


Universidad
“Néstor Cáceres Velásquez”
Escuela de Posgrado

Contaminación Atmosférica



CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA



INTRODUCCIÓN

El aire:

Un bien común en peligro

La degradación del medio ambiente debida a la actitud adoptada por los humanos hacia la naturaleza durante el último siglo, en el sentido de que en su actuación tenía licencia para explotar los recursos naturales con una total indiferencia ante todo lo que no repercutiera en beneficio directo del hombre, ha dado lugar a uno de los problemas capitales que la Humanidad tiene planteados en la actualidad, la contaminación.

La explotación intensiva de los recursos naturales y el desarrollo de grandes concentraciones industriales y urbanas en determinadas zonas, son fenómenos que, por incontrolados, han dado lugar a la saturación de la capacidad asimiladora y regeneradora de la Naturaleza y pueden llevar a perturbaciones irreversibles del equilibrio ecológico general, cuyas consecuencias a largo plazo no son fácilmente previsibles.

La lucha contra la contaminación del aire, de las aguas continentales y marítimas, del suelo, así como la defensa del paisaje, la restauración y mejora de las zonas de interés natural y artístico, la protección de la fauna y de la flora, el tratamiento y eliminación de los residuos, la defensa de las zonas verdes y espacios libres, la reinstalación de industrias fuera de las zonas urbanas, la congestión del tráfico urbano, la lucha contra el ruido y tantas otras cuestiones, no son sino aspectos parciales e interrelacionados que han de tenerse en cuenta al abordar acciones o programas de actuación para la defensa del medio ambiente.

En estas páginas, abordaremos de una forma general el problema de la contaminación ambiental, aunque sin perder de vista que la Naturaleza actúa como una unidad, que en ella todo es interdependiente, existiendo relaciones múltiples entre el aire, el agua y el suelo, elementos que constituyen el hábitat o lugar donde se desarrolla normalmente el ciclo vital y la biosfera, sistema que engloba a los elementos anteriores y a todos los seres vivos de nuestro planeta.

Se considera el aire como un bien común limitado, indispensable para la vida; por lo tanto, su utilización debe estar sujeta a normas que eviten el deterioro de su calidad por el uso o abuso indebido del mismo, de tal modo que se preserve su pureza como garantía del normal desarrollo de los seres vivos sobre la Tierra y de la conservación del patrimonio natural y artístico de la Humanidad. Todos tenemos el deber de trabajar para lograr un mundo limpio y habitable, sustento de una mejor calidad de vida para las generaciones futuras.

La Atmósfera

La atmósfera es una capa gaseosa que rodea el globo terráqueo. Es transparente e impalpable, y no resulta fácil señalar exactamente su espesor, ya que no posee una superficie superior definida que la limite, sino que se va haciendo menos densa a medida que aumenta la altura, hasta ser imperceptible.

La atmósfera está formada por varias capas concéntricas:

- las capas bajas, que no mantienen una altura constante, y a las que se denomina troposfera y estratosfera;
- las capas altas, a las que se da el nombre de ionosfera y exosfera.

Los gases atmosféricos forman la mezcla que conocemos por aire. En las partes más inferiores de la troposfera, el aire está compuesto principalmente por nitrógeno y oxígeno, aunque también existen pequeñas cantidades de argón, dióxido de carbono, neón, helio, ozono y otros gases. También hay cantidades variables de polvo procedentes de la Tierra, y vapor de agua.

El oxígeno forma aproximadamente el 21% de la atmósfera, y es el gas más importante desde el punto de vista biológico. Es utilizado por los seres vivos en la respiración, mediante la cual obtienen la energía necesaria para todas las funciones vitales; también interviene en la absorción de las radiaciones ultravioleta del Sol que, de llegar a la Tierra en toda su magnitud, destruirían la vida animal y vegetal. La atmósfera es también la fuente principal de suministro de oxígeno al agua, y entre ambas se establece un intercambio gaseoso continuo.

Este proceso de intercambio de oxígeno en la biosfera recibe el nombre de ciclo del oxígeno y en él intervienen las plantas, como fuentes suministradoras de oxígeno a la atmósfera, y los seres vivos, incluyendo las propias plantas, como utilizadores de este gas.

No hay dudas de que la atmósfera constituye un recurso natural indispensable para la vida, y se clasifica como un recurso renovable. Sin embargo, su capacidad de renovación es limitada, ya que depende de la actividad fotosintética de las plantas, por la cual se devuelve el oxígeno a la atmósfera. Por esta razón, es lógico pensar que de resultar dañadas las plantas, por la contaminación del aire o por otras acciones de la actividad humana, es posible que se presente una reducción del contenido de oxígeno

en la atmósfera, con consecuencias catastróficas para todos los seres vivos que lo utilizan.

El hombre, en su incesante avance científico-técnico, debe tomar las medidas adecuadas para que su propio desarrollo no haga a nuestra atmósfera víctima de la contaminación. Solamente con una política planificada y consecuente es posible reducir tan terrible mal, y evitar a las futuras generaciones las peligrosas consecuencias que este puede implicar.

El humo procedente de las industrias o de la combustión que se lleva a cabo en otros lugares, así como el polvo, son agentes contaminantes de la atmósfera, los cuales enrarecen el aire y afectan la salud del hombre y de los seres vivos en general.



Como puede verse, la contaminación del aire afecta varios factores del ambiente:

- Las plantas pueden ser dañadas por los agentes contaminantes, especialmente el dióxido de azufre (SO₂), el cual blanquea las hojas y afecta las cosechas.
- Existen evidencias de que la contaminación del aire está asociada con enfermedades de tipo respiratorio, incluyendo bronquitis crónica, asma bronquial, etc.
- El aire contaminado corroe los metales, las telas se debilitan y se desfilen, el cuero se hace más débil y más brillante, la pintura se decolora, las piezas de mármol y otras piedras se ennegrecen y se hacen más frágiles.

Otra forma de contaminación del

aire son los olores en general, pues aún cuando sean agradables inicialmente, pueden convertirse en molestos e inconvenientes, ocasionando al hombre malestar y dolores de cabeza.

Dentro de las principales fuentes de producción de olores, aparte de la actividad industrial y el tráfico automotor, se encuentran:

- las aguas albañales y los desechos,
- los corrales de animales,
- las quemas de residuos industriales, domésticos, etc.,
- la descomposición de basuras por acumulación de residuos.

Todas las formas de contaminación del aire son producto de fuentes muy variadas que pueden ser estacionarias o móviles:

Estacionarias industrias
construcción, demolición
quemas

Móviles transporte

La contaminación influye directamente sobre la salud del hombre y en el deterioro de sus recursos naturales, por lo que deben aplicarse las medidas necesarias para disminuir los efectos.

LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS Y CLASES

Se entiende por contaminación atmosférica la presencia en el aire de sustancias y formas de energía que alteran la calidad del mismo, de modo que implique riesgos, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza.

Todas las actividades humanas, el metabolismo de la materia humana y los fenómenos naturales que se producen en la superficie o en el interior de la tierra van acompañados de emisiones de gases, vapores, polvos y aerosoles. Estos, al difundirse a la atmósfera, se integran en los distintos ciclos biogeoquímicos que se desarrollan en la Tierra.

De la definición de contaminación atmosférica dada arriba, se desprende que el que una sustancia sea considerada contaminante o no dependerá de los efectos que produzca sobre sus receptores. Se consideran contaminantes aquellas sustancias que pueden dar lugar a riesgo o daño, para las personas o bienes en determinadas circunstancias.

Con frecuencia, los contaminantes naturales ocurren en cantidades mayores que los productos de las actividades humanas, los llamados contaminantes antropogénicos. Sin embargo, los con-

taminantes antropogénicos presentan la amenaza más significativa a largo plazo para la biosfera.

Contaminantes Naturales del Aire

Fuente	Contaminantes
Volcanes	Óxidos de azufre, partículas
Fuegos forestales	Monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas
Vendavales	Polvo
Plantas (vivas)	Hidrocarburos, polen
Plantas (en descomposición)	
Metano, sulfuro de hidrógeno	
Suelo	Virus, polvo
Mar	Partículas de sal

Una primera clasificación de estas sustancias, atendiendo a cómo se forman, es la que distingue entre contaminantes primarios y contaminantes

Entre los contaminantes atmosféricos más frecuentes que causan alteraciones en la atmósfera se encuentran:

- Aerosoles (en los que se incluyen las partículas sedimentables y en suspensión y los humos).
- Óxidos de azufre, SO_x.
- Monóxido de carbono, CO.
- Óxidos de nitrógeno, NO_x.
- Hidrocarburos, Hn Cm.
- Ozono, O₃.
- Anhídrido carbónico, CO₂.

Además de estas sustancias, en la atmósfera se encuentran una serie de contaminantes que se presentan más raramente, pero que pueden producir efectos negativos sobre determinadas zonas por ser su emisión a la atmósfera muy localizada. Entre otros, se encuentra como más significativos los siguientes:

químicas y fotoquímicas que sufren los contaminantes primarios en el seno de la misma.

Las principales alteraciones atmosféricas producidas por los contaminantes secundarios son:

- la contaminación fotoquímica;
- la acidificación del medio; y
- la disminución del espesor de la capa de ozono.

CONTAMINANTES PRIMARIOS

Los aerosoles

El término aerosol o partícula se utiliza a veces indistintamente, ya que los aerosoles atmosféricos se definen como «dispersiones de sustancias sólidas o líquidas en el aire».

Las propiedades de los aerosoles que más afectan a los procesos de contaminación atmosférica son el tamaño de sus partículas, la forma y la composición química.



secundarios.

Contaminantes primarios

Entendemos por contaminantes primarios aquellas sustancias contaminantes que son vertidas directamente a la atmósfera. Los contaminantes primarios provienen de muy diversas fuentes dando lugar a la llamada contaminación convencional. Su naturaleza física y su composición química son muy variadas, si bien podemos agruparlos atendiendo a su peculiaridad más característica tal como su estado físico (caso de partículas y metales), o elemento químico común (caso de los contaminantes gaseosos).

- Otros derivados del azufre.
- Halógenos y sus derivados.
- Arsénico y sus derivados.
- Componentes orgánicos.
- Partículas de metales pesados y ligeros, como el plomo, mercurio, cobre, zinc.
- Partículas de sustancias minerales, como el amianto y los asbestos.
- Sustancias radiactivas.

Contaminantes secundarios

Los contaminantes atmosféricos secundarios no se vierten directamente a la atmósfera desde los focos emisores, sino que se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones

química. El tamaño de las partículas oscila entre 1 y 1000 micras, aunque existen algunas muy especiales fuera de estos límites. En la atmósfera, las partículas de tamaño inferior a 1 micra realizan movimientos al azar, produciendo choques entre ellas que dan lugar a agregados de mayor tamaño en un proceso denominado coagulación.

Las partículas de tamaños comprendidos entre 1 y 10 micras tienden a formar suspensiones mecánicamente estables en el aire, por lo que reciben el nombre de «materia en suspensión», pudiendo ser trasladados a grandes distancias por la acción de los vientos. Las

partículas mayores de 10 micras permanecen en suspensión en el aire durante periodos de tiempo relativamente cortos por lo que se las conoce como «materia sedimentable»; sus efectos son más acusados en las proximidades de las fuentes que las emiten. El tamaño de las partículas es un factor muy importante en la determinación tanto de los efectos que producen como de las áreas afectadas, ya que establece su tiempo de permanencia en la atmósfera y la facilidad con que se introducen en las vías respiratorias profundas.

La composición química varía mu-



cho de unas partículas a otras, dependiendo fundamentalmente de su origen. Así las partículas de polvo procedentes del suelo contienen, principalmente, compuestos de calcio, aluminio y silicio. El humo procedente de la combustión del carbón, petróleo, madera y residuos domésticos contiene muchos compuestos orgánicos, al igual que los insecticidas y algunos productos procedentes de la fabricación de alimentos y de la industria química. En la combustión del carbón y gasolinas se liberan metales pesados que pasan a formar parte de las partículas liberadas a la atmósfera, generalmente en forma de óxidos metálicos.

Las partículas pueden clasificarse, atendiendo a su tamaño y composición,

en:

Denominación	Composición
--------------	-------------

Núcleos de Aitken	Partículas con menos de 1 micra de diámetro.
-------------------	--

Partículas medias (en suspensión)	Partículas con un diámetro comprendido entre 1 y 10 micras.
-----------------------------------	---

Partículas sedimentables	Partículas con diámetro superior a 10 micras.
--------------------------	---

Polvos	Partículas sólidas de origen mineral o materia sólida dispersada por el aire.
--------	---

Humos industriales	Partículas sólidas o líquidas debidas a la volatilización de metales, seguida o no de su oxidación por el aire o condensación de vapores.
--------------------	---

Humos de combustión Humos debidos a proceso de combustión, constituidos por partículas de carbono y de hidrocarburos no quemados y cenizas volantes.

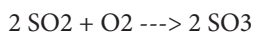
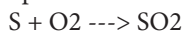
Los óxidos de azufre (SOx)

El óxido de azufre que se emite a la atmósfera en mayores cantidades es el anhídrido sulfuroso (SO₂), y en menor proporción, que no rebasa el 1 ó el 2 por ciento del anterior, el anhídrido sulfúrico (SO₃).

El SO₂ es un gas incoloro, de olor picante e irritante en concentraciones superiores a 3 ppm. Es 2.2 veces más pesado que el aire, a pesar de lo cual se desplaza rápidamente en la atmósfera, siendo un gas bastante estable. El SO₃ es un gas incoloro y muy reactivo que condensa fácilmente; en condiciones normales, no se encuentra en la atmósfera, ya que reacciona rápidamente con el agua atmosférica, formando ácido sulfúrico.

La combustión de cualquier sustancia que contenga azufre produce emisiones de SO₂ y SO₃; la cantidad de SO₃ producida depende de las condiciones de la reacción, especialmente de la temperatura, oscilando entre 1 y 10 por ciento de los SOx producidos.

Un mecanismo de formación de SOx podría ser:



La segunda reacción se produce en pequeña escala y tiene lugar muy lentamente, a la temperatura de la atmósfera, siendo favorecida por la acción de catalizadores. El efecto neto es que la emisión de los SOx se realiza fundamentalmente en forma de SO₂.

El monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es el contaminante del aire más abundante en la capa inferior de la atmósfera, sobre todo en el entorno de las grandes ciudades. Es un gas incoloro, inodoro e insípido y su punto de ebullición es de -192° C. Presenta una densidad del 96.5 por ciento de la del aire, siendo un gas muy ligero que no es apreciablemente soluble en agua. Es inflamable y arde con llama azul, aunque no mantiene la combustión.

El CO se produce generalmente como resultado de alguno de los siguientes procesos químicos:

- Combustión incompleta del carbono.
- Reacción a elevada temperatura entre el CO₂ y materiales que tienen carbono.
- Disociación del CO₂ a altas temperaturas.
- Oxidación atmosférica del metano (CH₄ procedente de la fermentación anaerobia (sin aire) de la materia orgánica.

- Proceso de producción y degradación de la clorofila en las plantas.

Los principales problemas de contaminación atmosférica por CO son debidos a la combustión incompleta de carburantes en los automóviles.

Los óxidos de nitrógeno (NOx)

Los contaminantes que poseen en su molécula algún átomo de nitrógeno pueden clasificarse en 3 grupos diferentes: formas orgánicas, formas oxidadas y forma reducidas.

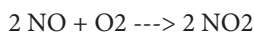
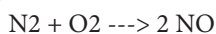
Se conocen ocho óxidos de nitrógeno distintos, pero normalmente sólo tienen interés como contaminantes dos de ellos, el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂). El resto se encuentra en equilibrio con estos dos, pero en concentraciones tan extraordinariamente bajas que carecen de importancia.

El óxido nítrico (NO) es un gas incoloro y no inflamable, pero inodoro y tóxico. El dióxido de nitrógeno (NO₂) es un gas pardo-rojizo, no es inflamable pero sí tóxico y se caracteriza por un olor muy asfixiante. Se utiliza normalmente la notación NOx para representar colectivamente al NO y al NO₂ implicados en la contaminación del aire.

La mayor parte de los óxidos de nitrógeno se forman por la oxidación del nitrógeno atmosférico durante los procesos de combustión a temperaturas elevadas. El oxígeno y el nitrógeno del aire reaccionan para formar NO, oxi-

dándose este posteriormente a NO₂.

Las partículas pueden clasificarse, atendiendo a su tamaño y composición, en:



La mayor parte de los NO_x emitidos a la atmósfera lo son en la forma NO.

Los hidrocarburos (HC)

Son sustancias que contienen hidrógeno y carbono. El estado físico de los hidrocarburos, de los que se conocen decenas de millares, depende de su estructura molecular y en particular del número de átomos de carbono que forman su molécula.

Los hidrocarburos que contienen de uno a cuatro átomos de carbono son gases a la temperatura ordinaria, siendo estos los más importantes desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, ya que favorecen la formación de las reacciones fotoquímicas.

Ozono (O₃)

El ozono es una forma alotrópica del oxígeno. Su fórmula química es O₃. En condiciones normales es un gas incoloro de olor picante característico. Posee un gran poder oxidante y gran tendencia a transformarse en oxígeno.

Las concentraciones de ozono a nivel del suelo son muy pequeñas, incrementándose rápidamente con la altura. Su presencia en la parte baja de la atmósfera se debe, sobre todo, a la acción fotoquímica de las radiaciones solares, en presencia de NO_x y HC.

Anhídrido carbónico (CO₂)

El anhídrido carbónico o dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro, no tóxico, más denso que el aire, que se presenta en la atmósfera en concentraciones que oscilan entre 250 y 400 ppm.

En realidad no puede considerarse como contaminante en sentido estricto ya que no es tóxico, y se halla en atmósferas puras de modo natural. No obstante, por los posibles riesgos que entraña su acumulación en la atmósfera, como consecuencia de las alteraciones producidas en su ciclo por las actividades humanas que pudieran dar lugar a una modificación del clima de la Tierra, lo consideramos como sustancia contaminante.

Compuestos halogenados

De entre los productos químicos que contienen halógenos en su molécula, son contaminantes de la atmósfera: el cloro, el fluoruro de hidrógeno, el cloruro de hidrógeno y ciertos haluros. Entre estos destacamos la acción tóxica del

flor y sus derivados sobre los vegetales.

Metales tóxicos

Los metales son elementos químicos que generalmente se hallan presentes en la atmósfera en muy bajas concentraciones.

Una de las consecuencias más graves de la presencia de metales tóxicos en el ambiente es que no son degradados, ni química ni biológicamente, por la naturaleza, lo que origina su persistencia en ella. Esta persistencia lleva a la amplificación biológica de los metales en las cadenas tróficas. Como consecuencia de este proceso, las concentraciones de metales en los miembros superiores de la cadena pueden alcanzar valores muy superiores a los encontrados en la



atmósfera (ver sobre Magnificación biológica).

Entre los metales tóxicos más importantes por sus efectos sobre la salud del ser humano están el mercurio (Hg) y el plomo (Pb). La cantidad de plomo en el aire ha experimentado un marcado aumento como consecuencia de las actividades humanas, siendo las concentraciones de plomo en las áreas urbanas de 5 a 50 veces superiores que en las áreas rurales.

Sustancias radiactivas

La causa de entender estas sustancias como contaminantes radica en que emiten radiaciones ionizantes que pueden provocar efectos nocivos cuando interactúan con los seres vivos.

CONTAMINANTES SECUNDARIOS

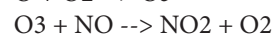
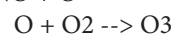
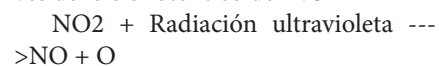
Contaminación fotoquímica

La contaminación fotoquímica se produce como consecuencia de la aparición en la atmósfera de oxidantes, originados al reaccionar entre sí los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el oxígeno en presencia de la radiación ultravioleta de los rayos del sol. La formación de los oxidantes se ve favorecida en situaciones estacionarias de altas presiones (anticiclones) asociados a una fuerte insolación y vientos débiles que dificultan la dispersión de los contaminantes primarios.

El mecanismo de formación de los oxidantes fotoquímicos es complejo, realizándose por etapas a través de una serie de reacciones químicas. El proceso

completo puede ser simplificado en las tres etapas siguientes:

- Formación de oxidantes a través del ciclo fotolítico del NO₂



- Formación de radicales libres activos. La presencia en el aire de hidrocarburos hace que el ciclo fotolítico se desequilibre al reaccionar éstos con el oxígeno atómico y el ozono generado, produciendo radicales libres muy reactivos.



- Formación de productos finales. Los radicales libres formados reaccionan con otros radicales, con los contaminantes primarios y con los

constituyentes normales del aire, dando lugar a los contaminantes fotoquímicos según las reacciones:

$\text{HC-3} + \text{HC} \rightarrow \text{Aldehídos, ketonas, etc.}$

$\text{HCO}_2 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{Nitratos de peroxiacilo (PAN)}$

La mezcla resultante de todas estas sustancias da lugar a la denominada contaminación fotoquímica o «smog fotoquímico», tipo Los Angeles, como normalmente se le conoce, debido a que fue en esta ciudad californiana donde se observó por primera vez. Este tipo de contaminación se presenta cada vez con más frecuencia en las grandes ciudades de los países industrializados, siendo muy interesante el estudio de la variación durante el día de la concentración de los contaminantes que intervienen en el mecanismo de formación de los oxidantes fotoquímicos.

En las primeras horas de la mañana se produce una intensa emisión de hidrocarburos (HC) y óxido nítrico (NO) al comenzar la actividad humana en las grandes ciudades (encendido de las ca-

lefacciones y tráfico intenso). El óxido nítrico (NO) se oxida a óxido nítrico (NO₂) aumentando la concentración de este último en la atmósfera. Las concentraciones superiores de NO₂ unido a que la radiación solar se va haciendo más intensa, ponen en marcha el ciclo fotolítico del NO₂, generando oxígeno atómico que al transformarse en ozono conduce a un aumento de la concentración de este elemento y de radicales libres de hidrocarburos. Estos, al combinarse con cantidades apreciables de NO, producen una disminución de este compuesto en la atmósfera. Este descenso en la concentración de NO impide que se complete el ciclo fotolítico aumentando rápidamente la concentración de ozono (O₃).

A medida que avanza la mañana la radiación solar favorece la formación de oxidantes fotoquímicos, aumentando su concentración en la atmósfera. Cuando disminuyen las concentraciones de los precursores (NO_x y HC) en la atmósfera, cesa la formación de oxidantes y sus concentraciones disminuyen al avanzar el día. De aquí que la contaminación

fotoquímica se manifieste principalmente por la mañana en las ciudades

Acidificación del medio ambiental (lluvias ácidas)

Entendemos por acidificación del medio ambiente la pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra en forma de ácidos de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera.

La acidificación es un ejemplo claro de las interrelaciones entre los distintos factores ambientales, atmósfera, suelo, agua y organismos vivos. Así la contaminación atmosférica producida por los SO_x y NO_x afecta directa o indirectamente al agua, al suelo y a los ecosistemas.

La amplitud e importancia de la acidificación del medio es debida, principalmente, a las grandes cantidades de óxidos de azufre y de nitrógeno lanzados a la atmósfera, siendo de destacar que del total de las emisiones de SO₂ en el globo terrestre, aproximadamente la mitad son emitidas por las actividades humanas (antropogénicas) y que la ma-





por parte de éstas se producen en las regiones industrializadas del Hemisferio Norte que ocupan menos del 5% de la superficie terrestre.

El proceso de acidificación se origina de la siguiente forma:

- El azufre se encuentra en un principio en estado elemental, fijado en los combustibles fósiles.
- El nitrógeno en forma elemental se encuentra en el aire y también en los combustibles.
- Durante el proceso de la combustión de los combustibles fósiles se liberan el azufre y el nitrógeno, emitiéndose, en su mayor parte por las chimeneas, a la atmósfera como dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), respectivamente.

• Los óxidos de azufre y nitrógeno sufren una serie de fenómenos tales como transporte a gran distancia, reacciones químicas, precipitación y deposición. Con el tiempo estos óxidos y los distintos compuestos a que dan lugar retornan a la superficie de la tierra donde son absorbidos por los suelos, el agua o la vegetación.

El proceso de retorno a la tierra puede realizarse de dos maneras:

a. Deposición seca. Una fracción de los óxidos vertidos a la atmósfera retornan a la superficie de la tierra en forma gaseosa o de aerosoles. Esto puede ocurrir cerca de las fuentes de emisión

de los contaminantes o a distancia de hasta algunos cientos de kilómetros de la misma, en función de las condiciones de dispersión. No obstante, la deposición en seco es predominante en zonas próximas al foco emisor.

b. Deposición húmeda. La mayor parte de los SO_2 y NO_x que permanecen en el aire sufren un proceso de oxidación que da lugar a la formación de ácido sulfúrico (SO_4H_2) y ácido nítrico (NO_3H). Estos ácidos se disuelven en las gotas de agua que forman las nubes y en las gotas de lluvia, retornando al suelo con las precipitaciones. Una parte de estos ácidos queda neutralizada por sustancias presentes en el aire tales como el amoníaco, formando iones de amonio (NH_4^-).

Los ácidos disueltos consisten en iones de sulfato, iones nitrato e iones de hidrógeno. Todos estos iones están presentes en las gotas de lluvia, lo que da lugar a la acidificación de la misma.

Rotura de la capa de ozono

Uno de los grandes problemas causados por las reacciones que tienen lugar entre los contaminantes de la atmósfera es el de la disminución de la capa de ozono de la estratosfera como consecuencia de la descarga de determinadas sustancias a la atmósfera.

El ozono contenido en la estratosfera se puede descomponer a través de una serie de reacciones cíclicas en las

que intervienen radicales que contienen hidrógeno y nitrógeno. El ozono se puede descomponer también por absorción de radiación ultravioleta, produciendo oxígeno atómico y molecular.

Como consecuencia de estas reacciones de producción y destrucción se forma una capa de ozono cuyo espesor varía cíclicamente, tanto diaria como estacionalmente. Se han detectado como potencialmente peligrosas para la capa de ozono, tres tipos de actividades humanas:

- Generación de gran cantidad de óxidos de nitrógeno emitidos por los aviones supersónicos como el Concorde y los cohetes espaciales.

- Producción de óxidos nitrosos como resultado de la acción desnitrificadora de las bacterias en el suelo. Los óxidos nitrosos son productos relativamente estables que pueden persistir en la troposfera, llegando a alcanzar la estratosfera donde se pueden descomponer en óxido nítrico que es activo en la destrucción del ozono. Esta es probablemente la principal fuente del óxido de nitrógeno presente en la estratosfera y el principal agente de destrucción del ozono en el ciclo natural.

- Finalmente, los átomos libres de cloro pueden producir la destrucción del ozono a través de una serie de reacciones. La presencia de estos átomos de cloro en la estratosfera se debe a las

reacciones que sufren los clorofluorcarbonos cuando se dispersan en la atmósfera. En las últimas décadas dos de estos productos, el CF_2Cl_2 y el CFCl_3 se han utilizado con gran profusión como refrigerantes en la industria y especialmente como propelentes de las aspersiones ("spray"), debido a su alta estabilidad química, baja toxicidad y no ser inflamables. Su estabilidad química es la que permite la migración de estos productos hasta la estratosfera, en la que se descomponen como consecuencia de la radiación ultravioleta produciendo átomos de cloro.

3.- LA CALIDAD DEL AIRE (INMISIONES)

La exigencia de un aire limpio y puro proviene, en principio, del público en general ante su creciente preocupación por los problemas de contaminación atmosférica originados como consecuencia de la evolución de la tecnología moderna y la previsión de que las cada vez mayores emisiones de contaminantes a la atmósfera alteren el equilibrio natural existente entre los distintos ecosistemas, afecten la salud de los humanos y a los bienes materiales o, incluso, provoquen cambios catastróficos en el clima terrestre.

La atmósfera terrestre es finita y su capacidad de autodepuración, aunque todavía no es muy conocida, también parece tener sus límites. La emisión a la atmósfera de sustancias contaminantes en cantidades crecientes como consecuencia de la expansión demográfica mundial y el progreso de la industria, han provocado ya concentraciones de estas sustancias a nivel del suelo que han

ido acompañadas de aumentos espectaculares de la mortalidad y morbilidad, existiendo pruebas abundantes de que, en general, las concentraciones elevadas de contaminantes en el aire atentan contra la salud de los seres humanos.

En la mayoría de los países industrializados se han establecido valores máximos de concentración admisible, para los contaminantes atmosféricos más característicos. Estos valores se han fijado a partir de estudios teóricos y prácticos de los efectos que sobre la salud tiene la contaminación al nivel actual y los que puede alcanzar en el futuro. Los efectos se basan principalmente en el examen de factores epidemiológicos.

Para la definición de criterios y pautas de salubridad del aire, se pueden utilizar varios procedimientos. Las técnicas experimentales se basan en el ensayo con animales o en el empleo de muestras de voluntarios en atmósferas controladas. Son muy útiles para el estudio de los efectos fisiológicos, bioquímicos y sobre el comportamiento, producidos por supuestos contaminantes. Los estudios epidemiológicos permiten investigar los efectos producidos por las fluctuaciones de la contaminación atmosférica sobre la totalidad de la población, o sobre grupos seleccionados y definidos.

Determinar los efectos de la contaminación del aire es sumamente complejo, ya que la asociación entre un contaminante y una enfermedad o una defunción puede ser más accidental que causal. Las relaciones existentes entre las enfermedades humanas por la exposición a niveles bajos de contaminación

durante un periodo largo de tiempo no se conocen en la actualidad con exactitud.

En la evaluación de riesgos asociados a la contaminación y para la fijación de normas de calidad del aire, lo ideal sería disponer de una serie completa de curvas dosis-respuesta para los distintos contaminantes atmosféricos, para los diferentes efectos y para los distintos tipos de población expuesta. De momento no se dispone de esta información, para todos los contaminantes atmosféricos y aún es más difícil que llegue a reunirse para las combinaciones de sustancias que más frecuentemente se encuentran en el aire.

Para tratar de evitar las lagunas e imprecisiones con que se conocen las relaciones dosis-respuesta y dado que, generalmente, está aceptado que ciertas concentraciones de contaminantes atmosféricos provocan efectos nocivos sobre la salud humana, se suele recurrir a la utilización de un coeficiente de seguridad cuando se fijan las normas sobre la calidad del aire. La magnitud del coeficiente de seguridad adoptado depende de muy diversas consideraciones; puede tratarse de consideraciones políticas en las que se tenga en cuenta, sobre todo, los análisis «coste-beneficio», o de la significación estadística y de la exactitud de los datos, o del grado de protección que se quiere dar a la población.

En la mayoría de los países, las normas de calidad del aire tienen como objetivo inmediato el evitar enfermedades y fallecimientos en aquellos subgrupos de la población más sensibles. Hay que tener en cuenta que el objetivo a largo plazo ha de ser de protección contra todo posible efecto sobre la salud del hombre, incluidas las alteraciones genéticas y somáticas.

Generalmente, la calidad del aire se evalúa por medio de los denominados niveles de inmisión, que vienen definidos como la concentración media de un contaminante presente en el aire durante un periodo de tiempo determinado. La unidad en que se expresan normalmente estos niveles son microgramos de contaminante por metro cúbico de aire, medidos durante un periodo de tiempo determinado.

ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA (EMISIONES)

Los contaminantes presentes en la atmósfera proceden de dos tipos de fuentes emisoras bien diferenciadas: las naturales y las antropogénicas. En



el primer caso la presencia de contaminantes se debe a causas naturales, mientras que en el segundo tiene su origen en las actividades humanas.

Las emisiones primarias originadas por los focos naturales provienen fundamentalmente de los volcanes, incendios forestales y descomposición de la materia orgánica en el suelo y en los océanos. Por su parte, los principales focos antropogénicos de emisiones primarias los podemos clasificar en:

Focos fijos	Industriales
Procesos industriales	Instalaciones fijas de combustión
Domésticos	Instalaciones de calefacción
Focos móviles	Vehículos automóviles
Aeronaves	
Buques	
Focos compuestos	Aglomeraciones industriales
Áreas urbanas	

Si atendemos a la distribución espacial de la emisión de contaminantes, podemos clasificar los focos en: puntuales, tales como las chimeneas industriales aisladas; lineales, por ejemplo, las calles de una ciudad, las carreteras y autopistas; y planos, las aglomeraciones industriales y las áreas urbanas son los ejemplos más representativos.

En el cuadro siguiente se muestra la proporción entre las emisiones primarias naturales y antropogénicas para los distintos contaminantes.

Focos de emisión	Contaminante Antropogénicos	
% Naturales	%	%
Aerosoles	11.3	88.7
SO _x	42.9	57.1
CO	9.4	90.6
NO	11.3	88.7
HC	15.5	84.5

Las cifras anteriores muestran la gran importancia que, en cuanto a emisiones globales, tienen las fuentes naturales de emisión de contaminantes en relación con los antropogénicos, excepto en el caso de las emisiones de anhídrido sulfuroso en que casi se igualan ambas.

Atendiendo a la distribución espacial de estas emisiones se observa que en las regiones más industrializadas de Europa y Norteamérica las emisiones antropogénicas de SO₂ alcanzan proporciones muy superiores a las naturales. Así en el Norte de Europa las

emisiones antropogénicas originan alrededor del 90% del azufre que está en circulación en la atmósfera.

Otra circunstancia a tener en cuenta es que los focos de emisión antropogénicos están concentrados, por lo general, en áreas urbanas e industriales. Este conjunto de circunstancias hacen que la contribución de las emisiones antropogénicas al problema de la contaminación atmosférica a escala regional sea predominante.

Focos antropogénicos de emisión

Los principales focos de contaminación atmosférica de origen antropogénico son las chimeneas de las instalaciones de combustión para generación de calor y energía eléctrica, los tubos de escape de los vehículos automóviles y los procesos industriales.

Contaminantes emitidos por los vehículos automóviles

En las últimas décadas, el automóvil ha aparecido de forma masiva en las ciudades, contribuyendo a incrementar los problemas de contaminación atmosférica como consecuencia de los gases contaminantes que se emiten por los tubos de escape. Los principales contaminantes lanzados por los automóviles son: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos no quemados (HC), y compuestos de plomo.

No todos los vehículos lanzan los distintos tipos de contaminantes en las mismas proporciones; éstas depende-

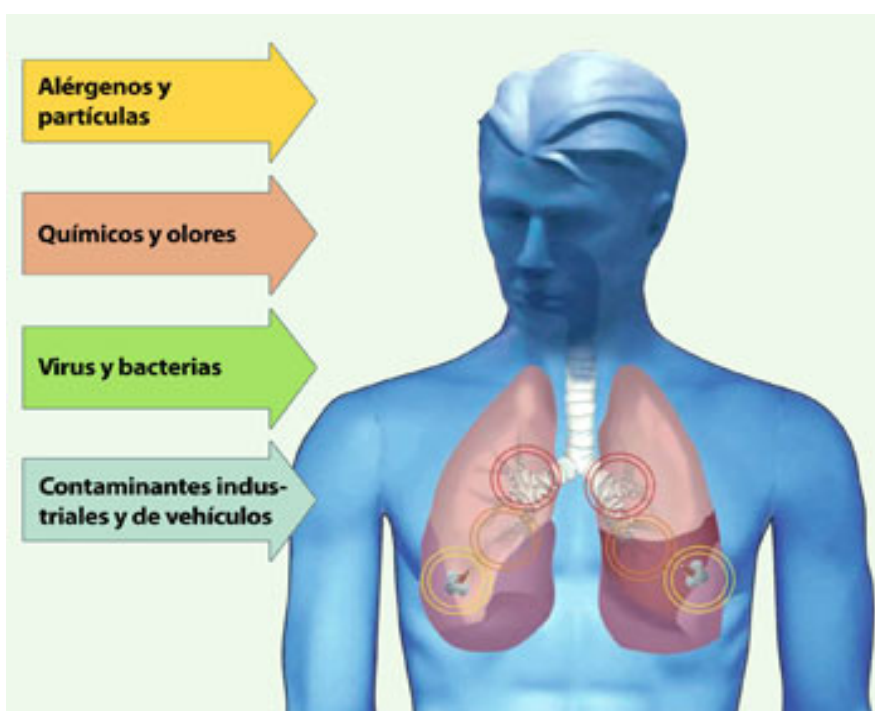
rán del tipo de motor que se utilice. Los vehículos que emplean gasolina como carburante emiten principalmente monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y compuestos de plomo. La emisión de este último tipo de contaminante se debe a la presencia en algunos tipos de gasolina de tetraetilo de plomo, aditivo que se añade para aumentar su índice de octano.

Los principales contaminantes emitidos por los vehículos que utilizan motores de ciclo diésel (camiones y autobuses, por ejemplo) son partículas sólidas en forma de hollín que da lugar a los humos negros, hidrocarburos no quemados, óxidos de nitrógeno y anhídrido sulfuroso procedente del azufre contenido en el combustible.

Calefacciones domésticas

Las instalaciones de calefacción domésticas son una de las principales fuentes de contaminación atmosférica de las grandes ciudades. Este tipo de focos puede contribuir con un 20 a 30% de las emisiones totales a la atmósfera en áreas urbanas. Los principales contaminantes producidos dependen del tipo de combustible empleado.

En el caso del carbón los principales contaminantes producidos son: anhídrido sulfuroso, cenizas volantes, hollines, metales pesados y óxidos de nitrógeno. Cuando el combustible empleado es líquido (gasóleo o gasoil), los principales contaminantes emitidos son: SO₂, SO₃, NO_x, hidrocarburos volátiles no quemados y partículas carbonosas.



El gas natural es el combustible más limpio de los actualmente disponibles para calefacción, siendo su producción de contaminantes despreciable respecto a los otros combustibles. A la introducción masiva del gas para calefacciones domésticas, sustituyendo al carbón y al gas oil anteriormente utilizados, se debe en gran parte el éxito del Plan de Descontaminación Atmosférica de la ciudad de Londres (Gran Bretaña).

Calderas industriales de generación de calor

Entre las distintas fuentes de contaminación atmosférica de origen industrial, la combustión de combustibles fósiles para la generación de calor y electricidad ocupa un lugar preponderante, tanto por la cantidad como por los tipos de contaminantes emitidos. Especial atención merecen las centrales térmicas de producción de electricidad.

Los combustibles utilizados por este tipo de instalaciones son el carbón y el fuel-oil. La producción de contaminantes depende en gran medida de la calidad del combustible, en especial de las proporciones de azufre y cenizas contenidas en el mismo y del tipo de proceso de combustión empleado.

Durante el proceso de combustión se libera a la atmósfera el azufre contenido en el combustible en forma de anhídrido sulfuroso. Junto con otros contaminantes como óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, metales pesados y una gran variedad de sustancias. Cuando se utiliza como combustible el carbón, se emiten abundantes partículas finas que pueden ser trasladadas a grandes distancias.

Contaminantes emitidos por la industria

La contaminación de origen industrial se caracteriza por la gran cantidad de contaminantes producidos en las distintas fases de los procesos industriales y por la variedad de los mismos. Por otra parte, en los focos de emisión industriales se suelen combinar las emisiones puntuales, fácilmente controlables, con emisiones difusas de difícil control.

Los tipos de contaminantes producidos por los focos industriales dependen fundamentalmente del tipo de proceso de producción empleado, de la tecnología utilizada y de las materias primas usadas. Las actividades industriales que producen contaminantes atmosféricos son muy variadas, pero los principales focos están en los procesos productivos

utilizados en las industrias básicas.

Entre los sectores que dan lugar a la mayor emisión de contaminantes atmosféricos podemos destacar:

- La siderurgia integral. Produce todo tipo de contaminantes y en cantidades importantes, siendo los principales: partículas, SO_x, CO, NO_x, fluoruros y humos rojos (óxidos de hierro).

- Refinerías de petróleo. Producen principalmente: SO_x, HC, CO, NO_x, amoníaco, humos y partículas.

- Industria química. Produce, dependiendo del tipo de proceso empleado: SO₂, nieblas de ácidos sulfúrico, nítrico y fosfórico y da lugar a la producción de olores desagradables.

- Industrias básicas del aluminio y derivados del fluor. Producen emisiones de contaminantes derivados del fluor.

CORRELACIÓN ENTRE LAS INMISIONES Y LAS EMISIONES DE CONTAMINANTES

Desde los focos de contaminación se produce la mezcla y dilución de los contaminantes en el aire, dando lugar a una distribución de la concentración de los mismos, variable tanto en el espacio como en el tiempo.

La cantidad de contaminantes presentes en la atmósfera vendrá determinada por la diferencia entre los lanzados y producidos en la misma y los que se eliminan a través de los procesos de autodepuración por deposición, precipitación y absorción por el suelo, el agua y la vegetación. Estos procesos de autodepuración atmosférica pueden causar acumulaciones excesivas de contaminantes en otros medios (vegetación, suelos, lagos, etc.), incluso lejos del punto de emisión del contaminante, como consecuencia del arrastre atmosférico producido por el viento.

En las áreas en que se dé una fuerte concentración de focos emisores de contaminantes pueden producirse episodios de fuerte contaminación local como consecuencia de la persistencia de situaciones meteorológicas adversas para la difusión de los contaminantes.

Estos episodios se manifiestan con grandes aumentos de la concentración de contaminantes en un área más o menos extensa alrededor de focos contaminantes y pueden verse forzados por las especiales condiciones topográficas de la zona, o por la localización de barreras artificiales (edificios) que pueden favorecer la acumulación de contaminantes.

En otros casos los contaminantes

pueden alcanzar bastante altura e introducirse en las masas de aire que forman las corrientes generales de vientos sobre la tierra, siendo arrastrados a muchos kilómetros de las fuentes de emisión.

Influencia de los procesos meteorológicos en la contaminación atmosférica

La concentración de contaminantes a nivel del suelo varía como consecuencia del desequilibrio entre los índices



de producción de contaminantes y los de dilución y desaparición de los mismos. Es decir, la concentración de contaminantes dependerá de la relación de fuerzas entre las fuentes contaminantes y las condiciones de autodepuración atmosférica.

La importancia de las condiciones meteorológicas en el grado de contaminación atmosférica se reconoce observando las variaciones de la calidad del aire en una zona determinada de unos días a otros, aun cuando las emisiones permanecen prácticamente constantes.

Las principales variables meteorológicas a considerar por su influencia sobre la calidad del aire son:

- a. el transporte convectivo horizontal, que depende de las velocidades y direcciones del viento; y

- b. el transporte convectivo vertical, que depende de la estabilidad atmosférica y del fenómeno de la inversión térmica de las capas de la atmósfera.

Transporte convectivo horizontal. El viento, al transportar los contaminan-

tes, produce su dispersión horizontal y determina la zona que va a estar expuesta a los mismos. Por lo general, una mayor velocidad del viento reducirá las concentraciones de contaminantes al nivel del suelo, ya que se producirá una mayor dilución y mezcla.

No obstante, pueden producirse circulaciones cerradas de viento, como en el caso de las brisas del mar y las de valle y montaña, en las que los contaminantes lanzados a la atmósfera se incorporan a la circulación del viento con lo que se produce una acumulación progresiva de contaminantes, que da lugar a un aumento de la concentración de los mismos en las zonas barridas por este tipo de vientos. Efectos similares se producen cuando los vientos fuertes inciden perpendicularmente a las crestas montañosas, a un valle o sobre los edificios

diente al gradiente vertical adiabático.

- Si en la capa de aire la temperatura descende con la altura bastante menos de un grado cada 100 metros, los movimientos verticales del aire están muy limitados por lo que hay poca o nula dispersión vertical de contaminantes. En estas condiciones se dice que la clase de estabilidad atmosférica es del tipo estable.

- Cuando la temperatura del estrato descende con la altura más de un grado cada 100 metros de altura, la estabilidad atmosférica será del tipo inestable y los movimientos verticales del aire están muy favorecidos difundiéndose los contaminantes verticalmente hasta donde alcance la inestabilidad.

- Por último, tenemos el caso de la estratificación indiferente o nula, que se da cuando coinciden la variación de

las capas de aire que están en contacto con él.

Existen otros tipos de inversiones que, generalmente, se producen a más altura y que actúan como una capa que limita la dispersión de contaminantes en sentido vertical, incrementando notablemente las concentraciones de contaminantes en los estratos de aire que quedan bajo ellos.

Estos tipos de inversiones son las llamadas de subsistencia, que tienden a formarse en las áreas anticiclónicas, y las inversiones frontales, producidas por la superposición de una masa de aire cálido sobre una de aire más frío. Este último tipo de inversión suele tener por lo general una permanencia escasa.

Un aspecto interesante de la contaminación atmosférica es el de la micrometeorología urbana. Las grandes ciudades crean al su alrededor un microclima propio, el efecto «isla urbana de calor», produciendo un penacho térmico que tiene gran incidencia en la capacidad de difusión de los contaminantes urbanos. A menudo, da lugar a la circulación de vientos locales que elevan el aire caliente del centro de la ciudad, creando una corriente compensada de aire frío de la zona rural circundante que penetra en la zona urbana a niveles bajos.

Las grandes ciudades alteran el clima urbano de muchas formas; por lo general la temperatura es superior, hay menos viento, menos precipitaciones en forma de nieve, si bien las precipitaciones totales son ligeramente superiores en la ciudad que en las zonas rurales circundantes. La radiación solar, y especialmente los rayos ultravioletas, es más reducida en la ciudad como consecuencia del efecto pantalla producido por la contaminación urbana.

EFFECTOS PRODUCIDOS POR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica afecta a millones de personas de todo el mundo, especialmente a aquellas que viven en los grandes núcleos urbanos y en áreas fuertemente industrializadas, con denso tráfico de vehículos. Las emanaciones de polvos y gases corrosivos deterioran el medio ambiente dando lugar a olores desagradables, pérdida de visibilidad y daños para la salud humana, para los cultivos y otras formas de vegetación y sobre los materiales de construcción.

La contaminación atmosférica apareció primero como una molestia grave



altos; en estas condiciones, los efectos aerodinámicos de estos obstáculos pueden tener consecuencias negativas para la dispersión de contaminantes, acumulándolos en determinadas zonas.

Transporte convectivo vertical. El principal factor que determina el grado de difusión vertical de contaminantes es la variación vertical de temperaturas en la atmósfera.

Podemos determinar la capacidad de difusión vertical de contaminantes comparando la variación vertical de temperaturas de un estrato de aire atmosférico con el gradiente vertical adiabático del aire, que corresponde a una variación de -1°C por cada 100 metros de altura. De esta forma se obtienen tres clases diferentes de estabilidad atmosférica en el estrato, según que la variación de la temperatura con la altura sea mayor, igual o inferior que la correspon-

temperatura del estrato con la gradiente vertical adiabática. En estas condiciones la dispersión vertical de contaminantes no está limitada.

Cuando la temperatura del aire aumenta con la altura, aparece el fenómeno de la inversión térmica. Este fenómeno produce una fuerte acción limitadora en la dispersión de contaminantes. La inversión de la temperatura del aire se puede producir como consecuencia del enfriamiento del suelo, por la gran irradiación de calor que se produce en las noches despejadas. El aire se va enfriando progresivamente desde el suelo hacia arriba, produciendo una fuerte estabilidad atmosférica que impide la difusión vertical de los contaminantes. La inversión térmica se forma durante la noche y suele desaparecer progresivamente durante la mañana, cuando la radiación solar calienta de nuevo el suelo y éste a

pero, posteriormente, se ha convertido en una amenaza para la calidad de la vida, ya que una contaminación excesiva puede poner en peligro la salud y llegar a convertir algunas zonas en lugares no aptos para ser normalmente habitados.

Los efectos producidos por la contaminación atmosférica dependen principalmente de la concentración de contaminantes, del tipo de contaminantes presentes, de tiempo de exposición y de las fluctuaciones temporales en las concentraciones de contaminantes, así como de la sensibilidad de los receptores y los sinergismos entre contaminantes. Hay que tener muy en cuenta la graduación del efecto a medida que aumentan la concentración y el tiempo de exposición.

Efectos de los contaminantes atmosféricos

Efectos sobre la salud humana

Las relaciones existentes entre las enfermedades humanas y la exposición a la contaminación no son sencillas ni se conocen con exactitud. No obstante, existen pruebas abundantes de que en general, las concentraciones elevadas de contaminantes en el aire son peligrosas para los seres humanos (y animales).

Los efectos que producen sobre la salud se ponen claramente de manifiesto, como se ha observado en Londres, Nueva York y Osaka entre otras ciudades, por el aumento de la mortalidad, sobre todo en las personas de edad avanzada o en los individuos más sensibles por cualquier razón. Más difíciles de discernir son los efectos que, a largo plazo, pueden producir las exposiciones episódicas a elevadas concentraciones medias y bajas de contaminantes.

Se ha comprobado la relación existente entre la contaminación atmosférica, producida por partículas en suspensión y anhídrido sulfuroso, y la aparición de bronquitis crónica caracterizada por la producción de flemas, la exacerbación de catarros y dificultades respiratorias tanto en los hombres como en las mujeres adultas. Se ha observado igualmente, que cuando las concentraciones tanto de SO₂ como de partículas en suspensión superan los 500 microgramos/metro cúbico de aire, como promedio de 24 horas, se produce un aumento de la mortalidad en la población en general, siendo los grupos más sensibles los individuos con procesos cardíacos o pulmonares. Con promedios diarios de 250 microgramos/metro

cúbico de SO₂ y de humos se ha registrado el empeoramiento en los enfermos con afecciones pulmonares.

Es de destacar que las concentraciones de partículas en suspensión y de SO₂ que pueden provocar la aparición de efectos sobre la salud, pueden variar de un lugar a otro según cuáles sean las características físicas y químicas de las partículas, y en función de la presencia en el aire de otros contaminantes que



puedan producir efectos sinérgicos con aquéllos.

La presencia en el aire de elevadas concentraciones de monóxido de carbono (CO) representa una amenaza para la salud. El CO inhalado se combina con la hemoglobina de la sangre, dando lugar a la formación de carboxihemoglobina, lo que reduce la capacidad de la sangre para el transporte de oxígeno desde los pulmones hasta los tejidos.

Se ha comprobado que una saturación de carboxihemoglobina por encima del 10% puede provocar efectos sobre la función psicomotora que se manifiesta con síntomas de cansancio, cefaleas y alteraciones de la coordinación. Por encima del 5% de saturación se producen cambios funcionales cardíacos y pulmonares y se aumenta el umbral visual. No se han encontrado pruebas que indique efectos significativos con una concentración de carboxihemoglobina inferior al 2%.

Los óxidos de nitrógeno, NO_x, son contaminantes igualmente peligrosos para la salud. La mayor parte de los estudios relativos a los efectos de los NO_x

se han ocupado, sobre todo, del NO₂ ya que es el más tóxico. Los efectos producidos por el NO₂ sobre los animales y los seres humanos afectan, casi por entero, al tracto respiratorio. Se ha observado que una concentración media de 190 microgramos de NO₂ por metro cúbico de aire, superada el 40% de los días, aumenta la frecuencia de infecciones de las vías respiratorias en la población expuesta.

Otros tipos de contaminantes que afectan a la salud humana son los oxidantes fotoquímicos. Se han realizado estudios epidemiológicos en la ciudad de Los Angeles y no se descubrió ningún aumento de mortalidad como consecuencia de episodios de contaminación fotoquímica, cuando las concentraciones de oxidantes variaban entre 0.5 y 0.9 partes por millón. No obstante, se ha observado que los oxidantes fotoquímicos tienen efectos nocivos sobre la salud, produciendo irritación de los ojos y mucosas. Los oxidantes fotoquímicos afectan especialmente a las personas con afecciones asmáticas y broncopulmonares, en los que se han observado crisis asmáticas y disminución de la función pulmonar cuando las concentraciones atmosféricas de oxidantes eran superiores a 500 microgramos por metro cúbico de aire.

Los metales tóxicos presentes en el aire representan una amenaza para la salud humana cuando se inhalan en cantidades suficientes, debido a la tendencia que presenta el organismo a su acumulación. Por su importancia, des-

tacaremos los efectos producidos por el plomo sobre la salud humana.

Los compuestos inorgánicos del plomo atmosférico son absorbidos por los humanos, principalmente a través del sistema respiratorio, alcanzando el torrente sanguíneo aproximadamente el 35% del plomo inhalado por los pulmones. Una vez incorporado el plomo a la corriente sanguínea, una parte se almacena en los huesos y otra se expulsa por la orina, en una continua fase de renovación en el organismo. A partir de ciertas cantidades puede producir efectos adversos en el comportamiento, afectan la inteligencia de los niños y ser causa de anomalías en los fetos de madres gestantes. Los adultos, por lo general, son menos sensibles que los niños a los efectos del plomo, pero una acumulación excesiva en el organismo puede producir serios e irreversibles daños en su sistema nervioso.

Otras sustancias tóxicas presentes en el aire tales como el cadmio, amianto, el cloruro de vinilo, el benzo-a-pireno, varios compuestos orgánicos halogenados y el benceno, pueden provocar modificaciones genéticas y malformaciones en los fetos, siendo algunos de ellos cancerígenos.

Efectos sobre las plantas

Las plantas muestran una especial sensibilidad a la mayor parte de los contaminantes del aire, y sufren daños significativos a concentraciones mucho más bajas que las necesarias para causar

efectos perjudiciales sobre la salud humana y animal.

Es muy difícil establecer valores límites de la contaminación atmosférica a partir de los cuales los efectos negativos se empiezan a manifestar, ya que estos dependen de la constitución de la planta y de la especie de que se trate, es decir, hay una especificidad de respuestas.

Por otra parte, los efectos producidos por la contaminación atmosférica se pueden manifestar por la alteración de diversos mecanismos vitales de las plantas. Así, las funciones metabólicas y los tejidos vegetales se pueden ver afectados como consecuencia de la acción de gases como el anhídrido sulfuroso, el monóxido de carbono y los compuestos de flúor. Los daños causados se manifiestan en forma de necrosis foliar en áreas localizadas que presentan un color marrón-rojizo-blanco, de clorosis, adquiriendo el tejido una coloración verde pálida o amarilla, o por la aparición de manchas puntuales necróticas. Si la acción del contaminante es muy fuerte puede llegar a paralizar el crecimiento de la planta.

Entre los distintos contaminantes que se presentan generalmente en el aire ambiente, el SO_2 es el que tiene mayor importancia debido a la gran toxicidad que tiene para la vegetación.

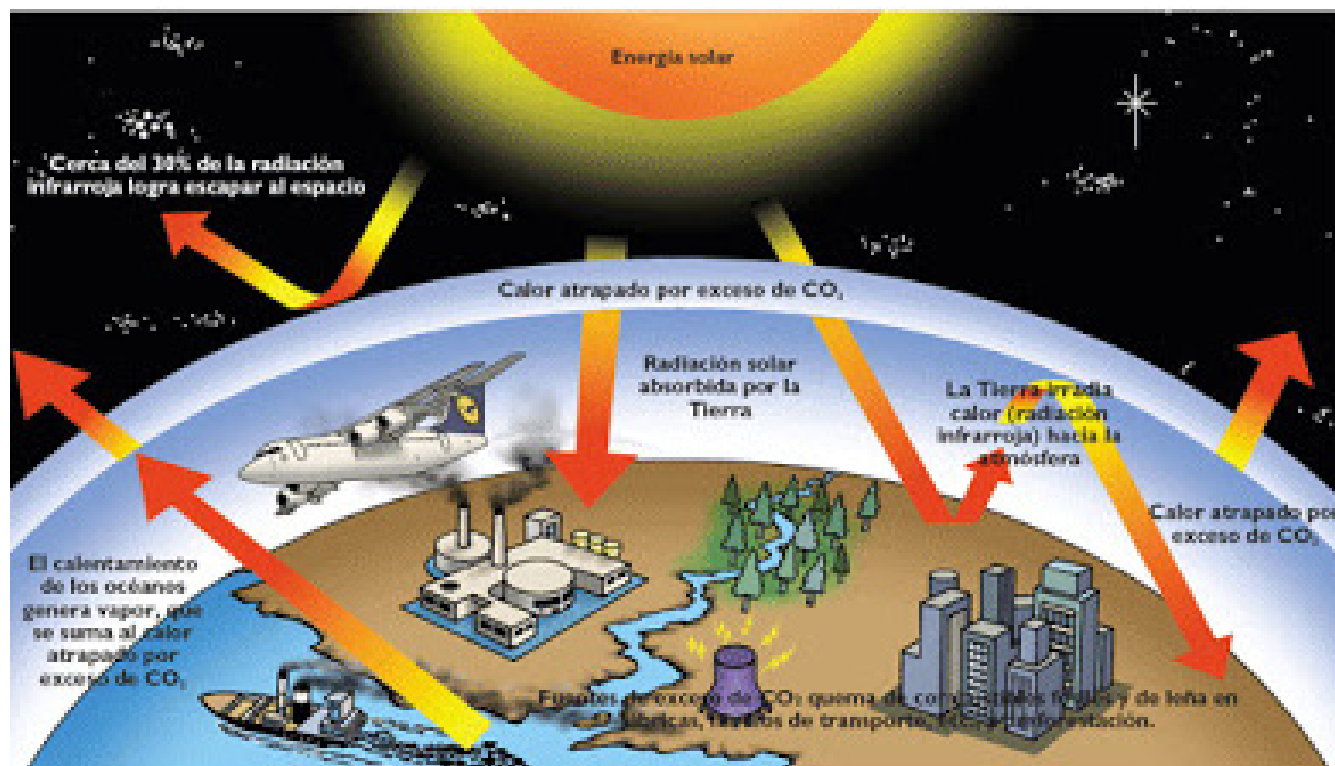
Los daños producidos por el SO_2 a las plantas obedecen a la exposición a altas concentraciones durante periodos cortos; o por la exposición a concentra-

ciones relativamente bajas durante largos periodos.

Los daños agudos se producen como consecuencia de exposiciones cortas a concentraciones elevadas. Exposiciones medias diarias de 130 microgramos de SO_2 por metro cúbico de aire durante el periodo de crecimiento, pueden causar daños en las coníferas más sensibles. Estos daños se caracterizan por la aparición de necrosis apicales de color rojo o anaranjado.

La exposición a menores concentraciones durante tipos de exposición más largos ocasiona lesiones crónicas. Exposiciones medias anuales de anhídrido sulfuroso de 50 microgramos por metro cúbico de aire pueden causar daños a especies forestales sensibles. Estas se manifiestan por un gradual amarilleamiento de la hoja que se va extendiendo desde la zona apical a la base de la misma, causada por dificultades en el mecanismo sintetizador de la clorofila. En las plantas dañadas se encuentran grandes cantidades de sulfato en las hojas con síntomas crónicos.

Las brumas de ácido sulfúrico, causadas por la presencia en el aire de los óxidos de azufre, producen daños en las hojas, caracterizados por la aparición de manchas producidas por las gotas de ácido depositadas sobre las hojas humedecidas por el rocío o la niebla. Concentraciones relativamente bajas de SO_2 pueden causar daños importantes en la vegetación sensible, como consecuencia





de la acción sinérgica de este contaminante con el ozono y los óxidos de nitrógeno, aunque estos se presenten en bajas concentraciones en el aire.

El flúor y sus derivados son contaminantes del aire que se caracterizan por ser tóxicos en general para las plantas a muy pequeñas concentraciones. La sensibilidad de las plantas a la acción del flúor varía, como en el caso del SO_2 , según las especies y las condiciones del medio, siendo especialmente sensibles a este contaminante las viñas y las plantaciones frutales, especialmente las de frutos con hueso (como el melocotón o durazno). En el medio forestal, las resinosas son las especies más sensibles al flúor, ya que al tener hojas perennes y tener el flúor un efecto acumulativo sobre los tejidos, se va almacenando hasta sobrepasar los umbrales de toxicidad, lo que da lugar a la aparición de necrosis que pueden llegar a producir la muerte de grandes masas forestales.

Un aspecto importante del efecto acumulativo del flúor es su transmisión a través de las cadenas alimentarias. El mecanismo es el siguiente: el flúor presente en el aire se acumula en los pastos y de éstos pasa a los animales, siendo los bovinos los más afectados. La acumulación del flúor en los tejidos puede causar la aparición de la fluorosis, enfer-

medad que se presenta sobre todo en el ganado vacuno. Observaciones realizadas muestran que la ingestión de pastos puede ser tolerada sin efectos negativos, cuando su concentración en flúor no supera los 40 ppm como media durante todo el año.

Se ha observado la aparición de lesiones visibles sobre las hojas después de una exposición durante un día a concentraciones de flúor en el aire de 3 a 10 microgramos por metro cúbico. Para concentraciones entre 0.5 y 3 microgramos/metro cúbico los efectos se manifiestan cuando transcurren periodos de exposición superiores a un mes.

Entre los óxidos de nitrógeno solo el NO_2 es tóxico para las plantas, a pequeñas concentraciones y largo tiempo de exposición. Los daños se manifiestan por la aparición de necrosis y clorosis de color negro o marrón rojizo en las hojas. Los sinergismos de NO_2 y SO_2 provocan a bajas concentraciones alteraciones en la vegetación. Este hecho se ha observado en las zonas urbanas.

La contaminación atmosférica fotoquímica produce daños en la vegetación a concentraciones que ya se están alcanzando en algunas ciudades. El ozono y el PAN son los principales causantes de estos daños. Las lesiones producidas por el ozono se manifiestan como man-

chas blancas o punteados claros sobre el haz de las hojas. Los daños producidos por los PAN se presentan como graves lesiones foliares caracterizadas por una tintura plateada o vidriosa en el envés de la hoja, así como por un ataque general en las hojas jóvenes.

La radiación gamma produce numerosos efectos biológicos sobre las plantas, incluyendo daños a los ácidos nucleicos, citocromos, mitocondria y membranas celulares. Una irradiación crónica en una amplia zona produce una disminución gradual de la diversidad de plantas. Poco a poco los bosques van muriendo, empezando por los árboles más sensibles como los pinos.

Efectos sobre los materiales

Cada vez se está prestando más atención, tanto por sus repercusiones económicas como por los daños irreparables que causa sobre los objetos y los monumentos de alto valor histórico-artístico, a los efectos que la contaminación atmosférica produce sobre los materiales.

La acción de los contaminantes atmosféricos sobre los materiales puede manifestarse por la sedimentación de partículas sobre la superficie de los mismos, afeando su aspecto externo, o por ataque químico al reaccionar el contaminante con el material. Los SO_x

causan daños a muchos tipos de materiales, bien directa o indirectamente. Un alto contenido de SOx en el aire produce la aceleración de la corrosión de los metales tales como el acero al carbono, zinc, acero galvanizado, compuestos del cobre, níquel y aluminio. Esta aceleración se ve favorecida por la presencia de partículas depositadas por la humedad y por la temperatura.

En general, puede señalarse que la corrosividad de una atmósfera depende de condiciones meteorológicas y factores de contaminación. Se han observado correlaciones entre tasas de corrosión en metales y concentraciones de SO₂ en la atmósfera, dándose las tasas altas de corrosión más altas en zonas industrializadas. Las nieblas de ácido sulfúrico procedentes de la conversión catalítica del SO₂ a SO₃ en la atmósfera, atacan a los materiales de construcción como el mármol, la caliza y la argamasa, convirtiendo los carbonatos en sulfatos solubles en el agua de lluvia. Esto unido a que el volumen específico de los sulfatos es mayor que el de los carbonatos, hace que en la piedra aparezcan escamas y se debilite mecánicamente.

Los compuestos de azufre pueden producir daños en pinturas plásticas, papel, fibras textiles y sobre los contactos eléctricos de los sistemas electrónicos, dando lugar a deficiencias en su funcionamiento. La acción de los oxidantes fotoquímicos se produce sobre todo en los cauchos y elastómeros en los que causan un rápido envejecimiento y agrietamiento. Los óxidos de nitrógeno decoloran y estropean las fibras textiles y los nitratos producen la corrosión de las aleaciones de cupro-níquel.

Efectos sobre visibilidad

La presencia de contaminantes en la atmósfera produce la absorción y dispersión de la luz solar, acompañados de una notable reducción de la visibilidad. Los aerosoles de tamaños comprendidos entre 1.4 y 0.8 micras son los que tienen una mayor influencia en la dispersión de la luz solar, debido a la proximidad de su tamaño a la longitud de onda de la luz visible.

Se ha observado una estrecha relación entre la disminución de la visibilidad y la presencia de sulfatos en la atmósfera. Una experiencia realizada en Suecia, ha demostrado que los periodos de mínima visibilidad se corresponden con concentraciones máximas de sulfatos y nitratos presentes en la atmósfera.

Los gases presentes normalmente en

la atmósfera no absorben la luz visible. El NO₂ en concentraciones altas puede tener un efecto significativo ya que absorbe la franja azul-verde del espectro visible de la radiación solar. Consecuencia de esta absorción es el que la atmósfera de las grandes ciudades adquiera una coloración amarilla-parduzca-rojiza cuando se presentan concentraciones de NO₂ elevadas.

Efectos Globales

Cada vez está más admitida la necesidad de realizar estudios sobre los posibles efectos que a largo plazo puede producir la contaminación atmosférica sobre los distintos ecosistemas, sobre el clima y sobre la estratosfera. Tanto las modificaciones de las características de los suelos, debidas al lavado de los elementos del mismo por las lluvias ácidas, como los cambios producidos en las grandes masas de agua por el aumento de la concentración de metales tóxicos, pueden tener consecuencias ecológicas irreversibles.

El aumento de las concentraciones de dióxido de carbono y de otros contaminantes en la atmósfera puede dar lugar a una elevación general de la temperatura del globo, por «efecto invernadero», que modificaría el régimen de lluvias, lo que produciría alteraciones sobre las tierras cultivables y la extensión de los desiertos. Por otra parte, los sulfatos y las partículas finas que disminuyen la visibilidad pueden igualmente reducir la intensidad de la radiación solar. Los hidrocarburos halogenados y los óxidos de nitrógeno emitidos por los aviones supersónicos pueden provocar una disminución de ozono en la estratosfera con el consiguiente aumento de la radiación ultravioleta que llegaría a la Tierra.

Efectos sobre los ecosistemas (lluvias ácidas)

Los primeros efectos producidos por las precipitaciones ácidas se detectaron en cientos de lagos de Escandinavia, alrededor de los años 60. En la actualidad, más de 18,000 lagos están acidificados, en Suecia alrededor de 6,000 de ellos muestran graves daños sobre la biología acuática, y unos 2,000 de los situados en la zona meridional y central han perdido sus poblaciones piscícolas.

La acidificación de las aguas interiores tiene efectos muy graves sobre los ecosistemas acuáticos. Se ha demostrado que todos los tipos de organismos integrantes de los ecosistemas de agua dulce son sensibles a la acidificación,

produciéndose cambios en todos los niveles tróficos. La acidificación de los lagos y de las masas de agua se está extendiendo progresivamente cada vez a mayor número de países, afectando día a día a más extensas áreas.

Las zonas más propensas a la acidificación del agua tienen suelos ácidos de poca profundidad, superpuestos a rocas graníticas o son suelos arenosos muy erosionados. El aumento de la acidez del agua de los lagos y ríos provoca un fuerte aumento del contenido de iones aluminio disueltos en el agua. El ión aluminio es muy tóxico para la mayor parte de los organismos y se cree que la causa última de la muerte de las poblaciones de peces en los lagos acidificados se debe al envenenamiento por aluminio. Otros metales tales como el cadmio, zinc y plomo tienen igualmente una mayor facilidad para disolverse, por lo que son más accesibles para los animales y plantas acuáticas.

Los suelos presentan, por lo general, una mayor resistencia a la acidificación que el agua. No obstante, el grado de sensibilidad puede variar muy ampliamente de unas zonas a otras dependiendo, principalmente, del espesor de la capa de humus, de la consistencia del sustrato, así del tipo de rocas y suelo. Uno de los efectos más importantes de la acidificación de los suelos es, probablemente, el incremento de la movilidad con las consiguientes pérdidas por lixiviación de ciertos cationes metálicos de carácter básico tales como el calcio, magnesio, potasio y aluminio.

En Europa Central, las altas deposiciones de compuestos de azufre y nitrógeno han producido graves daños sobre amplias áreas de suelo y bosques. El daño a los bosques probablemente ha sido causado por la acción combinada de ácidos y metales en el suelo y por las altas concentraciones de SO₂ presentes en el aire de estas zonas. La combinación de un bajo pH en el agua del suelo unido a la presencia de metales, principalmente aluminio, produce daños en las raíces de los árboles, a través de las cuales absorben gran cantidad de nutrientes. Este hecho produce una pérdida de vitalidad haciéndolos especialmente sensibles a las plagas.

Efectos sobre el clima (efecto invernadero)

Durante los últimos años se ha venido poniendo de manifiesto una preocupación creciente por los posibles efectos que sobre el clima pudiera causar el au-

mento progresivo de contaminantes en la atmósfera como consecuencia de las actividades humanas.

Observaciones realizadas en Suecia, Australia, Alaska y Hawai muestran que la concentración de CO₂, que oscilaba entre 265 y 290 ppm antes de los años cincuenta, llegó a ser de 330 ppm en 1976, aumentando a un ritmo de alrededor de 1 ppm en el curso de los últimos años.

Se cree que el incremento de CO₂ en la atmósfera es debido a las alteraciones que las actividades humanas producen en el ciclo biogeoquímico del carbono ya que, por una parte, en la combustión de combustible fósiles y en los incendios forestales se producen grandes cantidades de CO₂, y por otra parte, estos mismos incendios y la tala progresiva de bosques, que produce una disminución de las masas forestales mundiales, la degradación del suelo y la creciente desertificación, producen una disminución de la tasa de la absorción total del CO₂ presente en la atmósfera por la vegetación.

El incremento de la concentración del CO₂ en la atmósfera puede alterar la temperatura de la Tierra debido a que el CO₂ es transparente a la radiación solar recibida del sol, dejándola pasar libremente, pero absorbe la radiación infrarroja emitida desde la tierra. El efecto total es que cuanto mayor sea la concentración de CO₂ en la atmósfera, mayor es la cantidad de energía recibida por la Tierra desde el Sol que queda atrapada en la atmósfera en forma de calor. Este fenómeno que se conoce con el nombre de «efecto invernadero» produciría un recalentamiento de la atmósfera.

Se estima que, de duplicarse la concentración actual de CO₂ en la atmósfera, podría aumentar en dos o tres grados centígrados la temperatura de la misma. En las zonas lluviosas se incrementarán las precipitaciones y las zonas áridas serán aún más áridas, mientras que los hielos polares comenzarán a derretirse.

Los sulfatos y las partículas finas presentes en la atmósfera pueden tener igualmente efectos sobre el clima. Las partículas finas tienen una doble acción sobre la radiación solar: por una parte, difunden la luz incidente y, por otra, absorben una parte de esta radiación, lo que produce un calentamiento de las partículas y la emisión de radiación infrarroja. Los efectos atmosféricos que producen dependerán de la altitud a que

las partículas se encuentre.

Las de baja altura disminuyen el flujo solar sobre el suelo, pero contribuyen a aumentar el efecto invernadero. A más alta temperatura, el efecto de barrera solar es preponderante, produciendo un enfriamiento de la baja atmósfera y un calentamiento en la estratosfera. Las partículas pueden causar también efectos sobre el clima de forma indirecta al actuar como núcleos de condensación del vapor de agua y jugar éste un importante papel en los cambios de calor atmosférico.

Otro tipo de contaminantes vertidos a la atmósfera que pueden afectar el clima son los clorofluorocarbonos, debido a su acción sobre la capa de ozono y a que, como ya se ha indicado anteriormente, el ozono es el principal absorbente de la radiación solar ultravioleta en la estratosfera, regulando la temperatura de la misma.

Efectos sobre la estratosfera

La presencia en la estratosfera de determinados compuestos, especialmente los clorofluorocarbonos, puede provocar una disminución de la concentración de ozono en la estratosfera. La capa estratosférica de ozono protege la superficie de la tierra de una exposición excesiva a los rayos solares ultravioletas actuando como filtro. Una disminución sensible de esta capa protectora tendría efectos perjudiciales para la salud humana y para la biosfera.

Este incremento de la radiación produciría un aumento apreciable de casos de cáncer de piel en los seres humanos y efectos negativos sobre los organismos, al ser ciertos tipos de plancton vegetal, animales invertebrados y algunos vertebrados en determinadas etapas de su ciclo vital, especialmente sensibles a la radiación ultravioleta.

LA LUCHA CONTRA LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Durante algún tiempo se consideró que el despilfarro de los recursos naturales y la degradación del medio ambiente era un mal menor que tenía que ser soportado por las colectividades en pro del progreso económico de los pueblos. Este punto de vista está cambiando rápidamente en la actualidad ante la evidencia, cada vez más clara, de que la conservación del medio ambiente es una cuestión de supervivencia para los humanos.

Entre los distintos tipos de contaminación, la atmosférica puede considerarse como la de más reciente aparición.

Para algunos países surge como problema grave durante los años cincuenta, mientras que para la mayoría no aparece como tal hasta el final de los años sesenta. El punto de partida de la toma de conciencia de la gravedad de la contaminación atmosférica se puede situar en Londres en el invierno de 1952, cuando una fuerte contaminación por humos, que persistió durante cinco días, contribuyó a la muerte de varios miles de personas. Este episodio actuó como detonador para la opinión pública mundial y contribuyó a la puesta en marcha de una serie de acciones tendentes a reducir este tipo de contaminación.

En 1956 se publicó en el Reino Unido la Ley de Aire Limpio, que tenía como objetivo el disminuir la emisión de humos, fomentando el uso de combustibles limpios. La primera ley sobre contaminación atmosférica no aparece en Estados Unidos hasta 1963 con la Ley de Aire Limpio. En Francia se aborda el problema de la contaminación atmosférica, de una forma general, en el año 1961, y en la mayoría de los países la legislación sobre la contaminación atmosférica es más reciente.

Principios generales y objetivos

Los primeros programas de lucha contra la contaminación atmosférica son nacionales y surgen, inicialmente, para proteger la salud y bienestar de las poblaciones expuestas a niveles de contaminación superiores a los valores considerados aceptables y causados, bien por un foco puntual emisor de contaminantes peligrosos, o por la estructura demográfica e industrial de una determinada zona que provoca una contaminación general o episódica.

La mayoría de los países industriales han desarrollado reglamentaciones de lucha contra la contaminación atmosférica, adoptando estrategias en función de sus peculiares características tradicionales, culturales y ambientales. No obstante, se reconocen una serie de principios generales que deben tenerse presentes para una eficaz lucha contra la contaminación atmosférica, entre los que podemos destacar:

- Las decisiones deben basarse en datos correctos obtenidos del conocimiento científico y técnico, de los procesos ecológicos y de la tecnología para el control de las fuentes de emisión.
- Los métodos a aplicar han de ser flexibles, de forma que puedan adaptarse al cambiante desarrollo del conocimiento del problema y de las técnicas

para resolverlo.

- Han de tenerse en cuenta las circunstancias tanto económicas como ambientales, siendo necesario disponer de un buen sistema de análisis económico y de prioridades económicas.

- La coordinación y una eficaz estructura legislativa y administrativa son necesarias para convertir las prioridades y decisiones en acción.

Aparte de estos principios de carácter general, es imprescindible para llevar a cabo un programa de lucha contra la contaminación atmosférica una fuerte concienciación del público a través de una información lo más amplia posible y una decidida voluntad política, ya que la promulgación de leyes contra la contaminación atmosférica es una decisión de carácter político en cualquier país.

Estrategias de lucha

La contaminación atmosférica suele ser el resultado de la aplicación de una tecnología defectuosa o mal empleada, así como de la ausencia de criterios ambientales al realizar las planificaciones económicas nacionales. Basándonos en estas hipótesis de partida, se plantean a continuación los pasos a seguir para reducir la contaminación atmosférica.

El primer paso es fijar el objetivo principal que se quiere alcanzar, de forma que se optimicen los beneficios globales netos de la reducción de la contaminación, ya que existen muchos tipos de receptores. Para poder fijar el objetivo principal es necesario:

- a. disponer de un inventario completo de las fuentes de contaminación;
- b. conocer las tecnologías de descontaminación aplicables, así como las relaciones coste-eficacia de su aplicación;
- c. disponer de modelos atmosféricos que permitan conocer las relaciones entre las emisiones en los distintos focos y la calidad del aire de los receptores; y
- d. conocer los efectos que sobre la salud, los ecosistemas y los bienes materiales producen las distintas concentraciones de contaminantes, cuantificándolos de alguna forma.

Con la información disponible y a través de las técnicas que relacionan los costos y beneficios se analizan las distintas opciones, eligiendo la más interesante como objetivo social. Una vez fijado el objetivo y planteadas las prioridades de actuación, es necesario formular la estrategia a seguir para su consecución.

Se han planteado dos enfoques distintos a la hora de formular estrategias para combatir la contaminación atmosférica:

1. La gestión de los recursos atmosféricos, que se basa en la fijación de unas normas de calidad del aire que no deben sobrepasarse. Este tipo de estrategia tiene su origen en Alemania, Estados Unidos y otros países.

2. La aplicación de los mejores medios practicables, basada en el control de las emisiones mediante el empleo de la mejor tecnología disponible, económicamente aplicable para la reducción de la contaminación. Este tipo de estrategia se ha seguido principalmente en el Reino Unido.

Hoy día se sabe que la mejor estrategia para combatir la contaminación atmosférica ha de basarse en una combinación de estos dos enfoques, ya que

Por otra parte, la estrategia debe fijar unas metas a conseguir en unos plazos (corto, medio y largo), especificar de forma clara y concisa el conjunto de acciones necesarias para conseguir esas metas en los plazos deseados, formular un plan de ejecución e introducir un sistema de control y vigilancia.

ACCIONES PARA COMBATIR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Para combatir la contaminación atmosférica es necesario emprender una serie de acciones a las que podemos clasificar como acciones curativas y acciones preventivas

Acciones curativas

Las acciones curativas se aplican en aquellas zonas en donde se superan regularmente los niveles admisibles de la calidad del aire.

Consisten, por lo general, en la adopción de medidas correctoras de la



la aplicación de los mejores medios practicables no garantiza una calidad del aire admisible, que dependerá de la densidad de las fuentes de emisión, de las condiciones meteorológicas y de la topografía, y, por otra parte, la exigencia únicamente de normas de calidad del aire puede ser discriminadora para las distintas actividades que se van instalando en una zona. La estrategia óptima que combina las dos anteriores se ha de basar en el control de las emisiones de las fuentes fijas, exigiendo los mejores medios practicables y en la adopción de criterios de gestión de recursos atmosféricos para controlar la contaminación en los núcleos urbanos y áreas industriales.

contaminación atmosférica, en aquellos focos en funcionamiento que se considere contribuyen en mayor medida a generar este tipo de contaminación. Estas medidas actúan disminuyendo la emisión de contaminantes al mejorar los sistemas de depuración o mejorando las condiciones de dispersión de contaminantes.

Entre los distintos tipos de medidas que podemos adoptar para reducir la emisión de contaminantes podemos destacar las que actúan sobre los gases y humos, las que lo hacen sobre el propio proceso tecnológico, o aquellas que inciden sobre los combustibles y materias primas utilizadas.

Es de destacar que la adopción de

medidas correctoras es un sistema eficaz para solucionar un problema de contaminación atmosférica local, pero no es correcto desde un punto de vista ambiental más amplio, por las siguientes razones:

- Se transfiere el problema de la contaminación atmosférica a otro medio, como consecuencia de que los contaminantes captados hay que depositarlos en algún lugar. Es decir, descontaminamos la atmósfera y contaminamos el agua y el suelo.

- El funcionamiento de los equipos de depuración consume materias primas y energía cuya generación produce contaminación atmosférica en otras zonas, pudiendo darse la paradoja de que sean mayores los contaminantes producidos que los eliminados.

Con el fin de evitar inconvenientes se considera que para proteger el medio ambiente hay que recurrir a la aplicación de técnicas poco contaminantes y sin desechos. Estas técnicas tratan de atacar el problema de la contaminación en el origen, desarrollando procesos técnicamente más eficaces en el aprovechamiento de las materias primas y los recursos energéticos consumidos. Las formas de prevenir en el origen la contaminación son: la reformulación del producto, la modificación del proceso y el reciclado o recuperación de los subproductos obtenidos.

Hay que destacar que este tipo de tecnología no está en la actualidad totalmente desarrollado, y que su aplicación en el caso de instalaciones en funcionamiento no suele ser siempre ni técnica ni económicamente viable. No obstante, no hay que perder de vista que ésta es la tendencia moderna de las técnicas de defensa del medio ambiente. Puesto que el uso de combustibles suele ser la principal fuente de contaminación atmosférica, una medida muy eficaz para combatir la contaminación atmosférica es la reglamentación de las características, calidades y condiciones de uso de los distintos combustibles sólidos y líquidos.

Otra de las acciones posibles para reducir la contaminación local es mejorar las condiciones de dispersión de los contaminantes utilizando la capacidad de autodepuración de la atmósfera mediante la elevación de la altura de las chimeneas de las fuentes estacionarias, o modificando las condiciones de emisión de los gases, tales como la velocidad y temperatura de salida de los mis-



mos. Sobre esta forma de deshacernos de grandes cantidades de contaminantes se ha discutido mucho en los últimos años, ya que los contaminantes vertidos a gran altura pueden quedar atrapados en zonas relativamente estables de la atmósfera y ser transportados a grandes distancias causando fenómenos tales como las lluvias ácidas.

Acciones preventivas

Las acciones preventivas son aquellas dirigidas a evitar que aparezcan los problemas de contaminación atmosférica. Entre las distintas acciones posibles podemos destacar la planificación urbana, los estudios previos de evaluación de impacto ambiental y el ahorro energético.

La planificación urbana

Muchos de los problemas de contaminación atmosférica que hoy sufren las grandes ciudades podrían haberse evitado, o al menos atenuado, mediante una planificación adecuada de la estructura urbanística de las ciudades y una localización de actividades y polígonos industriales que hubiera tenido en cuenta condicionamientos medioambientales.

Partiendo de la base de que las principales fuentes de contaminación atmosférica de los núcleos urbanos son los vehículos, las calefacciones domésticas y la industria, es necesario para evitar la aparición de estos problemas emprender una serie de acciones preventivas coordinadas, encaminadas a reducir las emisiones de estas fuentes. Entre estas acciones podemos distinguir:

- Fomentar el uso de combustibles de bajo poder contaminante.
- Estimular el ahorro energético.
- Fomentar el uso de tecnologías

poco contaminantes.

- Aplicación de innovaciones tecnológicas a los vehículos.

- Planificar de forma adecuada el tráfico viario.

- Introducción en los planes de ordenamiento urbano criterios medio ambientales tales como:

- o Clasificación de industrias por sus efectos ambientales a la hora de ubicarlas en las zonas industriales, situando la industria pesada en las zonas más ventiladas y a sotavento de las áreas habitadas.

- o Creación de zonas amortiguadoras, en las que crezca la vegetación, entre las zonas industriales y las áreas con viviendas.

- o Alejar los viales de tráfico intenso de las zonas céntricas y residenciales, fomentando en lo posible el transporte público en el interior de las ciudades.

- o Aprovechamiento al máximo de las propiedades de autodepuración de la atmósfera, a través del mejor conocimiento de las propiedades de la atmósfera urbana y de las condiciones meteorológicas.

La adopción de criterios ambientales en la planificación y desarrollo de las ciudades es la única medida que puede llevarnos hacia la creación de ciudades hechas para que el hombre pueda vivir, muy diferente a las que conocemos actualmente, congestionadas y ambientalmente degradadas.

Estudios previos de impacto ambiental

Estos estudios tienen por objeto el prever rigurosamente las alteraciones que sobre el medio ambiente va a provocar la realización de determinadas

acciones, planes o proyectos. Su misión principal es el prever efectos, sirviendo como instrumentos válidos que permiten introducir consideraciones ambientales en la planificación socioeconómica.

Se entiende por evaluación de impacto ambiental (EIA) aquellos estudios dirigidos a identificar, interpretar y prevenir las consecuencias medioambientales que sobre la salud del hombre, los ecosistemas o sobre los bienes pueden causar determinadas acciones, planes o proyectos humanos.

Ahorro energético

Uno de los sectores productivos que más ha contribuido al problema de la

mejor aprovechamiento de los recursos naturales como en la reducción de los problemas de contaminación atmosférica, ya que para obtener la misma energía útil se requiere un consumo menor de combustibles y, por tanto, una menor emisión de contaminantes.

Puede disminuirse el consumo de energía en todos los sectores sin que por ello tenga que disminuir la actividad de los mismos. Se trata de utilizar más eficazmente la energía. Entre las medidas adoptadas con tal fin están la mejora del rendimiento térmico de los edificios, tanto residenciales como comerciales, adoptando un buen aislamiento térmico, el aumento del rendimiento ener-

gético del aire y su evolución en el tiempo y en el espacio. La realización de tal vigilancia es necesaria para proteger la salud del hombre, los ecosistemas y los bienes en general.

En el diseño de un programa de vigilancia de la contaminación atmosférica se debe tener en cuenta, en primer lugar, la escala del problema de contaminación, ya que éste puede abarcar aspectos mundiales (aumento de la concentración del CO₂ en la atmósfera), aspectos nacionales (problema de las lluvias ácidas) o aspectos locales (problemas de contaminación convencional).

Por otra parte, hay que considerar el objetivo fijado para el programa de vigi-



contaminación atmosférica durante las últimas décadas ha sido el energético. La disponibilidad de grandes cantidades de energía procedente de los combustibles fósiles (especialmente el petróleo) a precios relativamente baratos, hizo que durante los años 50 y 60 se incrementara extraordinariamente el consumo de estos combustibles y se produjera un gran despilfarro energético unido a una fuerte contaminación, como consecuencia de la gran cantidad de combustibles utilizados.

Las medidas de ahorro energético tienen una gran incidencia tanto en un

gético de los vehículos y el fomento del uso de los transportes públicos en los centros urbanos.

El sector industrial, que es por lo general el mayor consumidor de energía, está haciendo un gran esfuerzo en el ahorro de energía mediante la adopción de sistemas de recuperación energética en los procesos

Programas de vigilancia

Entendemos por vigilancia de la contaminación atmosférica el procedimiento utilizado para la evaluación de la concentración de contaminantes atmosféricos, con el fin de conocer la ca-

lancia. Entre los distintos objetivos podemos señalar: conocer la evolución de los efectos de los contaminantes, vigilar que no se superen los niveles de inmisión fijados por las normas, evaluación de la eficacia de los programas de lucha contra la contaminación, etc.

Según cual sea la escala y el objetivo a cubrir por el programa de vigilancia, éste requerirá el empleo de métodos y técnicas específicas para la obtención de los datos necesarios.

Se utilizan principalmente dos procedimientos diferentes para la vigilancia de la calidad del aire: uno basado en las



técnicas del análisis fisicoquímico y otro basado en la técnica de los indicadores biológicos.

Procedimientos fisicoquímicos

El análisis de los contaminantes presentes en la atmósfera por este procedimiento consiste en la toma de muestras de aire en las distintas estaciones que componen la Red de Vigilancia a las que somete a distintos procesos analíticos para la determinación de los diferentes contaminantes. Las etapas que comprende este procedimiento son:

- Toma de muestras.
- Acondicionamiento de las mismas.
- Análisis.

Por lo general, la toma de muestras incluye la separación del contaminante del seno del gas por filtración o por retención en un absorbente líquido.

Indicadores biológicos

La técnica de los indicadores biológicos se basa en la sensibilidad que presentan algunas especies o variedades de plantas a ciertos contaminantes gaseosos atmosféricos, que permiten identificar la presencia de estos contaminantes y vigilar la evolución de la contaminación atmosférica.

Los contaminantes más comúnmente detectados mediante indicadores biológicos son el ácido fluorhídrico (HF), el etano (C_2H_4), el anhídrido sulfuroso (SO_2), los oxidantes fotoquímicos (PAN) y el ozono (O_3), los metales pesados y los isótopos radiactivos.

Entre las distintas especies animales y vegetales empleados como indicadores biológicos, los líquenes son los más ampliamente empleados en contaminación atmosférica. Los líquenes, entidad morfológica compuesta por la asociación simbiótica de un hongo y un alga, son muy sensibles a la contaminación atmosférica, principalmente al SO_2 , HF y ClH. Estos contaminantes producen alteraciones morfológicas y fisiológicas en los líquenes. Esto, unido a que su actividad fotosintética es continua, su gran capacidad de acumulación de contaminantes tales como azufre, plomo, flúor e isótopos radiactivos que toman de la atmósfera, que es su única fuente de alimentación, y su larga longevidad, que permite seguir la evolución de la contaminación, los hace especialmente aptos para ser utilizados como indicadores biológicos de la contaminación atmosférica.

Aspectos legislativos y administrativos

Formuladas las estrategias de lucha contra la contaminación atmosférica es necesario poner en práctica los instrumentos eficaces que hagan posible la ejecución de tales estrategias.

La promulgación de una legislación eficaz y la articulación racional de los mecanismos administrativos son los mejores medios de que se dispone para conseguir convertir en realidad las estrategias de lucha contra la contaminación atmosférica.

Una ley para que sea eficaz ha de ser políticamente aplicable, técnicamente posible y económicamente no ha de suponer dificultades excesivas. Por otra parte ha de ser flexible, de forma que se pueda aplicar de la mejor manera a los diversos problemas que surjan.

Se pueden adoptar tres enfoques diferentes en el momento de abordar la legislación sobre la protección del medio ambiente. El primero consiste en que cada ley se ocupe de un solo aspecto ambiental; por ejemplo, la contaminación atmosférica, la del agua, etc. El segundo enfoque se basa en una ley única que regule las actividades que pueden dañar el ambiente y el tercero consiste en la integración de la legislación sobre el medio ambiente dentro de la planificación económica nacional.

Una combinación de estos enfoques parece que es la mejor solución para combatir el problema de la contaminación, aunque todavía no se tiene demasiada experiencia sobre su aplicación práctica en los distintos países.

Este documento ha sido recopilado por: Hugo Cornejo Rosell y Abel De La Cuba Caminada.