

ÍNDICE

<i>Presentación de la obra</i>	11
<i>Unidad Didáctica 1. LA ATMÓSFERA</i>	13
Introducción y recomendaciones de estudio	15
1. Estructura, propiedades, origen y evolución	15
2. Balance energético de la tierra y efecto invernadero	24
3. Ciclos biogeoquímicos	27
4. Reacciones químicas en la estratosfera	37
5. Reacciones químicas en la troposfera	44
6. Funciones de la atmósfera	54
7. Bibliografía	55
Cuestiones y ejercicios de autoevaluación	57
Soluciones a las pruebas de autoevaluación	58
<i>Unidad Didáctica 2. LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA</i>	61
Introducción y recomendaciones de estudio	63
1. Historia de la contaminación atmosférica	65
2. Clasificación de los contaminantes atmosféricos	69
3. Procesos de contaminación atmosférica	70
4. Principales contaminantes atmosféricos	73
5. Expresión de las medidas en contaminación atmosférica	91
6. Bibliografía	93
Cuestiones y ejercicios de autoevaluación	95
Soluciones a las pruebas de autoevaluación	96
<i>Unidad Didáctica 3. DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA</i>	99
Introducción y recomendaciones de estudio	101
1. Factores que influyen en la dispersión de los contaminantes	105
2. Modelos de dispersión y transporte	113

3. Modelo gaussiano.....	124
4. Bibliografía.....	138
Cuestiones y ejercicios de autoevaluación.....	139
Soluciones a las pruebas de autoevaluación.....	141
 <i>Unidad Didáctica 4. TOMA DE MUESTRAS DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS</i>	 147
Introducción y recomendaciones de estudio.....	149
1. Estrategias de muestreo.....	150
2. Sistemas y equipos de muestreo en inmisión.....	160
3. Muestreo en emisión.....	171
4. Bibliografía.....	175
Cuestiones y ejercicios de autoevaluación.....	176
Soluciones a las pruebas de autoevaluación.....	177
 <i>Unidad Didáctica 5. ANÁLISIS DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS</i>	 179
Introducción y recomendaciones de estudio.....	181
1. Análisis de los principales contaminantes gaseosos.....	183
2. Análisis de los contaminantes particulados.....	200
3. Bibliografía.....	208
Cuestiones y ejercicios de autoevaluación.....	210
Soluciones a las pruebas de autoevaluación.....	211
 <i>Unidad Didáctica 6. EFECTOS LOCALES Y REGIONALES DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA</i>	 213
Introducción y recomendaciones de estudio.....	215
1. Impactos de la contaminación atmosférica a escala local.....	219
2. Impactos de la contaminación atmosférica a escala regional.....	232
3. Bibliografía.....	251
Cuestiones y ejercicios de autoevaluación.....	255
Soluciones a las pruebas de autoevaluación.....	256
 <i>Unidad Didáctica 7. EFECTOS GLOBALES DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA</i>	 259
Introducción y recomendaciones de estudio.....	261
1. El agotamiento de la capa de ozono.....	261

2. El calentamiento global	276
3. Bibliografía.....	304
Cuestiones y ejercicios de autoevaluación.....	307
Soluciones a las pruebas de autoevaluación	308
<i>Unidad Didáctica 8. CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....</i>	<i>311</i>
Introducción y recomendaciones de estudio.....	313
1. Disminución en origen de la contaminación.....	316
2. Control de fuentes fijas.....	320
3. Control de fuentes móviles	354
4. Bibliografía.....	361
Cuestiones y ejercicios de autoevaluación.....	362
Soluciones a las pruebas de autoevaluación	364
<i>Unidad Didáctica 9. CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN AMBIENTES INTERIO- RES</i>	<i>367</i>
Introducción y recomendaciones de estudio.....	369
1. Tipos de contaminantes	371
2. Fuentes de contaminación en interiores	378
3. Criterios de calidad del aire interior.....	381
4. Efectos de la calidad del aire interior sobre la salud.....	384
5. Gestión de la calidad del aire interior.....	386
6. Bibliografía.....	393
Cuestiones y ejercicios de autoevaluación.....	394
Soluciones a las pruebas de autoevaluación	395
<i>Unidad Didáctica 10. CALIDAD DEL AIRE Y LEGISLACIÓN</i>	<i>397</i>
Introducción y recomendaciones de estudio.....	399
1. Derechos y Medio Ambiente	399
2. Calidad del aire y legislación.....	402
3. Legislación europea	403
4. Legislación española.....	408
5. Redes de vigilancia	412
6. Legislación sobre calidad del aire.....	417
7. Bibliografía.....	438
Cuestiones y ejercicios de autoevaluación.....	439
Soluciones a las pruebas de autoevaluación	440

«las causas que perturban las benignas y saludables influencias que goza el ambiente de esta Villa de Madrid, de que resultan las frecuentes muertes repentinas, breves y agudas enfermedades, que se han declarado en esta Corte de cincuenta años a esta parte (López Piñero, 2006)».

El posterior invento del motor de vapor y el proceso derivado de él, la Revolución Industrial, no hizo sino agravar el problema en numerosas ciudades occidentales, muy especialmente en Londres. Las industrias que proliferaron en esta época estaban situadas, por lo general, en el interior de núcleos de población, con lo que sus emisiones se sumaron a las domésticas; en estas condiciones los contaminantes alcanzaban concentraciones muy elevadas. En ellas eran especialmente frecuentes los episodios de nieblas en los que el dióxido de azufre (SO₂) y las partículas alcanzaban valores extremos, hasta el punto de paralizar el tráfico, ennegrecer edificios, deteriorar las ropas expuestas y afectar seriamente a la salud de los habitantes. La situación era tal que distintos artistas y escritores la plasmaron en sus obras. Algunos describen con fascinación los distintos colores de las nieblas y el aire de misterio que envolvía a la ciudad de Londres a finales del siglo XIX.

El desarrollo de la Ciencia en general y de la Epidemiología en particular durante el siglo XIX posibilitó la identificación de la relación existente entre las muertes y afecciones respiratorias y la contaminación del aire. En el Londres de 1873, por ejemplo, se registraron 286 muertes por bronquitis en unos pocos días, que se achacaron sin dudarlo a una «atmósfera envenenada». En 1875 se firmó en Manchester (Inglaterra) el Decreto de Salud Pública, que en una de sus secciones buscaba limitar la emisión de contaminantes atmosféricos a través del control de las emisiones y las condiciones de combustión, estableciendo sanciones en caso de incumplimiento. Pittsburg y Chicago (EEUU) en 1880 fueron otras ciudades en las que se tomaron medidas para reducir la contaminación. La mejora de la calidad del aire era en aquel entonces, bienvenida y vista como necesaria por un amplio sector de la población. No obstante, el desarrollo económico de la sociedad primaba sobre otro tipo de consideraciones, por lo que, como muestra la publicidad de finales del siglo XIX y principios del XX, la contaminación era considerada como un síntoma de bonanza: son numerosos los carteles que muestran fábricas con chimeneas humeantes y coches envueltos en humo, algo impensable hoy en día.

El continuo desarrollo industrial y la invención del automóvil, unidas a la escasa eficacia de la política de control de las emisiones, no hicieron sino agravar el problema.

Finalmente, durante el siglo xx, una serie de desastres marcaron un punto de inflexión en la actitud hacia este tipo de problemática. Tres de ellos destacan especialmente por su significación:

- Valle del Meuse (Bélgica): en 1930, las emisiones provenientes de fundiciones, fábricas de vidrio, plantas de ácido sulfúrico y hornos de coque situadas en este valle quedaron atrapadas en él, provocando que la concentración de SO_2 ascendiera espectacularmente. En los días que duró este episodio, 63 personas murieron y otras 600 cayeron enfermas.
- Donora, Pennsylvania (EEUU): en 1948, las emisiones provenientes de varias industrias, incluyendo una fundición, una planta de ácido sulfúrico y una planta de producción de zinc quedaron retenidas en la baja atmósfera, dando lugar a una mezcla de niebla y contaminación irrespirable. 6.000 personas resultaron afectadas, con síntomas que iban desde la sequedad de garganta hasta las náuseas. En 3 días murieron 20 personas.
- Londres (Inglaterra): entre el 5 y el 8 de diciembre de 1952 se produjo un episodio de contaminación que en la actualidad es conocido con el nombre de «el gran smog de Londres». Las emisiones domésticas e industriales se combinaron con la condensación para dar lugar a una densa niebla. Ésta permaneció sobre la ciudad varios días, debido al estancamiento atmosférico. En estas condiciones, los contaminantes alcanzaron concentraciones muy elevadas. Para cuando el cambio de las condiciones meteorológicas favoreció la disipación de esta niebla, aproximadamente 4.000 habitantes habían fallecido.

Estos sucesos de carácter local y el descubrimiento reciente, en términos históricos, de fenómenos a gran escala vinculados a la emisión de contaminantes, tales como la acidificación y eutrofización de los ecosistemas o el agotamiento de la capa de ozono, han motivado que el ser humano haya comenzado a comprender la extensión y la gravedad de los problemas derivados de sus actividades.

2. CLASIFICACIÓN DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Hoy en día se encuentran identificadas unas 3.000 sustancias gaseosas consideradas como contaminantes atmosféricos, la mayoría de ellos orgánicos (es decir, compuestos por cadenas de carbono). Estos compuestos, englobados por el concepto de «contaminación atmosférica» como aquellos capaces de provocar daños, pueden clasificarse de acuerdo a distintos criterios:

Según su **origen** podemos clasificar a las emisiones gaseosas como naturales y antropogénicas. Las *emisiones naturales* se generan por procesos que ocurren en la naturaleza como emisiones volcánicas y marinas, incendios forestales o la actividad de los seres vivos (bacterias desnitrificadoras, digestión de los herbívoros, etc.). Este tipo de emisiones suele determinar los niveles de fondo natural que se registran en la atmósfera, es decir, aquella concentración registrada en la atmósfera no directamente influida por ningún foco de contaminación. A estos niveles de fondo se suman las emisiones gaseosas derivadas de la actividad humana. Las *emisiones antropogénicas*, reciben este nombre por ser generadas por las actividades humanas, principalmente la extracción, distribución y uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) para la generación de energía o el transporte, la actividad industrial, la gestión de los residuos, la agricultura, etc.

Otra forma de clasificar los contaminantes atmosféricos se realiza atendiendo a la **forma en la que se emiten a la atmósfera**. Así se puede distinguir entre contaminantes primarios y secundarios. Los *contaminantes primarios* son aquellos que se emiten directamente a la atmósfera, son de muy diversa naturaleza química y provienen de una gran variedad de fuentes de emisión. Los *contaminantes secundarios*, por el contrario, son el resultado de transformaciones químicas de los contaminantes primarios después de ser emitidos mediante reacciones con otras sustancias gaseosas, con el agua de la atmósfera o con la radiación solar. Se forman a partir de precursores, sustancias químicas que en las condiciones adecuadas reaccionan para generar otro contaminante que se denomina secundario.

Según su **composición química** se pueden clasificar en compuestos de nitrógeno, de azufre, compuestos orgánicos, etc.

Según su **estado físico** (gas, sólido y líquido). La atmósfera consiste en una mezcla de compuestos en distintos estados físicos, gaseosos en su ma-

yoría, pero también sólidos (polvo en suspensión) y líquidos (gotas de agua que conforman las nubes, las nieblas o la lluvia y las sustancias disueltas en ella). Los dos últimos constituyen el llamado aerosol o material particulado.

Según su **reactividad química**, es decir, su capacidad para transformarse químicamente, los contaminantes se pueden clasificar como *reactivos* o *inertes*. Los gases inertes pueden transformarse en reactivos mediante reacciones con la luz solar o con otros compuestos.

Los contaminantes atmosféricos por lo tanto pertenecen a numerosas categorías en función del punto de vista de la clasificación que se utilice. Además en ocasiones resulta difícil distinguir, en una situación determinada de contaminación, cuál es el origen principal de los niveles detectados, pues en ocasiones éstos responden a procesos complejos (numerosas fuentes, fenómenos de transporte a larga distancia, procesos naturales, etc.).

3. PROCESOS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Los procesos de contaminación atmosférica comienzan con la emisión de los gases a la atmósfera. Según la fuente emisora (en caso de ser contaminantes primarios), podemos tener gases procedentes de *fuentes móviles* (como el transporte por carretera, aviación o navegación) o *fuentes fijas* (como por ejemplo las industrias o las centrales térmicas de generación de energía eléctrica). Las primeras dan lugar a la llamada contaminación difusa porque no se puede atribuir en concreto a ningún foco ni tiene localización geográfica concreta, si no que corresponde a todo un sector de actividad y su control es más difícil. Las segundas se encuentran bien localizadas y se puede cuantificar más fácilmente cuánto contribuye cada una a los niveles de contaminación. Determinados sectores, por ejemplo, están obligados en la Unión Europea a proporcionar información sobre sus emisiones. Esta información se puede encontrar en registros accesibles al público como PRTR-España. PRTR-España es el Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. Constituye una base de datos en la que se dispone de información sobre las emisiones anuales de todos aquellos complejos industriales que realicen alguna de las actividades incluidas en el Real Decreto 508/2007, siempre que se superen los umbrales de información correspondientes. El registro incluye un listado de 93 sustancias,

entre las que se encuentran los contaminantes que trataremos aquí como NO_x , NH_3 , CH_4 , N_2O , CO , CO_2 , partículas, CFC, HFC, etc.

El nivel de emisiones, es decir, el conjunto de emisiones de todos los sectores suele estimarse mediante inventarios de emisiones a partir de datos como los suministrados por PRTR-España. Estos inventarios constituyen una compilación de todas las fuentes de emisión relevantes y su actividad. Pueden incluir fuentes puntuales o móviles, diversas escalas temporales y espaciales, etc. Al tratarse de estimaciones, siguiendo diversas metodologías, los inventarios de emisiones suelen estar sujetos a cierto grado de incertidumbre.

Una vez los contaminantes atmosféricos se encuentran en la atmósfera, pueden resultar transportados por movimientos horizontales o verticales, dispersados o transformados en otras especies químicas. La concentración atmosférica resultante de todos estos procesos se conoce como nivel de inmisión. El nivel de inmisión puede definirse como la concentración de contaminantes existentes en la atmósfera a nivel del suelo, de modo temporal o permanente (Martín y Santamaría, 2000). Debido a la cantidad de procesos que ocurren tras la emisión de un contaminante y a la influencia de multitud de factores ambientales y geográficos, la relación entre los niveles de emisión y los de inmisión es altamente no lineal.

La evaluación de los niveles de inmisión, en función de los posibles efectos que pueda causar sobre los distintos tipos de receptores, se expresa como calidad del aire. En lo que se refiere al estudio de los efectos de la contaminación atmosférica se distinguen tres tipos de receptores: seres humanos (salud), ecosistemas (terrestres y acuáticos) y materiales.

Para poder provocar determinados efectos nocivos, los contaminantes deben ser transportados hacia la superficie, en un proceso conocido como depósito atmosférico. Existen dos modalidades de depósito, en función de los procesos que los gobiernan.

El *depósito húmedo* consiste en el transporte de la sustancia contaminante hasta la superficie mediante su incorporación al agua de lluvia, la nieve o la niebla. La incorporación puede producirse por disolución en el agua que forma las nubes o directamente cuando determinadas partículas actúan como núcleos de condensación de la lluvia. Estos dos procesos se engloban en el término *rain-out*. Otra parte de la contaminación

se incorpora a las precipitaciones cuando se ve arrastrada por éstas al atravesar una masa de aire contaminado, lo que se conoce como *wash-out*. La cantidad de contaminante depositado en forma húmeda depende fuertemente de la cantidad de precipitaciones que se produzcan en una región, por lo que su importancia en el depósito total varía de una zona a otra.

El *depósito seco* de gases y partículas supone la captura directa de los contaminantes por la superficie mediante impacto, sedimentación o difusión. Se trata de un proceso complejo que está gobernado por la concentración y características fisicoquímicas de la sustancia, por los procesos de transporte turbulento y por las características de la superficie receptora de la contaminación. Generalmente el depósito seco se describe como un proceso que ocurre en tres etapas. En la primera, el compuesto es transportado a través de la atmósfera hasta la capa de aire justo en contacto con la superficie. Esta etapa está normalmente determinada por los procesos atmosféricos y el transporte turbulento. Posteriormente, se produce el transporte, gobernado por fenómenos de difusión, dentro de la capa de aire llamada *quasi-laminar* que está en contacto con la superficie para, finalmente, reaccionar con la superficie. La reacción con la superficie dependerá de la naturaleza de ésta, ya sea una masa de agua, el suelo, la superficie de la vegetación o los materiales de construcción.

Para describir el proceso del depósito seco en los estudios sobre contaminación atmosférica se suele utilizar la *analogía de las resistencias* (Fowler, 1978). Según este modelo, cada una de las tres etapas en que se subdivide el depósito seco está descrita por un término que describe la resistencia que opone cada uno de los medios implicados al transporte del contaminante hasta la superficie. Estos términos se conocen como resistencia aerodinámica, *quasi-laminar* y superficial. Esta última resulta la más complicada de determinar pues depende de la interacción fisicoquímica entre el contaminante y la superficie, en la que influye también la actividad biológica cuando el receptor es un ser vivo.

Mediante el cálculo de la capacidad de absorción y arrastre de la lluvia en el caso del depósito húmedo y de las resistencias en el caso del depósito seco, se puede determinar un flujo vertical descendente para una sustancia determinada que cuantifica el flujo de un contaminante hacia una superfi-

cie receptora. El estudio de los efectos de la contaminación atmosférica sobre los distintos receptores trata de relacionar estos flujos de depósito con la respuesta del receptor.

4. PRINCIPALES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Se detallan a continuación las características de algunos de los contaminantes atmosféricos más importantes debido a sus niveles de concentración en el aire o sus impactos sobre la salud humana, los ecosistemas o los materiales. En concreto se referirán aquí los compuestos nitrogenados, dióxido de azufre, monóxido de carbono, material particulado, metano, compuestos orgánicos volátiles, compuestos orgánicos persistentes (dioxinas y furanos, hidrocarburos aromáticos policíclicos), y ozono troposférico. Otras formas de contaminación atmosférica, como las emisiones atmosféricas de metales pesados, el ruido, la iluminación artificial o las radiaciones ionizantes no serán tratadas aquí.

4.1. Compuestos nitrogenados (NO_x , N_2O y NH_3)

Los compuestos nitrogenados pueden clasificarse en compuestos oxidados (óxidos de nitrógeno) o compuestos reducidos, de los cuales el más representativo es el amoníaco.

Los óxidos de nitrógeno son un conjunto de gases de los cuales los más representativos son el óxido nitroso (N_2O) y los NO_x . Estos últimos los conforman fundamentalmente el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el monóxido de nitrógeno (NO).

El N_2O se emite como consecuencia de procesos naturales, como la actividad de los microorganismos del suelo. Estas emisiones pueden incrementarse como resultado de la utilización de fertilizantes nitrogenados en la agricultura. De hecho la agricultura es el sector que más contribuye a los niveles detectados de N_2O pues es responsable del 48% de las emisiones en Europa (EEA, 1997). En España, el N_2O sigue una evolución marcada por un descenso medio entre 1990 y 1995, seguido de un aumento hasta el año 2000 (Figura 2.2). Finalmente se registra un descenso, acentuado en el año 2008 como reflejo del descenso de las emisiones en el sector agrícola (MARM, 2011).