régimen de funcionamiento de estas Entidades colaboradoras será determinado por el Ministerio competente por razón de la actividad.

Artículo 81

Para que las Entidades puedan tener la calificación de colaboradoras deberán ser aprobadas como tales por el Ministerio correspondiente a la vista de su competencia técnica y de sus disponibilidades de equipo.

Artículo 82

La comprobación del incumplimiento de las obligaciones a que se sujetarán las Entidades Colaboradoras podrá dar lugar a la re-

tirada, temporal o definitiva, de su autorización, previa instrucción del oportuno expediente.

TÍTULO VII

Infracciones y sanciones

Artículo 83

1. Faltas leves. A los efectos de lo dispuesto en el presente Reglamento se considerará falta leve cualquier infracción a las normas de esta disposición no calificada expresamente como falta grave.

2. Se considerarán faltas graves:

a) La emisión de contaminantes, por las actividades industriales, superior a tres veces los niveles de emisión fijados en la autorización de funcionamiento, durante un período máximo de media hora por día.

b) La falta de las autorizaciones o licencias necesarias para el ejercicio de la actividad y puesta en marcha de las instalaciones correspondientes.

c) La emisión de contaminantes por encima de los niveles fijados en la autorización de funcionamiento de una instalación industrial clasificada en el grupo A en las zonas declaradas de atmósfera contaminada. No obstante, se admitirá rebasar en dos veces los niveles de emisión admisibles, durante un período máximo de media hora por día.

d) La resistencia o demora en la instalación de los elementos correctores que hubieran sido impuestas.

e) Cualquier infracción de las prescripciones dictadas como consecuencia de haber sido declarada la situación de emergencia.

f) La negativa a la instalación o funcionamiento de dispositivos fijos de toma de

muestras de contaminantes o de aparatos de medición de la contaminación en las zonas de atmósfera contaminada.

g) La obstaculización de la labor inspectora de los Ministerios competentes por razón de la actividad.

h) La puesta en funcionamiento de aparatos o instalaciones cuyo precintado, clausura o limitación del tiempo haya sido ordenado por la autoridad competente.

i) La comisión de dos o más faltas leves por parte de las industrias clasificadas en el grupo A, cinco o más en las del grupo B y diez o más en las del grupo C.

3. En todo caso, las responsabilidades derivadas de las infracciones a que se refieren los números anteriores no serán exigibles cuando en la comisión de la infracción haya concurrido caso fortuito o fuerza mayor.

Artículo 84

La infracción de los preceptos contenidos en este Decreto y el incumplimiento de las obligaciones en él establecidas acarrearán a los infractores, con independencia de otras responsabilidades legalmente exigibles, la imposición de las correspondientes sanciones, que consistirán en las multas que se señalen en los artículos siguientes.

Artículo 85

1. Las faltas leves serán sancionadas con multas de hasta cincuenta mil pesetas; las graves, con multas desde cincuenta mil pesetas hasta quinientas mil pesetas.

2. En el acto en que se acuerde la sanción se indicará el plazo en que deberá corregirse la causa que haya dado lugar a la misma, salvo que pueda o deba hacerse de oficio y así se disponga.

3. En caso de reiterada resistencia al cumplimiento de lo ordenado por los Ministerios competentes por razón de la actividad o de la manifiesta actitud del titular de la industria en el sentido de dificultar, falsear o desvirtuar el resultado de la inspección de dichos Departamentos, los Ministros correspondientes podrán imponer sanciones de hasta quinientas mil pesetas, en resolución motivada en la que se haga constar las circunstancias en base a las cuales se apreció la intencionalidad o propósito fraudulento.

4. En caso de reincidencia en faltas graves, el Ministro competente por razón de la actividad podrá optar entre la imposición de multa de quinientas mil pesetas o la clausura temporal de la actividad industrial hasta tanto no se hayan corregido las deficiencias que motivaron la imposición de la sanción.

El cierre temporal se entenderá sin perjuicio de los intereses de los trabajadores, los cuales continuarán adscritos a la plantilla de la Empresa sancionada, percibiendo la totalidad de sus remuneraciones, calculándose el importe de las primas a la productividad, según el promedio de las devengadas en el trimestre natural anterior a la fecha de la clausura temporal.

Durante el período de cierre temporal, la Empresa sancionada quedará obligada a cotizar a la Seguridad Social por las mismas bases y en igual cuantía que la correspondiente al mes anterior a la fecha del cierre, respecto a los trabajadores afectados por el mismo.

5. A los efectos de lo dispuesto en el presente Reglamento se considerará reincidente al titular de una industria que hubiera sido sancionada anteriormente una o más veces por el mismo concepto en los doce meses precedentes.

6. En las zonas declaradas de atmósfera contaminada o en situación de emergencia, las multas previstas en el presente artículo podrán imponerse hasta el duplo o el triple de su cuantía, respectivamente.

7. En el caso de infracciones graves, la resolución recaída será publicada en el «Boletín Oficial del Estado» y de la provincia.

Artículo 86

Para determinar la cuantía de la sanción que proceda se atenderá a la valoración conjunta de las siguientes circunstancias:

- a) La naturaleza de la infracción.
- b) La capacidad económica de la Empresa.
- c) La gravedad del daño producido en los aspectos sanitarios, social o material.
- d) El grado de intencionalidad.
- e) La reincidencia.

Artículo 87

Previa instrucción del oportuno expediente, que será tramitado con arreglo a lo previsto en la Ley de Procedimiento Administrativo, por la Delegación Provincial del Ministerio competente por razón de la materia o por el Ayuntamiento correspondiente, se elevará la oportuna propuesta de sanción a la autoridad competente o por el Ayuntamiento correspondiente, según la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico, para la imposición de la sanción que proceda conforme a lo dispuesto en los artículos 12 y 13 de la misma.

Artículo 88

En el caso en que las obras o modificaciones necesarias para corregir las deficiencias observadas a que se refiere el número

dos del artículo 85 no fueran realizadas en el plazo previsto, se estará a lo dispuesto en la Ley de Procedimiento Administrativo.

Artículo 89

Las resoluciones a que dé lugar la aplicación del presente Decreto y disposiciones complementarias en materia sancionadora serán, en todo caso, recurribles en la forma prevista en el artículo 14 de la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico.

DISPOSICIONES TRANSITORIAS

Disposición 1.ª

Las industrias en proyecto cuyas obras no hayan sido iniciadas, aun cuando hayan sido autorizadas, deberán ajustar sus niveles de emisión a los establecidos en el Anexo IV del presente Decreto para las nuevas industrias.

En el caso de que hubiesen comprometido en firme un 20 por 100, al menos del coste total de la instalación autorizada, excluidos los terrenos necesarios para las mismas, dispondrán de un plazo de otros dos años, a partir de la fecha de la entrada en vigor de este Decreto, para acomodarse a los niveles de emisión establecidos por el mismo. Para que sea válida esta circunstancia, el interesado tendrá que justificar documentalmente en el plazo de un mes desde la entrada en vigor de dicho Decreto este extremo en la Delegación Provincial del Ministerio competente por razón de la actividad.

Disposición 2.ª

Las industrias que se encuentren en montaje a la entrada en vigor del presente Decreto deberán adaptar sus proyectos a los lími-

tes de emisión establecidos en el Anexo IV del mismo, para las nuevas industrias, si bien dispondrán para ello del plazo de dos años, a partir de su puesta en marcha.

Disposición 3.ª

Las industrias incluidas en los grupos A y B del Catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera, en funcionamiento con anterioridad a la entrada en vigor del presente Decreto y que estén situadas en zonas de atmósfera contaminada, dispondrán del plazo de un año, contado a partir de la fecha de declaración de zona de atmósfera contaminada para estudiar y evaluar sus emisiones de contaminantes a la atmósfera, y presentar un proyecto de las instalaciones correctoras precisas.

A la vista de los resultados de la evaluación y control realizados sobre las emisiones de las industrias previstas en el párrafo precedente, el Ministerio competente por razón de la actividad dictará la resolución que proceda. En dicha resolución se fijarán los plazos en que deberán entrar en funcionamiento las medidas correctoras que deban aplicarse.

Sin perjuicio de los plazos que con carácter general se establezcan para cada tipo de actividad, podrá establecerse en cada caso particular un programa específico para la mejora progresiva de la calidad de los vertidos a la atmósfera, así como los plazos para su ejecución.

Disposición 4.ª

Con carácter general y sin perjuicio de lo establecido en el artículo 48, apartado 2, las industrias existentes deberán adaptarse a las prescripciones del mismo y disposiciones complementarias antes del 1 de julio de 1976.

Aquellas industrias que, por diversas razones debidamente justificadas y aceptadas por la Administración, no puedan ajustarse a los plazos establecidos requerirán una autorización especial para continuar en funcionamiento.

DISPOSICIONES FINALES Y DEROGATORIAS

Disposición 1.ª

1. Los Ministerios competentes elaborarán en un plazo máximo de dos años un inventario nacional de los focos contaminadores de la atmósfera bajo su jurisdicción, que se mantendrá puesto al día en todo momento.

2. Las Empresas industriales están obligadas a facilitar a los Ministerios citados los datos que éstos les soliciten con carácter extraordinario, periódico o permanente en todos los aspectos relacionados con la contaminación del ambiente atmosférico.

Disposición 2.ª

Por los Ministerios competentes se dictarán las disposiciones complementarias oportunas para el mejor desarrollo de lo dispuesto en el presente texto legal, debiéndose dar cuenta de las mismas a la Comisión Internacional del Medio Ambiente.

Disposición 3.ª

Quedan derogadas cuantas disposiciones de igual o inferior rango se opongan a la presente y en particular al Decreto 2861/1968, de 7 de noviembre, sobre medidas para evitar la contaminación atmosférica producida por partículas sólidas en suspensión y en los gases vertidos al exterior por fábricas de cemento, y la Orden del Ministerio de Indus-

tria de 17 de enero de 1969, por la que se crea la Comisión Técnica Asesora de Problemas de la Contaminación Atmosférica de Origen Industrial.

Disposición 4.ª

A los efectos de la contaminación atmosférica, la adaptación del Reglamento de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas aprobado por Decreto de 30 de

noviembre de 1961, a la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, sobre Protección del Medio Ambiente Atmosférico, conllevará la consiguiente adaptación de su nomenclátor al presente Reglamento.

Disposición 5.ª

El presente Decreto entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el «Boletín Oficial del Estado».

ANEXO I

Normas técnicas de niveles de inmisión

«Las medidas se expresan en condiciones normales de temperatura y presión, considerándose condiciones normales 0 °C de temperatura y 760 milímetros de presión.»

1. Definiciones.

1.1. Concentraciones de referencia.- Son los valores de inmisión individualizados por contaminante y período de exposición, a partir de los cuales se determinarán las situaciones ordinarias, las de zona de atmósfera contaminada y las de emergencia.

1.2. Concentraciones de contraste.- Son los valores de inmisión diarios representativos de la evolución admisible de la contaminación, desde el punto de vista higiénico-sanitario, que se determinan mediante las expresiones:

1.2.1. Para períodos anuales:

$$C_d^* = C_1 - a Ld, \text{ con } d = 1, 2, 3... 365$$

siendo:

C_d^* : El valor de la concentración de contraste en el día «d».

C_1 : El valor de concentración de referencia para un día.

a: Constante de proporcionalidad.

Ld: El logaritmo natural del número de días transcurridos desde el origen del período.

Este origen se establece en el primer día del mes en que se ha superado el valor de referencia para un día, o de no alcanzarse en todo el período, el del mes en que la concentración fuera más alta.

1.2.2. Para períodos mensuales:

$$C_{dm}^{*1} = C_1 - a Ld,$$

con $d = 1, 2, 3... 30, 31$ y $m = 1, 2, 3... 12$

siendo:

C_{dm}^{*1} : Valor de la concentración de contraste en el día «d» del mes «m».

1.3. Concentración promedio en un día.- Es el valor medio obtenido de la medición de la emisión en una estación que ha funcionado ininterrumpidamente durante veinticuatro horas. Se representa por V_d .

1.4. Concentración ponderada en un día.- Valor resultante de la ponderación de las concentraciones promedio de días anteriores mediante las expresiones:

1.4.1. Para períodos anuales:

$$C_d = \frac{V_d + dC_{d-1}}{d + 1}, \text{ con } d = 0, 1, 2... 365$$

o su equivalente:

$$C_d = \frac{\sum V_d}{d + 1}, \text{ con } d = 1, 2... 365$$

en donde:

C_d : Es la concentración ponderada del día «d».

d: Es el número de días transcurridos desde el origen.

$C_o = V_o$, se consideran como el mismo valor que el alcanzado en el último día del período anterior.

1.4.2. Para períodos mensuales:

$$C_{d,m} = \frac{V_{dm} + dC_{d-1,m}}{d + 1},$$

con $d = 0, 1, 2, \dots, 30, 31$

$m = 1, 2, 3, \dots, 12$

o su equivalente:

$$C_{d,m} = \frac{\sum V_{dm}}{d+1}, \text{ con } d = 0, 1, 2, 3, \dots, 30, 31$$

$$m = 1, 2, 3, \dots, 12$$

siendo:

$C_{d,m}$, la concentración ponderada del día «d», del mes «m».

d, es el número de días transcurridos a partir del primero del mes considerado.

$C_{31,m} = C_{0,m+1} = V_{0,m+1}$, es decir, que la concentración ponderada al final del período m coincide con el valor inicial del período siguiente, m + 1.

1.5. Índices de contaminación.-Coeficientes numéricos que representan la desviación de la contaminación ponderada en relación con la de contraste.

1.5.1. índice de contaminación anual: Responde a la expresión:

$$I_a = \frac{\sum \delta \frac{C_d}{C_d^*}}{N}, \text{ con } d = 1, 2, 3, \dots, 365$$

$$\delta = 1 \text{ si } C_d \geq C_d^*$$

$$\delta = 0 \text{ si } C_d < C_d^*$$

en la que:

I_a , es el índice anual.

N, es el número de días en que $\delta = 1$.

1.5.2. índice de contaminación mensual: Se obtiene mediante:

$$I_m = \frac{\sum \delta \frac{C_{d,m}}{C_{d,m}^*}}{n}, \text{ con } d = 1, 2, 3, \dots, 30, 31$$

$m = 1, 2, 3, \dots, 12$

$d = 1 \text{ si } \dots C_{d,m} \geq C_{d,m}^*$

$d = 0 \text{ si } \dots C_{d,m} < C_{d,m}^*$

siendo:

I_m , el índice mensual,

n, el número de días en que $\delta = 1$.

2. Criterios de calidad de aire para óxidos de azufre, expresados en dióxido (Derogado por RD 1613/1985).

2.1. Situación admisible:

- Valores de referencia:

Promedio máximo de concentración en dos horas: $700 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ N}$.

Promedio de concentración media en un día: $400 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ N}$.

Promedio de concentración acumulada en un mes: $256 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ N}$.

Promedio de concentración acumulada en un año: $150 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ N}$.

CONCENTRACIONES DE CONTRASTE DIARIAS

d	C _d *	d	C _d *	d	C _d *	d	C _d *	d	C _d *	d	C _d *
69	220	118	197	167	183	216	172	265	163	314	156
70	220	119	197	168	182	217	171	266	163	315	156
71	219	120	197	169	182	218	171	267	163	316	156
72	218	121	196	170	182	219	171	268	163	317	155
73	218	122	196	171	182	220	171	269	162	318	155
74	217	123	196	172	181	221	171	270	162	319	155
75	217	124	195	173	181	222	171	271	162	320	155
76	216	125	195	174	181	223	170	272	162	321	155
77	215	126	195	175	181	224	170	273	162	322	155
78	215	127	194	176	180	225	170	274	162	323	155
79	214	128	194	177	180	226	170	275	161	324	154
80	214	129	194	178	180	227	170	276	161	325	154
81	213	130	193	179	180	228	169	277	161	326	154
82	213	131	193	180	179	229	169	278	161	327	154
83	212	132	193	181	179	230	169	279	161	328	154
84	212	133	192	182	179	231	169	280	161	329	154
85	211	134	192	183	179	232	169	281	160	330	154
86	211	135	192	184	178	233	168	282	160	331	154
87	210	136	191	185	178	234	168	283	160	332	153
88	210	137	191	186	178	235	168	284	160	333	153
89	209	138	191	187	178	236	168	285	160	334	153
90	209	139	190	188	178	237	168	286	160	335	153
91	208	140	190	189	177	238	168	287	160	336	153
92	208	141	190	190	177	239	167	288	159	337	153
93	207	142	189	191	177	240	167	289	159	338	153
94	207	143	189	192	177	241	167	290	159	339	153
95	207	144	189	193	176	242	167	291	159	340	152
96	206	145	189	194	176	243	167	292	159	341	152
97	206	146	188	195	176	244	166	293	159	342	152
98	205	147	188	196	176	245	166	294	159	343	152
99	205	148	188	197	176	246	166	295	158	344	152
100	204	149	187	198	175	247	166	296	158	345	152
101	204	150	187	199	175	248	166	297	158	346	152
102	204	151	187	200	175	249	166	298	158	347	152
103	203	152	187	201	175	250	165	299	158	348	151
104	203	153	186	202	175	251	165	300	158	349	151
105	202	154	186	203	174	252	165	301	158	350	151
106	202	155	186	204	174	253	165	302	157	351	151
107	202	156	185	205	174	254	165	303	157	352	151
108	201	157	185	206	174	255	165	304	157	353	151
109	201	158	185	207	173	256	164	305	157	354	151
110	200	159	185	208	173	257	164	306	157	355	151
111	200	160	184	209	173	258	164	307	157	356	150
112	200	161	184	210	173	259	164	308	157	357	150
113	199	162	184	211	173	260	164	309	156	358	150
114	199	163	184	212	172	261	164	310	156	359	150
115	198	164	183	213	172	262	163	311	156	360	150
116	198	165	183	214	172	263	163	312	156		
117	198	166	183	215	172	264	163	313	156		

2.2. Zona contaminada:

Su declaración tendrá lugar cuando ocurran uno o ambos de los siguientes supuestos:

a) Índice anual de contaminación igual o superior a 1,20.

b) Una vez al año con índice mensual de contaminación igual o superior a 1,30, dos veces al año con índice mensual de contaminación igual o superior a 1,20, y tres veces al año con índice mensual de contaminación igual o superior a 1,15.

2.3. Emergencia de primer grado:

– Valores de referencia:

Promedio máximo de concentración en dos horas: 1.500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

Promedio de concentración media en un día: 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

Promedio de concentración acumulada en siete días: 610 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

CONCENTRACIONES ACUMULADAS DIARIAS

Período de días	1	2	3	4	5	6	7
Concentración acumulada	800	732	693	665	643	635	610

2.4. Emergencia de segundo grado:

– Valores de referencia:

Promedio máximo de concentración en dos horas: 2.500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

Promedio de concentración media en un día 1.400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

Promedio de concentración acumulada en cinco días: 1.100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

CONCENTRACIONES ACUMULADAS DIARIAS

Período de días	1	2	3	4	5
Concentración acumulada	1.400	1.271	1.195	1.142	1.100

2.5. Emergencia total:

– Valores de referencia:

Promedio máximo de concentración en dos horas: 4.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

Promedio de concentración media en un día: 2.200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

Promedio de concentración acumulada en tres días: 1.900 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

CONCENTRACIONES ACUMULADAS DIARIAS

Período de días	1	2	3
Concentración acumulada	2.200	2.032	1.900

3. Criterios de calidad del aire para partículas en suspensión.

3.1. Situación admisible:

– Valores de referencia:

Promedio de concentración media en un día 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

Promedio de concentración acumulada en un mes: 202 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

Promedio de concentración acumulada en un año: 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

CONCENTRACIONES ACUMULADAS DIARIAS

d	C_d*	d	C_d*	d	C_d*	d	C_d*	d	C_d*
1	300	61	181	121	160	181	150	241	142
2	280	62	181	122	160	182	150	242	141
3	268	63	180	123	160	183	150	243	141
4	260	64	180	124	160	184	149	244	141
5	254	65	179	125	161	185	149	245	141
6	248	66	179	126	160	186	149	246	141
7	244	67	179	127	160	187	149	247	141
8	240	68	178	128	160	188	149	248	141
9	237	69	178	129	160	189	149	249	141
10	233	70	177	130	159	190	148	250	141
11	231	71	177	131	159	191	148	251	140
12	228	72	176	132	159	192	148	252	140
13	226	73	176	133	159	193	148	253	140
14	224	74	176	134	159	194	148	254	140
15	222	75	175	135	158	195	148	255	140
16	220	76	175	136	158	196	148	256	140
17	218	77	175	137	158	197	147	257	140
18	217	78	174	138	158	198	147	258	140
19	215	79	174	139	157	199	147	259	140
20	213	80	173	140	157	200	147	260	139
21	212	81	173	141	157	201	147	261	139
22	211	82	173	142	157	202	147	262	139
23	209	83	172	143	157	203	147	263	139
24	208	84	172	144	156	204	146	264	139
25	207	85	172	145	156	205	146	265	139
26	206	86	171	146	156	206	146	266	139
27	205	87	171	147	156	207	146	267	139
28	204	88	171	148	156	208	146	268	139
29	203	89	170	149	155	209	146	269	138
30	201	90	170	150	155	210	146	270	138
31	201	91	170	151	155	211	145	271	138
32	200	92	169	152	155	212	145	272	138
33	199	93	169	153	155	213	145	273	138
34	198	94	169	154	155	214	145	274	138
35	197	95	168	155	154	215	145	275	138
36	197	96	168	156	154	216	145	276	138
37	195	97	168	157	154	217	145	277	138
38	195	98	168	158	154	218	144	278	137
39	194	99	167	159	154	219	144	279	137
40	193	100	167	160	153	220	144	280	137
41	193	101	167	161	153	221	144	281	137
42	192	102	166	162	153	222	144	282	137
43	191	103	166	163	153	223	144	283	137
44	191	104	166	164	153	224	144	284	137
45	190	105	166	165	153	225	144	285	137
46	189	106	165	166	152	226	143	286	137
47	189	107	165	167	152	227	143	287	137
48	188	108	165	168	152	228	143	288	136
49	188	109	165	169	152	229	143	289	136
50	187	110	164	170	152	230	143	290	136
51	186	111	164	171	152	231	143	291	136
52	186	112	164	172	151	232	143	292	136
53	185	113	164	173	151	233	143	293	136
54	185	114	163	174	151	234	143	294	136
55	184	115	163	175	151	235	142	295	136
56	184	116	163	176	151	236	142	296	136
57	183	117	162	177	151	237	142	297	136
58	183	118	162	178	150	238	142	298	135
59	182	119	162	179	150	239	142	299	135
60	182	120	162	180	150	240	142	300	135
								301	135
								302	135
								303	135
								304	135
								305	135
								306	135
								307	135
								308	135
								309	134
								310	134
								311	134
								312	134
								313	134
								314	134
								315	134
								316	134
								317	134
								318	134
								319	133
								320	133
								321	133
								322	133
								323	133
								324	133
								325	133
								326	133
								327	133
								328	133
								329	133
								330	133
								331	132
								332	132
								333	132
								334	132
								335	132
								336	132
								337	132
								338	132
								339	132
								340	132
								341	132
								342	131
								343	131
								344	131
								345	131
								346	131
								347	131
								348	131
								349	131
								350	131
								351	131
								352	131
								353	131
								354	130
								355	130
								356	130
								357	130
								358	130
								359	130
								360	130

3.2. Zona contaminada:

Su declaración tendrá lugar cuando ocurran uno o ambos de los siguientes supuestos:

a) Índice anual de contaminación igual o superior a 1,20.

b) Una vez al año con índice mensual de contaminación igual o superior a 1,30.

Dos veces al año con índice mensual de contaminación igual o superior a 1,20.

Tres veces al año con índice mensual de contaminación igual o superior a 1,15.

3.3. Emergencia de primer grado:

– Valores de referencia:

Promedio de concentración media en un día: 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

Promedio de concentración acumulada en siete días: 470 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

CONCENTRACIONES ACUMULADAS DIARIAS

Período de días	1	2	3	4	5	6	7
Concentración acumulada	600	554	527	507	493	480	470

3.4. Emergencia de segundo grado:

– Valores de referencia:

Promedio de concentración media en un día: 1.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

Promedio de concentración acumulada en cinco días: 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

CONCENTRACIONES ACUMULADAS DIARIAS

Período de días	1	2	3	4	5
Concentración acumulada	1.000	914	863	828	800

3.5. Emergencia total:

– Valores de referencia:

Promedio de concentración media en un día: 1.600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

Promedio de concentración acumulada en tres días: 1.400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

CONCENTRACIONES ACUMULADAS DIARIAS

Período de días	1	2	3
Concentración acumulada	1.600	1.475	1.400

4. Criterios de calidad del aire para mezcla de óxidos de azufre y partículas en suspensión.

4.1. Situación admisible:

– Valores de referencia:

Producto de concentraciones promedio diarias, expresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de óxidos de azufre y partículas en suspensión: 120 x 103.

Producto de concentraciones promedio mensual, expresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de óxidos de azufre y partículas en suspensión: 64 x 103.

Productos de concentraciones promedio anual, expresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de óxidos de azufre y partículas en suspensión: 20 x 103.

CONCENTRACIONES ACUMULADAS DIARIAS

d	C _d *	d	C _d *	d	C _d *	d	C _d *	d	C _d *	d	C _d *
1	120	61	50	121	39	181	32	241	27	301	23
2	108	62	50	122	38	182	32	242	27	302	23
3	101	63	50	123	38	183	31	243	27	303	23
4	96	64	49	124	38	184	31	244	27	304	23
5	93	65	49	125	38	185	31	245	27	305	23
6	90	66	49	126	38	186	31	246	27	306	23
7	87	67	49	127	38	187	31	247	26	307	23
8	85	68	48	128	38	188	31	248	26	308	23
9	84	69	48	129	37	189	31	249	26	309	23
10	81	70	48	130	37	190	31	250	26	310	23
11	79	71	48	131	37	191	31	251	26	311	22
12	78	72	47	132	37	192	31	252	26	312	22
13	76	73	47	133	37	193	31	253	26	313	22
14	75	74	47	134	37	194	31	254	26	314	22
15	74	75	47	135	37	195	30	255	26	315	22
16	73	76	47	136	37	196	30	256	26	316	22
17	72	77	46	137	36	197	30	257	26	317	22
18	71	78	46	138	36	198	30	258	26	318	22
19	70	79	46	139	36	199	30	259	26	319	22
20	69	80	46	140	36	200	30	260	26	320	22
21	68	81	45	141	36	201	30	261	25	321	22
22	67	82	45	142	36	202	30	262	25	322	22
23	67	83	45	143	36	203	30	263	25	323	22
24	66	84	45	144	36	204	30	264	25	324	22
25	65	85	45	145	35	205	30	265	25	325	22
26	65	86	44	146	35	206	29	266	25	326	22
27	64	87	44	147	35	207	29	267	25	327	22
28	63	88	44	148	35	208	29	268	25	328	22
29	63	89	44	149	35	209	29	269	25	329	22
30	62	90	44	150	35	210	29	270	25	330	22
31	62	91	43	151	35	211	29	271	25	331	21
32	63	92	43	152	35	212	29	272	25	332	21
33	61	93	43	153	35	213	29	273	25	333	21
34	60	94	43	154	34	214	29	274	25	334	21
35	60	95	43	155	34	215	29	275	25	335	21
36	59	96	42	156	34	216	29	276	25	336	21
37	59	97	42	157	34	217	29	277	24	337	21
38	58	98	42	158	34	218	29	278	24	338	21
39	58	99	42	159	34	219	28	279	24	339	21
40	57	100	42	160	34	220	28	280	24	340	21
41	57	101	42	161	34	221	28	281	24	341	21
42	57	102	41	162	34	222	28	282	24	342	21
43	56	103	41	163	33	223	28	283	24	343	21
44	56	104	41	164	33	224	28	284	24	344	21
45	55	105	41	165	33	225	28	285	24	345	21
46	55	106	41	166	33	226	28	286	24	346	21
47	54	107	41	167	33	227	28	287	24	347	21
48	54	108	40	168	33	228	28	288	24	348	21
49	54	109	40	169	33	229	28	289	24	349	21
50	54	110	40	170	33	230	28	290	24	350	20
51	53	111	40	171	33	231	28	291	24	351	20
52	53	112	40	172	33	232	27	292	24	352	20
53	53	113	40	173	32	233	27	293	23	353	20
54	52	114	39	174	32	234	27	294	23	354	20
55	52	115	39	175	32	235	27	295	23	355	20
56	52	116	39	176	32	236	27	296	23	346	20
57	53	117	39	177	32	237	27	297	23	357	20
58	51	118	39	178	32	238	27	298	23	358	20
59	51	119	39	179	32	239	27	299	23	359	20
60	50	120	39	180	32	240	27	300	23	360	20

4.2. Zona contaminada:

Su declaración tendrá lugar cuando ocurran uno o ambos de los siguientes supuestos:

a) Índice anual de contaminación igual o superior a 1,20.

b) Una vez al año con índice mensual de contaminación igual o superior a 1,30.

– Dos veces al año con índice mensual de contaminación igual o superior a 1,20.

– Tres veces al año con índice mensual de contaminación igual o superior a I, 1 5.

4.3. Emergencia de primer grado:

– Valores de referencia:

Producto de concentraciones promedio diario: 327×10^3 .

Producto de concentraciones acumuladas en siete días: 218×10^3 .

CONCENTRACIONES ACUMULADAS DIARIAS

Período de días	1	2	3	4	5	6	7
Concentración acumulada $\times 10^3$	327	270	256	240	234	225	218

4.4. Emergencia de segundo grado:

– Valores de referencia:

Producto de concentraciones promedio diario: 600×10^3 .

Producto de concentración acumuladas en cinco días: 460×10^3 .

CONCENTRACIONES ACUMULADAS DIARIAS

Período de días	1	2	3	4	5
Concentración acumulada $\times 10^3$	600	540	505	485	460

4.5. Emergencia total:

– Valores de referencia:

Producto de concentraciones promedio diario: 1.000×10^3 .

Producto de concentraciones acumuladas de tres días: 840×10^3 .

CONCENTRACIONES ACUMULADAS DIARIAS

Período de días	1	2	3
Concentración acumulada $\times 10^3$	1.000	900	840

5. Criterios de calidad del aire para óxidos de nitrógeno, expresados en dióxido (30).

5.1. Situación admisible.

– Valores de referencia.

Concentración máxima en treinta minutos: $400 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ N}$.

Concentración media en un día: $200 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ N}$.

Concentración media en un año: $100 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ N}$.

5.2. Emergencia de primer grado. Concentración media en un día: $565 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ N}$.

5.3. Emergencia de segundo grado. Concentración media en un día: $750 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ N}$.

5.4. Emergencia total. Concentración media en un día: $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ N}$.

6. Criterios de calidad del aire para monóxido de carbono.

6.1. Situación admisible.

Concentración máxima en treinta minutos: $45 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ N}$.

Concentración media en ocho horas: $15 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ N}$.

6.2. Emergencia de primer grado.

Concentración media en un día:

34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

6.3. Emergencia de segundo grado.

Concentración media en un día:

46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

6.4. Emergencia total.

Concentración media en un día:

60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.

7. Criterios de calidad del aire para otros compuestos.

7.1. Situación admisible.

– Valores de referencia.

Plomo molecular:

– 50 microgramos por metro cúbico de aire (concentración media en treinta minutos).

– 10 microgramos por metro cúbico de aire (concentración media en ocho horas).

Hidrocarburos (expresada en hexano):

– 280 miligramos por metro cúbico de aire (concentración media en treinta minutos).

– 140 miligramos por metro cúbico de aire (concentración media en veinticuatro horas).

Cloro molecular:

– 300 microgramos por metro cúbico de aire (concentración media en treinta minutos).

– 50 microgramos por metro cúbico de aire (concentración media en veinticuatro horas).

Cloruro de hidrógeno:

– 300 microgramos por metro cúbico de aire (concentración media en treinta minutos).

– 50 microgramos por metro cúbico de aire (concentración media en veinticuatro horas).

Compuestos de flúor:

– 60 microgramos por metro cúbico de aire (concentración media en treinta minutos).

– 20 microgramos por metro cúbico de aire (concentración media en veinticuatro horas).

Fluoruro de hidrógeno:

– 30 microgramos por metro cúbico de aire (concentración media en treinta minutos).

– 10 microgramos por metro cúbico de aire (concentración media en veinticuatro horas).

Sulfuro de hidrógeno:

– 100 microgramos por metro cúbico de aire (concentración media en treinta minutos).

– 40 microgramos por metro cúbico de aire (concentración media en veinticuatro horas).

Sulfuro de carbono:

– 30 microgramos por metro cúbico de aire (concentración media en treinta minutos).

– 10 microgramos por metro cúbico de aire (concentración media en veinticuatro horas).

Partículas sedimentables:

– 300 miligramos por metro cuadrado (concentración media en veinticuatro horas).

ANEXO II

Catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera*Grupo A*

- 1.1. Energía
- Generadores.
- 1.1.1. Centrales térmicas convencionales de potencia superior a 50 Mw.
- 1.1.2. Centrales térmicas nucleares.
- Gas.
- 1.1.3. Fábricas de gas manufacturado.
- 1.1.4. Destilación en saco de carbones y madera.
- Petróleo.
- 1.1.5. Refinerías de petróleo.
- 1.2. Minería.
- 1.2.1. Tostación, calcinación, aglomeración y sinterización de minerales.
- 1.3. Siderurgia y fundición.
- 1.3.1. Siderurgia integral.
- 1.3.2. Aglomeración de minerales.
- 1.3.3. Parque de minerales.
- 1.3.4. Producción de arrabio en hornos altos.
- 1.3.5. Baterías de coque en las plantas siderúrgicas y fundiciones.
- 1.3.6. Acerías de oxígeno, incluidos los procesos LD, LDAC, KALDO y similares.
- 1.3.7. Fabricación y afinado de acero en convertidor con inyección de aire, con o sin oxígeno, incluidos los convertidores Bessemer.
- 1.3.8. Acerías Martin.
- 1.3.9. Fabricación de acero en hornos de arco eléctrico de capacidad total de la planta superior a 10 Tm.
- 1.3.10. Fabricación de ferroaleaciones en horno eléctrico cuando la potencia del horno sobrepasa por 100 Kw.
- 1.4. Metalurgia no férrea.
- 1.4.1. Producción de aluminio.
- 1.4.2. Producción de plomo en horno de cuba.
- 1.4.3. Refino de plomo.
- 1.4.4. Producción de plomo de segunda fusión (recuperación de la chatarra de plomo).
- 1.4.5. Producción de cinc por reducción de minerales y por destilación.
- 1.4.6. Producción de cobre bruto o negro en horno de cuba, horno de reverbero u horno rotativo.
- 1.4.7. Producción de cobre en el convertidor.
- 1.4.8. Refino de cobre en horno de ánodos.
- 1.4.9. Producción de antimonio, cadmio, cromo, magnesio, manganeso, estaño y mercurio.
- 1.4.10. Producción de metales y aleaciones por electrólisis ígnea, cuando la potencia de los hornos es mayor de 25 Kw.
- 1.5. Transformados metálicos.
- Ninguna.
- 1.6. Industrias químicas y conexas.
- Abonos

1.6.1. Producción de fertilizantes orgánicos e inorgánicos -excepto los potásicos.

Industria inorgánica de base e intermedia.

1.6.2. Fabricación de gases para síntesis química que emitan contaminantes incluidos en el Anexo II de este Decreto.

1.6.3. Producción de halógenos y sus hidrácidos y procesos en que se emitan sistemáticamente.

1.6.4. Producción y utilización de fluoruros.

1.6.5. Producción de cloruros, oxiclорuros y sulfuros de carbono, azufre y fósforo.

1.6.6. Producción de azufre y sus ácidos y tratamientos de sulfuros minerales.

1.6.7. Producción de ácidos nítrico y fosfórico.

1.6.8. Producción de fósforo.

1.6.9. Producción de arsénico y sus componentes y procesos que los desprenden.

1.6.10. Producción y utilización de ácido cianhídrico, sus sales y derivados.

1.6.11. Producción de carburos metálicos.

Industria orgánica de base e intermedia.

1.6.12. Producción de hidrocarburos alifáticos.

1.6.13. Producción de hidrocarburos aromáticos.

1.6.14. Producción de derivados orgánicos de azufre, cloro, plomo y mercurio.

1.6.15. Producción de acrilonitrilo.

1.6.16. Producción de coque de petróleo.

1.6.17. Producción de betún, brea y asfalto de petróleo.

1.6.18. Fabricación de grafito artificial para electrodos.

Pigmentos.

1.6.19. Producción de negros de humo.

1.6.20. Producción de bióxido de titanio.

1.6.21. Producción de óxido de cinc.

Pastas de papel y papel.

1.6.22. Fabricación de celulosa y pastas de papel.

1.7. Industria textil.

Ninguna.

1.8. Industria alimentaria.

1.8.1. Cervecerías y malterías.

1.8.2. Azucareras, incluido el depósito de pulpas húmedas de remolacha.

1.8.3. Fabricación de harina de huesos y gluten de pieles.

1.8.4. Producción de harina de pescado y extracción y tratamiento del aceite de pescado.

1.9. Industria de la madera, corcho y muebles.

Ninguna.

1.10. Industria de materiales para la construcción.

1.10.1. Fabricación de clinker y de cemento.

1.10.2. Fabricación de cal y yeso con capacidad de producción superior a 5.000 Tm./año.

1.10.3. Calcinación de la dolomita.

1.10.4. Fabricación de lana de roca y otras lanas minerales.

1.10.5. Fabricación de aglomerados asfálticos.

1.11. Industria de la piel, cuero y calzado.

Ninguna.

1.12. Industrias fabriles y actividades diversas.

1.12.1. Plantas de recuperación de metales por combustión de desperdicios.

1.12.2. Incineración de residuos industriales.

1.12.3. Torrefacción de huesos, cueros, cuernos, pezuñas y otros desechos de animales para la fabricación de abonos y otros usos.

1.12.4. Plantas de tratamiento de residuos urbanos, con capacidad superior a 150 Tm./día.

1.12.5. Vertederos de basuras.

1.12.6. Plantas de compostaje.

1.12.7. Almacenamiento y manipulación de minerales y material pulverulento a granel y a la intemperie en zonas portuarias.

1.13. Actividades agrícolas y agroindustriales.

1.13.1. Establos para más de 100 cabezas de ganado bovino.

1.13.2. Granjas para más de 1.000 cerdos o 10.000 aves de corral.

1.13.3. Mataderos con capacidad superior a 1.000 Tm./año y talleres de descuartizamiento de animales con capacidad superior a 4.000 Tm./año.

1.13.4. Tratamiento de cuerpos, materias y despojos de animales en estado fresco con vistas a la extracción de cuerpos grasos.

1.13.5. Estercoleros.

1.13.6. Fabricación de piensos y procesamiento de cereales en grano.

1.13.7. Secado de piensos en verde en instalaciones industriales.

Grupo B

2.1. Energía.

Generadores.

2.1.1. Centrales térmicas convencionales de potencia inferior a 50 Mw.

2.1.2. Generadores de vapor de capacidad superior a veinte toneladas de vapor por hora y generadores de calor de potencia calorífica superior a 2.000 termias por hora. Si varios equipos aislados forman parte de una instalación o si varias instalaciones aisladas desembocan en una sola chimenea común, se aplicará a estos efectos la suma de las potencias de los equipos o instalaciones aisladas.

Carbón.

2.1.3. Fabricación de aglomerados y briquetas de carbón.

2.1.4. Instalaciones de acondicionamiento y tratamiento del carbón (machaqueo, molienda y cribado).

2.1.5. Almacenamiento a la intemperie de combustibles sólidos y residuos de las centrales térmicas.

2.1.6. Carbonización de la madera (carbón vegetal) en cuanto sea una industria fija y extensiva.

2.2. Minería.

2.2.1. Extracción de rocas, piedras, gravas y arena (canteras).

2.2.2. Instalaciones de tratamiento de piedras, guijarros y otros productos minerales (machaqueo, desmenuzado, triturado, pulverizado, molienda, tamizado, cribado,

mezclado, limpiado, ensacado), cuando la capacidad es superior a 200.000 toneladas anuales, o para cualquier capacidad cuando la instalación se encuentre a menos de 500 metros de un núcleo de población.

2.2.3. Instalaciones de manutención y transporte en las explotaciones mineras.

2.2.4. Almacenamiento a la intemperie de productos minerales, incluidos los combustibles sólidos y escoriales.

2.3. Siderurgia y fundición.

2.3.1. Producción de fundición de hierro, hierro maleable y acero en hornos rotativos y cubilotes y hornos de arco eléctrico, con capacidad de producción igual o inferior a diez toneladas métricas.

2.3.2. Fabricación de ferroaleaciones en horno eléctrico cuando la potencia del horno sea igual o inferior a 100 Kw.

2.3.3. Tratamiento de escorias siderúrgicas.

2.4. Metalurgia no férrea.

2.4.1. Fabricación de sílico-aleaciones en horno eléctrico (silicio-aluminio, sílice-calcio, silicio-manganeso, etc., con excepción de ferrosilicio), cuando la potencia del horno es superior a 100 Kw.

2.4.2. Refundición de metales no férreos.

2.4.3. Recuperación de los metales no férreos mediante tratamiento por fusión de las chatarras, excepto el plomo.

2.4.4. Preparación, almacenamiento a la intemperie, carga, descarga, manutención y transporte de minerales en las plantas metalúrgicas.

2.5. Transformados metálicos.

2.5.1. Esmaltados de conductores de cobre.

2.5.2. Galvanizado, estañado y empuñado de hierro, o revestimientos con un metal cualquiera por inmersión en baño de metal fundido.

2.5.3. Fabricación de placas de acumuladores de plomo con capacidad superior a 1.000 Tm./año.

2.6. Industrias químicas y conexas.

Industria inorgánica de base e intermedia.

2.6.1. Fabricación de amoníaco.

2.6.2. Fabricación de alúmina.

2.6.3. Producción de cloruro de amonio.

2.6.4. Producción de derivados inorgánicos del mercurio.

2.6.5. Producción de sales de cobre.

2.6.6. Producción de óxidos de plomo (minio y litargirio) y carbonato de plomo (albayalde).

2.6.7. Producción de selenio y sus derivados.

Industria orgánica de base e intermedia.

2.6.8. Producción de hidrocarburos halogenados.

2.6.9. Producción de fenol, creasoles y nitrofenoles.

2.6.10. Producción de piridina y metilpiridinas (picolinas) y cloropicrina.

2.6.11. Producción de formol, acetaldehído y acroleína y sus alquil-derivados.

2.6.12. Producción y utilización de aminas.

2.6.13. Producción de ácidos grasos industriales.

2.6.14. Preparación de mezclas bituminosas a base de asfalto, betunes, alquitranes y breas.

2.6.15. Producción de benzol bruto.	Ninguna.
Colorantes.	2.8. Industria alimentaria.
2.6.16. Producción de colorantes orgánicos sintéticos.	2.8.1. Destilerías de alcohol y fabricación de aguardientes cuando la producción, expresada en alcohol absoluto, es superior a 500 litros diarios.
Pigmentos.	2.8.2. Fabricación de levadura.
2.6.17. Producción de litopón, azul de ultramar, azul de Prusia y peróxido de hierro.	2.8.3. Almacenamiento de sebos brutos destinados a la extracción de grasas industriales.
Jabones y detergentes.	2.8.4. Fundición, refundición, neutralización, blanqueo y filtrado de grasas y sebos.
2.6.18. Saponificación y cocción del jabón.	2.8.5. Producción de alimentos precocinados y ahumado, secado y salazones de alimentos.
Plásticos y cauchos.	2.8.6. Producción de conservas de pescado, crustáceos y moluscos.
2.6.19. Regeneración del caucho.	2.8.7. Almacenamiento de pescados salados, ahumados o secados cuando la cantidad almacenada es superior a 500 kilogramos.
2.6.20. Producción de plásticos para moldeado del tipo vinílico, fenólico, acrílico, uretánico y halogenado.	2.8.8. Almacenamiento de huevas de pescado.
2.6.21. Producción de cauchos nitrílicos y halogenados.	2.9. Industria de la madera, corcho y muebles.
Fibras artificiales y sintéticas.	2.9.1. Impregnación o tratamiento de la madera con aceite de creosota, alquitrán y otros productos para su conservación.
2.6.22. Producción de viscosa y fibras acrílicas.	2.10. Industria de materiales para la construcción.
Transformación de plásticos.	2.10.1. Fabricación de cal y yeso, con capacidad de producción igual o inferior a 5.000 Tm./año.
2.6.23. Fabricación de guarniciones de fricción que utilicen resinas fenoplásticas.	2.10.2. Fabricación de productos de arcilla para la construcción, azulejos, material refractario y artículos de porcelana, loza y gres.
Manufacturas de caucho.	
2.6.24. Fabricación de ebonita.	
Pinturas.	
2.6.25. Producción de tintas de imprenta.	
Plaguicidas.	
2.6.26. Producción de plaguicidas.	
Hidratos de carbono y colas.	
2.6.27. Fabricación de colas y gelatinas.	
2.7. Industria textil.	

2.10.3. Fabricación de vidrio.

2.10.4. Plantas de preparación de hormigón.

2.11. Industria de la piel, cuero y calzado.

2.11.1. Almacenamiento de pieles frescas o cueros verdes.

2.11.2. Tratamiento y curtido de cueros y pieles.

2.12. Industrias fabriles y actividades diversas.

2.12.1. Aplicación en frío de barnices no grasos, pinturas y tintas de impresión sobre cualquier soporte, y cocción o secado de los mismos, cuando la cantidad almacenada en el taller es superior a 1.000 litros.

2.12.2. Plantas de tratamiento de residuos urbanos, con capacidad igual o inferior a 150 Tm/día.

2.12.3. Hornos crematorios (hospitales y cementerios).

2.12.4. Almacenamiento a la intemperie y manipulación de materiales y desperdicios pulverulentos.

2.12.5. Transformación de tripas y tendones.

2.12.6. Instalaciones trituradoras de chatarra.

2.12.7. Instalaciones de chorreado de arena, gravilla u otro abrasivo.

2.12.8. Combustiones a cielo abierto.

2.12.9. Plantas de depuración de aguas.

2.13. Actividades agrícolas y agro-industriales.

2.13.1. Fundido de grasas animales.

2.13.2. Extracción de aceites vegetales.

2.13.3. Preparación de pelos de puercos, crines de origen animal y plumas.

2.13.4. Triperías.

2.13.5. Almacenamiento de huesos, pelo, astas, cuernos y pezuñas en estado verde.

2.13.6. Fumigación aérea.

Grupo C

3.1. Energía.

Generadores.

3.1.1. Generadores de vapor de capacidad igual o inferior a 20 toneladas métricas de vapor por hora y generadores de calor de potencia calorífica igual o inferior a 2.000 termias por hora. Si varios equipos aislados forman parte de una instalación o si varias instalaciones aisladas desembocan en una sola chimenea común se aplicará a estos efectos la suma de las potencias de los equipos o instalaciones aislados.

Gas.

3.1.2. Producción de gas pobre, de gasógeno o de agua.

3.2. Minería.

3.2.1. Instalaciones de tratamiento de piedras, guijarros y otros productos minerales (machaqueo, desmenuzado, triturado, pulverizado, molienda, tamizado, cribado, mezclado, limpiado, ensacado) cuando la capacidad es inferior a 200.000 toneladas anuales.

3.2.2. Tallado, aserrado y pulido, por medios mecánicos, de rocas y piedras naturales.

3.3. Siderurgia y fundición.

3.3.1. Tratamientos térmicos de metales féreos y no féreos.

3.3.2. Operaciones de moldeo y tratamiento de arenas de fundición y otras materias de moldeo.

3.3.3. Hornos de conformado de planchas o perfiles.

3.4. Metalurgia no férrea.

3.4.1. Refino de metales en hornos de reverbero a excepción del plomo y cobre.

3.4.2. Fabricación de silicoaleaciones, excepto ferrosilicio, cuando la potencia del horno es igual o inferior a 100 Kw.

3.5. Transformados metálicos.

3.5.1. Fabricación de placas de acumuladores de plomo con capacidad igual o inferior a 1.000 toneladas métricas / año.

3.5.2. Instalaciones de soldadura en talleres de calderería, astilleros y similares.

3.6. Industrias químicas y conexas.

Industria inorgánica de base e intermedia.

3.6.1. Producción de cloruro y nitrato de hierro.

3.6.2. Producción de compuestos de cadmio, cinc, cromo, magnesio, manganeso y cobre.

Industria orgánica de base e intermedia.

3.6.3. Producción de aromáticos nitrados.

3.6.4. Producción de ácidos fórmico, acético, oxálico, adípico, láctico, salicílico, maleico y ftálico.

3.6.5. Producción de anhídridos, acético, maleico y ftálico.

Jabones y detergentes.

3.6.6. Fabricación de productos detergentes.

Plásticos y cauchos.

3.6.7. Producción de celuloide y nitrocelulosa.

Pinturas.

3.6.8. Producción de pinturas, barnices y lacas.

Fotografía.

3.6.9. Recuperación de la plata por tratamiento de productos fotográficos.

Resinas naturales.

3.6.10. Fundido de resinas.

Aceites y grasas.

3.6.11. Oxidación de aceites vegetales.

Ceras y parafinas.

3.6.12. Moldeo por fusión de objetos parafínicos.

3.7. Industria textil.

3.7.1. Desmotado de algodón.

3.7.2. Lavado y cardado de lana.

3.7.3. Enriado del lino, cáñamo y otras fibras textiles.

3.7.4. Hilatura del capullo de gusano de seda.

3.7.5. Fabricación de fieltros y guatas.

3.8. Industria alimentaria.

3.8.1. Tostado y torrefactado del cacao, café, malta, achicoria y otros sucedáneos del café.

3.8.2. Destilerías de alcohol y fabricación de aguardientes cuando la producción diaria expresada en alcohol absoluto está comprendida entre 100 y 500 litros.

3.8.3. Preparación de productos opoterápicos y de extractos o concentrados de car-

nes, pescado y otras materias animales.

3.8.4. Freidurías industriales de productos alimentarios (pescado, patatas, etc.), en las aglomeraciones urbanas.

3.9. Industria de la madera, corcho y muebles.

3.9.1. Industrias de aserrado y despiece de la madera y corcho.

3.9.2. Fabricación de tableros aglomerados y de fibras.

3.9.3. Tratamiento del corcho y producción de aglomerados de corcho y linóleos.

3.10. Industria de materiales para la construcción.

3.10.1. Centrales de distribución de cementos a granel. Ensacado de cementos.

3.10.2. Fabricación de productos de fibrocemento.

3.11. Industria de la piel, cuero y calzado.

Ninguna.

3.12. Industrias fabriles y actividades diversas.

3.12.1. Aplicación en frío de barnices no grasos, pinturas y tintas de impresión sobre cualquier soporte, y cocción o secado de los

mismos, cuando la cantidad almacenada en el taller sea igual o inferior a 1.000 litros.

3.12.2. Aplicación sobre cualquier soporte (madera, cuero, cartón, plásticos, fibras sintéticas, tejido, fieltro, metales, etc.) de asfalto, materiales bituminosos o aceites asfálticos, de barnices grasos y aceites secantes para la obtención de papel recubierto, tejidos recubiertos, hules, cueros artificiales, telas y papeles aceitados y linóleos.

3.12.3. Azogado de espejos.

3.12.4. Actividades que tengan focos de emisión cuya suma de emisiones totalice 36 toneladas de emisión continua o más por año, de uno cualquiera de los contaminantes principales: SO_2 , CO , NO_x , hidrocarburos, polvos y humos.

3.12.5. Funcionamiento de maquinaria auxiliar para la construcción.

3.13. Actividades agrícolas y agroindustriales.

3.13.1. Secado de las heces de vino.

3.13.2. Secado de lúpulo con azufre.

3.13.3. Almacenamiento de bagazos y orujos fermentables de frutos.

3.13.4. Secado de forrajes y cereales.

3.13.5. Deshidratado de la alfalfa.

ANEXO III

Relación de los principales contaminantes de la atmósfera

- a) Contaminantes principales:
- Anhídrido sulfuroso.
 - Monóxido de carbono.
 - Óxidos de nitrógeno.
 - Hidrocarburos.
 - Polvos (partículas sedimentables y partículas en suspensión).
 - Humos.
- b) Contaminantes especiales:
- Derivados del azufre:
 - Anhídrido sulfúrico.
 - Nieblas de ácido sulfúrico.
 - Ácido sulfhídrico.
 - Sulfuro de carbono.
 - Cloruros de azufre.
 - Derivados del nitrógeno:
 - Amoníacos y sus derivados.
 - Ácido nítrico.
 - Cianógeno.
 - Ácido cianhídrico.
 - Cianuros.
 - Halógenos y sus derivados:
 - Flúor.
 - Cloro.
 - Bromo.
 - Yodo.
 - Ácido fluorhídrico.
 - Ácido clorhídrico.
 - Ácido bromhídrico.
 - Ácido yodhídrico.
 - Ácido fluosilícico.
 - Fluoruros.
 - Oxiclorigenado de carbono o fosgeno.
 - Otros compuestos inorgánicos:
 - Arsénico y sus derivados.
 - Compuestos orgánicos:
 - Acetileno.
 - Aldehídos.
 - Aminas.
 - Anhídrido y ácido maleico.
 - Anhídrido y ácido acético.
 - Ácido fumárico.
 - Anhídrido y ácido ftálico.
 - Compuestos orgánicos volátiles del azufre (mercaptanos y otros).
 - Compuestos orgánicos del cloro.
 - Compuestos orgánicos del plomo.
 - Piridina y metilpiridinas (picolininas).
 - Partículas sólidas:
 - Partículas no metálicas conteniendo fósforo, arsénico, antimonio, silicio, selenio, cloro y sus compuestos.
 - Partículas de metales pesados conteniendo cinc, cadmio, plomo, cobre, mercurio, aluminio, hierro, manganeso, cromo, molibdeno, wolframio, titanio, vanadio y sus compuestos.
 - Partículas de metales ligeros conteniendo sodio, potasio, calcio, magnesio, berilio y sus compuestos.
 - Partículas de sustancias minerales (asbestos).
 - Aerosoles:
 - Aerosoles procedentes de las plantas de benceno.
 - Aerosoles procedentes de las plantas de alquitrán.
 - Varios:
 - Olores molestos.
 - Partículas radiactivas.

ANEXO IV

Niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera para las principales actividades industriales potencialmente contaminadoras de la atmósfera

1. Centrales Térmicas

1.1. *Centrales Térmicas de carbón. Emisión de partículas sólidas*

	Niveles de emisión mg/Nm ³				
	I.E.	I.N.		P.80	
	(a)	(a)	(b)	(a)	(b)
Potencia: 50 MW	750	500	400	250	250
Entre 50 y 200 MW	500	350	300	200	200
200 MW	350	200	200	150	150

I.E.: Instalaciones existentes. I.N.: Instalaciones nuevas. P:80 Previsión 1980.
 (a) Zona higiénicamente aceptable. (b) Zona de atmósfera contaminada.

Las Centrales Térmicas que se vean precisadas a quemar carbones de baja calidad con muy alto contenido en azufre (superior al 1,5 por 100) o en cenizas (superior al 20 por 100), deberán cumplir unos niveles de emisión específicos que en cada caso serán determinados por el Ministerio de Industria.

Opacidad.

No se superara el número HI de la Escala de Ringelmann (equivalente a un 20 por 100 de opacidad limite). Este índice podrá alcanzar valores no superiores a 2 de la Escala de Ringelmann en períodos de dos minutos cada hora. Durante el período de encendido (estimado como máximo en tres horas) no se

sobrepasará el valor de 3 de la Escala de Ringelmann, obtenida como media de cuatro determinaciones escalonadas a partir de quince minutos del comienzo del mismo.

Emisión de SO₂.

Para cualquier potencia y tanto para instalaciones existentes como nuevas: 2.400 mg/Nm³ para las Centrales que quemen hulla o antracita. Para las que emplean lignitos, el limite de emisión máximo será de 9.000 mg/Nm³.

1.2. *Centrales Térmicas de fuel-oil*

Emisión de partículas sólidas.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Potencia: < 50 MW	250	200	175
Entre 50 y 200 MW	200	175	150
> 200 MW	175	150	120

Opacidad:

No se superará el número I de la Escala de Ringelmann. Este índice podrá alcanzar valo-

res no superiores a 2 de la Escala de Ringelmann en períodos de dos minutos cada hora.

Emissiones de SO₂.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E. P.N.	P.77	P.80
Para cualquier potencia	5.500	4.500	3.000

1.3. *Centrales Nucleares*

Se aplicaran las disposiciones especificas.

2. *Instalaciones de combustión industrial (excepto Centrales Térmicas).*

2.1. *Instalaciones que utilizan carbón*

Emisión de partículas sólidas.

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Potencia: Inferior a 500 + b/b	500	350	250
Potencia: Igual o superior a 500 th/h	400	250	150

(1 + h = termia = 1.000 Kcal).

Opacidad:

No se superara el número I de la Escala de Ringelmann o el número 2 de la Escala de Bacharach Este índice podrá alcanzar valores no superiores a 2 de la Escala de Ringelmann y 4 de la Escala de Bacharach, en períodos de dos minutos cada hora. Durante el período de encendido (estimado como máximo en dos horas) no se sobrepasará el valor 3 de la Escala de Ringelmann o el de la de Bacharach, obtenido como media de cuatro determinaciones escalonadas a partir de quince minutos del comienzo del mismo.

Emisión de SO₂:

Para cualquier potencia y tanto para instalaciones existentes como nuevas: 2.400 mg/Nm³ para las instalaciones que quemen hulla o antracita. Para las que empleen lignitos, el limite de emisión máximo será de .000 mg/Nm³.

2.2. *Instalaciones que utilizan fuel-oil*

Opacidad:

Los índices de ennegrecimiento para cualquier potencia no deberán sobrepasar los valores que a continuación se indican, salvo tres períodos inferiores a diez minutos cada día.

	Escala Bacharach	Escala Ringelmann
Instalaciones que utilicen gas-oil o fuel-oil doméstico	2	1
Instalaciones que utilicen fuel-oil pesado número 1 o BIA (bajo índice de azufre)	4	2
Instalaciones que utilicen fuel-oil pesado número 2	5	2,5

	Niveles de emisión mg/m³ N		
	I.E. I.N.	P.77	P.80
Emisión de SO₂:			
Instalaciones que emplean gasoil, doméstico o fuel-oil BIA (bajo índice de azufre)	1.700	1.700	850
Instalaciones que emplean fueloil pesado número 1	4.200	2.500	1.700
Instalaciones que emplean fueloil pesado número 2	800	5.000	3.400

Emisión de monóxido de carbono:

El contenido en CO en los gases de combustión, para cualquier potencia y combustible, no será superior a 1.445 ppm, que equivale a dos gramos termia o $4,8 \times 10^{-10}$ Kg/Joule.

3. Incineradores de residuos sólidos

Emisión de partículas sólidas:	Niveles de emisión mg/m³ N					
	IE.		IN.		P.80	
Capacidad	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
Hasta una Tm/h de residuos	800	450	700	350	500	250
Entre una y tres Tm/h	600	300	500	250	200	100
Entre tres Tm/h y siete Tm/h residuos	450	225	400	200	300	250
Entre 7 y 15 Tm/h residuos	350	175	300	150	250	150
15 Tm/h de residuos	250	150	250	150	150	120

Opacidad humos:

La opacidad de los humos no excederá el 20 por 100, que equivale a no rebasar el valor número I de la Escala de Ringelmann. Este índice podrá alcanzar valores no superiores a dos (40 por 100 de opacidad) de la

Escala de Ringelmann en períodos de tres minutos cada hora.

4. Siderurgia

4.1. Preparación y aglomeración de minerales

Emisiones de partículas sólidas:	Niveles de emisión mg/m ³ N		
	IE.	IN.	P.80
Aglomeración de minerales(sinterización y peletización)	400	250	150
Preparación del carbón (molienda, etcétera)	200	150	120

En las operaciones de aglomeración de minerales, en instalaciones nuevas se permitirá alcanzar niveles de emisión de hasta 500 mg/m³ N durante períodos breves que no sobrepasen un máximo de 200 h/año.

Recomendaciones:

- Disminuir la altura de caída en las operaciones de carga y descarga.

- Proteger las cintas transportadoras de la acción del viento.

- Prever instalaciones de rociado de agua, incluso utilizando productos que aumenten la tensión superficial.

4.2. Baterías de coque e instalaciones de recuperación de subproductos

	Niveles de emisión mg/m ³ N		
	IE.	IN.	P.80
Emisión de partículas sólidas	200	150	150
Emisión SO ₂	1.000	500	500
Emisión de H ₂ S	2.500	2.000	2.000

Opacidad de humos.

La opacidad de los humos no excederá el 30 por 100, que equivale a no rebasar el valor 1,5 de la Escala de Ringelmann. Este índice podrá alcanzar valores no superiores a 2,5 (50 por 100 de opacidad) de la Escala de Ringelmann en períodos de diez minutos ca-

da hora en la carga y quince minutos cada hora durante la descarga.

El encendido de las antorchas de barrilete deberá ser automático y se conducirán los gases de antorchas bajas a antorchas altas.

4.3. Fabricación de arrabio (horno alto)

	Niveles de emisión mg/m ³ N		
	I.R.	IN.	P.80
Emisión de partículas sólidas	200	100	100

Emisión de SO₂:

Se aplicaran los mismos niveles que en las instalaciones de combustión industriales.

Nota.-EI gas de horno alto que no se utilice como combustible y sea necesario lan-

zarlo al exterior, se quemará en una o varias antorchas diseñadas para quemar un volumen-punta de gas de alto horno.

4.4. Fabricación de acero

Convertidores de oxígeno (Acerías Ld, Kaldo y similares.)

	Niveles de emisión (valores medios de un ciclo completo) mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Emisión de partículas sólidas	250	150	120

4.5. *Acerías hornos eléctricos de arco*

Emisión de partículas sólidas (humos rojos):	Niveles de emisión (valores medios de un ciclo completo) mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Hornos de capacidad menor de cinco toneladas métricas	500	350	250
Hornos de capacidad mayor de cinco toneladas métricas	200	150	120

4.6. *Acerías Martín Siemens*

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Emisión de partículas sólidas	200	150	120

Estos límites deberán aplicarse a las Acerías Martín, que no tengan previsto su desmantelamiento en un plazo inferior a siete años.

4.7. *Fundiciones Cubilotes*

Emisiones de partículas sólidas:	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Cubilotes mayores de una tonelada métrica/hora y hasta cinco toneladas métricas/hora	800	600	250
Cubilotes mayores de cinco toneladas métricas/hora	600	300	150

4.8. *Hornos de recalentamiento y tratamientos térmicos*

Opacidad.

La opacidad de los hornos no excederá el 30 por 100, que equivale a no rebasar el valor 1,5 de la escala de Rigelmann.

4.9. *Instalaciones siderúrgicas en general*

Las emisiones de SO₂ en cualquier instalación siderúrgica se ajustarán a lo prescrito al respecto para las instalaciones de combustión industriales.

5. Metalurgia no férrea

5.1. Aluminio

Obtención por reducción de alúmina:	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Emisión de partículas sólidas	12	9	3,5
Emisión de SO ₂	8	6	3
Emisión de flúor, ácido fluorhídrico y fluoruros (gas y partículas) (medida en F)	3,6	1,2	1
Aluminio de segunda fusión:			
Emisión de partículas sólidas	200	150	100

5.2. Cobre

Emisión de partículas sólidas:	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Fusión de cobre	400	300	150
Refino del cobre	600	500	300
Hidrometalurgia	600	500	300
Emisión de SO ₂	5.700	2.850	1.500
Emisión de HCl	500	300	300

5.3. Plomo

Emisión de partículas sólidas:	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Cualquier proceso, excepto hornos cuba	200	150	50
Hornos de cuba (refino)	300	200	100
Emisión de plomo y sales de plomo (en Pb):			
Plantas pequeñas y medianas (volumen de emisión menor de 300 m ³ /min.)	120	100	80
Plantas grandes (volumen de emisión superior a 300 m ³ /min.)	20	15	10

5.4. Cinc

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Emisión de partículas sólidas	600	200	50

6. Ferroaleaciones

Emisión de partículas sólidas:	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Ferro-silicio	23	15	10
Ferro-silicio-cromo	30	20	15
Ferro-cromo refinado	8	5	5
Ferro-silicio-manganeso	0,5	0,5	0,3
Ferro-molibdeno	5	3	3
Emisión de HF:			
Ferro-molibdeno	2	1	1

7. Refinerías de petróleo *

Emisión de partículas sólidas:	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Calderas y hornos	180	150	120
Regeneración de catalizadores de las unidades de craqueo catalítico en lecho fluido (FCC)	-	150	150

* Apartado redactado conforme al artículo único del Real Decreto 547/1979, de 20 de febrero (BOE núm. 71, de 23 de marzo).

Opacidad:

La opacidad no será superior al 20 por 100, al número I de la escala de Ringelmann, excepto en períodos de tres minutos cada hora y con una tolerancia del 2 por 100 del tiempo durante el año,

Emisión de CO:

Regeneración de catalizadores: 500 ppm.
Otras unidades: 1.500 ppm.

Emisión de H ₂ S:	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Cualquier proceso	10	7,5	5
Emisión de SO₂:			
Calderas y hornos	5.900	5.400	4.200
Otras instalaciones	3.400	3.400	2.500
Emisión máxima diaria Tm/día	7 X C*	1 5 X C*	20 *

* Se admitirá una tolerancia de 1.000 mg/Nm³ durante noventa y ocho horas consecutivas.
Las instalaciones de depuración no podrán funcionar incorrectamente más de 200 horas/año.
C = Capacidad a nivel de tratamiento de crudo en millones de Tm.

Emisiones de hidrocarburos procedentes de tanques de almacenamiento.

Deberán evitarse las pérdidas de hidrocarburos volátiles de los tanques de almace-

namiento, para lo cual éstos se dotarán de techos flotantes o de sistemas de recuperación de los vapores.

8. Fabricación de cal

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Emisión de partículas sólidas	500	250	150
Trituradores, molinos, desleidores de cal, transportadores, silos, carga y descarga, etc.:			
Emisión de partículas sólidas	500	250	150

9. Cementos

Emisión de polvos:	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Hornos de cemento	400*	150*	150*
Enfriadores de clinker	170	100	50
Machacadoras, molinos, transportadores y ensacadoras	00	250	150

* Se admitirá una tolerancia de 1.000 mg/Nm³ durante cuarenta y ocho horas consecutivas. Las instalaciones de depuración no podrán funcionar incorrectamente más de 200 horas/año.

Opacidad:

Se admitirá una opacidad del 10 por 100 como máximo en todas las fuentes.

10. Cerámica

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Emisión de polvos	500	250	150

11. Vidrio y fibras minerales

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Emisión de polvos	300	200	150

11 bis. Fritas de vidrio para esmaltes *

	Emisión de flúor en partículas (mg/Nm ³)		
Zona húmeda de pastizales	20	20	20
Otras zonas	40	40	40
Emisión de flúor gas:			
Zona húmeda de pastizales	20	20	20
Otras zonas	40	40	40

* Nuevo apartado establecido por el artículo único del Real Decreto 547/1979, de 20 de febrero («BOE» núm. 71 de 23 de marzo).

12. Plantas de aglomerados asfálticos

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Secadores rotativos, elevadores de material caliente, cribas, tolvas, mezcladoras.			
Emisión de partículas sólidas:			
Plantas asfálticas situadas a menos de 500 metros de zona habitada	400	250	100
Plantas asfálticas situadas a dos kilómetros por lo menos de edificaciones o actividades que puedan ser molestadas por las emisiones de las mismas. Dichas plantas pueden permanecer en el mismo sitio dos años por lo menos	800	500	200

Opacidad:

Ninguna descarga tendrá una opacidad de más de un Ringelmann.

13. Fabricación de ácido sulfúrico

13.1. Método de cámaras de plomo

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Emisión de SO ₂	5.600	4.275	–
Nieblas de H ₂ SO ₄	615	500	–
NO ₂	3.000	1.000	–

13.2. Método de contacto

SO ₂	8.550	2.850	1.425
Nieblas de H ₂ SO ₄	500	300	150

14. Fabricación de ácido nítrico

Emisiones de NOx	20	3	1,5
------------------------	----	---	-----

Valor medido como promedio de dos horas y ácido producido expresado en toneladas equivalentes a ácido nítrico 100 por 100.

Opacidad:
Las emisiones a la atmósfera deben ser incoloras.

Emisiones de NOx, como NO ₂	3.200	410	205
Emisiones de NOx, como NO	2.000	292	146

15. Fabricación de fertilizantes

15.1. Fertilizantes orgánicos

Emisiones de partículas sólidas:			
Incinerador de residuos	250	150	120

Opacidad:

La opacidad de los humos del incinerador no será superior al 20 por 100 que equivale a no sobrepasar el número de 1 de la Escala de Ringelmann salvo períodos de tres minutos

cada hora, en que se podrá llegar hasta una opacidad del 40 por 100 o número 2 del Ringelmann.

15.2. Fertilizantes inorgánicos

15.2.1. Nitrogenados

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Emisión de partículas sólidas	250	150	150

15.2.2. Fosfatados

Emisión de partículas sólidas	250	150	150
-------------------------------------	-----	-----	-----

Emisión de flúor, ácido fluorhídrico y fluoruros:	Kg	F/Tm	P ₂ O ₅
Superfosfatos simples	0,4	0,07	0,07
Superfosfatos triples	0,3	0,05	0,05

16. Fabricación de carburo de calcio

Emisión de partículas sólidas:	Niveles de emisión mg/Nm ³		
Instalación de preparación	300	150	150
Horno	500	350	250

17. Fabricación de negro de humo

Emisión de partículas sólidas	150	100	60
-------------------------------------	-----	-----	----

18. Fabricación de alúmina

Emisión de partículas sólidas	–	150	50
-------------------------------------	---	-----	----

19. Fabricación de cloro

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P-80
Emisión de cloro	230	200	150

20. Fabricación de carbonato de sosa (sosa Solvay)

	IE	IN	P-80
Emisión de cloro	460	300	200

21. Fabricación de arsénico

Emisión de As ₂ O ₃ :	IE	IN	P-80
Volumen inferior a 2.500 litros/segundo	120	80	60
Volumen superior a 2.500 litros/segundo	45	30	20

22. Fabricación de antimonio

Emisión de Sb ₂ O ₃ :	IE	IN	P-80
Volumen inferior a 2.500 litros/segundo	120	80	60
Volumen superior a 2.500 litros/segundo	45	30	20

23. Fabricación de cadmio

Emisión de cadmio	40	25	17
-------------------------	----	----	----

Nota: El volumen total emitido no podrá exceder de 13,6 kilogramos por 168 horas semanales.

24. Fabricación de pasta de papel

24.1. Pasta al bisulfito

Emisiones de SO ₂ (kg/Tm pasta)	20	10	5
Emisión partículas sólidas: (Combustión de lejías) (mg/Nm ³)	500	250	150

24.2. Pasta al sulfato o kraft

	Niveles de emisión mg/Nm ³		
	I.E.	I.N.	P.80
Hornos de recuperación de lejías:			
Emisión de partículas sólidas	500	250	150
Emisión de H ₂ S	10*	10**	7,5

* Valor medio en un período de ocho minutos. Este valor no debe ser rebasado durante más del 10 por 100 del tiempo de funcionamiento mensual.

** Valor medio en un período de ocho minutos. Este valor no debe ser rebasado durante más del 5 por 100 del tiempo de funcionamiento mensual.

25. Fabricación de viscosa y otros procesos (que emitan ácido sulfhídrico)

Emisión de H ₂ S	10	10	7,5
-----------------------------------	----	----	-----

26. Incineración de lodos procedentes de las estaciones de depuración de aguas residuales

La emisión de partículas sólidas no podrá ser superior a 0,65 kilogramos de lodo seco.

La opacidad de los humos no superará el número I de la Escala de Ringelmann.

27. Actividades industriales diversas no especificadas en este anexo *

Contaminantes:	Unidad de medida	Niveles de emisión
Partículas sólidas	mg/Nm ³	150
SO ₂	mg/Nm ³	4,300
CO	ppm	500
NOx (medido como NO ₂)	ppm	300
Flúor total:		
Zonas húmedas de pastizales	mg/Nm ³	40
Otras zonas	mg/Nm ³	80
Cl	mg/Nm ³	230
HCl	mg/Nm ³	460
SH ₂	mg/Nm ³	10

* Apartado redactado conforme al artículo único del Real Decreto 547/1979, de 20 de febrero («BOE» núm. 71 de 23 de marzo).

Opacidad:

El índice de ennegrecimiento no será superior al número I de la Escala de Ringelmann o al número 2 de la Escala de Bacharach, que equivale al 20 por 100 de opacidad.

116.5. NORMATIVA ESTATAL: LISTADO CRONOLÓGICO DE LA LEGISLACIÓN

Ley 38/1972, de 22 de diciembre de Protección del Ambiente Atmosférico (BOE n.º 309, de 26-12-72).

Decreto 3025/1974, de 9 de agosto, sobre limitaciones atmosférica producida por vehículos de automoción (BOE n.º 267, de 7-11-74).

Decreto 833/1975, de 6 de febrero que desarrolla la Ley 38/1972 de Protección del Ambiente Atmosférico (BOE n.º 96, de 22-04-75).

Corr. err. del D. 833/1975 por el que se desarrolla la Ley 38/1972, de 22-12, de Protección Ambiente Atmosférico (BOE n.º 137, de 20-02).

Decreto 2204/75, sobre características, calidades y condiciones de empleo de carburantes y combustibles en concordancia con las de la CEE. (BOE n.º 225, de 19-9-75), complementado por el Decreto 1773/1976, de 7 de junio, por el que se tipifican las características, calidades y condiciones de empleo de los combustibles y carburantes.

Orden de 10 de agosto de 1976, que establece las normas técnicas para el análisis de los contaminantes de naturaleza química presentes en la atmósfera (BOE n.º 226, 5-11-76).

Corrección de errores de la Orden de 10 de agosto de 1976. BOE 10-01-77.

Orden de 18 de octubre de 1976, sobre prevención y corrección de la Contaminación Atmosférica, Industrial (BOE

n.º 290, de 03-12-76).

Corrección de errores de la Orden de 18 de octubre de 1976. BOE 23-02-77.

Decreto 2512/78, de 14 de octubre, sobre la ampliación del artículo 11 de la Ley 38/72 (BOE n.º 258, de 28-10-78). Modificado por el Real Decreto 2826/1979, de 17 de diciembre.

Real Decreto 547/1979, de 27 de mayo, por el que se modifica el Decreto 883/72, 6 de febrero de 1975, en cuanto (BOE n.º 71, de 23-3-79).

Se modifican los niveles de emisión de algunos contaminantes del Anexo IV. Los organismos locales también figurarán como organismo competente en la materia.

Resolución de 10 de junio de 1980, por la que se desarrollan los procedimientos para la determinación de los niveles de inmisión de los óxidos de nitrógeno, como anexo 7 de la orden de 10 de agosto de 1976. BOE 13-10-80.

Instrumento de ratificación de 7 de julio de 1982, del Convenio de Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia, hecho en Ginebra el 13-11-79 (BOE n.º 59, 10.3.83). Adhesión al Protocolo sobre programa de seguimiento y evaluación (BOE n.º 42 de 18-2-88).

Orden de 25 de junio de 1984, sobre instalación de equipos de medida y registro de la contaminación atmosférica en centrales térmicas (BOE 159, de 4-7-84).

Real Decreto 284/1985, de 20 de febrero, que modifica especificaciones para las gasolinas de automoción. (BOE

n.º 60, de 11-03-85).

Observaciones:

– *Sustituido R.D. 25-9-1986.*

Real Decreto 1613/1985, de 1 de agosto por el que se modifica parcialmente el Decreto 833/1975, de 6 de febrero y se establecen nuevas normas de calidad del aire en lo referente a contaminación por dióxido de azufre y partículas (BOE n.º 219, de 12-09-85).

Observaciones:

– *Traspone la Directiva 80/779/CEE, de 15 de julio de 1980, relativa a los valores límite y a los valores guía de calidad atmosférica para el anhídrido sulfuroso y las partículas en suspensión. (DOCE n.º L 229/30, de 30-08-80).*

Real Decreto 2616/1985, de 9 de octubre, sobre homologación de vehículos automóviles de motor, en lo que se refiere a su emisión de gases contaminantes. (BOE n.º 13, de 15-01-86) (Corrección de errores en BOE n.º 50, de 27-02-86).

Real Decreto 1154/1986, de 11 de abril, por el que se modifica el Real Decreto 1613/1985, de 1 de agosto, sobre normas de calidad del ambiente: Declaración por el Gobierno de zonas de atmósfera contaminada (BOE n.º 146, de 14-06-86).

Real Decreto 2028/1986, de 6 de junio sobre normas para aplicación de Directivas Comunitarias relativas a la homologación de tipos de vehículos, remolques, semirremolques y sus partes y piezas. (BOE n.º 236, de 02-10-86).

Observaciones:

– *Incorpora las especificaciones sobre homologación contempladas en las Directivas 78/315/CEE, 78/547/CEE, 80/1267/CEE, para vehículos automóviles y 79/694/CEE y 82/890/CEE para tractores agrícolas.*

– *Anexos I y II actualizados por Orden de 29 de diciembre de 1992 (BOE n.º 9, de 11-01-93).*

Real Decreto 2482/1986, de 25 de septiembre, por el que se modifica el Decreto 2204/1975, de 23 de agosto, y se fijan especificaciones de gasolinas, gasóleos y fuelóleos en concordancia con las de la CEE (BOE n.º 291, de 05-12-86).

Real Decreto 667/87, de 30 de abril, por el que se establecen las características, calidades y condiciones de empleo del coque del petróleo (BOE n.º 125, de 26-05-87).

Real Decreto 717/1987, de 27 de mayo, sobre contaminación atmosférica por dióxido de nitrógeno y plomo: Normas de calidad del ambiente (BOE n.º 135, de 10-06-87).

Observaciones:

– *Adecúa a nuestra legislación las Directivas Comunitarias: 85/203/CEE, de 7 de marzo de 1985, y 82/884/CEE, de 3 de diciembre de 1982, que contienen normas de calidad del aire para el dióxido de nitrógeno y el valor límite para el plomo contenido en la atmósfera.*

Real Decreto 873/1987, de 29 de mayo, sobre limitación de emisiones sonoras de las aeronaves subsónicas (BOE n.º 158, de 03-07-89)

Observaciones:

– *Traspone la Directiva 80/51/CEE, de 20 de diciembre de 1979 (DOCE n.º L 18/26, de 24-01-80), así como su modificación mediante Directiva 83/206, de 21 de abril de 1983 (DOCE n.º L 117, de 04-05-83), sobre limitación de emisiones sonoras de naves subsónicas.*

Real Decreto 1485/1987, de 4 de diciembre, por el que se modifica el Real Decreto 2482/1986, de 25 de septiembre, que fija especificaciones de gasolinas, gasóleos y fuelóleos en concordancia con las de CEE (BOE n.º 291, de 05-12-87).

Observaciones:

– *Incorpora las especificaciones de productos petrolíferos de la Directiva del Consejo 87/219/CEE, de 30 de marzo de 1987.*

– *Anexo I modificado por Real Decreto 1513/88, de 9 de Diciembre (BOE n.º 303, de 19-12-88).*

Real Decreto 472/1988, de 30 de marzo, por el que se dictan las disposiciones de aplicación de la Directiva del Consejo de las Comunidades Europeas 75/324/CEE sobre generadores de aerosoles (BOE n.º 421, de 20-05-88).

Observaciones:

– *Derogado R.D. 29-12-1994.*

Instrumento de adhesión de España al Convenio de Viena para la protección de la capa de ozono, hecho en Viena el 22 de marzo de 1985 (BOE n.º 275, de 16-11-88)

Instrumento de Ratificación del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono, hecho

en Montreal el 16 de septiembre de 1987 (BOE n.º 65, de 17.3.89)

Real Decreto 1513/1988, de 9 de diciembre, por el que se establecen nuevos contenidos máximos de plomo en las gasolinas (BOE n.º 303, de 19-12-88).

Observaciones:

– *Modifica el Anexo I del Real Decreto 1485/87, de 4 de Diciembre. (BOE n.º 291, de 05-12-87) estableciendo nuevos límites en concordancia con la legislación comunitaria.*

Orden de 28 de febrero de 1989, sobre gestión (incineración) de aceites usados (BOE n.º 57, de 8.3.89)

Real Decreto 245/1989, de 27 de febrero, sobre determinación y limitación de la potencia acústica admisible de determinado material y maquinaria de obra (BOE n.º 60, de 11-03-89).

Observaciones:

– *Traspone la Directivas 79/113/CEE, modificada por D. 81/105/CEE y adaptada al progreso técnico por la Directiva 85/405/CEE. Todas ellas, así como las que las desarrollan, caen dentro del ámbito de la Directiva marco 84/532/CEE sobre disposiciones comunes de materiales y equipos para la construcción.*

Orden de 10 de abril de 1989, por la que se actualizan los anexos I y II de las normas para la aplicación de determinadas directivas relativas a homologación de vehículos automóviles, remolques y semirremolques (BOE n.º 96, de 22-4-89).

Orden de 24 de noviembre de 1989,

por la que se actualizan los anexos I y II de las normas para la aplicación de determinadas directivas relativas a homologación de vehículos automóviles, remolques y semirremolques (BOE n.º 274, de 3-11-89)

Orden de 22 de marzo de 1990, por la que se modifica la Orden de 10 de agosto de 1976, respecto al método de referencia para humo normalizado (BOE n.º 76, de 29-03-90)

Orden de 3 de septiembre de 1990 sobre el cumplimiento de la Directiva 88/76/CEE sobre emisiones de gases de escape procedentes de vehículos automóviles (BOE n.º 213, de 05-09-90).

Real Decreto 1256/1990, de 11 de octubre, sobre limitación de emisiones sonoras de los aviones de reacción subsónicos civiles (BOE n.º 250, de 18-10-90).

Observaciones:

– *Traspone la Directiva 89/629/CEE, de 4 de diciembre de 1989 (DOCE n.º L 363, de 13-12-89).*

Real Decreto 108/1991, de 1 de febrero, sobre la prevención y reducción de la contaminación del medio ambiente producida por el amianto (BOE n.º 32, de 06-02-91).

Observaciones:

– *Traspone la Directiva 87/217/CEE, de 19 de marzo de 1987, sobre prevención y reducción de la contaminación del medio ambiente producida por el amianto. (DOCE n.º L 85, de 25-03-87).*

Reglamento del Consejo 594/1991,

de 4 de marzo, relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono.

Reglamento n.º 24 sobre prescripciones uniformes relativas a la homologación de los vehículos equipados con motor diesel en lo que se refiere a las emisiones de óxido de nitrógeno o sus flujos transfronterizos, hecho en Sofía el 31 de diciembre de 1988 y abierto a la firma el 1 de noviembre de 1988. BOE 23-04-91.

Real Decreto 646/1991, de 22 de abril, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación a las emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión (BOE n.º 99, de 25-04-91).

Observaciones:

– *Traspone la directiva 88/609/CEE, de 24 de diciembre de 1988, sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión (DOCE n.º L 336, de 07-12-88).*

Real Decreto 1088/1992, de 11 de septiembre, por el que se establecen nuevas normas sobre la limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de instalaciones de incineración de residuos municipales (BOE n.º 255, de 23-10-92).

Observaciones:

– *Traspone las Directivas 89/369/CEE, de 8 de junio de 1989, sobre prevención de la contaminación atmosférica procedente de nuevas instalacio-*

nes de incineración de residuos municipales (DOCE n.º L 163, de 14-06-89) y 89/429/CEE, de 21 de junio de 1989, de reducción de la contaminación atmosférica procedente de instalaciones existentes de incineración de residuos municipales (DOCE n.º L 203, de 15-07-89).

– Modificado por Real Decreto 1217/97, de 18 de julio (BOE n.º 189, de 08-08-97).

Real Decreto 1321/1992, de 30 de octubre por que se modifica parcialmente el Real Decreto 1613/1985, de 1 de agosto, y se establecen nuevas normas de calidad del aire en lo referente a la contaminación por dióxido de azufre y partículas. (BOE n.º 289, de 02-12-92) y establece valores de calidad para las partículas en suspensión y el dióxido de azufre. BOE 03-02-93.

Real Decreto 1422/1992, de 27 de noviembre, sobre limitación del uso de aviones de reacción subsónicos civiles (BOE n.º 302, de 17-12-92).

Observaciones:

– Traspone al ordenamiento interno la Directiva 92/14/CEE, de 2 de marzo de 1992, sobre limitación de operación de las aeronaves contempladas en la Segunda Parte, Capítulo 2, Volumen I del Anexo 16, de la Convención Internacional de Aviación Civil, Segunda Edición (1988). (DOCE n.º 76, de 23-03-92).

Orden de 29 de diciembre de 1992 por la que se actualizan los Anexos I y II de las normas para la aplicación de las Directivas Comunitarias relativas a la homologación de tipos de vehículos, re-

molques y semirremolques y sus piezas y partes aprobadas por el Real Decreto 2028/1986, de 6 de junio (BOE n.º 9, de 11-01-93).

Real Decreto 1494/1995, de 8 de septiembre, sobre contaminación atmosférica por ozono (BOE n.º 230, de 26.9.95).

Observaciones:

– Traspone la Directiva 92/72/CEE, de 21 de septiembre de 1992, sobre la contaminación atmosférica por ozono. (DOCE n.º L 297/1, de 13-10-92).

Real Decreto 1800/1995, que modifica parcialmente el Real Decreto 646/1991 sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión.

Orden de 26 de diciembre de 1995 para el desarrollo del Real Decreto 646/1991, sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión (BOE n.º 312, 30-12-95)

Ley 12/1995, de 29 de diciembre, sobre el impuesto de Contaminación atmosférica, BOE 9-5-1996.

Real Decreto 2102/1996, de 20 de septiembre, sobre control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) resultantes del almacenamiento y distribución de gasolina desde las terminales a las estaciones de servicio (BOE n.º 259, de 26-10-96).

Ajustes del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono, hecho en Montreal el 16 de

septiembre de 1987 (BOE de 17-03-89), adoptados en la séptima reunión de las Partes del Protocolo de Montreal, celebrada en Viena el 7 de diciembre de 1995 (BOE n.º 276, de 15-11-96).

Real Decreto 1217/1997, de 18 de julio, sobre incineración de residuos peligrosos y de modificación del Real Decreto 1088/92, de 11 de septiembre, relativo a las instalaciones de incineración de residuos municipales (BOE n.º 189, de 08-08-97). Corrección de errores (BOE n.º 15, de 17-1-98).

Observaciones:

- *Transpone la Directiva 94/67/CE.*
- *Modifica el Real Decreto 1088/1992, de 11 de septiembre.*

Instrumento de Ratificación del Protocolo del Convenio sobre contaminación atmosférica transfronteriza a larga distancia de 1979 relativo a la lucha contra las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, o sus flujos transfronterizos, hecho en Ginebra el 18 de noviembre de 1991 (BOE n.º 225, de 19-09-97).

Ley 4/1998, de 3 de marzo, por la que se establece el régimen sancionador previsto en el Reglamento (CE) 3093/1994, del Consejo de 15 de diciembre, relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono (BOE n.º 54, 4.3.98).

Observaciones:

- *Desarrolla el artículo 19 del Reglamento (CE) 3093/1994.*

Instrumento de Ratificación del Protocolo del Convenio sobre contaminación atmosférica transfronteriza a larga

distancia de 1979 relativo reducciones adicionales de las emisiones de azufre, hecho en Oslo el 14 de junio de 1994 (BOE n.º 150, de 24-6-98).

Ajustes del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono, hecho en Montreal el 16 de septiembre de 1987 (BOE 17-3-89), adoptados en la novena reunión de las Partes del Protocolo de Montreal, celebrada en Montreal el 17 de septiembre de 1997 (BOE n.º 276, de 18-11-98).

Real Decreto 1728/1999, de 12 de noviembre, por el que se fija las especificaciones de los gasóleos de automoción y de las gasolinas (BOE n.º 272, de 13-11-99).

Instrumento de Aceptación de España de la Enmienda del Protocolo de Montreal de 16 de septiembre de 1987 (BOE de 17 de marzo), aprobado por la novena reunión de las partes de 17 de septiembre de 1997 (BOE n.º 258, de 28-10-99).

Ajustes del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono, hecho en Montreal el 16 de septiembre de 1987 (publicado en el «Boletín Oficial del Estado» de 17 de marzo de 1989), adoptados en la undécima reunión de las Partes del Protocolo de Montreal celebrada en Beijing (China) el 3 de diciembre de 1999 (BOE n.º 16, de 18-01-01, páginas: [2121], [2122]).

CAPÍTULO 117

LEGISLACIÓN AUTONÓMICA SOBRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La distribución de competencias entre el Estado, las Comunidades Autónomas y los Entes Locales está dividida. Es la Constitución quien opera fundamentalmente en el reparto de competencias. Ésta se completa con los Estatutos de las Autonomías, mientras que las competencias locales vienen determinadas por las decisiones adoptadas por los poderes legislativos.

La Comunidades Autónomas, según el artículo 143 de la Constitución, recogen en sus Estatutos la competencia de Gestión en materia de Protección Ambiental y desarrollo legislativo y ejecución en materia de normas adicionales de protección del medio ambiente. La Comunidades que accedieron a través del artículo 151 puede ejercer potestades de desarrollo legislativo y ejecución de normas adicionales de protección.

Las Comunidades Autónomas han recogido en sus Estatutos la materia ambiental de la siguiente manera:

– Medio ambiente.

- Espacios naturales protegidos.
- Vertidos industriales y contaminantes.
- Zonas de montaña.
- Protección de ecosistemas, ecología, paisaje.
- Higiene de la contaminación biótica y abiótica.
- Entorno natural.
- Instalaciones y experiencias con incidencia sobre las condiciones climáticas.
- Actividades molestas, insalubres, nocivas y peligrosas.
- Contaminación atmosférica.
- Reequilibrios ecológicos del aire, aguas, espacios naturales y conservación de flora, fauna y testimonios culturales.

Las Comunidades Autónomas que han asumido competencias para la ejecución de las normas sobre protección

del medio ambiente son también competentes para llevar a cabo los actos de ejecución que impliquen la aplicación sobre vertidos, sea cual fuere el género de éstos y su destino.

La legislación autonómica vigente se puede resumir de la siguiente manera:

ANDALUCÍA

Decreto 99/1985, de 17 de octubre, por el que se aprueban las normas técnicas de los proyectos de aislamiento acústico y de vibraciones (BOJA n.º 2488, de 28-10-85).

Ley 7/1994 de 18-05, de protección ambiental. ANDALUCIA. BOJA. n.º 79, de 31-05-1994.

Se establecen medidas para prevenir, minimizar, corregir o impedir efectos de actuaciones públicas o privadas sobre el medio ambiente y la calidad de vida. También define el marco normativo y de actuación de la Comunidad Autónoma de ANDALUCÍA, en materia de protección atmosférica, residuos y calidad de las aguas. Se incluyen tres anexos de actividades industriales que deben cumplir las determinaciones de esta Ley. Las infracciones en las actuaciones del anexo primero serán muy graves, las del anexo segundo serán graves y las del anexo tercero leves.

Decreto 74/1996, de 20 de febrero. Protección del Medio Ambiente. Reglamento de la Calidad del Aire (BOJA n.º 30, de 07-03-96).

Desarrolla los preceptos de la Ley 7/1994, de 18 de mayo de Protección Ambiental en materia de calidad del aire para prevenir, corregir y vigilar las situaciones de contaminación atmosférica. El capítulo VIII clasifica los niveles sonoros. El anexo I contiene el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera. El anexo II comprende los conceptos fundamentales, definiciones y unidades. El anexo III incluye tres tablas con los límites admisibles de nivel sonoro en el interior de edificaciones, en el exterior de edificaciones y estándares limitadores para transmisión de vibraciones. El anexo IV incluye dos tablas de límites máximos de nivel sonoro para motocicletas y otros vehículos.

Orden 23-02-1996, que desarrolla D.74/1996 20-2 por el que se aprueba el Reglamento de Calidad del Aire, en materia de medición, evaluación y valoración de ruidos y vibraciones. ANDALUCIA. BOJA. n.º 30, de 07-03-1996.

Corrección errores Orden 23-02-1996 que desarrolla D.74/1996 20-02, por el que se aprueba el Reglamento de la Calidad del Aire en materia de medición, evaluación y valoración de ruidos y vibraciones ANDALUCIA. BOJA. n.º 46, de 18-04-1996.

Corrección errores Decreto 74/1996 20-02, por el que se aprueba el Reglamento de calidad del aire. ANDALUCIA. BOJA. n.º 48, de 23-04-1996.

Orden de 12 de febrero de 1998, por la que se establece los límites de emisión a la atmósfera de determinados

agentes contaminantes procedentes de las instalaciones de combustión de biomasa sólida (BOJA n.º 37, de 24-4-98).

ARAGÓN

Orden de 15 de junio de 1994, por la que se establecen los modelos de registro de las emisiones contaminantes a la atmósfera en los procesos industriales y del libro de registro de las emisiones contaminantes a la atmósfera en las instalaciones de combustión (BOA n.º 78, de 27.6.94; corrección de errores BOA n.º 89 de 22-7-94).

Decreto 25/1999, de 23 de marzo, del Gobierno de Aragón, por el que se regula el contenido de los informes de los organismos de control sobre contaminación atmosférica, en la Comunidad Autónoma de Aragón (BOA n.º 40, de 07-04-99).

ISLAS BALEARES

Decreto 20/1987, para la protección del medio ambiente contra la contaminación por emisión de ruidos y vibraciones (BOCAIB n.º 54, de 30-04-87).

CATALUÑA

Ley 22/1983, de 9 de noviembre, de protección del ambiente atmosférico (DOGC n.º 385, de 30-11-83).

Observaciones:

– *Afectado por Decreto 230/93, de 6 de septiembre, sobre ejercicio de las*

funciones de inspección y control en el ámbito de la protección del medio ambiente.

– *Establece el régimen especial aplicable a las actividades industriales potencialmente contaminantes de la atmósfera. Contempla las situaciones de agravamiento esporádico o accidental y las más permanentes de contaminación atmosférica. Modificada por la Ley 7/1989, de 5 de junio y por la Ley 6/1996, de 18 de junio. Los titulares de actividades potencialmente contaminantes no podrán ejercer ninguna actividad sin la licencia municipal, deberán cumplir las condiciones y las medidas correctoras impuestas en la licencia, adoptar las medidas necesarias para respetar los niveles máximos de emisión, instalar y mantener en perfecto estado de servicio los aparatos de control o las estaciones de medida de emisión de las sustancias contaminantes más importantes, y facilitar los actos de inspección y de comprobación que los organismos locales o los departamentos de la Generalitat ordenen.*

Decreto 322/1987, de 23-09-1987, de desarrollo de la Ley 22/1983 de 21-11-1983, de Protección del Ambiente Atmosférico. CATALUÑA. DOGC. n.º 919, de 25-11-1987.

Este decreto establece las determinaciones para la formulación de los mapas de vulnerabilidad y capacidad del territorio, las actuaciones en las Zonas Clasificadas, el régimen de implantación de centros en la Red de vigilancia y previsión de la contaminación atmosférica y el Régimen especial aplicable a las actividades industriales potencialmente contamina-

doras de la atmósfera. En el anexo I se presenta el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y en el anexo II la lista de sustancias contaminantes más importantes. Licencia municipal, con estudio de impacto ambiental para las actividades clasificadas en el grupo A. Inscripción en el Registro Industrial.

Ley 7/1989, de 5 de junio, de modificación parcial de la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico (DOGC n.º 1153, de 09-06-89).

Considera la restauración del ambiente atmosférico, las situaciones de empeoramiento esporádico o accidental y las más permanentes, y prevé la actuación de la Administración. Tiene cuidado de la prevención de la calidad del medio, y establece la elaboración de los mapas de vulnerabilidad del territorio. Contempla la protección del ambiente atmosférico con medidas de disuasión, imposición de sanciones y suspensión de actividades. En general, modifica la disposición final 5ª de la Ley 22/1983.

Decreto 323/1994, de 4 de noviembre, por la que se regulan las instalaciones de incineración de residuos y los límites de sus emisiones a la atmósfera (DOGC n.º 1986, de 16-12-94).

D. 199/1995 de 16-05, de aprobación de los mapas de vulnerabilidad y capacidad del territorio referidos a la contaminación atmosférica. CATALUÑA. DOGC. n.º 2077, de 19-07-1995.

Ley 6/1996, de 18 de junio, de modificación de la ley 22/83, de 21 de noviembre, de protección del ambiente

atmosférico (DOGC n.º 2223, de 28-06-96).

Establece la formulación de un programa de instalación y funcionamiento de la Red de Vigilancia y previsión de la contaminación atmosférica. Se fijan los principios y criterios para reglamentar el control de las emisiones. Se tipifican las infracciones y se actualizan las sanciones, otorgando competencias al Departamento de Medio Ambiente. Modifica diversos artículos de la Ley 22/1983, principalmente los que hacen alusión a infracciones y sanciones, y a funciones de la administración.

Decreto 398/1996, de 12 de diciembre, regulador del sistema de planes graduales de reducción de emisiones a la atmósfera (DOGC n.º 2294, de 18-12-969).

Es objeto de este decreto la regulación del sistema voluntario de autodeclaración por las empresas del grado de cumplimiento de la normativa sobre protección del ambiente atmosférico que se establece en la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico. Autodeclaración de emisiones, licencia municipal y documentación complementaria

Decreto 22/1998, de 4 de febrero. Café. Límites de emisión a la atmósfera para instalaciones de tueste y torrefacción. (DOGC n.º 2575, de 10-02-98).

Decreto 318/1999, de 15 de diciembre, sobre límites de emisión para instalaciones industriales de combustión de potencia térmica inferior a 50 MWt e instalaciones de cogeneración. DOGC n.º 2816, de 29-1-99.

Orden de 7 de julio de 2000, por la que se fijan las tarifas que han de aplicar las entidades de inspección y control (EIC) concesionarias de la Generalidad de Cataluña en materia de controles reglamentarios de emisiones a la atmósfera. (DOGC n.º 3192, de 27-07-00).

EXTREMADURA

Decreto 19/1997, de 4 de febrero, de Reglamentación de Ruidos y Vibraciones (DOE n.º 18, de 11.02.97). (Corrección de errores: DOE n.º 36, de 25-03-97).

GALICIA

Ley 11/1995, de 2 de enero, de protección ambiental de Galicia (DOG n.º 29, de 10-2-95, corrección de errores en DOG n.º 27, de 12-4-95).

Ley 12/1995, de 29 de diciembre, del impuesto sobre la contaminación atmosférica (DOG n.º 249, de 30-12-95).

Observaciones:

– Desarrollado por Decreto 4/96, de 12 de enero, por el que se aprueba el Reglamento del impuesto sobre contaminación atmosférica (DOG n.º 19, de 26-01-96).

– Constituye el hecho imponible la emisión de dióxido de azufre u otros compuestos oxigenados del azufre y de dióxido de nitrógeno u otros compuestos oxigenados del nitrógeno.

Decreto 4/1996, de 12 enero, por el que se aprueba el Reglamento del impuesto sobre la contaminación atmosférica (DOG n.º 19, de 26-1-96)

Orden 26-01-1996 por la que se aprueban los modelos de gestión y liquidación del impuesto sobre la contaminación atmosférica. GALICIA. DOGA. n.º 28, de 08-02-1996.

Ley 7/1997, de 11 de agosto, de Protección contra la contaminación acústica (DOG n.º 159, de 20-08-97).

Decreto 150/1999, de 7 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de protección contra la contaminación acústica (DOG n.º 100, de 27-05-99).

Decreto 29/2000, de 20 de enero, por el que se aprueba el Reglamento del impuesto sobre la contaminación atmosférica (DOG n.º 34, de 18-02-00).

El impuesto recae en emisiones de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno o cualquier otro compuesto oxigenado del azufre o del nitrógeno.

Declaración de alta de focos emisores de sustancias contaminantes

Corrección de errores D. 29/2000 de 20-01 que aprueba el reglamento del impuesto sobre la contaminación atmosférica. GALICIA. DOGA. n.º 40, de 28-02-2000.

Corrección de errores D. 29/2000 de 20-01 que aprueba el reglamento del impuesto sobre la contaminación atmosférica. GALICIA. DOGA. n.º 67 de 05-04-2000.

LA RIOJA

Orden de 18 de julio de 1996, de medidas correctoras de la contaminación (BOR n.º 103, de 22-8-96) modificado

por la Orden de 24 de octubre de 1997 (BOR n.º 131 de 1-11-97)

MADRID

Acuerdo 26-11-1998 por el que se aprueba el Plan de saneamiento atmosférico de la Comunidad. MADRID. BOCM. n.º 8 SUPL, de 11-01-1999.

Decreto 78/1999, de 27 de mayo, por el que se regula el régimen de protección contra la contaminación acústica de la Comunidad de Madrid (BOCM n.º 134, de 08-06-99). Corrección de errores BOCM n.º 154, de 01-07-99.

Orden de 25 de agosto de 1999, por la que se aprueban las bases sobre concesión de subvenciones para la recuperación de vapores de combustible en estaciones de servicio en el nuevo Plan de Saneamiento Atmosférico de la Comunidad Autónoma de Madrid (DOCM n.º 209, de 3-9-99).

Decreto 180/2000, de 20 de julio, por el que se crea la Comisión Regional de Alerta por Ozono (BOCM n.º 177, de 27-07-00).

MURCIA

Resolución de la Agencia Regional para Medio Ambiente y la Naturaleza por la que se ordenan determinadas actuaciones a las empresas de la zona de

atmósfera contaminada de Cartagena, ordenadas a la prevención de episodios de contaminación. MURCIA. BOMU. n.º 216, de 29-7-1989.

Resolución 24-09-1990, que complementa la Resolución de 07-09-1989, que ordena actuaciones a empresas de zona atmosférica contaminada de Cartagena. MURCIA. BOMU. n.º 237, de 15-10-1990.

PAÍS VASCO

Ley 3/1998 de 27-02, general de protección del medio ambiente en el País Vasco. PAÍS VASCO. BOPV. n.º 59, de 27-03-1998.

Establece el marco normativo de protección del medio ambiente, determinando los derechos y deberes de las personas físicas y jurídicas y el uso sostenible de los recursos ambientales. El anexo I lista los planes y obras o actividades sometidos al procedimiento de evaluación de impacto ambiental. El anexo II incluye la lista de actividades clasificadas. Contaminación atmosférica de origen industrial.

Decreto 42/2000, de 7 de marzo, por el que se aprueba la cesación de la declaración de zona atmosférica contaminada, establecida por Decreto 3322/1977, de 16 de diciembre, sobre régimen aplicable a los términos municipales del área del «Gran Bilbao» (BOPV n.º 62, de 29-03-00).

CAPÍTULO 118

LEGISLACIÓN LOCAL SOBRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

118.1. BASES GENERALES

En el sistema de atribución de competencias a los entes locales, el Estado tiene la posición de legislador básico. Éste puede determinar de qué materias referidas al medio ambiente puede atribuir a los entes locales competencias sobre los servicios públicos medioambientales.

El medio ambiente se ve acompañado, además, de otras materias propias o conexas:

- Ordenación del tráfico de vehículos.
- Protección civil.
- Protección y prevención de incendios.
- Ordenación, gestión, ejecución y disciplina urbanística.
- Defensa de usuarios y consumidores.
- Suministro de agua.
- Recogida y tratamiento de residuos.
- Alcantarillado y tratamiento de aguas residuales.

Los Ayuntamientos son los auténticos responsables en materia de calidad del aire y de contaminación de plantas industriales, siempre que no excedan de determinadas características y que la población sea mayor de 50.000 habitantes. De esta manera están incluidos en las Zonas de Atmósfera Contaminada (ZAC). Estas competencias les son atribuidas en el artículo de la Ley 14/1986, General de Sanidad.

La declaración de ZAC puede ser iniciada por el propio Alcalde; por esto, sus Ordenanzas deben adoptar regímenes y medidas específicas en materia de contaminación.

Todo municipio que tenga unos niveles de contaminación elevados o esté declarado zona ZAC, debería de tomar las siguientes medidas correctoras:

1. Puesta en marcha y creación de una red de vigilancia y control de calidad del aire. Mediante el establecimiento de esta red de control se obtienen valoraciones reales del estado de la atmósfera en cada estación.

2. Entrada en funcionamiento de un centro que procese y analice los datos generados en la red de vigilancia.
3. Elaboración de estudios individualizados de cada una de las emisiones contaminantes, CO₂, SO₂, NO_x, CO y partículas.
4. Información periódica a la población del estado de la Calidad del Aire.
5. Creación de un inventario de todo el parque industrial, para poder pedir responsabilidades a las empresas contaminantes. En este inventario se deben recoger los niveles de emisión generados por cada industria.
6. Reducción de los niveles de contaminantes atmosféricos presentes.
7. Inspección periódica al sector industrial con el objetivo del cumplimiento de las ordenanzas y de la legislación vigente.
8. Elaboración de un Programa Regional sobre el control de calidad que incluya medidas correctoras y preventivas.
9. Potenciación del transporte público frente al privado, con el fin de disminuir el tráfico y las eventuales situaciones de congestión.
10. Control del cumplimiento de la Ley de Seguridad Vial.
11. Vigilancia y control de las emisiones de los automóviles mediante la realización de inspecciones técnicas de los vehículos.

12. Potenciación de energías alternativas.
13. Fomento de un ahorro energético.
14. Campañas de sensibilización.

118.2. NIVELES DE INMISIÓN DE REFERENCIA PARA LA DECLARACIÓN DE SITUACIÓN DE ALERTA ATMOSFÉRICA

En general, la propuesta de declaración de situación de alerta atmosférica se realizará cuando, a partir de los datos suministrados por la Red de Control de la Contaminación Atmosférica, y teniendo en cuenta las previsiones meteorológicas, se prevea que se pueda alcanzar alguna de las situaciones siguientes:

1. Que la concentración media diaria de óxidos de azufre, expresada como dióxido, de toda la Red de Control de la Contaminación Atmosférica, sobrepase el valor límite de 200 mg/m³, en condiciones normales.
2. Que la concentración media diaria de óxidos de azufre, expresada como dióxido, de una estación sobrepase el límite de 350 mg/m³.
3. Que la concentración media diaria de partículas en suspensión de toda la Red Automática de Control sobrepase el límite de 150 mg/m³.
4. Que la concentración media diaria de partículas en suspensión de una estación sobrepase el límite de 250 mg/m³.

118.3. MEDIDAS PARA SITUACIONES DE ALERTA ATMOSFÉRICA

Para las situaciones de alerta atmosférica se establecen tres niveles de actuación, en función de la gravedad y persistencia de dichas situaciones especiales, siendo las medidas a tomar correspondientes a cada nivel las que a continuación se detallan, pudiendo éstas aplicarse bien a una zona concreta o bien al municipio completo.

Nivel UNO:

- Intensificación al máximo de la vigilancia de los aparcamientos prohibidos que provoquen obstrucción de tráfico.
- Inmovilización de los vehículos con emisiones abusivas de humos, tomando las medidas necesarias para impedir su circulación hasta la reparación de los mismos.
- Limitación de la carga y descarga, estableciendo los horarios adecuados para realizar la misma.
- Establecimiento de la red de Calles de Atención Especial, en las que se prohíbe totalmente el aparcamiento, salvo carga y descarga bajo las condiciones adecuadas, y que se regirán por su normativa específica.
- Limitación del encendido de calefacciones al período comprendido entre las 12 y 18 horas.
- Obligación de utilizar fuel-oil BIA para aquellas empresas autorizadas al consumo de fuel-oil.

Nivel DOS:

- Todas las del nivel uno.
- Prohibición del estacionamiento de no residentes en la zona regulada.
- Ampliación de la limitación de los horarios de carga y descarga.
- Limitación del funcionamiento de las calefacciones y aguas calientes centrales al horario comprendido entre las 13 y 17 horas.
- Limitación del funcionamiento de ciertas industrias, bien por horario o por limitación de la producción.
- Interrupción de las actividades contaminantes no imprescindibles.

Nivel TRES:

- Todas las del nivel dos.
- Restricción al máximo de la circulación de vehículos privados, estimulando el uso de medios de transporte públicos.
- Prohibición del encendido de calefacciones y agua caliente central.
- Cierre temporal de las industrias que sus problemas de contaminación así lo aconsejen.
- Estas medidas tienen carácter general, si bien se establecen las siguientes excepciones:
 - a) Generadores de calor:

Quedan exceptuados los generadores de calor que empleen energía

eléctrica o cualquier forma de energía renovable, como por ejemplo la solar, así como los correspondientes a hospitales, guarderías, asilos de ancianos y escuelas primarias, en todos los niveles de medidas.

En el primer nivel, además de las excepciones consideradas en el párrafo anterior, quedan exceptuados los generadores de calor que utili-

cen como combustible gas o gasóleo C.

b) Circulación y aparcamiento de vehículos:

Quedan exceptuadas las ambulancias, vehículos sanitarios, de minusválidos, de médicos y ATS en acto de servicio, así como los vehículos del ejército, policía, bomberos, servicios de urgencia y mantenimiento de los servicios públicos.

BIBLIOGRAFÍA

PARTE I

- ACOSTA, A. 1992. Niebla potable. Conc. Planet. 12. Madrid.
- ASCHE, N. 1984. Ermittlung der aktuellen Belastung stadtnaher Ökosysteme durch Luftverunreinigungen. Institut für Bodenkunde und Waldernähr. der Univ. Göttingen.
- BAGGESS, W.R. *et al.* S.f. Lead in the environment. NSF. Washington.
- BANCO MUNDIAL. 1995. World Data 1995. Banco Mundial. Washington.
- BAUMÜLLER, J. 1984. Hinweise zur Darstellung windrichtung-sabhängiger Schadabgasbelastungen. Staub-Reinhaltung der Luft. 44.4.
- BICHARA, K. 1994. La géopolitique de l'eau en Méditerranée. CERMAC.
- CANS, R. 1990. Le monde poubelle. First. Paris.
- CERNUSCA, A. 1971. Ökophysik: Neue Wege zur quantitativen Ökologie. Umschau, 71.
- CHAIB, J. *et al.* 2000. Ecocitoyen au quotidien. Sang de la terre. París.
- COGEMA. 1995. Branche enrichissement, le retraitement des combustibles. Paris.
- DANTÍN CERECEDA, J. 1960. Historia de la Tierra. 5.^a ed. Espasa Calpe. Madrid.
- DAVIS, M.L. 1991. Environmental engineering. Mc Graw-Hill. New York.
- DETRIE, J.P. 1969. La pollution atmosphérique. Dunod. Paris.
- ELLIOTT, T. *et al.* 1984. Acid rain. Mc Graw-Hill. New York.
- EPA. 1971. Air Quality Criteria for Nitrogen Oxides, AP-84, U.S. EPA.
- EPA. 1992. National Air Pollutant Emissions Estimates, 1900-1991. EPA-454/R-92-013.

- ESTEVAN BOLEA, M.^a T. 1984. Evaluación del impacto ambiental. Mapfre. Madrid.
- FONT, I. 1991. El hombre y su ambiente atmosférico. INM. Madrid.
- GIORDAN, A. *et al.* 1996. 12 Questions d'actualité sur l'Environnement. M. de l'environnement. Paris.
- HOUGHTON, R. *et al.* 1998. Le réchauffement de la Terre. N.º Jun. Pour la Science.
- LE GOFF, P. 1990. Optimisation énergétique et économique comparées de systèmes industriels. Entropie n.º 153/154, p. 136-146.
- LORA, F de *et al.* 1978. Técnicas de defensa del medio ambiente. Labor.
- MARTIN, J. *et al.* 1988. Santé et pollution de l'air. PPUR. Lausanne.
- MAYSTRE, L.I. 1987. Protection de l'environnement et protection de la santé. Communications du 13^{ème} Congrès de la SIRMCE, EPFL.
- Mc. CORMAC, B.M. 1971. Introduction to the scientific study of atmospheric pollution. Reidel. Dordrecht.
- NAVARRO, A. 1996. Combustibles. INSA de Lyon.
- NAVARRO, A. 1999. Gestion et traitement des déchets. Lamy Environ.
- NEVERS N. de, 1995. Air pollution control engineering. Mc Graw-Hill. New York.
- PASCAL, B. 1657. Pensamientos. Ed. Planeta. 1988. Barcelona.
- RAMADE, F. 1974. Éléments d'écologie appliquée. Ediscience. Paris.
- RAMADE, F. 1979. Écotoxicologie. Masson. Paris.
- ROUSSEAUX, P. *et al.* 2000. Valeur environnementale de l'énergie. PPUR. Lausanne.
- SEOÁÑEZ, M. 1985. Planificación y control de la contaminación ambiental. Mapfre. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 1998. Ingeniería del medio ambiente. 2ª Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 1998. Medio Ambiente y Desarrollo. Mundi-Prensa. Madrid.
- THEYS, J., 1993. L'environnement à la recherche d'une définition. Institut Français de l'environnement. Paris.
- THOMAS, G. *et al.* 1996. L'état de l'atmosphère. Nº Jun. Pour la Science.

- UNEP.1991.The Environmental Impacts of Production and Use of Energy, Part I: Fossil Fuels. Nairobi.

PARTE 2

- ANNEMA, J.A. 1992. Methodology for the evaluation of potential action to reduce the environmental impact of chemical substances. SETAC-EUROPE.
- AVARGUES, M. 1971. Nuisances dues aux activités industrielles. Ed.Guy le Prat. Paris.
- BANCO MUNDIAL. 1995. World Data 1995. Banco Mundial. Washington.
- BOGGESS, W.R. *et al.* S.f. Lead in the environment. NSF. Washington.
- BOREL, J.P. *et al.* 1989. Bioquímica dinámica. Ed. Méd. Panam. Buenos Aires.
- BUTCHER, S.S. 1972. *et al.* An Introduction to Air Chemistry. Academic Press. New York.
- COGEMA. 1995. Branche enrichissement, le retraitement des combustibles. Paris.
- DEMANGEOT, J. 1992. Les milieux «naturels» du globe. Masson, 4^a éd. Paris.
- DETRIE, J.P. 1969. La pollution atmosphérique. Dunod. Paris.
- EDF. 1995. Maîtriser les déchets nucléaires. EDF. Paris.
- ELIAS, F. *et al.* 1996. Agrometeorología. Mundi Prensa. Madrid.
- FREY, C. *et al.* 28-3-1987. Die Zürcher Luft: giftig und gefährlich. Tages-Anzeiger Magazin. 13.
- FUCHS, N.A. 1964. The Mechanics of Aerosols, Pergamon-Mc-millan. New York. Chapter 11.
- FUCHS, N.A. *et al.* 1970. Sutugin: Highly dispersed Aerosols. Ann Arbor Science. Ann Arbor.
- GUDERIAN, R. 1977. Air pollution. Springer-Verlag. Berlin.
- HOUGHTON, R. *et al.*1998. Le réchauffement de la Terre. Pour la Science. Paris.
- HUGREL, C. 1998. Contribution à l'élaboration d'un outil d'aide à la décision multicritère pour la mise en place de la politique environnementale des collectivités locales. Thèse de Doctorat. INSA de Lyon.
- IUDK. 1996. Innerschweizer Umweltschutzdirektoren. Luftbelastung in der Innerschweiz 1995. IUDK. Berna.
- KERVERN, G.Y. *et al.* 1991. L'archipel du danger, introduction

- aux cindyniques, CPE Economica. Paris.
- LORA, F. de. *et al.* 1978. Técnicas de defensa del medio ambiente. Labor.
 - MARTIN, J. *et al.* 1988. Santé el pollution de l'air. PPR. Lausanne.
 - MIRON, J.L. 1992. ¿Es saludable el aire que respiramos? Mapfre Seguridad, 45. Madrid.
 - MORTGAT, B. 1998. Pyrolyse et thermolyse des déchets. Environnement et Technique.
 - NAVARRO, A. 1996. Combustibles. INSA de Lyon.
 - NAVARRO, A. 1999. Gestion et traitement des déchets. Lamy Environnement: les déchets.
 - NEVERS, N de 1995. Air pollution control engineering. Mc Graw-Hill. New York.
 - OFPE. 1988. Luftverschmutzung und Gesundheit. Schrift. Umwelt. 87.
 - PECH, P. *et al.* 1992. Géographie physique. PUF, coll «Premier Cycle». Paris.
 - PÉDELABORDE, P. 1991. Introduction à l'étude scientifique du climat. SEDES.
 - PILLET, P.E. *et al.* 1972. Un polluant atmosphérique: I'anhydride sulfureux. Poll.Atm. 55.
 - RABL, A. 1998. Effets sur la santé de la pollution atmosphérique due aux incinérateurs: une perspective. Déchets-Sciences et Techniques n.º 9.
 - RAMADE, F. 1979. Écotoxicologie. Masson. Paris.
 - ROUSSEAU, P. *et al.* 2000. Valeur environnementale de l'énergie. PPUR. Lausanne.
 - SANZ SA, J.M. 1985. La contaminación atmosférica. MOPU. Madrid.
 - SCHLIPKÖTER, H. W. *et al.* 1986. Gesundheitliche Auswirkungen von Luftschadstoffen. SPM/MSP. 31.
 - SEOÁÑEZ, M. 1977. La contaminación agraria. INIA. Madrid.
 - SEOÁÑEZ, M. 1979. Conferencia sobre Planificación de la Investigación Ambiental. Univ. J.Kepler. Linz (Austria).
 - SEOÁÑEZ, M. 1979. Modelos de estudio de perturbaciones atmosféricas de origen urbano-industrial en el medio agrario. INIA. Burgos.
 - SEOÁÑEZ, M. 1980. Bases para una normativa de previsión y evaluación de daños producidos por contaminación atmosférica. Hoja Técnica 29. INIA. Madrid.

-
- SEOÁNEZ, M. *et al.* 1981. Tratado del Medio Natural. Universidad Politécnica. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. 1997. Ingeniería Medioambiental aplicada. Casos prácticos. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. 1998. Ingeniería del medio ambiente aplicada al medio natural continental. 2.^a ed. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. 1999. Ecología industrial: Ingeniería medioambiental aplicada a la industria y a la empresa. 2.^a ed. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. 2001. Tratado de gestión del medio ambiente urbano. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. *et al.* 2001. Tratado de climatología aplicada a la ingeniería medioambiental. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SHAW, W. 1987. Air pollution by particles. Scientific american. 457.
 - SPEDDING, D.J. 1981. Contaminación atmosférica. Ed. Reverté. Barcelona.
 - TEICHMANN, H. *et al.* 1987. Vergleichende Geruchsmessungen auf Abwasserreinigungsanlagen. Mitteilungen 24 vom Institut für Wasserwesen der Hochschule der Bundeswehr. München.
 - TERNISIEN, J.A. *et al.* 1974. La pollution par les oxydes d'azote. Col. Environnement. Doc. Fran. Paris.
 - THEYS, J. 1993. L'environnement à la recherche d'une définition. Institut Français de l'environnement.
 - THOMAS, G. *et al.* 1996. L'état de l'atmosphère. Pour la Science. Paris.
 - TROYANOWSKY, C. 1985. Air pollution and plants. VCH. Weinheim.
 - ULRICH, B. *et al.* 1983. Forschungsbericht 104 02 615 des Umweltbundesamt. Bundesministerium des Innern. Bonn.
 - ULRICH, B. *et al.* 1985. Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme. Univ. Göttingen. 10.
 - UNEP, 1991. The Environmental Impacts of Production and Use of Energy, Part I: Fossil Fuels. Nairobi.
 - UNESCO. 1998. La naturaleza y sus recursos. Vol. 34. n.º 2. Mundi Prensa.
 - WANNER, H. 1983. Stadtklimatologie und Stadtklimastudien in der Schweiz. Jahrbuch der SNG, Wissenschaftlicher Teil.

- WANNER, H.U. 1985. Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit. *Ther. Umsch.* 42.
- WANNER, H.U. 1986. Pollution de l'air et santé. *SPM/MSP.* 31.
- WMO/UNEP, 1990. Climate change. UNEP. Nairobi.
- BOON, C.R. 1982. The effect of air speed changes on the group postural behaviour of pigs. *J.Agric. Enging. Res.* 27.
- CANS, R. 1990. Le monde poubelle. First. Paris.
- CICT. 1990. Programas I+D de la CE. Madrid.

PARTE 3

- ACOSTA, A. 1992. Niebla potable. *Conc. Planet.* 12. Madrid.
- ADEME. 1994. Fascicule sur «Débat National: Energie et environnement».
- ARAUJO, J. 1990. La muerte silenciosa. T.H. Madrid.
- AUERSCH, O. 1967. Zur Beeinflussung der Obstgehölze durch Immisionen. *Erwerbsobstbau*, 9.
- AVARGUES, M. 1971. Nuisances dues aux activités industrielles. Ed. Guy le Prat. Paris.
- BANCO MUNDIAL. 1995. World Data 1995. Banco Mundial. Washington.
- BARKER, G.L. *et al.* 1989. Influence of wind on cotton growth and yield. *Transactions of the ASAE*, 32.
- BERTOLINI, G. 1979. Les schémas d'armature antipollution. *Rev. Géogr. Lyon.* 54.
- CICT. 1992. Progr. Bridge de Biotecnología, de la CE. Madrid.
- DEMANGEOT, J. 1992. Les milieux «naturels» du globe. Masson, 4^a éd. Paris.
- DETRIE, J.P. 1969. La pollution atmosphérique. Dunod. Paris.
- ELIAS, F. *et al.* 1977. Agroclimatología de España. Cuaderno 7. INIA.
- ELIAS, F. *et al.* 1996. Agrometeorología. Mundi Prensa. Madrid.
- HOUGHTON, R. *et al.* 1998. Le réchauffement de la Terre. Pour la Science. Paris.
- HUGREL, C. 1998. Contribution à l'élaboration d'un outil d'aide à la décision multicritère pour la mise en place de la politique environnementale des collectivités locales. Thèse de Doctorat. INSA de Lyon.
- IUDK. 1996. Innerschweizer Umweltschutzdirektoren. Luftbelastung in der Innerschweiz 1995. IUDK. Berna.

-
- KELLER, Th. 1971. Schutz unse-res Lebensraumes. Huber Verlag. Frauenfeld.
 - LE GOFF, P. 1990. Optimisation énergétique et économique comparées des systèmes industriels. ENTROPIE n.º 153/154.
 - LORA, F. de. *et al.* 1978. Técnicas de defensa del medio ambiente. Labor.
 - LORENTE, J.M. 1966. Meteorología. Ed. Labor. Barcelona.
 - LYLES, L. 1988. Basic wind erosion processes. Agric. Ecosystems Environ, 22.
 - MANTEIGA, L. *et al.* 1999. Sistema español de indicadores ambientales. M.º de Medio Ambiente. Madrid.
 - MARTIN, J. *et al.* 1988. Santé et pollution de l'air. PPUR. Lausanne.
 - MAYSTRE, L.I. 1987. Protection de l'environnement et protection de la santé. Communications du 13^{ème} Congrès de la SIRMCE. EPFL.
 - MEININGER. Dr. *et al.* 1974. La pollution par le plomb et ses dérivés. Col. Environnement. Doc. Fran. Paris.
 - NAVARRO, A. 1996. Combustibles. INSA de Lyon.
 - NEVERS N. de. 1995. Air pollution control engineering. Mc Graw-Hill. New York.
 - OFPE. 1988. Luftverschmutzung und Gesundheit. Schrift. Umwelt.87.
 - PECH, P. *et al.* 1992. Géographie physique. PUF, coll «Premier Cycle». Paris.
 - PÉDELABORDE, P. 1991. Introduction à l'étude scientifique du climat. SEDES.
 - PÉGUY, Ch. 1970. Précis de Climatologie. Masson & Cie Editeurs. Paris.
 - PERKINS, H.C. 1974. Air Pollution. Mc Graw-Hill. New York.
 - RAMADE, F. 1974. Éléments d'écologie appliquée. Eudiscience. Mc Graw Hill. Paris.
 - RAN, J.G. *et al.* 1980. Environmental impact analysis handbook. Mc Graw Hill. New York.
 - ROBINSON, E. *et al.* 1970. Global effects of environmental pollution. Reidel. Amsterdam.
 - ROUSSEAUX, P. *et al.* 2000. Valeur environnementale de l'énergie. PPUR. Lausanne.
 - SANZ SA, J.M. 1985. La contaminación atmosférica. MOPU. Madrid.

- SAURA, A. 1992. La ecoindustria espera su momento. Ecología y Sociedad, 1. Madrid.
 - SEHMEL, G.A. 1980. Particle and Gas Dry Deposition: a Review. Atmospheric Environment. 14.
 - SEOÁÑEZ, M. 1974. Estudio sobre la contaminación agraria de las zonas de Ontón y Munguía por flúor de origen atmosférico. INIA. Madrid.
 - SEOÁÑEZ, M. 1975. Efectos del SO₂ emitido por industrias de celulosa sobre la vid. Est. Bibl. N.I. INIA.
 - SEOÁÑEZ, M. 1977. La contaminación agraria. INIA. Madrid.
 - SEOÁÑEZ, M. 1985. Planificación y control de la contaminación ambiental. Itsemap. Mapfre.
 - SEOÁÑEZ, M. 1999. Ecología industrial: Ingeniería medioambiental aplicada a la industria y a la empresa. 2.^a ed. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁÑEZ, M. 1999. Ingeniería del Medio Ambiente aplicada al Medio Natural Continental. 2.^a edición. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁÑEZ, M. 2001. Tratado de climatología aplicada a la ingeniería medioambiental. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁÑEZ, M. 2001. Tratado de gestión del medio ambiente urbano. Mundi-Prensa. Madrid.
 - THOMAS, G. *et al.* 1996. L'état de l'atmosphère. Pour la Science. Paris.
 - UNESCO. 1998. La naturaleza y sus recursos. Vol. 34. n.º 2. Mundi Prensa.
 - WANNER, H.U. 1986. Pollution de l'air et santé. SPM/MSP. 31.
 - WARK, K. *et al.* 1981. Air Pollution, Its Origin and Control. Harper & Row. New York.
 - WESTMAN, W.E. 1985. Ecology impact assessment, and environmental planning. J.Wiley. New York.
 - ZÜST, B. *et al.* 1987. L'air, c'est la vie. Bulletin des médecins suisses. 68.
- PARTE 4**
- BANCO MUNDIAL. 1995. World Data 1995. Banco Mundial. Washington.
 - BARFIELD, B.J., *et al.* 1990. Modifying the aerial environment, 827-869. En Hoffman y col. (Ed.). Management of Farm Irrigation Systems. ASAE Monograph.

-
- BARKER, G.L. *et al.* 1989. Influence of wind on cotton growth and yield. Transactions of the ASAE, 32.
 - BARRY, R.G. 1981. Mountain wather and climate. Methuen & Company Ltd. New York.
 - BARRY, R.G. *et al.* 1976. Atmosphere, Weather and Climate. Methuen. London.
 - BASTIDA, J. 1943. Atlas de plantas para las observaciones fenológicas. Min. del Aire. Sección de Climatología. Madrid.
 - BJERKNES, J. 1963. Climatic changes as an ocean-atmosphere problem. In: Proc. WMO.UNESCO. Symp. Clim. Changes, Rome, 1961. Arid Zone Res., 20.
 - BOON, C.R. 1982. The effect of air speed changes on the group postural behaviour of pigs. J.Agric. Enging. Res, 27.
 - CAPEL MOLINA, J.J. 1981. Los climas de España. OIKOS-TAU, S.A. Ediciones.
 - COLE, D.J.A. *et al.* 1986. Ecosystems of the World 21. Bioindustrial Ecosystems. Elsevier. Amsterdam.
 - DEMANGEOT, J. 1992. Les milieux «naturels» du globe. Masson, 4.^a éd. Paris.
 - DÉTRIE, J.P. *et al.* 1969. La pollution atmosphérique. Dunod. Paris.
 - ELÍAS, F. *et al.* 1977. Agroclimatología de España. Cuaderno n.º 7. INIA.
 - ELIAS, F. *et al.* 1996. Agrometeorología. Mundi Prensa. Madrid.
 - GARRAT, J.R. 1992. The atmospheric boundary layer. Cambridge University Press. Cambridge.
 - GUYOT, J. 1997. Climatologie de l'environnement. Masson. Paris.
 - HARDY, R. *et al.* 1983. El libro del clima. Hermann Blume. Madrid.
 - LORENTE, J.M^a. 1966. Meteorología. Labor, S.A. Barcelona.
 - LYLES, L. 1988. Basic wind erosion processes. Agric. Ecosystems Environ, 22.
 - MARTÍN, J. *et al.* 1988. Santé et pollution de l'air. PPUR. Lausanne.
 - MONTEITH, J. 1973. Principle of environmental physics. Ed. Arnold. London.
 - MOPT. 1993. El clima urbano. Teledetección de la isla de calor en Madrid. Secretaría General Técnica del Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

- NEVERS N. de. 1995. Air pollution control engineering. Mc Graw-Hill. New York.
- PANOFSKY, H.A. *et al.* 1984. Atmospheric turbulence. Interscience. Wiley. New York.
- PECH. P. *et al.* 1992. Géographie physique. PUF, coll «Premier Cycle». Paris.
- PÉDELABORDE, P. 1991. Introduction à l'étude scientifique du climat. SEDES.
- PÉGUY, Ch. 1970. Précis de Climatologie. Masson & Cie Editeurs. Paris.
- RUMNEY, G.R. 1968. Climatology and the world's climates. Univ.of Connecticut, The MacMillan Co. New York.
- SEEMAN, J. *et al.* 1979. Agrometeorology. Springer Verlag. Berlin.
- SEOÁÑEZ, M. 1997. Ingeniería Medioambiental Aplicada. Casos prácticos. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 1998. Medio Ambiente y Desarrollo. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 1999. Ingeniería del medio ambiente aplicada al medio natural continental. 2ª Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 1999. Ecología industrial: Ingeniería medioambiental aplicada a la industria y a la empresa. 2.ª ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 2001. Tratado de gestión del medio ambiente urbano. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. *et al.* 2001. Tratado de climatología aplicada a la ingeniería medioambiental. Mundi-Prensa. Madrid.
- SHAW, E.M. 1988. Hydrology in practice. 2nd ed. Chapman and Hall. London.
- SPEDDING, D.J. 1981. Contaminación atmosférica. Ed. Reverté. Barcelona.
- TROLL, C. 1958. Climatic seasons and climatic classification. Oriental Geographer, 2.
- WOODWARD, F.I. 1987. Climate and plant distribution. Cambridge Univ. Press. London.

PARTE 5

- AHRENS, D.C. 1982. Meteorology today. An introduction to weather, climate and the environment. West Publishing Co.
- ARYA, P.S. 1988. Introduction to micrometeorology. Academic Press Inc. San Diego.

-
- BAGGESS, W.R. *et al.* S.f. Lead in the environment. NSF. Washington.
 - BALDOCCHI, D.D. *et al.* 1988. Measuring biosphere atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 69.
 - BARFIELD, B.J. *et al.* 1990. Modifying the aerial environment, 827-869. En Hoffman y col. (Ed.) Management of Farm Irrigation Systems. ASAE Monograph.
 - BARRY, C.B. *et al.* 1985. *Atmósfera, tiempo y clima*. 4ª ed. Ediciones Omega, S.A. Barcelona.
 - CIONCO, R.M. 1972. Intensity of turbulence within canopies with simple and complex roughness elements. *Boundary-Layer Meteorol*, 2.
 - CHANLETT, E.T. 1979. *Environmental Protection*. 2ª ed. McGraw-Hill. New York.
 - DAVIS, M.L. *et al.* 1991. *Introduction to environmental engineering*. McGraw-Hill. New York.
 - DETRIE, J.P. 1969. *La pollution atmosphérique*. Dunod. Paris.
 - ESCOURROU, G. 1981. *Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat*. Masson. Paris.
 - FERNANDEZ, J.L. 1976. *Fundamentos de Meteorología Aeronáutica*. Madrid.
 - GARRAT, J.R. 1992. *The atmospheric boundary layer*. Cambridge University Press. Cambridge.
 - GRIBBIN, J. 1979. *Weather Force*. Hamlyn. London.
 - GUYOT, G. 1972. *Étude de l'écoulement de l'air au voisinage d'un obstacle poreux en couche limite turbulente*. Thèse de Docteur Ingénieur. Université de Paris VI.
 - GUYOT, G. 1986. *Manuel sur l'utilisation des brise-vent dans les zones arides*. FAO. Roma.
 - GUYOT, G. 1997. *Climatologie de l'environnement*. Masson. Paris.
 - HAGEN, L.J. *et al.* 1974. Reducing turbulent transfer to increase water-use efficiency. *Agric. Meteorol*, 14.
 - HAGEN, L.J. *et al.* 1981. Simulation of effect of wind barriers on airflow. *Transactions of the ASAE*.
 - HARDY, R. *et al.* 1983. *El libro del clima*. Hermann Blume. Madrid.
 - HEFFTER, J.L. 1980. In Air resources laboratories atmospheric transport and dispersion model. NOAA Tech. Mem. ERL ARL-81. Silver Springs. MD.

- INRA. 1970. Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère. Paris.
- LOCKWOOD, J.G. 1979. Causes of climate. Ed. Arnold. London.
- LORENTE, J.M.^a. 1966. Meteorología. Labor, S.A. Barcelona.
- LYLES, L. 1988. Basic wind erosion processes. Agric. Ecosystems Environ, 22.
- MERINO, D. 1991. Cortavientos en agricultura. Agroguías Mundi-Prensa. Madrid.
- PANOFSKY, H.A. *et al.* 1984. Atmospheric turbulence. Interscience. Wiley. New York.
- PÉGUY, Ch. 1970. Précis de Climatologie. Masson & Cie Editeurs. Paris.
- RAINE, J.K. *et al.* 1977. Wind protection by model fences in simulated atmospheric boundary layer. J.Industrial Aero.
- RAMADE, F. 1979. Écotoxicologie. Masson. Paris.
- SACADURA, J.F. 1993. Initiation aux transferts thermiques, 4^{ème} tirage. Lavoisier Technique et Documentation. Paris.
- SEOÁÑEZ, M. 1999. Ingeniería del Medio Ambiente aplicada al Medio Natural Continental. 2^a edición. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 2000. Tratado de reciclado y recuperación de productos de los residuos. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 2001. Tratado de gestión del medio ambiente urbano. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. *et al.* 2001. Tratado de climatología aplicada a la ingeniería medioambiental. Mundi-Prensa. Madrid.
- SHAW, E.M. 1988. Hydrology in practice. 2nd ed. Chapman and Hall. London.
- SPEDDING, D.J. 1981. Contaminación atmosférica. Ed. Reverté. Barcelona.
- SZEICZ, G. *et al.* 1969. Aerodynamic and surface factors in evaporation, Water Resource Res., 5.
- TIBKE, G.L. 1988. Basic principles of wind erosion control. Agric. Ecosystems Environ.
- TOWNSEND, A.A. 1976. The structure of turbulent shear flow, 2nd Edition. Cambridge University Press. Cambridge.
- TREWARTHA, G.T. *et al.* 1980. An introduction to climate. MacGraw Hill. New York.
- WEN, K.J. *et al.* 1991. The statistical analysis of shelterbelt structure and windproof efficiency. Agric. For.Meteorol.

- WESTMAN, W.E. 1985. Ecology, impact assessment, and environmental planning. Willey. Ed. New York.

PARTE 6

- ALLUÉ, J.L. 1998. Actas de la reunión sobre el cambio climático. Número 7. Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- ALPERT, S. 1993. Biological Approaches to Reducing Atmospheric CO₂. EPRI Jour. Vol 18.
- CARIOLLE, D. 1991. Trou d'ozone: comment cela va continuer? Science & vie. n.º 174.
- CHARLSON, R.J. *et al.* 1994. Sulfate Aerosols and Climatic Change. Sci. Am. Vol.270.
- COURTIN, R. *et al.* 1992. L'effet de serre dans le système solaire. La Recherche.
- DAUTRAY, R. 1991. L'effet de serre et ses conséquences climatiques: évaluation scientifique. C.R. Acad. Sci. La vie des Sciences, 8.
- DAVIS, M.L. 1991. Environmental engineering. Mc Graw-Hill. New York.
- DEARDORFF, J.W. 1978. Observed characteristics of the outer layer, In Short Course on the Planetary Boundary Layer, A.K. Blackadar Ed., Amer. Meteorol. Soc. Boston.
- DETRIE, J.P. 1969. La pollution atmosphérique. Dunod. Paris.
- ELÍAS, F. *et al.* 1996. Agrometeorología. Mundi Prensa. Madrid.
- ENTREPRISES POUR L'ENVIRONNEMENT. 1996. Problèmes d'environnement. Lavoisier. Paris.
- EUROPEAN COMMISSION. 1994. Science research development. Environment and climate. Bruselas.
- FINNVEDEN, G. 1994. Methods for describing and Characterising Ressource Depletion in the Context of Life-Cycle Assessment. Swedish Environmental Research Institut. Stockholm.
- FONT, I. 1991. El hombre y su ambiente atmosférico. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.
- FRASER, P. *et al.* 1991. Source gases: Concentration, emission and trends. In Scientific asesment of ozone depletion. WMO. Genève.
- GOUDRIAAN, J. 1992. Le réchauffement et la végétation. La Recherche, n.º 23.
- GOUDRIAAN, J. 1992. Où va le gaz carbonique? Le rôle de la végétation. La Recherche, n.º 23.

- GRUBB, M. 1992. Politiques de l'énergie et effet de serre. La Recherche, n.º 23.
- GUYOT, J. 1997. Climatologie de l'environnement. Masson. Paris.
- HARDY, R. *et al.* 1983. El libro del clima. Hermann Blume. Madrid.
- HOUGHTON, J.T. *et al.* 1990. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press. Cambridge.
- HOUGHTON, R. *et al.* 1998. Le réchauffement de la Terre. Pour la Science. Paris.
- HUGREL, C. 1998. Contribution à l'élaboration d'un outil d'aide à la décision multicritère pour la mise en place de la politique environnementale des collectivités locales. Thèse de Doctorat. INSA de Lyon.
- III CONGRESO NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE. 1996.
- IPCM (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1995. Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92. Emission Scenarios. Cambridge University Press.
- LAMBERT, G. 1992. Les gaz à effet de serre. La Recherche n.º 243.
- LORIUS. 1991. Climat et gaz à effet de serre: les données des archives glaciaires. C.R Acad. Sci. La vie des Sciences, 8.
- MANTEIGA, L. *et al.* 1999. Sistema español de indicadores ambientales. Mº de Medio Ambiente. Madrid.
- MEGIE, G. 1989. Ozone, équilibre rompu. Presses du CNRS. Paris.
- MIMA. 2000. Revista de Medio Ambiente. 2000. N.º 89. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- MINSTER, J.F. *et al.* 1992. Ou va le gaz carbonique? Le rôle des océans. La Recherche. n.º 23.
- MONFRAY, P. 1989. Modéliser le cycle du gaz carbonique. Le courrier du CNRS, 72.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1979. Protection against Depletion of Stratospheric Ozone by Chlorofluorocarbons. National Academy of Sciences. Washington, DC.
- NEBEL, B.J. 1981. Environmental Science. Prentice-Hall. New Jersey.
- NEVERS, N de. 1995. Air pollution control engineering. Mc Graw-Hill. New York.
- OKE, T.R. 1987. Boundary Layer Climates, 2d ed. Methuen. London.

- RAY, D.L. *et al.* 1990. *Trashing the Planet*. Harper Collins. New York.
 - ROSENFELD, L. 1991. Effet de serre et couche d’ozone: mythes et réalités, *Fusion Magazine de la Fondation pour l’Energie de Fusion*, n.º 35.
 - ROUSSEAUX, P. *et al.* 2000. *Valeur environnementale de l’énergie*. PPUR. Lausanne.
 - SADOURNY, R. 1992. L’homme modifie-t-il le climat? *La Recherche*, n.º 23.
 - SEITZ, F. 1994. *Global Warming and the Ozone Hole Controversies: A Challenge to Scientific Judgment*. George C. Marshall Institute. Washington, DC.
 - SEOÁNEZ, M. 1999. *Ingeniería del Medio Ambiente aplicada al Medio Natural Continental*. 2ª edición. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. *et al.* 2001. *Tratado de climatología aplicada a la ingeniería medioambiental*. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SMITH, J.B. *et al.* 1990. *The Potential Effects of Global Climate Change on the United States. Hemisphere*. New York.
 - SULLIVAN, D.A. 1989. *International Gathering Plans Way to Safeguard Atmospheric Ozone*. C&E News.
 - THOMAS, G. *et al.* 1996. *L’état de l’atmosphère*. Pour la Science. Paris.
 - WMO. 1992. *The global climate system. Climate system monitoring December 1988-May 1991*. WMO. Genève.
 - WMO/UNEP. 1990. *Climate change*. UNEP. Nairobi.
 - ZURER, P.S. 1988. *Studies on Ozone Destruction Expand Beyond Antarctic*. C&E News.
- PARTE 7**
- ALBERTY, R.A. *et al.* 1992. *Physical Chemistry*. J. Wiley and Sons. New York.
 - ANTLER, M. *et al.* 1963. *The effects of air pollution on electric contacts*. *Jour. APCA*, 9.
 - CUBLEY, B. 1990. *Chemical inhibitors for corrosion control*. The Royal Society of Chemistry. London.
 - DAVIS, M.L. 1991. *Environmental engineering*. Mc Graw-Hill. New York.
 - DETRIE, J.P. 1969. *La pollution atmosphérique*. Dunod. Paris.

- DETRIE, J.P. 1973. Pollution et corrosion. *Pollut. Atm.* 58.
 - DUFFAU, F. *et al.* 1972. Degrada-tions des pierres. *Pollut. Atm.* 56.
 - GATES, B.C. 1992. *Catalytic Chemistry*. J. Wiley and Sons. New York.
 - NEVERS, N de. 1995. *Air pollution control engineering*. Mc Graw-Hill. New York.
 - PERKINS, H.C. 1974. *Air Pollution*. Mc Graw-Hill. New York.
 - PERRIN, R. *et al.* 1993. *Chimie industrielle*. Masson. Paris.
 - SALELLES, A. 1964. Aspects économiques de la pollution de l'air. *Rap. Conf. Eur. Poll. De l'Air*. Strasbourg.
 - SCHMIDT-THOMSEN, K. 1972. Steinzerstoerung und-konservierung in Westfalen-Lippe (Stone Destruction and Conservation in Lippe-Westfalia). *Third International Clean Air Congress*. VDI Verlag. Düsseldorf.
 - SCULLY, J.C. 1983. *The Fundamentals of Corrosion*. Pergamon Press. London.
 - SEOÁÑEZ, M. 1985. *Planificación y control de la contaminación ambiental*. Mapfre. Madrid.
 - SEOÁÑEZ, M. 1999. *Ingeniería del Medio Ambiente aplicada al Medio Natural Continental*. 2.^a edición. Mundi-Prensa. Madrid.
 - STERN, A.C. 1968. *Air Pollution*. Academic Press. New York.
 - UPHAM, J.B. 1967. *Atmospheric Corrosion Studies in Two Metropolitan Areas*. *J.Air Pollut. Control Assoc.* vol. 17.
- PARTE 8**
- ADAMS, D. *et al.* 1986. *Acid deposition*. Plenum Press. New York.
 - ÅGREN, G. 1983. *Ecological effects of acid deposition*. National Swedish Environment Protection Board-Report PM 1636.
 - ARAUJO, J. 1990. *La muerte silenciosa*. T.H. Madrid.
 - ASCHE, N. 1984. *Ermittlung der aktuellen Belastung stadtnaher Ökosysteme durch Luftverunreinigungen*. Institut für Bodenkunde und Waldernähr. der Univ. Göttingen.
 - BOGGESS, W.R. *et al.* S.f. *Lead in the environment*. NSF. Washington.
 - BUREL, F. *et al.* 1999. *Écologie du paysage*. Technique et Documentation. Paris.

-
- ENTREPRISES POUR L'ENVIRONNEMENT. 1996. Problèmes d'environnement. Paris.
 - ESCOURROU, G. 1981. Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat. Masson. Paris.
 - HARDY, R. *et al.* 1983. El libro del clima. Hermann Blume. Madrid.
 - HUTCHINSON, T.C. *et al.* 1980. Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems. Plenum Press.
 - IUDK. 1996. Innerschweizer Umweltschutzdirektoren. Luftbelastung in der Innerschweiz 1995. IUDK. Berna.
 - MANTEIGA, L. *et al.* 1999. Sistema español de indicadores ambientales. M.º de Medio Ambiente. Madrid.
 - MARTÍN, J. *et al.* 1988. Santé et pollution de l'air. PPUR. Lausanne.
 - NEVERS, N de. 1995. Air pollution control engineering. McGraw-Hill. New York.
 - PERRY, R. *et al.* 1987. Acid Rain: Scientific and Technical Advance. Publications Division, Selper Ltd. London.
 - RAMADE, F. 1979. Écotoxicologie. Masson. Paris.
 - RENZONI, A. 1994. Contaminants in the Environment. Univ. de Siena. Siena.
 - ROBERT, M. 1996. Le sol: interface dans l'environnement, ressources pour le développement. Masson. Paris.
 - ROUSSEAUX, P. *et al.* 2000. Valeur environnementale de l'énergie. PPUR. Lausanne.
 - SEIP, H.M. 1980. Ecological impact of acid precipitation. SNSF-project.
 - SEOÁNEZ, M. 1977. La Contaminación Agraria. INIA. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. 1999. Ingeniería del Medio Ambiente aplicada al Medio Natural Continental. 2.^a edición. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. 1999. Contaminación del suelo: Estudios, tratamiento y gestión. Mundi-Prensa.
 - SEOÁNEZ, M. 2000. Tratado de reciclado y recuperación de productos de los residuos. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. *et al.* 2001. Tratado de climatología aplicada a la ingeniería medioambiental. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SOLBERG, W. *et al.* 1983. Acid Rain and Forest Resources Conference. Québec, Canada.

- SPEDDING, D.J. 1981. Contaminación atmosférica. Ed. Reverté. Barcelona.
- TAMM, C.O. *et al.* 1984. State and change of forest ecosystems-indicators in current research. Report 13. Swed. Univ. Agr. Sciences. Dep. Ecology and Env. Research.
- WESTMAN, W.E. 1985. Ecology, impact assessment, and environmental planning. Wiley Ed. New York.
- CEBALLOS, L. *et al.* 1971. Árboles y arbustos de la España peninsular. IFIE-ETSIM. Madrid.
- CHOVIN, P. 1968. La pollution atmosphérique. Presse Univ. de France. Paris.
- CICT. 1992. Progr. Step de Medio Ambiente de la CE. Madrid.
- CORMIS, L. de. *et al.* 1968. Absorption des fluorures en solution et migration du fluor chez la tomate. Ann. Physiol. veg. 10, 3.

PARTE 9

- ANDERSON, P.J. 1974. The effect of dust from cements mills on the setting of fruit. Plant World, 17.
- BARTOLI, M. 1973. Forêt-SO₂. Et. Bibl. CNRF. N.I.
- BOGGESS, W.R. *et al.* S.f. Lead in the environment. NSF. Washington.
- BOHNE, H. 1953. Schädlichkeit von Staub aus Zementwerken für Waldbestände. Allg. Fortzeitschrift. 18,7.
- BORTITZ, S. *et al.* 1967. Zur Transpiration von Koniferennadeln bei unterschiedlicher SO₂-Einwirkung. Arch. Forstw. 16.
- DAVIS, M.L. *et al.* 1991. Environmental engineering. Mc Graw Hill. New York.
- DETRIE, J.P. 1973. Pollution et corrosion. Pollut. Atm. 58.
- DEVLIN, R.M. 1970. Fisiología Vegetal. Omega. Barcelona.
- DÍAZ ÁLVAREZ, M.^a C. *et al.* 1988. Agricultura y medio ambiente. MOPU. Madrid.
- DUCET, G. *et al.* 1952. Action de l'oxyde de carbone sur la respiration des feuilles vertes. C.R. Acad. Sci. París. 234.
- ESCOURROU, G. 1978. Climatologie pratique. Masson. Paris.
- ESCOURROU, G. 1981. Climat et environnement. Masson. Paris.
- FERRY, B.W. *et al.* 1973. Air pollution and lichens. The Athlone Press. Univ. of London.

-
- FONT QUER, P. 1963. Diccionario de Botánica. Labor. Barcelona.
 - GARCIA SALMERON, J. 1964. Setos. Clases y especies utilizables. IFIE. Madrid.
 - GASSNER, M. *et al.* 1987. Relation von meteorologischen Gegebenheiten mit pollen und Luftschadstoffimmissionen insbesondere Ozon, im Rheintal. Schw. Arztezeitung, 68.
 - GODRON, M. 1984. Écologie de la végétation terrestre. Masson. Paris.
 - GROSSMANN, F. 1970. Einfluß der Ernährung der Pflanzen auf den Befall durch Krankheitserreger und Schädlinge. Landwirtsch. Forsch, 18.
 - GUDERIAN, R. 1977. Air pollution. Springer-Verlag. Berlin.
 - GUDERIAN, R. *et al.* 1960. Zeitschr. Pflanzenkrankh. u. Pflanzenschutz, 67.
 - GUDERIAN, R. *et al.* 1970. Nachweis von Schwefeldioxid-Wirkungen an Pflanzen. Staub Reinh. Luft, 30.
 - GUYOT, G. *et al.* 1970. Los cortavientos en agricultura. Estac. Aula Dei. CIDADE, 4. Zaragoza.
 - HASELHOFF, E. *et al.* 1903. Die Beschädigung der Vegetation durch Rauch. Gebr. Borntraeger Verlag. Leipzig.
 - HILL, A.C. *et al.* 1970. Inhibition of apparent photosynthesis by nitrogen oxides. *Atm. Env.* 4.
 - KLAPP, E. 1967. Lehrbuch des Acker- und Pflanzenbaus. P. Parey Verlag. Berlin.
 - KOFLER, L. *et al.* 1969. Influence des fumées d'usines sur la germination des spores de certains lichens. *Bull. Soc. bot. Fr. Mém.*
 - MATERNA, J. *et al.* 1963. Die Absorption des Schwefeldioxid durch die Fichte. *Naturwissenschaften*, 50.
 - MATERNA, J. *et al.* 1968. Stickstoff-Düngung und Schwefeldioxid-Aufnahme durch Fichtennadeln. *Naturwissenschaften*, 54.
 - Mc LAUGHLIN, S.B. *et al.* 1975. Effects of fluoride on photosynthesis and respiration of some south-east american forest trees. *Environ. Pollut.* 8.
 - NEITZKE, M. 1984. Der Einfluß von Aluminium auf die Keimung und Keimlingsentwicklung der Buche (*Fagus sylvatica* L.) *Diss. Univ. Münster.*
 - NOVAK, F.A. 1973. Encyclopédie illustrée du monde végétal. Gründ-Artia. Praga.

- PELZ, E. 1960. Die phytotoxische Wirkung von Staubemissionen und Massnahmen zu ihrer Werhütung. Die Technik. 15.
- PELZ, E. 1963. Untersuchungen über die Fruktifikation rauchgeschädiger Fichtenbestände. Arch. Forstw. 12, 10.
- PILLET, P. E. *et al.* 1968. Action du fluor et du sulfite sur les aiguilles du Pinus sylvestris. Ann. Physiol. vég. 10. 1.
- QUINCHE, J.P. *et al.* 1974. La pollution par les composés fluorés et ses effets sur les arbres fruitiers du Valais. Bull. de la Murith 91.
- RAMADE F. 1974. Elément d'écologie appliquée. Eudiscience. Mc Graw Hill. Paris.
- RAMADE, F. 1979. Écotoxicologie. Masson. Paris.
- RAMADE, F. 1981. Écologie des ressources naturelles. Masson. Paris.
- ROST-SIEBERT, K. 1985. Untersuchungen zur H- und Al-Ionen-Toxizität an Keimpflanzen von Fichte (*Picea abies* Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Lösungskultur. Diss. Univ. Göttingen.
- ROUSSEL, L. 1972. Photologie forestière. Masson. Paris.
- SEOÁÑEZ, M. 1971. Introducción a un estudio sobre la contaminación atmosférica y su relación con la vegetación. Options Medit. CIHEAM. 9. Paris.
- SEOÁÑEZ, M. 1973. Efectos del CO sobre los vegetales y su asimilación por las plantas. Tesis doctoral, Univ. Politéc. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 1974. Estudio sobre la contaminación agraria de las zonas de Ontón y Munguía por flúor de origen atmosférico. INIA. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 1975. Efectos del SO₂ emitido por industrias de celulosa sobre la vid. Est. Bibl. N.I. INIA.
- SEOÁÑEZ, M. 1975. Informe sobre las posibles alteraciones en el medio vegetal (cultivos de vid) provocadas por las emisiones de SO₂ a la atmósfera procedentes de la industria papelera. INIA. Burgos.
- SEOÁÑEZ, M. 1977. La contaminación agraria. INIA. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 1977. Síntomas y efectos visibles y no visibles de la contaminación por flúor en vegetales. INIA. Burgos.
- SEOÁÑEZ, M. 1980. Bases para una normativa de previsión y evaluación de daños producidos por

- contaminación atmosférica. Hoja Técnica 29. INIA. Madrid.
- SEOÁNEZ, M. 1985. Planificación y control de la contaminación ambiental. Mapfre. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. *et al.* 1981. Tratado del Medio Natural. Universidad Politécnica. Madrid.
 - STERN, A.C. 1968. Air pollution. Acad Press. T 1. New York.
 - STRASBURGER, E. 1923. Tratado de Botánica. Marín. Barcelona.
 - TAMM, C.O. *et al.* 1984. State and change of forest ecosystems-indicators in current research. Report 13. Swed. Univ. Agr. Sciences. Dep. Ecology and Env. Research.
 - THOMAS, M.D. *et al.* 1935. Absorption of sulfur dioxide by alfalfa and its relation to leaf injury. Plant physiol. 10.
 - TROYANOWSKY, C. 1985. Air pollution and plants. VCH. Weinheim.
 - ULRICH, B. *et al.* 1985. Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme. Univ. Göttingen. 10.
 - VAN HAUT, H. *et al.* 1960. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. 884. Westdeutscher Verlag. Köln. Opladen.
 - WEINSTEIN, L.H. 1977. Effects of fluorides on plants. JOM. 19, 1.
- PARTE 10**
- ALVIRA, Pilar (coord.) *et al.* 1981. Veterinaria y medio ambiente. Monogr.6. CEOTMA. MOPU.
 - ANADON, A. *et al.* 1982. Niveles residuales de arsénico. Anales INIA. Serie ganadera, 14. Madrid.
 - ATHANASSIADAS, Y.C. 1971. Air Pollution Aspects of Cadmium and its Compounds. Litton Sist. Bethesda.
 - BOGGESS, W.R. *et al.* S.f. Lead in the environment. NSF. Washington.
 - BOREL, J.P. *et al.* 1989. Bioquímica dinámica. Ed. Méd. Panam. Buenos Aires.
 - CHOVIN, P. 1968. La pollution atmosphérique. Presse Univ. de France. Paris.
 - DARNELL, R.M. 2000. Organism and environment. 6nd Ed. Freeman. San Francisco.
 - DETRIE, J.P. 1969. La Pollution Atmosphérique. Dunod. Paris.
 - DREHER, K. 1965. Empoisonnement des abeilles par le fluor. Bull. Apicole. 2.

- FAVEZ, G. 1985. Umwelt und Lunge. Therapeutische Umschau. 42.
- FERNÁNDEZ, G. 1999. La economía agraria gallega. FG, EES. Madrid.
- GÓMEZ PAJUELO, A. 1976. Informe sobre el estado de las abejas en el entorno de la fábrica de S. Ciprián. N.I. INIA. Burgos.
- GUIHLON, J. 1961. Contribution à l'étude de la pollution atmosphérique par les sublimats fluorés d'origine industrielle. Rev. APPA, 4.
- GUYOT, J. 1997. Climatologie de l'environnement. Masson. Paris.
- LUCAS, J. 2000. Our polluted food. Ch. Knight and Co. London.
- OBEL, A.L. *et al.* 1971. Borine fluorosis in Sweden. Acta Vet. Scand. 12.
- OLERU, U.G. 1976. Kidney, liver, hair and lungs as indicators of cadmium absorption. Am. Ind. Hygg. Assoc. J., 37.
- PROSSER, C.L. 1999. Physiological variation in animals. Biol. Rev., 90.
- RICHTER, G. 1972. Fisiología del metabolismo. CECSA. México.
- ROBINSON, E. *et al.* 1970. Global effects of environmental pollution. Reidel. Amsterdam.
- SALDAÑA, L. *et al.* 1981. Identificación analítica de venenos. Anales INIA. Serie agrícola, 15. Madrid.
- SÁNCHEZ BOTIJA, R. 1955. La intoxicación fluorósica de origen industrial en el ganado bovino. Rev. Patr. Biol. An. 1. 2.
- SANZ SA, J.M. 1985. La contaminación atmosférica. MOPU. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 1977. La contaminación agraria. INIA. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. *et al.* 1981. Tratado del Medio Natural. Universidad Politécnica. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 1998. Medio Ambiente y Desarrollo. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 1999. Ingeniería del Medio Ambiente aplicada al Medio Natural Continental. 2.^a edición. Mundi-Prensa. Madrid.
- SHUPE, J.L. *et al.* 1964. Clinical and pathological aspects of fluorine toxicosis in cattle. Ann. of the New York Acad. Sci. 111, 2.
- SHUPE, J.L. *et al.* 1964. The effect of fluorine on dairy cattle II-Clinical and Pathologic effects. Ann. Jour. Vet. Rese. 24, 102.
- SHUPE, J.L. *et al.* 1972. Fluoride toxicity in domestic and wild animals. Clinical toxicol. 5, 2.

- SPEDDING, D.J. 1981. Contaminación atmosférica. Reverté. Barcelona.
- STERN, A.C. 1968. Air pollution. Acad Press. T 1. New York.
- STODDARD, G. *et al.* 1963. Effects of fluorine on dairy cattle. I. growth and feed consumption. Journal of dairy Science XLVI, 10.
- THORPE, W.H. 1956. Learning and instinct in animals. Methuen. London.
- CHARPIN, D. 1984. Le Tabagisme passif. Med. Hyg 42.
- CHOVIN, P. *et al.* 1973. Physicochimie et physiopathologie des polluants atmosphériques. Masson. Paris.
- COLLEY, J.R.T. *et al.* 1981. Pollution atmosphérique et maladies respiratoires chroniques chez les enfants. Rapports et Etudes EURO 28. Bureau régional de l'Europe de l'OMS. Copenhague.

PARTE 11

- ACKERMANN, U. *et al.* 1986. Luftverschmutzung und Atemwegserkrankungen bei Kindern. SPM/MSP, 31.
- BAEHLER, W. 1985. Sources et comportements des principaux polluants atmosphériques. Therapeutische Umschau, 42.
- BARKER, K. *et al.* 1961. Pollution de l'air. Série de monographies 46. OMS. Genève.
- BOGGESE, W.R. *et al.* S.f. Lead in the environment. NSF. Washington.
- CEE. 1988. Directiva 88/160/CEE. Bruselas.
- CEE. 1989. Directiva 89/106/CEE. Bruselas.
- CORREA, P. *et al.* 1983. Passive smoking and lung cancer. Lancet. London.
- DEOUX, P. *et al.* 1993. L'écologie c'est la santé. Frison-Roche Éd. Paris.
- DETRIE, J.P. 1969. La pollution atmosphérique. Dunod. Paris.
- DODGE, R. 1980. The respiratory health of schoolchildren in smelter communities. Am.J.Med, 1.
- ELÍAS, F. *et al.* 1996. Agrometeorología. Mundi Prensa. Madrid.
- FAVEZ, G. 1986. L'impact de la pollution atmosphérique sur le poumon. Schweiz. Medizinische Wochenschrift, 116.
- FONT, I. 1991. El hombre y su ambiente atmosférico. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.

- GUERIN-HENNI, A. 1980. Les pollueurs; luttés sociales et pollutions industrielles. Le Seuil. Collection Points-Politique. Paris.
- GUYOT, J. 1997. Climatologie de l'environnement. Masson. Paris.
- HERMANN, H. 1983. Die Bedeutung komunalen Umweltfaktoren für die Entstehung chronischer Atemwegserkrankungen. Z. Erkr. Atmungsorgane, 161.
- JELAMBI, O. 1988. Manual de seguridad industrial. M.º Educación. Valera (Venezuela).
- LAWThER, P.J. 1962. Epidemiologie de la pollution de l'air. Cahiers de santé publique 15. Organisation mondiale de la santé. Genève.
- LUFTVERSCHMUTZUNG. 1987. Bulletin des médecins suisses, 68.
- MALLOL, J. *et al.* 1987. Determinación de tioéteres urinarios en trabajadores. Mapfre-Seguridad, 28.
- MARTÍN, J. *et al.* 1988. Santé et pollution de l'air. PPUR. Lausanne.
- MAZARRASA, F.O. 1988. Toxicología del mercurio. Mapfre-Seguridad, 29.
- MIRÓN, J.C. 1992. ¿Es saludable el aire que respiramos? Mapfre-Seguridad. 45.
- NUGON-BAUDON, L. *et al.* 1999. Maisons toxiques. Flammarion. Paris.
- OFPE. 1988. Luftverschmutzung und Gesundheit. Schrift. Umwelt. 87.
- OMS. 1958. Pollution de l'air. Série de rapports techniques, 157.
- OMS/EURO. 1985. Les buts de la Santé pour tous 2000. Bureau régional de l'Europe de l'OMS. Copenhague.
- PALOMARES, M. 1988. Aspectos humanos y sociales en Meteorología y Climatología. INM. Madrid.
- PEDROLI, R. 1985. Prävention in Gesundheits- und Umweltpolitik. SPM/MSP, 30.
- PERRUCHOUD, A.P. *et al.* 1985. Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Lungenfunktion. Therapeutische Umschau 42.
- PIERSON, W.E. *et al.* 1984. Air pollutants, bronchial hyperreactivity and exercise. J. Allergy Clin. Immunol., 73
- RAMADE, F. 1979. Écotoxicologie. Masson. Paris.
- RINSKY, R.A. *et al.* 1987. Benzene and leukemia. An epidemiologic risk assessment. New England Journal of Medicine, 316.

-
- ROM, W.N. 1983. The discipline of environmental and occupational medicine. Environmental and Occupational Medicine, Ed. W.N. Rom. Little, Brown and Company. Boston.
 - ROUSSEAU, D. 1992. Environment: l'entreprise s'engage. Ed. D'organisation. Paris.
 - RUTISHAUSER, M. 1985. Einfluss der Luftverschmutzung auf die kindlichen Atemwegserkrankungen. Therapeutische Umschau 42.
 - RYLANDER, R. *et al.* 1984. Environmental tobacco smoke. In: European Journal of Respiratory Diseases, 133.
 - SAMET, J.M. *et al.* 1987. Respiratory effects of indoor air pollution. J.Allergy Clin. Immunol, 79.
 - SCHEIDEGGER, B. 1991. Luftbelastung im Kanton Obwalden. Wanner, A.F.S^t Gallen.
 - SCHLIPKÖTER, H.W. *et al.* 1986. Gesundheitliche Auswirkungen von Luftschadstoffen. SPM/MSP 31.
 - SEOÁNEZ, M. 1999. Ecología industrial: Ingeniería medioambiental aplicada a la industria y a la empresa. 2.^a Edición. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. *et al.* 2001. Tratado de climatología aplicada a la ingeniería medioambiental. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SNELLA, M.C. *et al.* 1984. La fumée de tabac et l'environnement. Médecine et Hygiène, 42.
 - STERN, A.C. 1968. Air Pollution. Academic Press. New York.
 - SUESS, M.J. *et al.* 1978. Manuel de gestión de la calidad de l'air des villes. Publications régionales 1. Bureau régional de l'Europe de l'OMS. Copenhague.
 - WANNER, H.U. 1985. Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit. Ther. Umsch., 42.
 - WANNER, H.U. 1985. Conséquences de la pollution atmosphérique sur la santé. Bull.méd suisses, 66.
 - WANNER, H.U. 1986. Pollution de l'air et santé. SPM/MSP, 31.
 - WEBER, A. 1983. Lüftungsmassnahmen zum Schutze der Passivraucher. Haustechnik-Bauphysik-Umwelttechnik-Gesundheits-Ingenieur, 104.
 - WHO. 1987. Health and Safety Component of Environmental Impact Assessment. WHO-EURO. Copenhagen.

PARTE 12

- ARAUJO, J. 1990. La muerte silenciosa. Ed. Temas de hoy. Madrid.
- BAILLE, A. 1974. La diffusion des polluants dans les basses couches atmospheriques. INRA. Montfavet.
- BARNAUD, G. *et al.* 1974. L'effect du vent dans les ensembles construits. Metropolis, 6.
- BASTIE, J. *et al.* 1980. L'espace urbain. Masson. Paris.
- BMA. 1998. Health & environmental impact assessment. Earthscan Pub. Ltd. London.
- CCE. 1990. Libro verde sobre el medio urbano. Of. Pub. Bruselas.
- ERIKSEN, W. 1964. Beiträge zum Stadtklima von Kiel. Geographisches Institut, Universität Kiel.
- ESCOURROU, G. 1981. Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat. Masson. Paris.
- FONT, I. 1991. El hombre y su ambiente atmosférico. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.
- FREY, C. *et al.* 1987. Die Zürcher Luft: giftig und gefährlich. Tages-Anzeiger Magazin, 13.
- KUR, F. 1998. Bauen und Wohnen mit Naturbaustoffen. Compact Verlag. München.
- LÓPEZ, A. *et al.* 1988. El clima urbano de Madrid: La isla de calor. Inst. de Economía y Geografía Aplicadas. C.S.I.C. Madrid.
- LÓPEZ, F. *et al.* 1992. Geografía física. Ediciones Cátedra.
- LORA, F de. *et al.* 1978. Técnicas de defensa del medio ambiente. Labor.
- MARTIN, J. *et al.* 1988. Santé et pollution de l'air. PPUR. Lausanne.
- MATHYS, H. *et al.* 1980. Klima und Lufthygiene im Raum Bern. Geographica Bernensia, G 12. Berna.
- OKE, T.R. 1974. Review of urban climatology 1968-1973. World Meteorological Organization. WMO Tech. Note n.º 134. Ginebra.
- PEDROLI, R. 1985. Prävention in Gesundheits- und Umweltpolitik. SPM/MSP, 30.
- ROTEN, M. 1979. Le climat urbain et suburbain de Fribourg. Ed. Universitaires. Fribourg.
- SANGRA, E. 1987. Circulation et pollution de l'air dans les grandes villes suisses: analyse et stratégie

- communale de lutte. Cahiers de l'Institut des Hautes Etudes en Administration Publique (IDHE-AP), 38. Lausanne.
- SCHEIDEGGER, B. 1991. Luftbelastung im Kanton Obwalden. Wanner, AG. S^t Gallen.
 - SCHLIPKÖTER H.W. *et al.* 1986. Gesundheitliche Auswirkungen von Luftschadstoffen. SPM/MSP, 31.
 - SEOÁNEZ, M. 2001. Tratado de gestión del medio ambiente urbano. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. *et al.* 2001. Tratado de climatología aplicada a la ingeniería medioambiental. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SHAW, W. 1987. Air pollution by particles. *Sci. Amer.*, 457.
 - WANNER, H. 1983. Stadtklimatologie und Stadtklimastudien in der Schweiz. Jahrbuch der SNG. Wissenschaftlicher Teil.
 - WANNER, H. *et al.* 1984. Studies of Urban Air Pollution in Switzerland. American Meteorological Society.
 - WANNER, H.U. 1985. Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit. *Ther. Umsch.* 42.
- PARTE 13**
- ANDELMAN, J.B. 1985. Human Exposure to Volatile Halogenated Organic Chemicals in Indoor and Outdoor Air. *Env. Health Persp.*, 62.
 - BOGGESS, W.R. *et al.* S.f. Lead in the environment. NSF. Washington.
 - CHAIB, J. 2000. Écocitoyen au quotidien. Sang de la terre. Paris.
 - DAVIS, M.L. 1991. Environmental engineering. Mc Graw-Hill. New York.
 - DEOUX, P. *et al.* 1993. L'écologie c'est la santé. Frison-Roche Éd. Paris.
 - FINNEGAN, M.J. *et al.* 1986. Building related illness. *Clinical Allergy*, 16.
 - GUILLEMIN, M. *et al.* 1987. The Indoor Asbestos Problem: Facts and Questions. *Advances in Aerobiology*. Eds. G. Boehm and R.M. Leuschner Birkhauser Verlag. Basel.
 - KASPERSON, R.E. 1983. Acceptability of Human Risk. *Env. Health Persp.*, 52.
 - KILBURN, K.H. *et al.* 1985. Asbestos Disease in Family Contacts of Shipyard Workers. *Am. Ind. J. Publ. Health*, 75.

- KUHN, M. 1982. Belastung der Raumluft durch Formaldehyd. Swiss Chem., 4.
 - KUISHOWY, B. 1986. Transmission of Occupational Disease to Family Contacts. Am. J. Ind. Med., 9.
 - KUR, F. 1998. Bauen und Wohnen mit Naturbaustoffen. Compact Verlag. München.
 - LAUWERYS, R.R. 1982. Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles. Ed. Masson. Paris.
 - LORA, F de. *et al.* 1978. Técnicas de defensa del medio ambiente. Labor.
 - MARTÍN, J. *et al.* 1988. Santé et pollution de l'air. PPUR. Lausanne.
 - MORIN, P. *et al.* 1999. La maison du bien-être. Éd. du Dauphin. Paris.
 - NEVERS, N. de. 1995. Air pollution control engineering. Mc Graw-Hill. New York.
 - NUGON-BAUDON, L. *et al.* 1999. Maisons toxiques Flammarion. Paris.
 - SAMET, J.M. *et al.* 1987. Respiratory effects of indoor air pollution. J. Allergy Clin. Immunol, 79, n.º 5.
 - SCHMITZ-GUNTHER, T. 1999. Eco-logis. Könenmann. Köln.
 - SEOÁÑEZ, M. *et al.* 2001. Tratado de climatología aplicada a la ingeniería medioambiental. MundiPrensa. Madrid.
 - SKOV, P. *et al.* 1987. The sick building syndrome in the office environment. The Danish town hall study. Indoor Air 87. Proceedings of the 4th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 2. Berlin.
 - THIERRY, S. *et al.* 1999. La maison des (néga) wats. Terre Vivante. Mens.
 - WHORTON, M.D. *et al.* 1987. Investigation and work-up of tight building syndrome. J. Occup. Med., 29, n.º 2.
- PARTE 14**
- BOGGESS, W.R. *et al.* S.f. Lead in the environment. NSF. Washington.
 - CHAIB, J. 2000. Écocitoyen au quotidien. Sang de la terre. Paris.
 - CHEREMISINOFF, P.N. *et al.* 1977. Air Pollution Control and Design Handbook. M.Dekker. New York.
 - DAVIS, M.L. 1991. Environmental engineering. Mc Graw-Hill. New York.

- DETRIE, J.P. 1969. La pollution atmosphérique. Dunod. Paris.
 - DIAZ, J. 1998. Medidas correctoras de las emisiones de polvo. Retema, 65.
 - EPA. 1982. Control techniques for particulate emissions. EPA 450/3-81/005 a.
 - KUR, F. 1998. Bauen und Wohnen mit Naturbaustoffen. Compact Verlag. München.
 - LICHT, W. 1980. Air Pollution Control Engineering. M.Dekker. New York.
 - LORA, F de *et al.* 1978. Técnicas de defensa del medio ambiente. Labor. Madrid.
 - NEVERS, N. de. 1995. Air pollution control engineering. Mc Graw-Hill. New York.
 - PLASTOQUÍMICA. 1996. Los biofiltros. Retema, 52.
 - ROUSSEAU, P. *et al.* 2000. Valeur environnementale de l'énergie. PPUR. Lausanne.
 - SEOÁNEZ, M. 1997. Ingeniería Medioambiental Aplicada. Casos prácticos. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. 1998. Medio Ambiente y Desarrollo. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. 1999. Ingeniería del Medio Ambiente aplicada al Medio Natural Continental. 2ª edición. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. 1999. Residuos: Problemática, descripción, manejo, aprovechamiento y destrucción. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. 2001. Tratado de gestión del medio ambiente urbano. Mundi-Prensa. Madrid.
 - STERN, A.C. 1968. Air Pollution. Academic Press. New York.
 - THEODORE, L. *et al.* 1976. Industrial Air Pollution Control Equipment. CRC Press. Cleveland.
 - VEIGA, María C. *et al.* 1996. Tecnologías actuales para el tratamiento de aire contaminado con COV. Retema, 55.
 - WESTMAN, W.E. 1985. Ecology, impact assessment, and environmental planning. Willey. Ed. New York.
- PARTE 15**
- BLACK, T.A. *et al.* 1971. Psychrometric apparatus for Bowen-ratio determination over forests. Boundary-Layer Meteorol., 2.

- BLANEY, H.F. *et al.* 1950. Determining water requirements in irrigate areas from climatological and irrigation data, USDA. Soil Conservation Service, TP-96.
- BRIGGS, G.A. 1969. Plume Rise. U.S. Atomic Energy Commission. Washington, DC.
- CATSKY, J. 1970. Méthodes et techniques de mesure de la concentration en anhydride carbonique dans l'air, in Techniques d'Étude des Facteurs Physiques de la Biosphère. INRA. Paris.
- COULSON, K.L. 1975. Solar and terrestrial radiation, methods and measurements, Academic Press. New York.
- CRETINON, B. 1994. Définition des principaux paramètres utilisés en hygrométrie. Bulletin du Bureau National de Métrologie, 25.
- DETRIE, J.P. 1969. La pollution atmosphérique. Dunod. Paris.
- DOORENBOS, J. *et al.* 1975. Les besoins en eau des cultures. Bulletin d'irrigation et de drainage 24. FAO. Rome.
- ELÍAS, F. *et al.* 1996. Agrometeorología. Mundi Prensa. Madrid.
- FORSDYKE, A.G. 1970. Meteorological factors in air pollution. WMO, Genève, Technical note 114.
- FREEMAN, H. *et al.* 1992. Industrial Pollution Prevention: A Critical Review. J. Air Waste Manage. Assoc., 42.
- FRITCHEN, L.J. *et al.* 1979. Environmental instrumentation. Springer Verlag. New York.
- GUYOT, J. 1997. Climatologie de l'environnement. Masson. Paris.
- HANNA, S.R. 1971. «A Simple Model for Calculating Dispersion from Urban Area Sources», J. Air Pollut. Control Assoc., 21.
- HANNA, S.R. *et al.* 1982. «Handbook on Atmospheric Diffusion», DOE/TIC-11223.
- HEWSON, E.W. 1945. The Meteorological Control of Atmospheric Pollution by Heavy Industry. Quarterly J. Royal Meteorolog., 71
- HOLMES, D.R. 1985. Dewpoint Corrosion, Ellis Horwood, Ltd., Chichester, England.
- JACCARD, G. *et al.* 1976. Etude de la pollution atmosphérique de la Ville de Lausanne. Ville de Lausanne.
- KLOCKE, N.F. *et al.* 1985. Measurement of evaporation and transpiration with lysimeters. Trans. ASAE, 28.
- LONG, L.F. *et al.* 1968. The measurement of environmental factors

- in terrestrial ecology. Biological Engineering Society Symposium n.º 8. WBS. Oxford.
- LORA, F de *et al.* 1978. Técnicas de defensa del medio ambiente. Labor. Madrid.
 - MARTIN, D.O. 1976. Comment on The Change of Concentration Standard Deviations with Distance. J. Air Pollut. Control Assoc., 26.
 - MARTIN, J. *et al.* 1988. Santé et pollution de l'air. PPUR. Lausanne.
 - MCCREADY, P.B. 1966. Mean wind speed measurements in turbulence. J.Appl. Meteorol., 5.
 - MILLÁN, M.M. *et al.* 1987. Experimental Characterization of Atmospheric Diffusion in Complex Terrain with Land-Sea Interactions. J.Air Pollut. Control Assoc., 37.
 - NEHLS, G.J. *et al.* 1973. Procedures for handling aerometric data. Journal of Air Pollution Control Association, 23.
 - NEVERS, N. de. 1995. Air pollution control engineering. Mc Graw-Hill. New York.
 - OMM. 1990. Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques. OMM n.º 8. Ginebra.
 - OTT, W. *et al.* 1981. Measuring air quality levels inexpensively at multiple locations by random sampling. Journal of Air Pollution Control Association, 31.
 - OWER E. *et al.* 1966. The measurement of air flow. Pergamon. Oxford.
 - PERLAT, A. *et al.* 1961. Mesures en météorologie. Gauthier-Villars. Paris.
 - ROTHEN, R. 1985. Les émissions de polluants atmosphériques en Suisse: proportions, évolution et mesures prises jusqu'à présent. Bull. OFPE, 1.
 - SEINFELD, J.M. 1988. Ozone Air Quality Models: A Critical Review. J. Air Pollut. Control Assoc., 38.
 - SEOÁNEZ, M. 1998. Medio Ambiente y Desarrollo. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. 1999. Ecología industrial: Ingeniería medioambiental aplicada a la industria y a la empresa. 2ª Edición. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. 1999. Ingeniería del Medio Ambiente aplicada al Medio Natural Continental. 2ª edición. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. *et al.* 2001. Tratado de climatología aplicada a la

- ingeniería medioambiental. Mundi Prensa. Madrid.
- SKOOG, D.A. *et al.* 1971. Principles of instrumental analysis. Holt, Rinehart and Winston. New York.
 - SMITH, M.E. *et al.* 1975. Improvement of Ambient Sulfur Dioxide Concentrations by Conversion from Low to High Stacks. J.Air Pollut. Control Assoc., 25.
 - STERN, A.C. 1968. Air pollution. Acad. Press. New York.
 - WENTZ, C.A. 1989. Hazardous Waste Management. McGraw-Hill. New York.
 - CRAWFORD, M. 1976. Air Pollution Control Theory. McGraw-Hill. New York.
 - DAVIS, M.L. 1991. Environmental engineering. Mc Graw-Hill. New York.
 - DETRIE, J.P. 1969. La pollution atmosphérique. Dunod. Paris.
 - KLEIN, M. 1991. The Diesel Revolution. American Heritage of Invention and Technology., 6.
 - LIDE, D.R. 1990. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 71 ed. CRC Press. Boca Raton.
 - MARTÍN, J. *et al.* 1988. Santé et pollution de l'air. PPUR. Lausanne.
 - NEVERS N. de. 1995. Air pollution control engineering. Mc Graw-Hill. New York.
 - SANTOS, J. 1998. Los sistemas predictivos de contaminación atmosférica. Retema, 65.
 - SEINFELD, J.H. 1975. Air pollution, Physical and Chemical Fundamentals. McGraw-Hill. New York.
 - SEOÁÑEZ, M. 1997. Ingeniería Medioambiental Aplicada. Casos prácticos. Mundi Prensa. Madrid.
 - SEOÁÑEZ, M. 1998. Ingeniería medioambiental aplicada a la reconversión industrial y a la restau-
- PARTE 16**
- AGARWAL, J.C. *et al.* 1981. Preliminary Economic Analysis of SO₂ Abatement Technologies, in T.C. Chatwin and N.Kikumoto (eds.), Sulfur Dioxide Control in Pyrometallurgy, The Metallurgical Society of AIME. Warrendale.
 - AYMERICH, M. *et al.* 1997. EMMA. Sistema integrado de medida, predicción e información medioambiental en áreas metropolitanas. Retema, 57.
 - CAMPBELL, I.M. 1986. Energy and the Atmosphere, 2d ed. John Wiley & Sons. New York.

- ración de paisajes industriales degradados: Casos Prácticos. Mundi Prensa. Madrid.
- SEOÁNEZ, M. 1998. Medio Ambiente y Desarrollo. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. 1999. Ingeniería del Medio Ambiente aplicada al Medio Natural Continental. 2.^a edición. Mundi-Prensa. Madrid.
 - STERN, C. 1968. Air pollution. Academic Press. New York.
 - THOMAS, A. 1988. Automotive Fuels, in C.Arcoumanis (ed.), Internal Combustion Engines. Academic Press. London.
 - WARK, K. *et al.* 1981. Air Pollution, Its Origin and Control, 2nd Edition. Harper & Row. New York.
 - SEOÁNEZ, M. 1998. Medio Ambiente y Desarrollo. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. 1999. Ecología industrial: Ingeniería medioambiental aplicada a la industria y a la empresa. 2.^a Edición. Mundi-Prensa. Madrid.
 - SEOÁNEZ, M. 1999. Manual de gestión medioambiental de la empresa: Sistemas de gestión medioambiental, auditorías medioambientales, evaluaciones de impacto ambiental y otras estrategias. Mundi-Prensa. Madrid.
 - STERN, A.C. 1968. Air Pollution. Academic Press. New York.
 - WESTMAN, W.E. 1985. Ecology, impact assessment, and environmental planning. Willey Ed. New York.

PARTE 17

- BOGGESS, W.R. *et al.* S.f. Lead in the environment. NSF. Washington.
- CHANLETT, E.T. 1979. Environmental Protection. 2^a ed. Mc Graw-Hill. New York.
- DETRIE, J.P. 1969. La pollution atmosphérique. Dunod. Paris.
- NEVERS N. de, 1995. Air pollution control engineering. Mc Graw-Hill. New York.

PARTE 18

- ATKINSON, S.E. *et al.* 1992. Econometric Health Production Functions: Relative Bias from Omitted Variables and Measurement Error. Journal of Environmental Economics and Management, 22.
- AZQUETA, D. 1996. Valoración económica de la calidad ambiental. Mc Graw-Hill. Madrid.

- AZQUETA, D. *et al.* 1993. Análisis económico y gestión de recursos naturales. Alianza Editorial. Madrid.
- BARANZINI, A. *et al.* 1992. The Physical Environment, the Economy and Sustainable Development. Fourth Annual International Conference of The Society for the Advancement of Socio-Economics. Irvine.
- BRADEN, J.B. *et al.* 1991. Measuring the Demand for Environmental Quality, North Holland. Amsterdam.
- COLBY, M.E. 1991. La administración ambiental en el desarrollo: evolución de los paradigmas. El Trimestre Económico, LVIII, 3.
- CROCKER, T.D. *et al.* 1993. Dynamic inconsistency in valuing environmental goods. Ecological Economics, 7.
- DASGUPTA, P. *et al.* 1991. The environment and Emerging Development Issues. World Bank Development Review.
- EUROSTAT. 1979. Système européen de comptes économiques intégrés (Sec). Office statistique des Communautés Européennes. Luxembourg.
- EUROSTAT. 1990. Système européen de rassemblement de l'information économique sur l'environnement. OSCE. Bruselas.
- FERREIRO, A. *et al.* 1992. Evaluación económica de los costes y beneficios de la mejora ambiental. Monografías de Economía y Medio Ambiente No.4. Agencia de Medio Ambiente. Sevilla.
- FOLMER, H. *et al.* 1991. Environmental Problems and Policy in the Single European Market. Environmental & Resource Economics, 1.
- FRANK, R.H. 1992. Microeconomía y conducta. McGraw-Hill. Madrid.
- FREEMAN III, A.M. 1993. The measurement of environmental and resource values: Theory and methods. Resources for the future. Washington.
- FRI, R.W. 1991. Sustainable Development: Principles into Practice. Resources, No 2.
- FRITSCH, B. 1990. Evolutionsökonomische Aspekte des Energie- und Umweltproblems. Referat anlässlich der Sitzung des Temporären Arbeitskreises Evolutorische Ökonomik in Freiburg.
- GREPPIN, H. 1990. La nouvelle donne écologique. Campus No 5. Université de Genève.

-
- HANLEY, N. *et al.* 1991. Wilderness development decisions and the Krutilla-Fisher model: the case of Scotland's «flow country». *Ecological Economics*, 4.
 - HAUSER, J.A. 1990. Bevölkerungs- und Umweltprobleme der Dritten Welt. Band 1. Verlag Paul Haupt. Bern.
 - HEDIGER, W. 1991. Opportunitätskosten der Umweltverschmutzung – Eine dynamische ökologisch-ökonomische Analyse. Rüegger. Chur.
 - KNOEPFEL, I. 1990. Der Stoffhaushalt der Schweiz – materielle Austausch – Beziehung zwischen Ökonomie und Umwelt. Memo, Paul Scherrer Institut. Villigen.
 - KÜMMEL, R. *et al.* 1991. Heat Equivalents of Noxious Substances: A Pollution Indicator for Environmental Accounting. *Ecological Economic*, 3.
 - KYPREOS, S. 1990. Energy Scenarios for Switzerland and Emission Control, Estimated with a Normative Model. PSI-Bericht No 70. Paul Scherrer Institut. Villigen.
 - LORA, F de. *et al.* 1978. Técnicas de defensa del medio ambiente. Labor.
 - MÄLER, K.G. 1991. National Accounts and Environmental Resources. *Environmental and Resource Economics*, 1.
 - MARTÍN, J. *et al.* 1988. Santé et pollution de l'air. PPUR. Lausanne.
 - MEADOWS, D.H. *et al.* 1992. Beyond the limits: Global Collapse or a Sustainable Future. Earthscan. London.
 - NORDHAUS, W.D. 1993. Reflections on the Economics of Climate Change. *Journal of Economic Perspectives*, 7.
 - OATES, W.E. *et al.* 1991. Economic Incentives for Controlling Greenhouse Gases. *Resource*, 103.
 - OSTRO, B.D. 1983. The effects of air pollution on work loss and morbidity. *Journal of environmental economics and management*, 10.
 - PEARCE, D. *et al.* 1990. Economics of natural resources and the environment. Harvester Wheatsheaf. London.
 - PEARCE, D. *et al.* 1990. Sustainable Development. Earthscan Publication Ltd. London.
 - PILLET, G. 1990. Analyse du rôle de l'environnement dans les macro-processus économiques. Rapport FNRS. Genève.

- PILLET, G. 1991. Coûts de la pollution de l'air en Suisse: avant et après le Clean Air Concept. DISP 105.
- PILLET, G. 1993. Économie écologique. Georg Ed.Ginebra.
- PILLET, G. *et al.* 1985. Fragments d'écologie humaine. Castella, Albeuve et Éditions de l'Université de Bruxelles. Bruxelles.
- PILLET, G. *et al.* 1987. Environmental Economics: The Analysis of a Major Interface. R. Leimgruber. Geneva.
- PILLET, G. *et al.* 1991. Revue critique du modèle. «ECCO» et proposition d'un module environnement. Papier TM-52-91-01. Paul Scherrer Institute. Villingen.
- PILLET, G. *et al.* 1992. The Economics of Global Warming – National and International Climate Policy: The Requisites for Switzerland. Rapport PSI. Paul Scherrer Institut. Villigen.
- SANZ, J.M. 1991. La contaminación atmosférica. U.T.A. MOPT. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 1998. Ingeniería medioambiental aplicada a la reconversión industrial y a la restauración de paisajes industriales degradados: Casos Prácticos. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 1998. Medio Ambiente y Desarrollo. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 1999. Ecología industrial: Ingeniería medioambiental aplicada a la industria y a la empresa. 2.^a Edición. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁÑEZ, M. 1999. Manual de gestión medioambiental de la empresa: Sistemas de gestión medioambiental, auditorías medioambientales, evaluaciones de impacto ambiental y otras estrategias. Mundi-Prensa. Madrid.
- STEPHAN, G.R. *et al.* 1991. Klimaschutz im Alleingang – der richtige Weg für die Schweiz. Gaia, 1.
- TIETENBERG, T. 1992. (Third Edition). Environmental and natural resource economics. Harper Collins. New York.
- VILLET, M. 1990. Limites et grandeur de l'économie politique, in: Les sciences économiques et sociales – Evolution et perspectives. Editions Universitaires. Fribourg.
- WALKER, H.S. 1991. Qualité des eaux potables: situation en Suisse et dans le canton de Fribourg, in: Actes des IV rencontres romandes Recherche-Environnement. Yverdon.

- WALTHER, A. 1990. Die Folgekostenrechnung von Umweltschäden. Erweiterung des Volkswirtschaftlichen Rechnungswesens am Beispiel der Schweiz. Dissertation der Hochschule St-Gallen. No 1209. Difo-Druck GmbH. Bamberg.

PARTE 19

- ARENAS, J.A. 2000. Diccionario Técnico Jurídico del Medio Ambiente. McGraw-Hill. Madrid.
- ORTEGA, L. 1998. Lecciones de derecho del medio ambiente. Lex Nova. Madrid.
- PERALES, M. 2000. Derecho español del medio ambiente. Civitas. Madrid.
- PÉREZ, J. 1995. Legislación ambiental. Comares. Granada.
- SEOÁNEZ, M. 1985. Planificación y control de la contaminación ambiental. Itsemp. Mapfre. Madrid.
- SEOÁNEZ, M. 1997. El Medio Ambiente en la Opinión Pública. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁNEZ, M. 1999. Ecología industrial: Ingeniería medioambiental aplicada a la industria y a la empresa. 2.^a Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁNEZ, M. 1999. Manual de gestión medioambiental de la empresa: Sistemas de gestión medioambiental, auditorías medioambientales, evaluaciones de impacto ambiental y otras estrategias. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁNEZ, M. 1999. Residuos: Problemática, descripción, manejo, aprovechamiento y destrucción. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁNEZ, M. 2000. Manual de contaminación marina y restauración del litoral. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁNEZ, M. 2000. Tratado de reciclado y recuperación de productos de los residuos. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁNEZ, M. 2001. Tratado de gestión del medio ambiente urbano. Mundi-Prensa. Madrid.
- SEOÁNEZ, M. *et al.* 2001. Tratado de climatología aplicada a la ingeniería medioambiental. Mundi-Prensa. Madrid.
- VARIOS. 1997. Actividades molestas y otras normas medioambientales. Civitas. Madrid.
- VARIOS. 1998. Ordenanza del medio ambiente. Civitas. Madrid.
- VARIOS. 2000. Legislación sobre medio ambiente. Civitas. Madrid.
- ZAMORA, J. 1995. II Congreso Nacional de Medio Ambiente. Colegio Oficial de Físicos. Madrid.

ÍNDICE ALFABÉTICO

A

- ACE, 899
Acerías, 157
Acido clorhídrico, 117
ACNAT, 899
Activadores, 474
Acumulación, 410
ADP, 420
Advección, 299, 315
AENOR, 903
Aerografía textil, 636
Aeronáutica (industria), 159
Afelio, 248
Aforadores *Bergerholl*, 793
Aforadores *Owen*, 495, 793, 798
Agencia Europea del Medio Ambiente, 61, 369, 371, 380, 437 a 439
Agricultura ecológica, 56
Aguanieve, 266, 268
AIG, 899
Albedo, 165, 249, 329, 684
Alquilación, 202
Altitud continental (efectos), 308
Altura de mezcla, 315
Aluminio, 615, 669
Alveolización, 388
Alveolos pulmonares, 626, 628
AMA, 919 a 921
Amalgamas, 114
Amianto, 657
Anabolismo, 485
Análisis microquímico, 801
Andes, 619
Anemómetros, 811 a 813
Angel Azul, 902
Anillos *Raschig*, 727
Animales de compañía, 599
Antorcha, 160, 742 a 744
Antropocéntrico, 75
Antroposistemas, 76
Año sin verano, 166
Aparato de *Williard y Winter*, 524, 525
Apoenzimas, 473
Ardystil (síndrome), 636
Areas industriales (entorno), 873
Armley, 657
Arsénico, 124, 547, 611 a 613, 670, 803
Asbestosis, 78, 644, 657, 658
Asegurado, 907
Asegurador, 907
Aspirador *Söderman*, 797
At-(indicadores ambientales), 141, 372 a 374, 380, 381
Atmósfera estándar aeronáutica, 304
Atmósfera real, 304
ATP, 417, 420, 485, 488
Atrición, 745

Auditoría medioambiental, 922
 Autotrofos, 488
 Auxinas, 518
 Avalanchas de aire frío, 289
 Avifauna, 592

B

Banco Mundial, 899
 Basura espacial, 180
 BATNEEC, 905
 BEI, 899
 Benceno, 103, 124, 128, 178, 203, 547, 671
 BERD, 899
 Berilio, 115, 670
 Bhopal, 53, 624
 Bioantropocéntrico, 75, 76
 Biocatalizadores, 473
 Biocéntrico, 75
 Biocombustibles, 211 a 215
 Biodiversidad, 917
 Biofiltración, 734, 748, 749, 752
 Biogás, 187 a 189, 861
 Bioindicadores, 848, 849, 885
 Biomasa, 211 a 215, 225, 347 a 350, 619
 Bomba de inyección, 177
 Brisas 289 a 292, 681, 683, 686, 820
 Bromo, 118
 Bromuro de metilo, 784, 785
 Buques metaneros, 208
 Burgos, 49

C

Cadenas alimentarias, 410 a 412
 Cadmio, 115, 128, 157, 614, 656, 657
 Calabobos, 264
 Calderería, 157
 Cámaras de separación por inercia, 724
 Cáncer de cuello de útero, 672
 Cáncer de escroto, 78
 Cáncer de esófago, 672
 Cáncer de labio, 382

Cáncer de las glándulas salivales, 382
 Cáncer de piel, 670, 801
 Cáncer de próstata, 670
 Cáncer de vejiga, 78, 643
 Cáncer nasal, 670, 672
 Capa de rozamiento, 287
 Capa de superficie, 295
 Capa límite, 294
 Captador, 721, 722
 Carbuco, 195
 Carbón activo, 769, 770, 795
 Carbonífero, 47, 193
 Carboxihemoglobina, 596, 602, 624, 635, 647, 665
 Carbuco, 624, 638
 Cardado, 159
 Cariocinesis, 545
 Catabolismo, 485
 Cataratas oculares, 382
 Caucho, 393
 Célula de *Hadley*, 313
 Células de *Ferrel*, 313
 Células oclusivas, 478, 484, 491, 540, 581
 Células tormentosas, 258, 259
 Celulosa (industria), 159
 Cemento (industria), 159, 160, 496 a 499, 878
 Central Térmica de As Pontes, 829
 Centre de Prospective et de Veille Scientifique, 929
 Centro Europeo de Coordinación Química, 833
 Certificados, 933
Chaqueo, 173
 Chichón, 167, 168
 Chimeneas, 65, 73, 103, 178, 198, 320, 701, 723, 724, 793, 842, 875, 876
 Chirimiri, 264
 Chubascos, 263 a 265
 Ciclo de *Calvin*, 533
 Ciclo de *Krebs*, 478, 510
 Ciclones, 725, 726, 731
 CIEMAT, 367
 Cierzo, 569
 Cinarra, 266

- Cinc, 116, 158
 Cintura cálida, 289
 Circuito térmico, 183
 Cloro, 117, 166, 579, 584, 585, 781
 Cloroplasto, 478, 497, 517, 539
 Coalescencia, 259, 260, 267, 727, 730
 Coeficiente de extinción, 275, 276
 Coeficientes de difusión de *Palluch*, 447
 Coenzimas, 473
 Cohetes, 180
 Cok, 157, 160
 Colesterol, 673, 693
 Colmena, 594, 595
 Color de los edificios, 683, 684
 Columna eruptiva, 163
 Columnas (lavado), 735, 736
 Comburente, 161
 Complejo arcillo-húmico, 350
 Conciencia ecológica, 897
 Condensación, 242, 252, 252, 254, 255, 256, 258, 259, 292, 727, 734, 747, 748, 752, 767, 768, 795
 Condensadores, 727, 767, 768
 Condriosomas, 478
 Conferencia de Kioto, 67
 Conferencia de Río, 60
 Conferencias de las Partes, 362, 363
 Conferencias mundiales sobre el clima, 359 a 363, 777 a 781
 Confort, 703, 708
 Conímetros, 799
 Constante de *Plank*, 246
 Constante de *Stefan-Boltzmann*, 236, 249
 Constante de *Stevens*, 146
 Constante de *von Karman*, 296, 300, 450
 Constante de *Weber-Fechner*, 146
 Constantes de disociación, 97
 Consumidores, 410, 412, 570, 597
 Contaminación atmosférica transfronteriza, 434
 Convenio de Ginebra, 68, 833
 Convenio de Viena (ozono), 781
 Conversión secundaria, 202
 Convertidor analógico / numérico, 806
 Corion, 79

Corpus Iuris Cicilis, 49
 Corrosión, 392, 393
 Cortavientos, 309 a 311, 567 a 570
 Cortejo Medio Específico, 852
 Cortinas vegetales, 567 a 570
Counterblaste to Tobacco, 49
 Craking, 103, 122, 160, 201, 202
 Crecimiento económico, 929, 930
 Cretácico, 47
 Criolitas, 106, 106
 Criosfera, 325
 Crisálidas, 79
 Crisis del petróleo de 1973, 699
 Crisis medioambiental, 897
 Cromo, 115, 669
Crossover effect, 272
 Cuanto, 233, 246
 Cultivares, 583, 586
 Cultivos celulares, 849, 850
 Cumbre de Kioto, 360 a 362, 365
 Cumbre de la Tierra, 360

D
 Decapado, 114, 157
 Declaración de Río, 67
 Declaración medioambiental, 922
 Déficit de saturación, 809
Degradative metabolism, 485
 Densidad de vapor, 226
 Deriva continental, 326, 327
 Deriva de cero, 806
 Descomponedores, 411, 570
 Desengrasado, 158
 Deshollinadores, 78
 Desnaturalización, 474
 Desodorantes, 125
 Desorción, 737, 738, 742, 766
 Destilación, 201
 Detritívoros, 411
 Diámetro de corte, 725
 Dioxinas, 54, 128, 181, 191, 599, 673
 Directiva CIC, 69

Directivas de la Unión Europea, 61
 Dispersión de *Rayleigh*, 275
 Dispersión *Mie*, 276
 Distribución espectral, 247
 Diversidad, 56
 DNA, 383, 418, 420, 476
Dobris (informe), 371
 Domos, 207
 Donora, 50
 Dosis de materia perturbadora corregida, 446
 Dosis media corregida, 446

E

ECLAIR, 899
 Ecosistemas industriales, 400 a 402
 Ecuación de *Antoine*, 748
 Ecuación de *Clapeyron-Clausius*, 237, 238
 Ecuación de *Laplace*, 235, 304
 Ecuación de *Poisson*, 235
 Ecuación de *Sutton*, 447, 450, 558, 559
 Ecuación del balance de energía, 236
 EESC, 379, 380
 Efecto de fertilización aérea, 348
 Efecto *Devaux*, 480
 Efecto dominó, 47, 906
 Efecto *Joule*, 810
 Efecto *Pasteur*, 531, 532
 Efecto *Peltier*, 808
 Efecto *Thomson*, 808
 Efecto *Volta*, 808
 Efectores, 474
 Eficacia de un sistema de tratamiento de contaminantes atmosféricos, 719, 729
 Eficiencia de lavado, 455
 Egocéntrico, 75
 EIA, 923 a 925
 Elasticidad, 400
 Electrodo emisores, 728
 Electrofiltros, 728 a 730
 Electrónica (industria), 159
 EMMA, 834, 835, 837

Energía, 233 a 243
 Energía geotérmica, 205
 Energía nuclear, 118, 119
 Enfermedad de *Alzheimer*, 694
 Enfermedad de *Parkinson*, 694
 Enfermedad en placas, 388
 Enmascaradores, 763
 Entomofauna, 591, 592
 Eoceno, 47
 Epidemiología, 694
 Equilibrio sulfitos-sulfatos, 509
 Equinoccios, 247
Equivalent Effective Stratospheric Chlorine, 379, 380
 Era Cuaternaria, 48, 193
 Era Primaria, 47, 193
 Era Secundaria, 47
 Era Terciaria, 47, 48, 193
 ERLAP, 838
 Erupciones volcánicas, 163 a 168, 224, 232, 329, 330, 334, 335
 Escala de *Beaufort*, 811
 Escala de *Ringelmann*, 794, 800
 Escala óptima de *Daly*, 918
 Escorias del aluminio, 185
 Esferas de *Lieja*, 793, 798
 EsIA, 925
 Espectrómetro de correlación, de *Barringer*, 854
 Esporas, 170, 251
 Espumas de poliuretano, 782
 Estaño, 114, 158, 761
 Estrategia sobre el CO₂ /Automóvil, 64, 65
 Estratopausa, 227
 Estratosfera, 227, 228, 377, 530, 651
 Estrés 572 a 576, 585, 586, 640, 692 a 694
 EUROSTAT, 370, 380, 436, 437, 439
 Evaluación medioambiental, 922
 Evolución de la intensidad de un haz de luz en la distancia, 133, 134
 Exitancia atmosférica, 249
 Exosfera, 229
 Exósmosis, 494
 Expectoración, 625

F

- Factor de descontaminación, 719
 Factor de lavado, 269
 Factor de pesada, 847
 Factores de combustión, 174
 Factores de crecimiento, 577 a 586
 Factores de efecto, 407
 Factores de estrés, 572 a 576
 Factores de exposición, 407
 Factores de intoxicación en la fluorosis, 603 a 606
 Factores de lucha contra los olores, 764
 Factores determinantes de resistencia, 585, 586
 Fallas, 207
 Fases de combustión de la biomasa, 213
 FEDER, 899
 Fel d I, 599
 Fenómeno de *Bergeron-Findeisen*, 253, 266
 FEOGA, 899
 Fiabilidad, 806
 Fibras textiles, 394
 Fibrocitosis pulmonar, 643
 Fidelidad, 806
 Filtros de mangas, 728
 Flujo energético terrestre, 247
Foehn, 254, 820
 Formaldehído, 703
 Fórmula de *Alt*, 239
 Fórmula de *Bosanquet*, 558, 559
 Fórmula de *Brutsaert*, 249
 Fórmula de *Calder*, 450
 Fórmula de *Dupré*, 238
 Fórmula de eficacia de absorción, 735
 Fórmula de *Fechner*, 146
 Fórmula de *Guderian*, 506
 Fórmula de *Guyot y Elejabeitia*, 568
 Fórmula de *Laplace*, 287, 301
 Fórmula de *Lapple*, 725
 Fórmula de *Larsen y Heck*, 448
 Fórmula de *Lettau*, 319
 Fórmula de *Magnus*, 238
 Fórmula de *O'Gara*, 448
 Fórmula de *O'Gara y Thomas*, 504
 Fórmula de *Pasquill*, 318
 Fórmula de *Plata-Arya*, 301
 Fórmula de *S.R. Hanna*, 320
 Fórmula de *Smoluchowski*, 133
 Fórmula de *Stratmann*, 448, 505
 Fórmula de *Tetens*, 238
 Fórmula de *Thomas y Hill*, 505
 Fórmula de *Turke*, 741
 Fórmula de *Zahn*, 448, 505
 Fórmulas de *E.M. Smith y A.I. Singer*, 318
 Fórmulas de *Stevens*, 146, 449
 Forzamiento radiativo, 329, 330, 333, 342
 Fotoautotrofos, 488
 Fotodetección, 856
 Fotoheterotrofos, 488
 Fotones, 246
 Fotooxidación, 98, 101, 104, 107, 108
 Fotorrespiración, 529, 532
 Fototactismo, 579
 Fototrofos, 485
 Frente intertropical, 283
 Freones, 106
 FSE, 899
 Fuego, 43, 48, 49
 Fuerza de *Coriolis*, 282 a 285
 Fuerzas de *van der Waals*, 738
Fumifugium, 49
 Fumigación, 842
 Fundiciones, 157, 542
 Furanos, 181, 191, 599, 673

G

- Galvanoplastia, 157
 Ganadería intensiva, 66
 Gas natural, 207 a 209
 Gasificación del carbón, 755
 Gasoductos, 208
 Gasógenos, 788
 Gatos, 599
 Generadores de microneblas, 727
 Glándulas sericígenas, 596
 Gota fría, 256
 Gradiente geotérmico, 205

Gramíneas, 652
 Gravimetría, 793
 Grisú, 194
 Groenlandia, 54
 Grupo Intergubernamental sobre Vigilancia del Medio, 847
 Guerra del Golfo, 54, 179
Gulf Stream, 283
 GWP, 342, 343

H

Hamster, 602
 HAP, 102
 Hemoglobina, 111, 596, 614, 624, 647
 Heterosfera, 223
 Heterotrofos, 485
 Hilos de ionización, 728
 Hipótesis de *Fischer*, 481
 Hipótesis de *Sayre y Scarth*, 480
 Hipótesis de *Zelitch*, 480
 Hipótesis *Gaia*, 340
 Histéresis, 400
 HIV-1, 382
 Homosfera, 223
 Hongos, 170
 Humedad (medida), 808 a 811
 Humedad relativa, 226, 241, 251, 254, 275, 276, 501, 582, 680, 687, 690, 808, 809

I

Ictericia, 671
 Ictiofauna, 597
 Igualdad de *Mayer*, 239, 240
 Impactadores, 794
 Impactos del calentamiento global, 355 a 358
Impingers, 799
 Impuestos, 932
In cloud scavenging, 270
 Indicadores de impacto, 76
 Índice de descontaminación, 719

Índice de *Richardson*, 103
 Índice foliar, 495
 Índice ORAQI, 846
 Índice *Shell-Bacharach*, 794
 Índices de pérdida en embalses, 823
 Índices de Presión Ambiental, 437
 Inercia, 400
 Inflorescencias, 583
 Informe ACACIA, 364
 Ingestión, 627
 INM, 828, 829
 Insolación (medida), 814, 815
Intra zona industrial, 871
 IPA, 851 a 853
 IPCC, 331, 334, 335, 341, 343, 346, 352, 359, 777
 IPPC (Directiva), 971
 Isla térmica, 271 a 273, 278, 678 a 680, 685, 686, 775
 Isocinetismo, 793
 Isopreno, 546
Jet dust counter, 799

J

JOULE, 899
 JRC, 838
 Krakatoa, 166

K

Kurosivo, 283

L

Lacas, 704 a 707
 Láser, 854
 Lecho fluido, 755, 766, 860
 Lechos de adsorción, 739 a 741
Legionella, 642, 704
 Ley de amortiguación de la Naturaleza, 400
 Ley de *Buys Ballot*, 285

Ley de *Dalton*, 237
 Ley de difusión, 298
 Ley de *Joule*, 239, 240
 Ley de *King*, 812, 813
 Ley de *Prandtl*, 299, 300
 Ley de *Raoult*, 748
 Ley de *Stokes*, 134, 135, 723, 800
 Ley de *Weber-Fechner*, 449
 Leyes de *Kepler*, 247
 Lidar, 805, 854
 Liebres, 593
 Ligantes, 395
 Límites de exceso tolerados, 959
 Límites de tolerancia al flúor, 604, 605
 Lluvias negras, 55
 Lluvias radiactivas, 555
 Lluvias sucias, 168
 Logística, 872
 Londres, 51, 137, 150, 619
 Longitud de mezcla, 299
 Longitud de *Monin-Obukhov*, 679
 Longitud de rugosidad, 558
 Los Angeles, 52, 101, 111, 137, 138, 150

M

Maleabilidad, 400
 Manchas solares, 327
 Manganeseo, 670
 Mapas, 821, 822, 833
 Margen visual, 276
 Marketing ecológico, 632
 MCG, 350, 352, 353
Mean Time Between Failures, 806
 Melanismo industrial, 592
 Membrana (Técnicas de), 752
 Merapi, 166
 Mercaptanos, 159, 160, 671, 796
 Mercurio, 114, 115, 158, 653 a 655
 Mesolítico, 48
 Mesopausa, 227, 229
 Mesosfera, 227, 229
 Mesotelioma pulmonar, 644, 658
 Meteoritos, 169

Método de *Gunther y Spenger* (bromo), 804
 Método de *Karln* (plomo), 804
 Método de *Kim y Silverman* (mercurio), 804
 Método DTS (*Dual Tape Sampler*), 523
 Método *Hemean*, 143
 Método *Saltzman*, 535, 802
 Método *West-Gaeke*, 796
 México D.F., 55, 57, 98
 Microsomias, 478
 Miel, 594
 Minas a cielo abierto, 194
 Minio, 114
 Mistral, 569
 Mitocondrias, 478, 517
 Mitosis, 545
 MLD, 362
 Modelo AERE, 139
 Modelo de *Laplace*, 303
 Modelo EKMA, 139
 Modelo noruego (ozono), 139
 Modelo SAI, 139
 Modelo *Stern*, 139
 Módulos de un sistema integral de predicción de la contaminación atmosférica, 839, 840
 Molibdeno, 611
 Monos, 602
 Montchanin, 53, 125
 Mosela, 50
 Motores de vapor, 788
 Motores *Stirling*, 788
 Motores *Wankel*, 176, 177, 788
 Movimiento browniano, 93
 MTBF, 806, 807
 Multiciclones, 725

N

NADPH, 488
 Nefelómetros, 800
 Neolítico, 48
 Neopreno, 394
 Nicotina, 128
 Nilo, 325, 326

Niquel, 115, 128, 670
 Nitrosaminas, 128
 Nivel de emisión, 848
 Nivel de inmisión, 848
 Nivel de vesiculación, 164
 Nivel trófico, 411, 597
 NOAA, 351
 Nodrizas, 594, 595
 Normas de emisión, 984
 Normas de inmisión, 984
 Nosemiasis, 595
 Nubosidad, 251 a 258
 Nucleación, 164, 165
 Núcleos de *Aitken*, 92, 132, 134
 Nueva Orleans, 52
 Número de *Reynolds*, 295, 740
 Número de *Richardson*, 293, 297, 298
 Número de *Sherwood*, 736

O

Oclusión, 264, 265
 Oleoductos, 200
 OMM, 813, 830, 833
 OMS, 71, 621, 667, 715, 833
 Opinión pública, 56, 930
 Orbayu, 264
 Orina, 121
 OSH, 667
 Ostíolo, 479
 Ozonósfera, 228, 375

P

PAEE, 366
 Paleolítico, 48
 Palomas urbanas, 613
 Parámetros ambientales, 691 a 693
 Parásitos, 411
 París, 53, 101
 Parques de carbón, 195, 197
 Partículas inertes, 93
 Partículas vivas, 94

Pater familiae, 953
 PCG, 341
 PECC, 366
 Pecoreadoras, 594, 595
 Pedrisco, 266
 Penetración de los sistemas de tratamiento de contaminantes atmosféricos, 719
 Pentaclorofenol, 599
 Percloroetileno, 671
 Perihelio, 248
Permafrost, 351
 Pérmico, 47
 Perros, 599
 Petróleo (industria), 160, 199 a 203
 Pigmentos, 395
 Pinatubo, 167, 351, 379
 Pinturas, 125, 158, 395, 547, 669, 671, 672, 704 a 707, 761
 Pirámides ecológicas, 411, 412
 Placas (Contaminación en), 388
 Placas *Diem* (análisis), 793
 Plan de Ahorro y Eficiencia Energética de España, 366
 Plantas asfálticas, 494
 Plantas de grano, 583
 Plantas de vida corta, 583
 Plantas efímeras, 583
 Plantas perennes, 583
 Plataformas *off-shore*, 200
 Pleistoceno, 48
 Plioceno, 48
 Plomo, 69, 114, 158, 613, 614, 655, 656, 761, 762
 PNRU, 182, 190
 Poder aglutinante, 196
 Poder calorífico, 161, 188
 Polen, 170, 171
 Polinización anemófila, 171
 Política medioambiental, 922
 Potencial de gravedad, 465
 Potencial de presión, 464
 Potencial químico, 465
 Potencial total, 465
 Poza Rica, 52
 Precipitadores de ionización, 799

Precipitadores de placas, 730
 Precipitadores de tubos, 730
 Precipitadores térmicos, 799
 Precursores, 131, 138, 140, 408
 Predadores, 411
 Presión de turgencia, 582
 Presión de vapor, 226
 Prevención, 951
 Primer Principio de la Termodinámica, 239, 240
 Principio de continuidad-conservación, 315
 Prioridades económicas, 930 a 932
 Productividad (ecológica), 412, 413
 Productores, 410, 412, 570
 Productos verdes, 901
 Programa 21, 60
 Programa ALTANER, 366
 Programa *Auto-Oil*, 64, 69
 Programa del Año Geofísico Internacional, 345
 Programa ERBE, 283
 Programa Europeo del Cambio Climático, 366
 Programa GARP, 283
 Programa medioambiental, 922
 Programa THESEO, 68
 Propiedad privada, 953
 Protocolo de Montreal, 68, 782, 783
 Puente de *Wheatstone*, 807, 808
 Pulverizadores, 726, 727, 735 a 737, 768, 769
 Punto de helada, 243
 Punto de marchitamiento, 582
 Punto de rocío, 242, 255, 809
 Puntos de corte, 834
 Purín, 66
 PVC, 181, 545, 672

Q

Q₁₀, 578
 Química (industria), 158
 Quimioautótrofos, 488
 Quimioheterótrofos, 485

Quimiotrofos, 485
 Quinto Programa, 68, 70, 141, 364, 906

R

Radar, 805
 Radiación (medida), 814, 815
 Radiación neta, 249
 Radiotermómetros, 808
 Radon, 670
Rassenfosse (técnica de análisis), 801
 Ratas, 593, 602
 Reactores, 178
 Red BAPMoN, 833
 Red de carreteras de la Unión Europea, 62, 63
 Red EMEP, 833
 Red Mundial de Vigilancia, 848
 Régimen de descenso adiabático, 252, 253
 Registrador numérico, 806
 Relación bosque/contaminación, 549
 Relación Ca/Al, 574
 Relación de mezcla, 808
 Relación de mezcla del aire húmedo, 240, 242
 Relación Dosis-Tasa de flúor, 520
 Relación N/S, 443
 Relación NO_x/SO_x, 538
 Relación salud-calidad del aire, 698
 Rendimiento de retención, 722, 723, 729
 Resiliencia, 400, 572, 574
 Resolución, 806
 Respiración radicular, 466
 Respirómetros de *Warburg*, 531, 532
 Restauración, 951
 Retículo endoplasmático, 477, 478, 517
 Revolución industrial, 43, 49, 194
 Revolución verde, 56
Rex nullius, 953
 Ribosomas, 478, 517
 Riesgos, 630 a 632
 RNA, 418, 420, 475, 476, 478
 Rosa de los vientos, 814
 Rotoclones, 725

Ruido de fondo, 132
Rumiantes, 605, 613

S

Sahel, 326
SALR, 252
Sanción, 951
Satélites, 283
Separadores *Cottrell*, 730
Separadores de escorrentía, 725
Separadores de relleno, 726, 736
Separadores de una etapa, 730
Separadores eléctricos, 794
Separadores eléctricos de doble etapa, 730, 764
Series climatológicas, 827, 842, 843
SETAC, 381
Setos, 567 a 570
Settlement dust counter, 799
Seveso, 54, 624
Sexto Programa, 141, 906
SGM, 921 a 923
Sick building syndrome, 700, 703
Sideritos, 169
Siderurgia, 157
Silicio, 669
Silicosis, 670
Silúrico, 47
Síndrome del edificio enfermo, 700
Sirenas, 730
Sistema *Cegrit*, 794
Sistema *Drawnicks*, 143
Sistema Mundial de Observación del Ozono, 378, 781
Sistemas analógicos (medida), 805, 806
Sistemas digitales (medida), 806
Sistemas *Howard*, 723
Sistemas inerciales, 794
Sistemas numéricos (medida), 806
Sistemas ópticos de medida, 794
Situación de tolerancia, 871
Skaptor Jokel, 167
Smokescope, 794

Sódares, 823
Soldaduras, 114, 157, 761
Solsticio, 248
Sombra, 684
Sombra pluviométrica, 820
Sombretes, 735
Sonar, 805
Sondas isocinéticas, 793
Soplante, 721, 722, 725
Standard gauge, 887
Standard Methods, 794
STEEP, 899
Subcapa de rugosidad, 294
Sublimación, 259, 60
Subsidencia, 251, 252
Subvenciones, 933
Sumideros, 224, 225
Synthetic metabolism, 485

T

Tabla de *Grob*, 103
Tambora, 166
Tasa de difusión, 470
TCE, 124, 125, 547
TEGD (Reaco), 143
Telematics for Environment, 834
Temperatura (medida), 807, 808
Temperatura de disparo, 256
Teorema del límite central, 827
Teoría de *Bayer*, 531
Termómetros, 807
Termopares, 808
Termosfera, 227, 229
Terpenos, 546
Tetracloroetileno, 672
Textil (industria), 159
TGD (TLD-1), 143
Tintes, 159, 394
Tintorerías, 671
Tolueno, 103, 125, 178, 203, 672
Torres de lavado, 726, 736, 769
Totalitarismo energético ecologista, 212
Tramontana, 569

Transformación de *Cannizzaro*, 104
 Traslocación, 585
 Tratado de Amsterdam, 59
 Trobos, 594
 Tropopausa, 227 a 229, 281, 376
 Troposfera, 227, 228, 281, 375
 Tubo de *Pitot*, 812
 Tubos de *Bourdon*, 817
 Turboalimentación, 788

U

Ultramicroscopio, 800
 Umbral de inmisión, 986

V

Vacuola, 478
 Valores de referencia, 986
 Valores guía, 986
 Vanadio, 115, 670
 Variables meteorológicas que se controlan
 en una estación, 819
 Variaciones de *Milankovitch*, 328
 Veletas, 813
 Ventanas atmosféricas, 248, 249, 337, 353
Venturi (lavado de gases), 726, 727, 743,
 762, 769, 794, 795
 Verde de París, 612

Vestíbulos, 479
 Vibrisas, 625
Virgae, 263
 Viscosidad, 293 a 295
 Volcanes, 43, 76, 97, 100, 163 a 168, 173,
 219

W

Walsum, 52

X

Xenobióticos, 488, 489
 Xileno, 103, 178, 203, 672

Y

Yacimientos geotérmicos, 205
 Yodo, 118
 Yokkaichi, 52

Z

ZAC, 1055
 Zona de convergencia intertropical, 283
 Zonas especiales, 986
 Zwitteriones, 108



La contaminación atmosférica está entre la población. El sistema de vida de la sociedad moderna contamina el aire, pues la circulación, la industria que fabrica lo que necesitamos y un gran exceso de productos superfluos, las calefacciones y la refrigeración, y la producción de energía, son el origen de una contaminación atmosférica que afecta radicalmente a la sociedad.

¿Pero es que hay que abandonar esto que llamamos avances de la humanidad? La medicina, el transporte rápido y seguro, el bienestar a nivel doméstico, las comodidades de la sociedad, el vestido o la luz son logros de los que no se puede prescindir, pero que tienen efectos secundarios indeseables.

En esta situación, y hagamos lo que hagamos, el hombre sigue dependiendo del Medio Ambiente: respira el aire que hay, limpio o contaminado, come los alimentos a los que tiene acceso, contaminados o no, y bebe el agua de que dispone, potable o contaminada.

El primer acto del hombre al nacer es respirar. Pero no circunstancialmente, sino que necesita 12.000 litros diarios de aire durante toda su vida.

El medio atmosférico representa, solo por este hecho, una de las bases de la vida, y no solo humana, sino de todas las especies terrestres vivas.

La contaminación atmosférica siempre se ha referido al aire libre, pero ahora debemos tener en cuenta que cerca del 90% de nuestro tiempo lo pasamos dentro de espacios cerrados como son las viviendas, los locales de ocio, las oficinas, las industrias o los sistemas de transporte, por lo que también debe analizarse esta situación.

En esta obra se tratan, en 19 Partes, todos estos puntos.

Los aspectos históricos, los agentes contaminantes y sus fuentes, las relaciones entre el clima y la contaminación atmosférica, constituyen los primeros capítulos del libro.

El medio natural, y sobre todo sus biocenosis, como la vegetación o la fauna, siguen a continuación, tratándose especialmente todo lo referente a la salud humana.

Después se entra en el problema a nivel urbano y de los interiores.

Las Partes siguientes se refieren al control, al tratamiento y a la medida de la contaminación atmosférica.

Finalmente se orienta la gestión de la contaminación atmosférica a nivel empresarial y se presenta un análisis económico a escalas variables.

La publicación se completa con un compendio de la legislación vigente en la Unión Europea, en la propia del Estado Español, y con la correspondiente a las Comunidades Autónomas y a los entes locales.

El autor es MARIANO SEOÁNEZ CALVO, Dr. Ingeniero de Montes, especialista en contaminación ambiental, que ha consagrado su vida profesional a la investigación y a la ingeniería del medio ambiente. Ha sido becario de prestigiosas instituciones extranjeras, y ha llevado a cabo más de 400 proyectos en 13 países. Ha recibido numerosos premios de diversas instituciones internacionales, como Naciones Unidas o la Unión Europea. Es autor de 24 libros vinculados a la investigación y a la ingeniería del medio ambiente, de los cuales la mayoría se incluye en la presente colección.



ISBN: 84-8476-035-9

www.mundiprensa.com

