

Introducción a las tecnologías de tratamiento de la contaminación atmosférica

Antonio Gil

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Colección: Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación, n. 2

Título: Introducción a las tecnologías de tratamiento de la contaminación atmosférica

Autor: Antonio Gil

Edición: Universidad Pública de Navarra / Nafarroako Unibertsitate Publikoa
1.^a edición: julio 2021

Diseño cubierta: Ken (info@ken.es)

Maquetación: Pretexto

ISBN: 978-84-9769-371-4

Universidad Pública de Navarra
Sección de Comunicación (Publicaciones)
Campus Arrosadia
31006 Pamplona-Iruña
publicaciones@unavarra.es
www.unavarra.es/publicaciones

Índice

Prólogo y agradecimientos	11
 Capítulo 1	
Contaminación de la atmósfera. Conceptos, contaminantes y efectos sobre el medioambiente	13
1.1. Atmósfera	13
1.1.1. Estructura y propiedades	13
1.1.2. Composición de la atmósfera	14
1.1.3. Radiaciones en la atmósfera	15
1.1.3.1. Absorción	16
1.1.3.2. Dispersión y reflexión	17
1.1.3.3. Radiación terrestre	17
1.1.4. Ciclos biogeoquímicos	17
1.1.4.1. Ciclo del carbono	17
1.1.4.2. Ciclo del nitrógeno	19
1.1.4.3. Ciclo del azufre	20
1.1.4.4. Ciclo del oxígeno	21
1.2. Química de la troposfera. Contaminación del aire	22
1.2.1. Efectos de la contaminación	22
1.2.2. Reducción de la visibilidad y alteraciones climáticas	23
1.2.1.1. Efectos sobre la vegetación	25
1.2.1.2. Efectos sobre los materiales	25
1.2.1.3. Efectos sobre la salud humana	26
1.3. Contaminantes atmosféricos	27
1.3.1. Contaminación de naturaleza física	27
1.3.2. Contaminación de naturaleza química	27
1.3.2.1. Compuestos del azufre	28
1.3.2.1.1. Origen y destino	28
1.3.2.1.2. Efectos sobre las plantas	29
1.3.2.1.3. Efectos sobre la salud	30
1.3.2.1.4. Efectos sobre los materiales	30
1.3.2.1.5. La lluvia ácida	31

1.3.2.2.	Compuestos del nitrógeno	31
1.3.2.2.1.	Origen y destino	31
1.3.2.2.2.	Ciclo fotolítico del NO ₂	32
1.3.2.2.3.	Efectos sobre las plantas	33
1.3.2.2.4.	Efectos sobre la salud	33
1.3.2.3.	Compuestos del carbono	33
1.3.2.3.1.	Óxidos de carbono	33
1.3.2.3.2.	Fuentes del CO	33
1.3.2.3.3.	Destino del CO atmosférico	35
1.3.2.3.4.	Efectos del CO sobre la salud	35
1.3.2.4.	Hidrocarburos	36
1.3.2.4.1.	Origen y destino	36
1.3.2.4.2.	Efectos sobre las plantas	36
1.3.2.4.3.	Efectos sobre la salud	37
1.3.2.5.	Clorofluorocarburos	37
1.3.2.5.1.	Debilitamiento de la capa de ozono	38
1.3.2.5.2.	Causas de la localización del agujero de ozono sobre la Antártida	38
1.3.2.6.	Otros contaminantes	39
1.3.2.6.1.	Hidrocarburos peligrosos	39
1.3.2.6.2.	Dioxinas	40
1.3.2.6.3.	PAH (Hidrocarburos aromáticos policíclicos)	40
1.3.2.6.4.	PCB (Policlorobifenilos)	40
1.3.2.6.5.	Toxinas naturales	41
1.3.2.6.6.	CO ₂	41
1.3.2.6.7.	Cloro y derivados	41
1.3.2.7.	Partículas	42
1.3.2.7.1.	Fuentes de emisión	42
1.3.2.7.2.	Distribución por tamaños	42
1.3.2.7.3.	Mecanismos de eliminación	43
1.3.2.7.4.	Efectos de la contaminación atmosférica por partícu- las	44
1.3.2.8.	Metales pesados	45
1.3.2.8.1.	Plomo (Pb)	46
1.3.2.8.2.	Mercurio (Hg)	46
1.3.2.8.3.	Cadmio (Cd)	47
1.3.2.8.4.	Vanadio (V)	47
1.3.2.8.5.	Arsénico (As)	47
1.4.	Conceptos de emisión e inmisión	48

Capítulo 2	
Gestión de contaminantes en forma de partículas	49
2.1. Introducción	49
2.2. Caracterización de partículas	52
2.2.1. Propiedades individuales	53
2.2.1.1. Tamaño, d_p	53
2.2.1.2. Forma	55
2.2.1.3. Superficie específica	55
2.2.2. Distribución granulométrica	55
2.2.3. Propiedades colectivas	58
2.2.3.1. Tamaño promedio	59
2.2.3.2. Superficie específica media	59
2.2.3.3. Densidad aparente y porosidad	59
2.3. Eficacia de captación	60
2.3.1. Eficacia fraccional y eficacia global	60
2.4. Separación de partículas mediante sedimentación	61
2.4.1. Sedimentación en campo gravitatorio	62
2.4.2. Sedimentación en un campo centrífugo horizontal	62
2.5. Captura aerodinámica de partículas	63
2.5.1. Impacto inercial	63
2.5.2. Interceptación directa	63
2.5.3. Difusión	64
2.6. Equipos de captación de partículas	64
2.6.1. Selección del sistema de captación de partículas	65
2.6.2. Separadores mecánicos	66
2.6.2.1. Cámaras de gravedad	66
2.6.2.1.1. Principios teóricos de la operación	67
2.6.2.2. Separadores inerciales o de impacto	67
2.6.2.3. Separadores ciclónicos	67
2.6.2.3.1. Tipos de ciclones	72
2.6.2.3.2. Eficacia y diseño	75
2.6.2.3.3. Factores de cálculo	76
2.6.2.3.4. Recolección	81
2.6.2.3.5. Multiciclones	83
2.6.3. Filtros de mangas o de tejido	84
2.6.4. Electrofiltros	92
2.6.5. Colectores húmedos	96
2.6.5.1. Tipos de captadores húmedos	97
2.6.5.1.1. Cámaras o torres de pulverización	97
2.6.5.1.2. Cámaras ciclónicas	98
2.6.5.1.3. Torres de relleno	99
2.6.5.1.4. Colectores de lecho fluido	99
2.6.5.1.5. Colectores tipo venturi	100

2.6.5.1.6. Jet-scrubbers	101
2.6.5.1.7. Colectores de atomización en orificio	101
2.6.5.1.8. Colectores de platos perforados con pantallas de im- pacto	102
Capítulo 3	
Gestión de contaminantes gaseosos	103
3.1. Introducción	103
3.2. Procesos de depuración de efluentes gaseosos	104
3.2.1. Eficacia de depuración	105
3.2.2. Selección del sistema depurador	105
3.3. Separación de gases	106
3.4. Adsorción	106
3.4.1. Tipos de adsorbentes	108
3.4.2. Criterios de selección del adsorbente	109
3.4.2.1. Afinidad	109
3.4.2.2. Sensibilidad a condiciones adversas y duración	109
3.4.2.3. Capacidad de trabajo	110
3.4.3. Tipos de lechos adsorbentes	110
3.4.3.1. Características técnicas del sistema	111
3.4.4. Torre de adsorción	111
3.4.5. Regeneración de los sistemas de adsorción	112
3.5. Absorción	113
3.5.1. Características del líquido absorbente	115
3.5.2. Sistemas de absorción	116
3.5.2.1. Columnas de relleno	116
3.5.2.1.1. Características del relleno	117
3.5.2.2. Columnas de platos	119
3.5.2.1.2. Tipos de platos	121
3.6. Incineración	121
3.6.1. Incineración térmica	125
3.6.1.1. Tipos de incineradores térmicos	127
3.6.1.1.1. Incineradores de llama directa	127
3.6.1.1.2. Incineradores recuperativos	129
3.6.1.1.3. Incineradores regenerativos	129
3.6.2. Incineración catalítica	130
3.7. Reducción catalítica	132
3.7.1. Estrategias para reducir las emisiones de NO _x	132

Capítulo 4

Aplicaciones en la gestión de compuestos orgánicos volátiles (COV),

CO₂ y CH₄	135
4.1. Introducción	135
4.2. Separación y eliminación mediante adsorción y oxidación catalítica de compuestos orgánicos volátiles (COV)	136
4.2.1. Química troposférica de los COV	137
4.2.2. Tratamientos para la reducción de COV	138
4.2.3. Adsorción y materiales adsorbentes	143
4.2.4. Sistemas catalíticos	148
4.2.4.1. Combustión catalítica de propeno	152
4.2.4.2. Combustión catalítica de benceno	154
4.2.4.3. Combustión catalítica de clorobenceno	155
4.3. Separación y valorización mediante adsorción, conversión y reducción catalítica de CO ₂	157
4.3.1. Captura de CO ₂	158
4.3.1.1. Tecnologías de captura de CO ₂	158
4.3.1.2. Adsorción de CO ₂	159
4.3.2. Valorización de CO ₂	162
4.3.2.1. Reformado de CH ₄ con CO ₂	162
4.3.2.2. Hidrogenación de CO ₂	163
4.4. Adsorción de CH ₄	164
Bibliografía	167
Acrónimos y nomenclatura	173

Prólogo y agradecimientos

Europa ha avanzado notablemente en las últimas décadas en relación con la limpieza del aire que respiramos, pero la contaminación atmosférica sigue siendo un problema grave y continúa dañando nuestra salud y el medio ambiente. Dado que la reducción de las emisiones de contaminantes a la atmósfera es una de las grandes preocupaciones de hoy en día, se están llevando a cabo muchas acciones enfocadas a este fin. Así, la Directiva IPPC tiene por objetivo la prevención y el control integrados de la contaminación procedente de grandes instalaciones industriales. Las instalaciones afectadas por esta ley deben obtener la Autorización Ambiental Integrada (AAI), en la que se fijan las condiciones ambientales que se deben cumplir teniendo en cuenta las Mejores Técnicas Disponibles (MTD), las características de la instalación y su localización geográfica, a fin de evitar o reducir las emisiones al agua, aire y suelo, y hacer frente a otros impactos ambientales. Las MTD son las tecnologías ambientalmente más respetuosas que se conocen para desarrollar una actividad, teniendo en cuenta que el coste para las empresas esté dentro de unos límites razonables. Con la Directiva IPPC, las MTD son uno de los criterios que hay que tener en cuenta, como referencia, para establecer los valores límite de emisión, y otros valores límite (consumo de agua, energía, etc.) en una determinada actividad industrial. Las MTD, que no son vinculantes en sí mismas, pero sí los niveles de protección ambiental que se pueden conseguir con su implantación, han sido, desde su aplicación, la referencia para establecer las condiciones de las AAI. Las MTD son un concepto dinámico que evoluciona con el tiempo.

Los Estados miembros de la UE-27, en línea con sucesivas directivas sobre los techos nacionales de emisión, en general han hecho buenos progresos en la reducción de las emisiones. Así, se han marcado límites para las emisiones de contaminantes acidificantes, eutrofizantes y precursores de ozono, mediante la fijación de techos nacionales de emisión tomando como referencia los años 2010 y 2020, y procediendo a revisiones sucesivas. Así, obliga a los países miembros a que sus emisiones de dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (COVNM) y amoníaco (NH_3) no superen los techos nacionales de emisión a partir del año 2010.

Esta breve monografía hace referencia a varios aspectos fundamentales sobre algunas de las tecnologías más importantes que se utilizan en el tratamiento de la contaminación atmosférica y que aparecen habitualmente como MTD para el tratamiento de efluentes contaminados industriales. No se pretende presentar nuevos conceptos, sino resumir los principios básicos de depuración de efluentes gaseosos contaminados con partículas y gases y hacerlos accesibles al estudiante/investigador que se inicia en este campo.

La información recopilada en este trabajo se ha impartido en varios cursos a lo largo de mi carrera docente (Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente, en las titulaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación [ETSIIT] de la Universidad Pública de Navarra; Ingeniería y Gestión Medioambiental, título propio de la Universidad Pública de Navarra; Caracterización de Catalizadores, en el Programa de Doctorado Interuniversitario de Química de la Universidad Pública de Navarra; Nanomateriales y Medio Ambiente, en el Máster Interuniversitario en Nanotecnología Medioambiental de la Universidad de Zaragoza). El trabajo final se ha realizado durante el periodo de vigencia del Programa de Intensificación de la Investigación subvencionado por el Banco Santander (2017-2022), y del que he sido beneficiario en su primera edición.

Contaminación de la atmósfera.

Conceptos, contaminantes y efectos sobre el medioambiente

1.1. ATMÓSFERA

1.1.1. Estructura y propiedades

Recibe el nombre de atmósfera toda la capa gaseosa que rodea la Tierra. Tiene un espesor medio de 2 500 km y, en función de la composición, densidad, temperatura y actividad química, entre otros factores, se diferencian varias capas: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera y exosfera (véase fig. 1.1). Es en la troposfera donde se producen la mayor parte de los fenómenos meteorológicos, movimientos

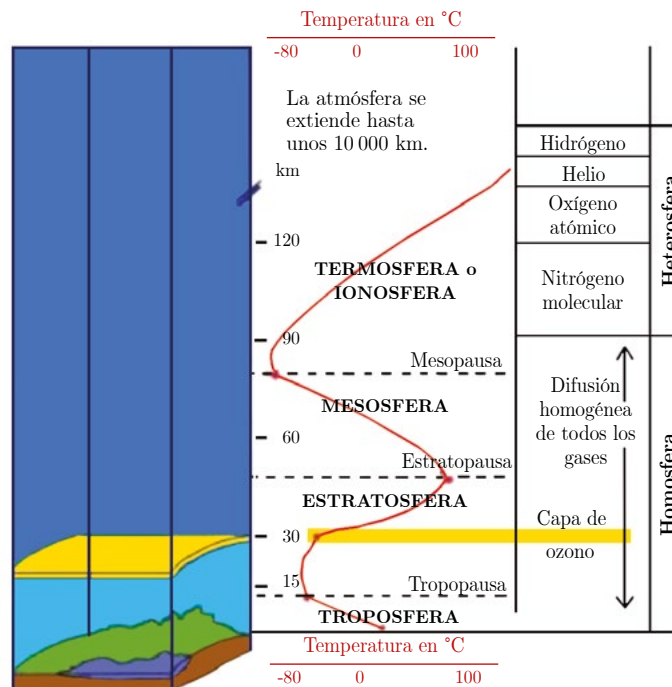


Figura 1.1. Estructura de la atmósfera y evolución de la temperatura con la altura (tomado de www.meteorologiaenred.com).

verticales y horizontales de las masas de aire, originando el desplazamiento de materiales y la dispersión de los contaminantes. La densidad de los gases que constituyen la atmósfera desciende con la altitud, de tal manera que la mitad de la masa de esta se encuentra en una primera capa de 5,5 km de altura. Por tanto, desde el punto de vista de calidad de la atmósfera, interesan aquellas capas que se encuentran más próximas a la superficie terrestre.

1.1.2. Composición de la atmósfera

Conocer la composición de la atmósfera es importante desde el punto de vista medioambiental, debido a que los parámetros físicos y el clima dependen en cierta medida de esta composición. Por ejemplo, la nubosidad y la precipitación están directamente relacionadas con la naturaleza de los aerosoles. Existe también una relación directa entre composición química y clima; de ahí la importancia de la presencia de contaminantes, dado que son causa de que aparezcan nuevas sustancias y se modifiquen la concentración y distribución de otras. Por lo tanto, conocer la composición de la atmósfera es importante para poder discutir posteriormente su contaminación, ya que esta se puede considerar como una alteración de la composición natural causada por la acción humana.

La composición del aire limpio y seco, al nivel del suelo, se presenta en la tabla 1.1. El aire en las proximidades de la superficie terrestre y en ausencia de contaminación se compone principalmente de N_2 y O_2 . En menor proporción, se encuentran el Ar y el CO_2 . En mucha menor cantidad, se pueden hallar otros gases como son: He, Ne, Kr, Xe, CH_4 , H_2 , N_2O , O_3 , CO, NH_3 , NO_2 , SO_2 y H_2S . También se puede considerar la existencia de H_2O , siendo variable su proporción. Además de los gases, también es posible detectar la presencia de materiales sólidos o líquidos en suspensión. Su procedencia y composición es variable, dependiendo su permanencia en la atmósfera del tamaño y densidad que tienen.

La presencia añadida de cualquier sustancia alterará en cierto grado las propiedades físicas y químicas del aire puro. Por tanto, esta sustancia podrá considerarse como un contaminante. No obstante, se clasifican como contaminantes únicamente aquellas sustancias o formas de energía que, añadidas en cantidades suficientes, causan efectos medibles sobre los seres humanos, los animales, la vegetación o los materiales.

Hay un número elevado de contaminantes de origen antropogénico, pero difieren según su importancia cuantitativa o cualitativa o por sus efectos. Estos pueden ser crónicos, que se asocian a niveles moderados de inmisión, pero durante periodos dilatados de tiempo, y agudos, que son los producidos por niveles de inmisión elevados en un período de tiempo reducido. También hay que considerar la naturaleza y la estructura de las fuentes contaminantes, así como la posterior

evolución de estas sustancias y de la posibilidad de que actúen sinérgicamente. Atendiendo a su naturaleza, podrían clasificarse en químicos, físicos y biológicos.

Los contaminantes químicos pueden, a su vez, clasificarse según su naturaleza, su estado físico, su estado de agregación y su origen. Sin embargo, para su descripción, parece más conveniente agrupar los contaminantes atmosféricos en función del elemento químico común más característico. Solamente en el caso de las partículas se prescindirá de este rango y se las mantendrá en un solo grupo.

Tabla 1.1. Composición química del aire limpio y seco (tomado de Wark y Warner, 1992)

	Concentración (% en volumen)
Componentes principales	
Nitrógeno (N_2)	78,084
Oxígeno (O_2)	20,946
Argón (Ar)	0,934
Dióxido de carbono (CO_2)	0,032
Componentes menores	
Neón (Ne)	0,0018
Helio (He)	0,00052
Metano (CH_4)	0,00015
Kriptón (Kr)	0,0001
Hidrógeno (H_2)	0,00005
Óxido nitroso (N_2O)	0,00002
Monóxido de carbono (CO)	0,00001
Xenón (Xe)	0,000008
Ozono (O_3)	0,000002
Amoníaco (NH_3)	0,0000006
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	0,0000001
Óxido nítrico (NO)	0,00000006
Dióxido de azufre (SO_2)	0,00000002
Sulfuro de hidrógeno (H_2S)	0,00000002

1.1.3. Radiaciones en la atmósfera

Las radiaciones que llegan a la atmósfera de la Tierra tienen como fuente más importante el Sol. Existen también otras provenientes del resto del universo: los rayos cósmicos.

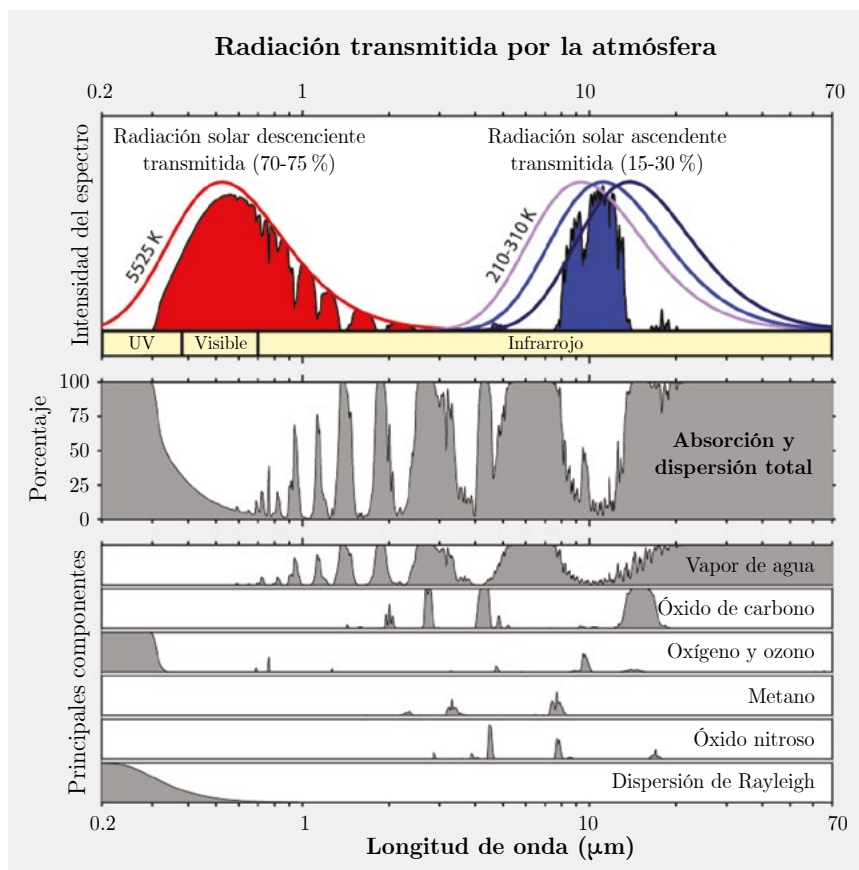


Figura 1.2. Relación intensidad de radiación/longitud de onda de la radiación solar y de la radiación terrestre (tomado de <http://www.globalwarmingart.com>).

El 99 % de la energía de la radiación solar, que corresponde a la de un cuerpo negro a 5.760 K, pertenece al intervalo de longitud de onda comprendido entre 0,1 y 4 μm (véase fig. 1.2), que incluye las regiones del ultravioleta entre 0,1 y 0,4 μm , visible entre 0,4 y 0,8 μm , e infrarroja, entre 0,8 y 30 μm .

Los fenómenos que sufre la radiación solar desde que llega a la atmósfera hasta que incide en la superficie terrestre son fenómenos de absorción, dispersión y reflexión.

1.1.3.1. Absorción

Los gases presentes en la atmósfera son responsables de la absorción de un 20 % del total de la radiación solar. La absorción de las radiaciones más energéticas en las regiones más externas de la atmósfera provoca procesos de fotodisociación y de fo-

toionización. El ozono absorbe en la estratosfera radiaciones con longitud de onda entre 240 y 310 nm, muy energéticas, siendo del orden del 5 % de la radiación incidente en el límite de la atmósfera. Los gases responsables de la absorción infrarroja son el vapor de agua, CO_2 , y, en menor medida, CH_4 , N_2O , etc., los denominados gases con efecto invernadero.

1.1.3.2. *Dispersión y reflexión*

Las especies presentes en el aire son también responsables de fenómenos de dispersión y reflexión de la radiación solar. En conjunto, del orden del 30 % de la radiación solar que incide sobre la atmósfera vuelve al espacio.

1.1.3.3. *Radiación terrestre*

La radiación absorbida por la superficie terrestre es, a su vez, remitida hacia la atmósfera como radiación calorífica durante las horas nocturnas. También hay remisión de energía no radiativa por la superficie mediante procesos de evaporación y convección. Todos estos fenómenos provocan el calentamiento de la troposfera.

Las radiaciones remitidas por la superficie terrestre experimentan fenómenos de absorción por parte de algunos componentes de la atmósfera, principalmente, vapor de agua, CO_2 , O_3 , N_2O y CH_4 . Esta absorción de radiación provoca que se pueda mantener la temperatura de la región de la atmósfera cercana a la superficie terrestre. El incremento de este fenómeno por causas antropogénicas (aumento de la concentración de los gases con efecto invernadero) así como especies que puedan absorber radiaciones similares, aumentan el efecto invernadero, favoreciendo el cambio climático.

1.1.4. **Ciclos biogeoquímicos**

La composición química de la atmósfera terrestre depende de los procesos bio y geoquímicos en los que se encuentran involucrados los diferentes elementos, siendo especialmente importantes, desde el punto de vista de contaminación atmosférica, los del carbono, oxígeno, nitrógeno y azufre. Estos elementos intervienen en transformaciones que permiten mantener la concentración de las especies atmosféricas, principalmente, las mayoritarias. Será, por tanto, necesario conocer estos procesos para poder entender cómo se relacionan la contaminación del agua y del suelo.

1.1.4.1. *Ciclo del carbono*

Las reservas naturales más importantes de carbono son la corteza terrestre y los combustibles fósiles, el suelo y la materia viva, los océanos y el CO_2 atmosférico.



Figura 1.3. Ciclo del carbono (tomado de <https://es.khanacademy.org/science/biology/ecology/biogeological-cycles/a/the-carbon-cycle>).

Se trata de un ciclo esencialmente gaseoso (véase fig. 1.3), donde la sustancia más importante es el CO_2 , tanto en su forma libre como combinada. Esta molécula puede disolverse en el agua de mar para formar HCO_3^- e intervenir mínimamente en algunas transformaciones con rocas. Mucho más importante es su participación en la fotosíntesis que realizan las plantas terrestres, las bacterias y las algas, en la que se sintetiza materia orgánica. Los procesos de respiración, fermentación y combustión devuelven el CO_2 a la atmósfera. Las influencias antropogénicas en este ciclo se derivan fundamentalmente de:

- utilización masiva de combustibles fósiles, que aumentan los niveles de CO_2 emitidos;
- deforestación, especialmente, de bosques tropicales que permiten secuestrar CO_2 ;
- otras actividades industriales; por ejemplo, descomposición de calizas para la producción de cemento.

Parte del CO_2 producido por la actividad humana puede ser absorbido por las plantas o los océanos, pero estos procesos no contrarrestan completamente el aumento, por lo que los niveles de CO_2 se elevan cada vez más.



Figura 1.4. Ciclo del nitrógeno (tomado de <https://es.khanacademy.org/science/biology/ecology/biogeochemical-cycles/a/the-nitrogen-cycle>).

Otros gases también implicados en el ciclo de carbono son el CH_4 y el CO . El metano atmosférico tiene su origen en procesos anaerobios, que pueden ser tanto naturales como producidos por el hombre. Se puede reducir su concentración mediante bacterias presentes en el suelo y por su transformación paulatina por oxidación a CO . Similares orígenes pueden citarse para el caso de monóxido de carbono.

1.1.4.2. Ciclo del nitrógeno

Al igual que el caso anterior, se trata de un ciclo gaseoso presentándose como N_2 . Las reservas naturales más importantes son: la atmósfera, los suelos y la materia viva y los océanos.

Los procesos que se pueden considerar en este ciclo son fundamentalmente cinco, englobados en dos grandes bloques: fijación del N_2 al suelo y emisión de N_2 a la atmósfera (véase fig. 1.4).

- Fijación del nitrógeno: los procesos que tienen lugar en el ciclo pueden ser biológicos o físico-químicos. En la fijación biológica intervienen bacte-

rias, hongos y microorganismos específicos. Inicialmente se mineraliza para transformarse posteriormente como nitrógeno orgánico en forma de proteínas y ácidos nucleicos. La fijación físico-química se puede producir mediante procesos naturales como por actividades antropogénicas, combustión a alta temperatura, síntesis de amoníaco, etc.

- Fuentes de nitrógeno atmosférico: el nitrógeno es devuelto a la atmósfera por su implicación en la cadena trófica y posterior descomposición de los detritus. El nitrógeno vegetal es asimilado por los animales, y los desechos producidos, que contiene urea, ácido úrico y restos orgánicos nitrogenados, pueden sufrir procesos de amonificación, nitrificación y desnitrificación por intervención de microorganismos.

Por otro lado, el nitrógeno puede solubilizarse en el agua oceánica, sufriendo transformaciones similares a las descritas anteriormente. En este medio, la cantidad de nitrógeno disuelto transformado por microorganismos marinos es 40 veces superior a la cantidad de nitrógeno atmosférico transformada.

Otro gas implicado en el ciclo del nitrógeno, debido a su participación como gas de efecto invernadero, es el monóxido de dinitrógeno. Es un compuesto muy estable, formado en los procesos de desnitrificación parcial de nitratos. Se difunde a la atmósfera y se transforma lentamente en monóxido de nitrógeno y dióxido de nitrógeno. Otra fuente importante de nitrógeno son los fertilizantes nitrogenados que pueden provocar graves problemas de desequilibrio, lo que causa la aparición de exceso de nitratos en los acuíferos y problemas de eutrofización en aguas naturales.

Resumiendo: además de N_2 , existen otros gases de nitrógeno minoritarios: NO , NO_2 y NH_3 . Todos ellos participan hasta la formación de aerosoles atmosféricos (NO_3^- y HNO_3). Estos componentes minoritarios están afectados por la intervención humana, ocasionando fenómenos de desequilibrio del ciclo natural, que influyen en procesos de contaminación localizada, *smog* fotoquímico y en procesos de lluvia ácida.

1.1.4.3. Ciclo del azufre

Es un ciclo de tipo sedimentario, encontrándose los mayores depósitos de azufre en el agua y en el suelo (véase fig. 1.5). En la atmósfera, los gases azufrados más abundantes son H_2S y SO_2 , pudiéndose producir aerosoles de sulfato (SO_4^{2-}). Son especies que se encuentran en baja concentración y que poseen tiempos de residencia cortos. El origen natural de estos es la descomposición anaerobia de la materia orgánica (H_2S), erupciones volcánicas (H_2S y SO_2) y aerosoles marinos (SO_4^{2-}). El cierre del ciclo se produce por la transformación del sulfuro de hidrógeno, por acción de microorganismos, en especies minerales (S y SO_4^{2-}), por absorción por las

plantas del SO_2 atmosférico y por deposición seca y húmeda de los aerosoles de sulfato. Otras especies minoritarias son el sulfuro de carbonilo (COS), mercaptanos y sulfuro de dimetilo.

La influencia antropogénica más importante se debe a los procesos de combustión de carburantes fósiles azufrados, que incrementan la concentración de SO_2 atmosférico y, por tanto, los problemas de lluvia ácida.

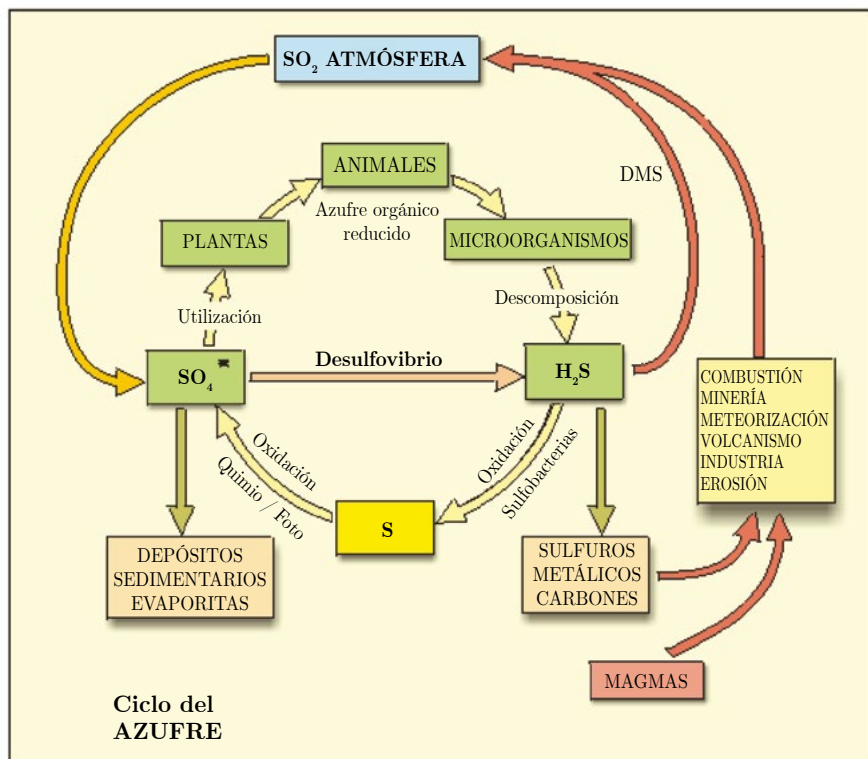


Figura 1.5. Ciclo del azufre (tomado de <https://www.lenntech.es/ciclo-azufre.htm>).

1.1.4.4. *Ciclo del oxígeno*

Además de participar en la composición de sustancias presentes en la biosfera, las dos formas alotrópicas presentes en la atmósfera son el oxígeno molecular y el ozono. Para el caso del O_2 , el ciclo se puede considerar como el inverso del ciclo del CO_2 . La principal fuente de generación es la fotosíntesis, y se elimina en los procesos de respiración, combustión y descomposición aerobia. Para el caso del O_3 , su concentración en la troposfera puede aumentar, disminuyendo en la estratosfera por la acción de ciertos contaminantes emitidos por el hombre.

1.2. QUÍMICA DE LA TROPOSFERA. CONTAMINACIÓN DEL AIRE

Por contaminación atmosférica se entiende la incorporación y permanencia temporal en la atmósfera de materiales en cualquier estado, o de forma de energía, que sean ajenas a su composición natural o se encuentren en proporción superior a esta. Los contaminantes no tienen por qué ser únicamente sustancias sólidas, líquidas o gaseosas y pueden ser contaminantes sustancias que se encuentren presentes en la composición natural de la atmósfera.

1.2.1. Efectos de la contaminación

Una de las consecuencias más notables de la contaminación atmosférica es la globalidad de algunos de sus efectos, lo que supone que los seres vivos que sufren estos efectos no son los que se suelen beneficiar de crearla (véase fig. 1.6). Las emisiones contaminantes a la atmósfera se producen en países desarrollados y se correlacionan tanto con el nivel de vida como con el PIB, pero sus efectos traspasa-

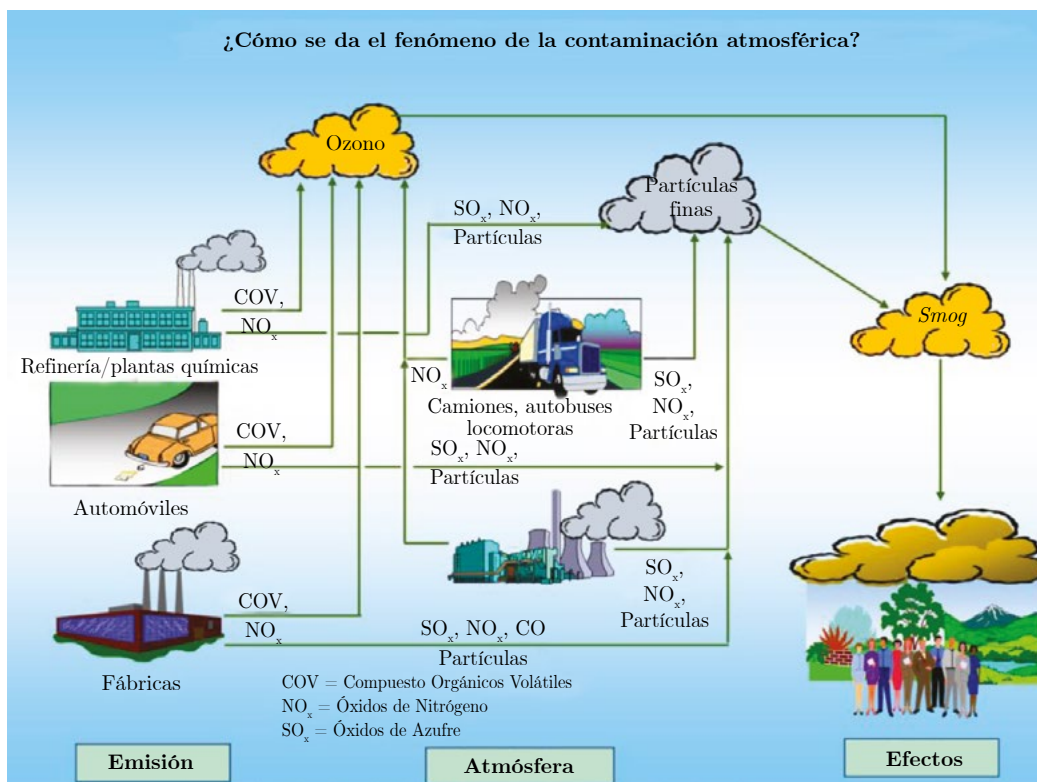


Figura 1.6. Efectos de la contaminación atmosférica. (tomado de <http://tumedioambienteysalud.blogspot.com.es/2013/11/efectos-de-la-contaminacion-del-aire.html>).

san en muchas ocasiones las fronteras y pueden sufrirlos países del tercer mundo. Como efectos globales podemos citar: reforzamiento del efecto invernadero natural de la Tierra, agotamiento de la capa estratosférica de ozono, acidificación de las corrientes de agua superficiales, eutrofización y formación del *smog* fotoquímico. Parte de estos efectos se encuentran interrelacionados: así, los óxidos de nitrógeno son contaminantes primarios que influyen en el agotamiento de la capa de ozono, intervienen en la formación de agua de lluvia ácida y pueden generar eutrofización.

Los principales efectos de la contaminación atmosférica se podrían resumir en los puntos siguientes:

- Reducción de la visibilidad y alteraciones climáticas.
- Efectos sobre la vegetación.
- Efectos sobre los materiales.
- Efectos sobre la salud humana.

1.2.2. Reducción de la visibilidad y alteraciones climáticas

Tal vez el efecto más evidente de la contaminación del aire sobre las propiedades de la atmósfera es la reducción de la visibilidad que acompaña frecuentemente al aire contaminado (véase fig. 1.7).

La visibilidad se reduce a causa de dos efectos, producidos por las moléculas gaseosas y las partículas sobre la radiación visible: la absorción y la dispersión de la luz. La absorción de determinadas radiaciones de la luz visible por moléculas gaseosas y partículas produce, algunas veces, ciertas coloraciones de la atmósfera. Sin embargo, la dispersión de la luz es la causante principal de la reducción de



Figura 1.7. Reducción de la visibilidad por efecto de la contaminación atmosférica.

la visibilidad. El fenómeno de la dispersión de la luz consiste en la desviación de las trayectorias luminosas producida por la presencia en el aire de partículas en suspensión.

Además de reducir la visibilidad, la contaminación por partículas puede afectar al clima, en cuanto que reduce la radiación solar que alcanza la superficie terrestre y, por tanto, la temperatura de la Tierra. Se ha estimado que las zonas urbanas reciben entre un 15 y un 20 % menos de radiación solar que las rurales, como consecuencia del mayor contenido de partículas en su entorno atmosférico.

La contaminación atmosférica también puede incrementar la temperatura de la Tierra, mediante el denominado efecto invernadero. Aunque existen otros gases que contribuyen a este efecto en la atmósfera (CH_4 , NO_2 , vapor de agua, CFC, etc.), numerosos científicos afirman que la causa principal de este fenómeno es el incremento del contenido de CO_2 en la atmósfera, producido como consecuencia de las actividades humanas, especialmente, la combustión de combustibles fósiles. El efecto invernadero natural se ha visto potenciado a partir de la Revolución Industrial con la emisión de diversos gases, tanto presentes en la atmósfera (CO_2 , CH_4 y NO_2), como ajenos a ella (CFC, HCFC, O_3 troposférico y SF_6 , entre otros). Hay que destacar que el vapor de agua también influye en el efecto invernadero. También es necesario indicar que los diferentes gases contribuyen de distinta forma en el efecto invernadero.

Numerosos científicos han previsto que, si se mantiene la actual tasa de incremento en las emisiones de CO_2 , en pocos años la temperatura media de la Tierra podría incrementarse en más de 3 °C, lo que provocaría que se fundieran parte de los casquetes polares, con lo que subiría el nivel del agua de mar; también se producirían alteraciones climáticas (huracanes, lluvias torrenciales, incremento de las zonas desérticas, etc.). Por todo lo anterior, proponen que el CO_2 se considere un contaminante atmosférico.

En la actualidad, muchas de las afirmaciones anteriores son objeto de controversia; así, por ejemplo:

- Las mediciones de la temperatura media del planeta se realizan en tierra firme, lo que solo supone 1/3 de la superficie total. Además, estas mediciones se suelen hacer en ciudades y aeropuertos donde se puede presentar el fenómeno de isla de calor.
- No existe una buena correlación entre la temperatura y el contenido de CO_2 en la atmósfera. Hay períodos en los que la temperatura ha bajado (años 1930 a 1960), mientras que los niveles de CO_2 siempre han subido.
- Los actuales modelos climáticos, que suponen un importante soporte de los científicos pro-calentamiento, presentan numerosas simplificaciones y deficiencias.