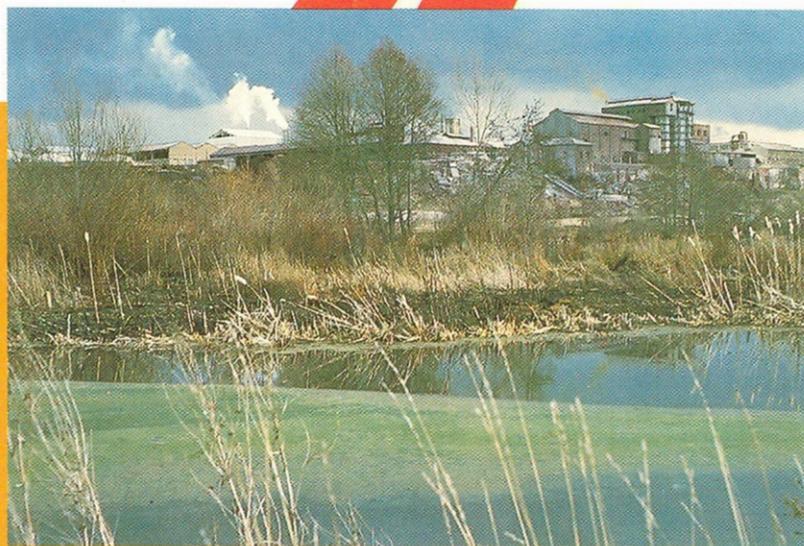


**A. PUERTO MARTIN
J. A. GARCIA RODRIGUEZ**

**TEMAS
MONOGRAFICOS**

19



LA CONTAMINACION ATMOSFERICA

**CENTRO DE EDAFOLOGIA Y BIOLOGIA APLICADA (C.S.I.C.)
EXCMA. DIPUTACION PROVINCIAL**

SALAMANCA

A. PUERTO MARTIN
J. A. GARCIA RODRIGUEZ

LA CONTAMINACION ATMOSFERICA

TEMAS MONOGRAFICOS

CENTRO DE EDAFOLOGIA Y BIOLOGIA APLICADA (C.S.I.C.)
EXCMA. DIPUTACION PROVINCIAL

SALAMANCA
1 9 8 6

Fotografía de portada:

A la vista típica y tónica de la Salamanca monumental contemplada desde la margen izquierda del Tormes, se contraponen las «catedrales» de la tecnología. Con todo, en las ciudades pequeñas y poco industrializadas, salvo raros casos, la contaminación del aire no supone un problema grave, al menos si se compara con los derivados de la polución de las aguas dulces.

TEMAS MONOGRAFICOS

COORDINADOR:
SILVINO CUADRADO SÁNCHEZ

Apartado 257 - Salamanca

© Fotografía: J. F. GALLARDO

I S B N 84 - 00 - 06448 - 8
Depósito legal: S. 72 - 1987

EUROPA ARTES GRÁFICAS, S.A.
Sánchez Llevot, 1. Teléfono 22 22 50. 37005 Salamanca, 1987.

El número 19 de la Serie TEMAS MONOGRAFICOS aborda un problema de actualidad e interés indiscutibles: LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.

Con el talante riguroso propio del Investigador, del Estudiante, los autores (Profesores de nuestra Universidad) dan cuenta de la naturaleza de los CONTAMINANTES primarios de la Atmósfera, de sus orígenes, y de sus efectos sobre plantas, hombres y materiales (cuyo paulatino aumento es bien conocido), así como de los mecanismos naturales y artificiales de su eliminación.

También se refiere el trabajo, entre otros aspectos, a la destrucción de la pantalla de ozono de la Atmósfera, a la formación de la lluvia ácida, y a la elevación de la temperatura, ocasionada por el aumento de la concentración del dióxido de carbono atmosférico.

A nuestro juicio, estamos ante un informe científico objetivo y prudente acerca de problemas del mundo real, que son claves por sus repercusiones ambientales (no siempre bien comentadas), por lo que la MONOGRAFIA está en la línea formativa, de Extensión Científica, del CENTRO DE EDAFOLOGIA Y BIOLOGIA APLICADA (CSIC), para la que siempre contamos con el Patrocinio de la EXCMA. DIPUTACION PROVINCIAL DE SALAMANCA.

INTRODUCCION

En 1966, un informe del Comité de Polución perteneciente a la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos definía la contaminación como «un cambio perjudicial en las características físicas, químicas o biológicas de nuestro aire, nuestra tierra o nuestra agua, que puede afectar o afectará nocivamente la vida humana o la de especies beneficiosas, nuestros procesos industriales, nuestras condiciones de vida y nuestro acervo cultural, o que puede malgastar y deteriorar, o malgastará y deteriorará, nuestros recursos de materias primas. Los elementos de contaminación son los residuos de cosas que hacemos, utilizamos y arrojamos. La contaminación aumenta no sólo porque a medida que la gente se multiplica, el espacio disponible para cada persona se hace más pequeño, sino también porque las demandas por persona crecen continuamente, de modo que aumenta con cada año lo que cada una de ellas desecha. A medida que la gente se va amontonando en la Tierra, ya no hay escapatoria posible. El cubo de la basura de una persona es el espacio vital de otra».

De esta definición se deduce que el tema de la contaminación, considerada en un sentido global, es demasiado amplio como para poder ser incluido en un trabajo de divulgación medianamente profundo. De hecho, en el momento actual, tanto especialistas como profanos están sufriendo una auténtica avalancha informativa sobre la contaminación, que los medios de difusión prodigan quizá demasiado y posiblemente sin la objetividad crítica necesaria.

Reducir los apartados que siguen a aspectos superficiales o sensacionalistas, es una tarea demasiado sencilla como para que nos interese abordarla. Por ello hemos preferido limitar nuestro campo de acción a la contaminación atmosférica, tocando una serie de puntos claves por sus repercusiones ambientales, entre los que se incluyen problemas preocupantes de consecuencias no siempre bien comentadas. En realidad, en la investigación de

muchos de estos problemas, como las posibilidades de deterioro de la capa de ozono o sobre las consecuencias climáticas del aumento de dióxido de carbono, los especialistas se enfrentan a la falta de datos definitivos. Curiosamente, los vulgarizadores parecen contar con estos datos (la ciencia infusa, fuera del Paraíso, parece ser otra forma de contaminación) y nos anuncian catástrofes a corto o medio plazo que prácticamente aniquilarán a la humanidad. Las posturas prudentes, que no es lo mismo que expectantes, conocedoras de los peligros potenciales pero ajustándolos a sus términos precisos, son las únicas que nos permitirán tomar conciencia del mundo real en que nos movemos.

El hombre ha pagado un precio por el desarrollo de sus sociedades y parte de este precio es la contaminación. Pedir renunciadas al bienestar de los integrantes de los países más desarrollados o resignación a las poblaciones de los países en vías de desarrollo, ha demostrado ser un completo fracaso. En el n.º 10 de esta misma serie hemos manifestado nuestras serias dudas acerca de la existencia del altruismo, sobre todo considerado en un plano colectivo. Los sucesos históricos nos vienen a dar reiteradamente la razón, lo cual, dicho sea de paso, es algo que ni nos agrada ni nos enorgullece. De momento, buscar soluciones que mitiguen o anulen los daños, parece ser el único medio viable para no herir el prepotente orgullo nacional de los unos ni condenar a los otros a la injusticia social.

Por otra parte, se nos podría preguntar el porqué de haber elegido la contaminación atmosférica dentro de las múltiples formas posibles de contaminación. La razón es sencilla; la contaminación del aire es la contaminación primaria por excelencia y la que comenzó a presentarse como más evidente, en particular a partir de la Revolución Industrial. El aire constituye uno de los elementos básicos para una gran parte de los seres vivos. Baste considerar que los pulmones del hombre filtran diariamente unos 15 Kg. de aire atmosférico, mientras que nuestras necesidades de agua se centran en 2,5 Kg. y las de alimentos en 1,5 Kg. La conciencia de la importancia de un aire puro y limpio ha debido de ser muy antigua; la invención del fuego, los incendios forestales, las erupciones volcánicas, etc., debieron contribuir a crearla ya en la prehistoria. En los tiempos históricos hay hechos señalados que indican esta preocupación; en 1382, Carlos VI de Francia, prohibía mediante edicto la emisión de gases malolientes, y en el siglo XVII existía una disposición que no permitía encender fuego durante las sesiones del Parlamento de Westminster; palabras como malaria (mala aria, es decir, aire impuro) se acuñaron en base a la posible peligrosidad del aire en la generación de enfermedades, aunque hoy día se conozca que las causas son muy distintas; actualmente, bajo el lema de «o tabaco o sa-

lud» se nos sensibiliza contra un vicio que disminuye nuestras defensas, refuerza la acción de otros contaminantes, potencia la aparición de cánceres y daña a través de la nicotina a los sistemas nervioso y circulatorio.

Los contaminantes del aire son muchos, por lo que su contemplación individual resulta prácticamente imposible. Sin embargo, a efectos de exposición, las cosas se simplifican, ya que los denominados contaminantes primarios, que podemos agrupar en cinco categorías, son responsables de la mayoría de los efectos perjudiciales para plantas, animales y materiales; a cada uno de ellos se le dedicará un apartado en el presente trabajo. Otros contaminantes, en cuanto a sus efectos, tienen menor importancia; no se quiere decir con ello que estos efectos no sean graves, que pueden serlo en grado sumo, sino que están muy localizados en las cercanías de los focos de emisión o sus repercusiones se canalizan más que a partir del aire a través del agua, del suelo o de los alimentos; aquí nos interesamos especialmente por fenómenos de carácter amplio, que son los de auténtica incidencia sobre una gran parte de los organismos.

Hemos vivido durante mucho tiempo bajo argumentos falsos acerca de la Naturaleza contemplada como un bien inagotable y gratuito. Pero la Naturaleza, en toda su pureza, es hoy en día un bien raro en vez de inagotable y caro de proteger en vez de gratuito. Su fragilidad ante las actividades humanas se está poniendo de manifiesto cada vez de forma más alarmante, de manera que el culto al progreso técnico e industrial, como creador de un nivel de vida ventajoso, debe tornarse en su sometimiento, para hacer más aceptable la calidad de la vida. Nivel y calidad de vida constituyen el antagonismo a tener en cuenta; la elección es sencilla; sólo hace falta que todos pongamos algo de nuestra parte para tener al menos la posibilidad de realizarla.

1. ESTRUCTURA Y COMPOSICION GENERAL DE LA ATMOSFERA

La atmósfera terrestre consiste en una envoltura gaseosa que rodea a nuestro planeta hasta una altura cifrada, un tanto arbitrariamente, en unos 10.000 Km. y que se encuentra retenida por atracción gravitacional.

La gran compresibilidad de los gases que la componen es causa de su peculiar estructura vertical, sustancialmente distinta de la estratificación de las aguas en la hidrosfera, la otra gran cubierta fluida de la Tierra. Así, la densidad máxima se alcanza al nivel del mar y disminuye rápidamente al ganar altura, de manera que el 50 % de la masa total se encuentra en los 5.300 primeros metros, y el 99 % por debajo de los 30 kilómetros. La mitad del agua atmosférica está contenida en los 1.800 metros iniciales, y la mitad del material sólido atmosférico (partículas constituyentes del polvo) en un espesor mucho menor. La vida ocupa la capa inmediata al sustrato, y aunque a veces se habla de un «aeroplancton» para referirse a los organismos suspendidos en el aire, se trata en realidad de situaciones transitorias.

De acuerdo con la temperatura la atmósfera se ha dividido en distintas capas (Fig. 1). La más cercana a la superficie se denomina troposfera, en la que prácticamente tienen lugar todos los fenómenos meteorológicos y climáticos de importancia directa para los seres vivos. Sólo las nubes altas, como los cirros, llegan a rebasar su límite o tropopausa, que se encuentra aproximadamente hacia los 11 Km. de altura. Hay que decir aproximadamente, porque esta altura es variable según la latitud, pasándose de unos 16 Km. en el Ecuador a unos 8 Km. en los Polos. Además, también se producen cambios de acuerdo con las distintas estaciones del año.

La troposfera se caracteriza por lo común por un descenso uniforme de la temperatura a medida que se gana en altura, a razón de unos 6,5°C cada kilómetro. De esta manera, la temperatura de la tropopausa viene a ser por término medio de -56°C, pero es me-

nor en el Ecuador, donde la tropopausa está más alta, que en los Polos.

En la capa inmediatamente superior o *estratosfera*, la temperatura asciende primero con lentitud y luego de forma más rápida, hasta alcanzar su límite o estratopausa, situado a unos 48 Km.

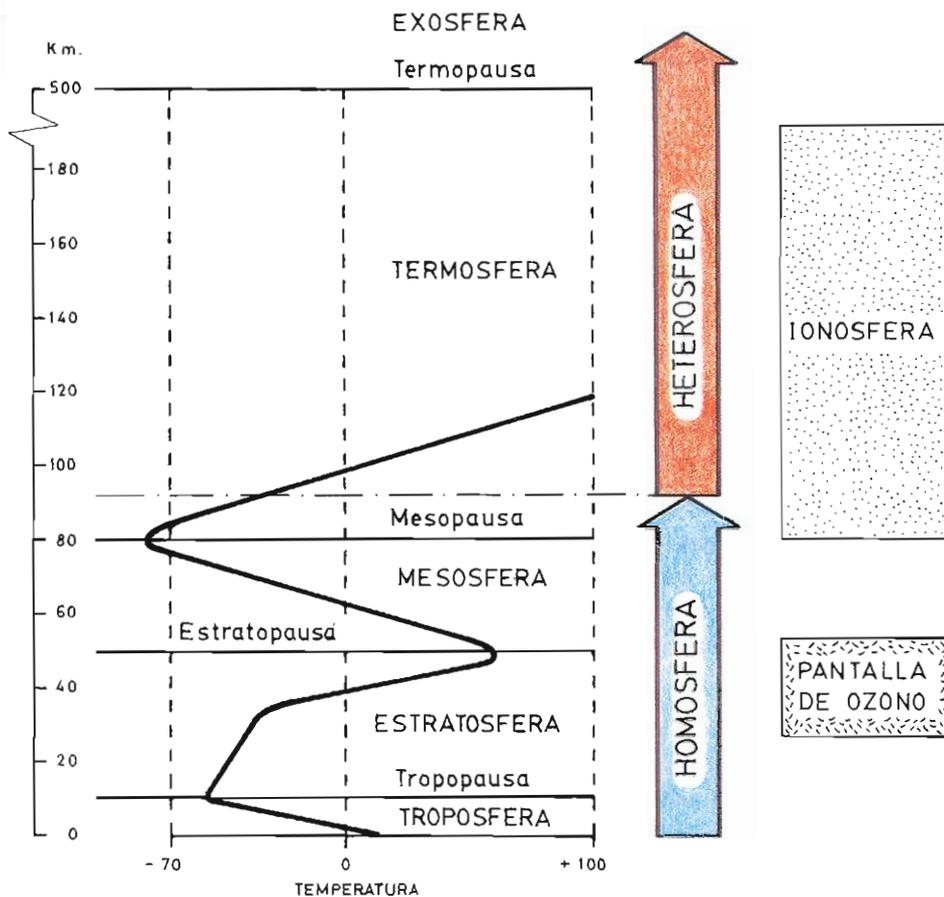


FIG. 1. Constitución general de la atmósfera. Se indican las distintas capas de acuerdo con la temperatura y con la composición. A la derecha se representa la posición aproximada de la ionosfera y de la pantalla de ozono

En la estratosfera se encuentra la capa de ozono (a veces denominada ozonosfera), que también penetra algo en la parte inferior de la capa si-

guiente o mesosfera. La absorción de radiación de onda corta (la más penetrante y perjudicial para la vida) por el oxígeno (O_2) produce ozono (O_3), el cual a su vez absorbe radiación de longitud de onda corta, aunque ligeramente superior a la absorbida por el oxígeno.

De esta manera, oxígeno y ozono constituyen una pantalla protectora, evitando los efectos nocivos de la radiación ultravioleta sobre los organismos. La absorción de rayos ultravioleta produce las elevadas temperaturas que se encuentran hacia la estratopausa, coincidiendo con el límite superior de la pantalla de ozono.

En la *mesosfera* la temperatura desciende hasta alcanzar valores muy bajos en la mesopausa. A mayor altura, en la *termosfera*, se observa un rápido ascenso de la temperatura, que llega a superar los $1.000^\circ C$, pero esta cifra tiene poca significación, ya que al ser la densidad del aire muy pequeña, es muy escasa la cantidad de calor que puede retener o conducir. La *exosfera* es la zona exterior, más o menos indefinida, de la atmósfera.

Como es lógico, en el orden en que han sido citadas las capas, se produce una rápida disminución de la presión, que a nivel de la tropopausa viene a ser $1/4$ de la medida a nivel del mar (la cuarta parte de aproximadamente 1 Kg./cm^2), y en la estratopausa ya se ha reducido a $1/1.000$ de la misma.

La atmósfera también puede subdividirse de acuerdo con su composición (Fig. 1). Así, se encuentra una primera capa u *homosfera*, de unos 90 Km, que aproximadamente viene a ser la suma de troposfera, estratosfera y mesosfera, y una segunda capa o *heterosfera*, situada por encima de la anterior.

La homosfera, como su nombre indica, es uniforme en la proporción de gases. En el caso de *aire puro y seco*, la homosfera tiene la siguiente composición fundamental:

Nitrógeno	78,084 %
Oxígeno	20,946 %
Argón	0,934 %
Dióxido de carbono . . .	0,033 %

Hay que añadir pequeñas cantidades de otros gases inertes aparte del argón, como son neón, helio, criptón y xenón, y también hidrógeno y metano; este último forma parte del ciclo del carbono en la biosfera, por lo que no es contaminante en las proporciones adecuadas, aunque a veces se

confunda con otros hidrocarburos al calcular la contaminación total. En conjunto, la suma de los últimos gases mencionados representa menos del 0,01 % del volumen total.

Todos los gases componentes de la homósfera están perfectamente mezclados entre sí, de forma que se comportan como si fueran un solo gas.

En la heterósfera, por el contrario, aparecen las siguientes subcapas:

De nitrógeno molecular (N_2). Hasta los 200 Km.

De oxígeno atómico (O). Hasta 1.100 Km.

De helio atómico (He). Hasta 3.500 Km.

De hidrógeno atómico (H). Hasta 10.000 Km.

Como se aprecia, los gases se disponen en orden a sus pesos. Así, el nitrógeno molecular, el más pesado, es el inferior; el hidrógeno atómico, el más ligero, el exterior.

A la altura de 10.000 Km. el hidrógeno se encuentra aproximadamente a la misma densidad que en el espacio interplanetario. No obstante, se encuentran átomos de hidrógeno que giran con la Tierra, y por tanto puede considerarse que pertenecen a su atmósfera, hasta 35.000 Km. de altura.

Localizada a un nivel que oscila entre los 80 y los 400 Km, es decir, coincidiendo con la parte baja de la heterósfera, se encuentra la ionósfera. *En ella, las moléculas de nitrógeno y los átomos de oxígeno absorben la radiación de longitudes de onda más corta (rayos γ y rayos X), y por tanto de alta energía, procedentes del espectro de radiación solar.* En el proceso de absorción cada molécula o átomo cede un electrón, convirtiéndose en un ión cargado positivamente.

La capacidad que poseen los estratos ionizados para reflejar las ondas de radio y devolverlas hacia la Tierra, hace posible la comunicación por radio a larga distancia. Dado que la ionósfera se forma por acción directa de la radiación solar, durante la noche las capas tienden a debilitarse.

2. AIRE NATURAL Y AIRE CONTAMINADO

No hay duda de que el vapor de agua es uno de los componentes más variables del aire, ya que su concentración puede ser insignificante en una zona desértica o alcanzar el 5 % en las selvas tropicales húmedas. Por ello, es importante prescindir de la humedad cuando se quiere obtener una idea precisa acerca de la composición del aire. Igualmente, la materia pulverizada es mucho más variable que los gases, fluctuando ampliamente de un lugar a otro; en ella se incluyen partículas no viables como polvo volcánico, constituyentes del suelo, sales provenientes de la evaporación de las pequeñas gotitas formadas al romper las olas, y partículas viables como el polen. De aquí que convenga hacer referencia no sólo al aire seco, sino también al aire limpio.

En el apartado anterior se ha hecho mención al aire puro. En realidad, hablar de aire puro es un tanto utópico y expuesto a conjeturas, porque el *aire natural* tiene una composición mucho más amplia que la dada. Así, se encuentran muchos componentes menores del aire que provienen de diversos procesos naturales. Por ejemplo, el sulfuro de hidrógeno (SH_2), el dióxido de azufre (SO_2) y el monóxido de carbono (CO), son vertidos a la atmósfera debido a la actividad volcánica. En condiciones anaerobias (sin oxígeno), la putrefacción de productos orgánicos da lugar a metano (CH_4), pero también se produce amoníaco (NH_3) y sulfuro de hidrógeno (SH_2). Los distintos óxidos de nitrógeno (NO , NO_2 y N_2O) se generan por descargas eléctricas durante las tormentas, al igual que ocurre con el ozono (O_3), el cual puede provenir también del efecto de la radiación solar. Los incendios forestales, la oxidación del metano y otras fuentes naturales producen toneladas de monóxido de carbono (CO).

Ahora bien, salvo en las cercanías de focos muy localizados, como pueden ser los volcanes, todos estos componentes se en-

cuentran en proporciones mínimas, compatibles con la vida, y esencialmente constantes para la generalidad del aire.

Cuando cualquier sustancia nueva penetra en el aire, o se altera la proporción de las ya existentes, puede hablarse de *aire contaminado*. Así, la introducción de fluoruros es causa de contaminación, de igual forma que el aire que contiene un 10 % de dióxido de carbono (CO_2) resulta venenoso.

No obstante, se ha llegado a un convenio para definir como contaminantes a *«aquellas sustancias que, añadidas en cantidades suficientes, causan efectos nocivos medibles sobre los seres humanos, los animales, la vegetación o los materiales»*.

De esta manera, cada vez es mayor el número de sustancias que se denuncian como contaminantes, a medida que su acción sobre los seres vivos o los materiales se va revelando como perjudicial. Tales sustancias pueden presentarse como partículas sólidas, gotas líquidas, gases o mezclas de estas formas. La mayor parte de los problemas ocasionados por el aire contaminado se deben a un gran número de tipos distintos de contaminantes, y no a un solo componente.

A pesar del gran número de contaminantes presentes en el aire, existen cinco sustancias básicas, denominadas contaminantes primarios, las cuales ocasionan más del 90 % de la contaminación atmosférica. Se trata de:

- Monóxido de carbono (CO).
- Oxidos de nitrógeno (NO_x).
- Hidrocarburos (C_xH_y).
- Oxidos de azufre (SO_x).
- Partículas.

Cuando se evalúa el impacto ambiental de los contaminantes primarios, cabe distinguir entre su masa y su efecto, ya que como es evidente un contaminante puede ser más peligroso o más perjudicial que otro. Para ello, a cada contaminante se le puede asignar un «factor de efecto», que cuanto mayor sea indica una superior peligrosidad ambiental. En la figura 2 se establece una comparación entre porcentajes de la masa y porcentajes del efecto de los contaminantes primarios. Se observa, por ejemplo, que el monóxido de carbono, el contaminante de mayor masa, tiene un efecto muy pequeño, ya que su nivel de tolerancia por organismos y materiales es comparativamente alto. Se le ha asignado el factor de efecto de 1, que es el

mínimo valor aplicable. Por el contrario, los hidrocarburos, a pesar de su masa mucho menor, son poco tolerados, y de aquí que al aplicarles un factor de efecto de 125 pasen a ocupar un lugar destacado en lo que se refiere a sus consecuencias.

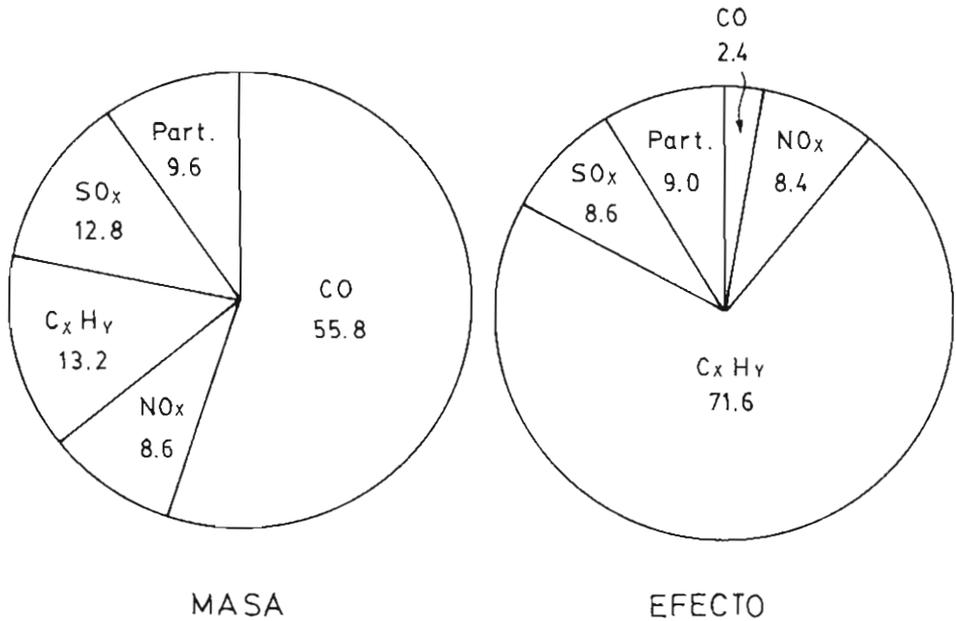


FIG. 2. Porcentajes de la masa y porcentajes del efecto de los cinco contaminantes primarios del aire. Se aprecia, por ejemplo, que los hidrocarburos a pesar de su pequeña masa tienen un gran efecto, ocurriendo lo contrario en el caso del monóxido de carbono.

Una vez examinados los principales contaminantes del aire, conviene distinguir las fuentes de origen más importantes de los mismos. Dichas fuentes son las siguientes:

- De combustión móvil (transporte).
- De combustión estacionaria.
- Procesos industriales.
- Eliminación de residuos sólidos.
- Otras.

Las cuatro primeras, es decir, las que revisten aspectos concretos, están citadas por orden de importancia en cuanto a la masa de contaminantes

producidos, destacando con mucho las fuentes de combustión móvil para los países industrializados. A estas fuentes de combustión móvil cabe atribuir las mayores emisiones de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos. La combustión estacionaria destaca por los óxidos de azufre y los procesos industriales por la incorporación de partículas a la atmósfera. La comparación entre masa y efecto se realiza, también en la forma de porcentajes, en la figura 3. Las diferencias no son tan grandes como para los contaminantes primarios considerados aisladamente, pero hay algunas alteraciones de orden, como la debida a los procesos industriales, que ocupan el segundo lugar por su efecto, mientras que respecto a la masa se encuentran en el tercer puesto.

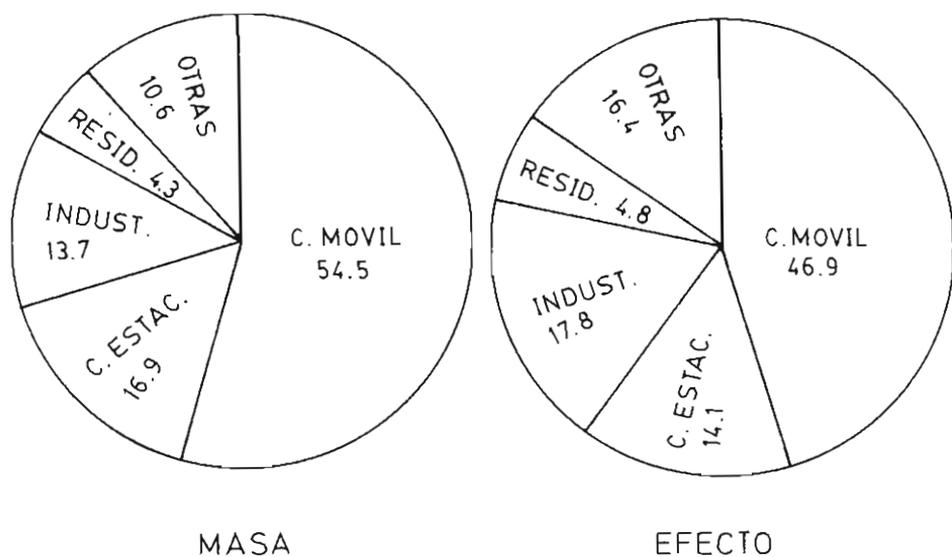


FIG. 3. Porcentajes de la masa emitida y porcentajes del efecto causado por las principales fuentes contaminantes del aire. Las diferencias, aún existiendo, no son tan acusadas como en la figura 2. Las fuentes de combustión móvil se revelan como el principal motivo de contaminación.

Por último, cabe preguntarnos acerca del aumento de la contaminación, y cuales son los contaminantes que han experimentado recientemente un incremento superior. Las diferencias entre países son muchas, pero siempre refiriéndonos a aquellos más industrializados, puede cifrarse entre un 50 y un 70 % el aumento global de los contaminantes totales del aire en los últimos treinta años. La comparación entre contaminantes primarios sugiere,

sin embargo, una cierta disminución de las partículas, mientras que los hidrocarburos y, particularmente, los óxidos de nitrógeno han subido de manera realmente espectacular (superando incluso el 150 %). Hay que anotar que hidrocarburos y óxidos de nitrógeno son precisamente los dos contaminantes de mayor factor de efecto, por lo que los peligros derivados de la contaminación atmosférica constituyen un tema tan grave como actual.

3. EL MONOXIDO DE CARBONO

El monóxido de carbono (CO) es el contaminante del aire más abundante y que se encuentra más ampliamente distribuido. *No obstante, y contra lo que se pensaba hasta hace pocos años, las fuentes naturales son mucho más importantes que las derivadas de las actividades humanas.* De esta forma, la mayor parte del monóxido de carbono que se encuentra en la atmósfera, entendida en sentido general, procede de la oxidación del metano (CH₄), el cual se genera por la descomposición de sustancias orgánicas en medios muy húmedos (zonas pantanosas, arrozales y regiones tropicales). Otras fuentes importantes y naturales de monóxido de carbono se encuentran en la producción y degradación de la clorofila en las plantas, en la liberación de este gas por los océanos, y en otros orígenes diversos que todavía no se han estudiado en detalle.

La consecuencia es que menos del 10 % del monóxido de carbono atmosférico tiene al hombre como agente causal, pero a pesar de ser una cantidad comparativamente pequeña, el impacto de las fuentes antropogénicas no debe minimizarse en modo alguno, debido principalmente a dos causas fundamentales:

a) La concentración de las fuentes antropogénicas en áreas muy reducidas, mientras que las naturales están más o menos repartidas por gran parte del globo. Esto hace que, por ejemplo, en las grandes ciudades el hombre llegue a ser responsable de más de un 90 % del monóxido de carbono presente en el aire.

b) Las fuentes antropogénicas emiten monóxido de carbono con una tasa muy alta, que sobrepasa los mecanismos naturales locales existentes para su eliminación.

Los automóviles con motor de gasolina son los emisores más importantes de monóxido de carbono contaminante, de manera que es en las zonas

urbanas muy pobladas donde aparecen las mayores cantidades de este gas. En dichas zonas su concentración se relaciona de forma muy clara con las actividades humanas, en particular con la densidad del tráfico. Debido a ello, se constata la existencia de mayor contaminación en los días laborables que en los festivos y, para un día en concreto, los niveles descienden mucho durante la noche, para incrementarse durante el día (Fig. 4). Otras fuentes tienen una importancia menor, pero todos los medios autónomos de transporte, quemadores, sobre todo de carbón, procesos industriales, como el refinado del petróleo, cremaciones de residuos, incluidos los agrícolas, etc., también contribuyen lanzando a la atmósfera millones de toneladas por año de monóxido de carbono.

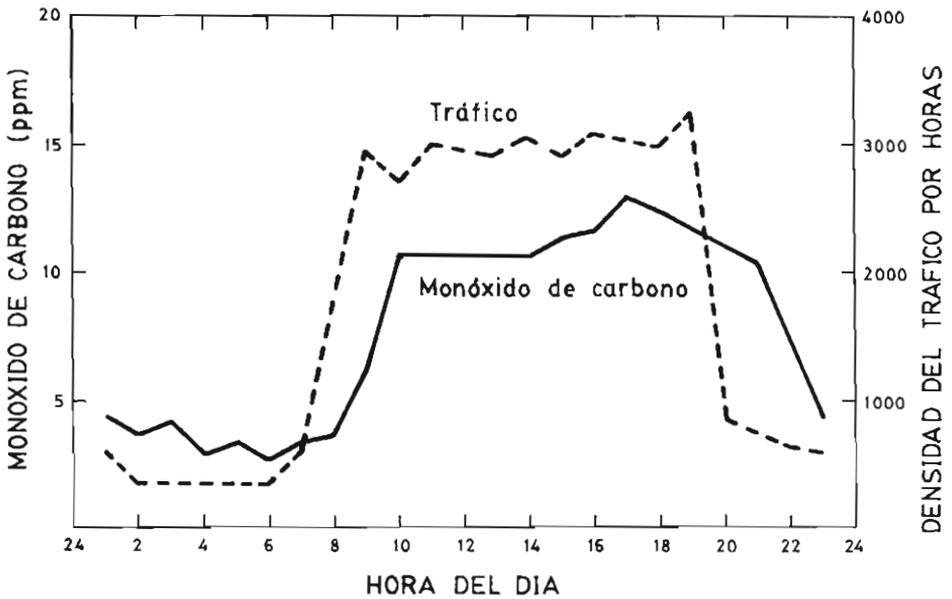


FIG. 4. Relación que se produce, según la hora del día, entre las emisiones de monóxido de carbono y la densidad del tráfico en una gran ciudad. Los automóviles dotados con motor de gasolina constituyen la principal fuente de polución del aire por este contaminante.

La eliminación del monóxido de carbono puede realizarse en una proporción muy pequeña por reacciones que ocurren en la atmósfera, pero la mayor parte de dicho papel corresponde al suelo, circunstancia que fue establecida a principios de los años setenta

después de un largo período de investigaciones. El proceso es de naturaleza biológica, siendo determinados hongos edáficos los agentes capaces de llevarlo a cabo mediante la oxidación del CO a CO₂.

Los suelos más eficientes en este sentido son los que soportan una vegetación natural, siendo mucho menos eficientes los cultivados, posiblemente por la carencia de materia orgánica. En particular, la efectividad más elevada corresponde a los suelos tropicales, debido a las condiciones climáticas favorables (alta humedad y temperatura) para el desarrollo de la microflora. Una estimación muy general nos lleva a la consideración de que *el suelo es capaz de eliminar más de tres veces la descarga anual de monóxido de carbono a la atmósfera, pero hay que dejar constancia de que en las ciudades, que como se ha indicado son los focos locales de las grandes concentraciones de este contaminante, el proceso es en gran parte imposible*. Dado que en los grandes núcleos urbanos la eliminación es muy pequeña, el que la concentración de monóxido de carbono no alcance límites insospechados se debe a su dispersión por el viento y turbulencias del aire; pero a veces la dispersión es frenada por los propios edificios o porque se producen situaciones de estabilidad atmosférica, con el consiguiente incremento de la concentración de monóxido de carbono.

Si consideramos que una concentración de 100 ppm (partes por millón) es raro que se supere en las ciudades, salvo en algunos casos excepcionales (interior de vehículos en un intenso tráfico urbano), puede decirse que para las plantas superiores este contaminante apenas supone peligro, siempre que el tiempo de exposición a estos niveles tan altos no se prolongue demasiado por estabilidad atmosférica, lo cual no es muy probable. Tampoco parece existir probabilidad de un detrimento claro para organismos inferiores, ya que, por ejemplo, la capacidad de las bacterias fijadoras de nitrógeno sólo queda inhibida al cabo de un mes de exposición a la concentración mencionada, por lo que de momento no son significativos los impactos que se producen en la vegetación y en los microorganismos.

Un caso muy distinto es el efecto producido sobre el hombre. Es bien conocido que elevadas cantidades de monóxido de carbono pueden producir la muerte, pero concentraciones menores de 100 ppm influyen en mayor o menor medida sobre la salud. Este hecho se debe a la capacidad del monóxido de carbono para combinarse con la hemoglobina (Hb) de la sangre. La hemoglobina funciona como un sistema de transporte de doble sentido: por una parte lleva oxígeno, en forma de oxihemoglobina (O₂Hb), desde los pulmones hasta las células y, por otra, conduce dióxido de carbono (en

la forma CO₂Hb) desde las células hasta los pulmones, con lo que es eliminado.

La presencia de monóxido de carbono en el aire condiciona que la hemoglobina forme carboxihemoglobina (COHb), con lo que su capacidad para transportar oxígeno se ve disminuida, tanto más cuanto que la afinidad del monóxido de carbono por la hemoglobina es unas 200 veces superior a la del oxígeno; en otras palabras, cuando existan ambas posibilidades se formará antes COHb que O₂Hb.

Dadas estas dos posibilidades, los efectos del monóxido de carbono sobre la salud dependerán del porcentaje de COHb que exista en la sangre. *De hecho, en la sangre siempre se encuentra un nivel de fondo de 0,5 %, que se debe a los procesos metabólicos orgánicos; el resto depende del contenido ambiental de monóxido de carbono.* Contenido ambiental del monóxido de carbono y porcentaje de COHb en sangre se pueden relacionar fácilmente mediante la expresión:

$$\% \text{ COHb en sangre} = 0,5 + (0,16 \times \text{Concent. ambiental de CO en ppm})$$

Donde el 0,5 corresponde al nivel de fondo mencionado. Como es lógico, para alcanzar este equilibrio se precisa de un cierto tiempo, tanto para que aumente la COHb en sangre como para que disminuya; con las actividades físicas duras el equilibrio se alcanza con mayor rapidez.

El porcentaje de carboxihemoglobina en sangre presenta distintos efectos sobre los seres humanos. Por debajo del 1 % dichos efectos no existen o, al menos, no son aparentes. Del 1 al 2 % el comportamiento se vuelve menos eficaz. Del 2 al 5 % se observan irregularidades que afectan al sistema nervioso central, particularmente en la ejecución de trabajos largos y en la discriminación visual o auditiva. Del 5 al 10 % se producen cambios funcionales, tanto cardíacos como pulmonares. Por encima del 10 % (unas 60 ppm de concentración ambiental de CO, según la expresión anterior) se aprecia, progresivamente a medida que esta cifra se incrementa, dolor de cabeza, fatiga, somnolencia, fallos respiratorios, coma y muerte.

Los estudios realizados a base de donantes de sangre indican que el hábito de fumar, la localización geográfica, la ocupación y las condiciones meteorológicas tienen influencia sobre el nivel de carboxihemoglobina. *El mayor efecto se encuentra entre los fumadores, con niveles entre dos y cuatro veces superiores a los no fumadores. La ocupación que arroja el mayor contenido es la de taxista, particularmente al finalizar la jornada de trabajo.*

Como es lógico, la mayoría de los intentos para el control de la contaminación por monóxido de carbono se dirigen hacia el automóvil y su motor de combustión interna. En concreto, se ha estudiado la mezcla de aire y carburante para obtener emisiones mínimas, pero el problema es grave porque dichas emisiones mínimas pueden coincidir con vertidos altos de óxidos de nitrógeno o hidrocarburos. Modificar los motores puede ser una medida, pero también hay otras como el desarrollo de sistemas de reactores de escape para completar el proceso de combustión, emplear carburantes sustitutos de la gasolina o el desarrollo de otras fuentes energéticas. No obstante, todas estas alternativas presentan en la actualidad inconvenientes, bien de tipo tecnológico o económico, de manera que al proceso de investigación, aunque no es nuevo, puede considerarse que le queda mucho camino por recorrer.

4. OXIDOS DE NITROGENO

De los distintos óxidos de nitrógeno conocidos, normalmente se detectan en la atmósfera tres de ellos: óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y óxido nitroso (N₂O), de los cuales los dos primeros son tóxicos a determinadas concentraciones.

El origen de estos compuestos es muy diferente según el óxido de que se trate. Así, el óxido nítrico proviene tanto de fuentes naturales (80 %) como antropogénicas (20 %), el dióxido de nitrógeno es de origen antropogénico casi en su totalidad, y el óxido nitroso se emite de forma natural, lo que unido a su falta de toxicidad hace que no se le considere un contaminante del aire. *En total, las fuentes antropogénicas de óxidos de nitrógeno vienen a representar sólo algo más del 10 % de las emisiones globales mundiales; pero al igual que ocurre con el monóxido de carbono no hay que minimizar el problema, ya que dichas fuentes se concentran en espacios reducidos.*

Aunque durante las tormentas los rayos producen la combinación del nitrógeno y del oxígeno formando los tres óxidos de nitrógeno mencionados, la cantidad que se obtiene de esta forma es mínima. El origen natural del óxido nítrico y del óxido nitroso se encuentra en la actividad bacteriana del suelo, que es causa de la descomposición de compuestos nitrogenados. *En cuanto a las emisiones antropogénicas del óxido nítrico y dióxido de nitrógeno, provienen principalmente de la combustión a elevadas temperaturas;* las cantidades relativas de óxido nítrico y dióxido de nitrógeno producidas varían de acuerdo con la temperatura y con la proporción en que estén presentes nitrógeno y oxígeno; con todo, siempre se forma mucho más óxido nítrico sean cual sean las condiciones, si bien, en la atmósfera, gran parte del óxido nítrico (inoloro e inodoro) se convierte en dióxido de nitrógeno (gas pardo-rojizo de fuerte olor asfijante).

En efecto, el óxido nítrico y el dióxido de nitrógeno una vez que se encuentran en la atmósfera, entran a formar parte de un conjunto de reacciones fotoquímicas (con intervención de la radiación ultravioleta procedente del Sol) que determinan un aumento del segundo en perjuicio del primero, y que se conoce con el nombre de «ciclo fotolítico del NO_2 ».

Dichas reacciones están esquematizadas en la figura 5, e incluyen esencialmente los siguientes pasos:

- Absorción de radiación ultravioleta por el dióxido de nitrógeno (NO_2).
- Rotura de la molécula de dióxido de nitrógeno (NO_2), dando lugar a óxido nítrico (NO) y oxígeno atómico (O).
- Dado el gran poder reactivo del oxígeno atómico (O), éste se combina con el molecular (O_2), dando lugar a ozono (O_3).
- El ozono (O_3) reacciona con el óxido nítrico (NO) formado anteriormente, para dar oxígeno (O_2) y dióxido de nitrógeno (NO_2).

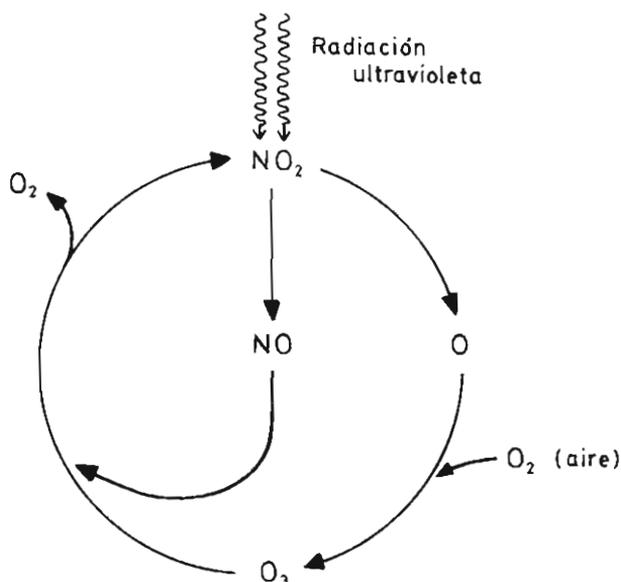


FIG. 5. Ciclo fotolítico del dióxido de nitrógeno. Al absorber radiación ultravioleta el dióxido de nitrógeno produce óxido nítrico y oxígeno atómico; este último al combinarse con el oxígeno molecular da lugar a ozono, el cual reacciona con el óxido nítrico para originar oxígeno y dióxido de nitrógeno.

Como se aprecia, el ciclo fotolítico del NO_2 no supone en sí cambios en las concentraciones de NO y NO_2 , ya que todos los componentes que inter-

vienen se forman y destruyen con la misma rapidez. Pero si están presentes hidrocarburos, frecuentemente debidos a idénticas fuentes que las de los óxidos de nitrógeno, el NO se convierte en NO₂ a mayor velocidad que el NO₂ se disocia en NO y O. Además, se producen contaminantes secundarios, en un proceso reactivo sumamente complejo que veremos simplificado en el apartado siguiente.

La eliminación de los óxidos de nitrógeno de la atmósfera supone su conversión en ácido nítrico (NO₃H), proceso en el que interviene el agua pero que aún no se ha determinado por completo. El ácido nítrico como tal, o en la forma de nitratos, es luego precipitado por la lluvia o el polvo.

Actualmente se piensa que el suelo puede constituir también un importante sumidero para los óxidos de nitrógeno, de forma paralela a lo que ocurre con el monóxido de carbono.

Es bien conocido que los óxidos de nitrógeno causan daños a las plantas, aunque estos daños son difíciles de desligar de los ocasionados por los contaminantes secundarios a los que se ha hecho mención al tratar del ciclo fotolítico del dióxido de nitrógeno. *Considerados en sí mismos, en la Naturaleza no hay pruebas de daños debidos al óxido nítrico, aunque sí al dióxido de nitrógeno.* En el laboratorio, altas dosis de óxido nítrico hacen que disminuya fuertemente la fotosíntesis, pero una vez cesa la exposición el proceso se recupera y no se desarrollan daños visibles. El dióxido de nitrógeno ocasiona a niveles bajos y tiempos prolongados manchas en las hojas, aumento de la caída de las mismas y menores rendimientos, y a concentraciones altas desde necrosis (descomposición de los tejidos) leve a necrosis total.

Para los animales y seres humanos existe peligro en la contaminación por los óxidos de nitrógeno, pero dicho peligro es más potencial que real, ya que los niveles actuales en la atmósfera no son muy altos. En particular, *el óxido nítrico desempeña un papel muy poco relevante respecto a la salud. El dióxido de nitrógeno es unas cuatro veces más nocivo, pudiendo afectar al sistema respiratorio.* En animales se han ensayado dosis altas de dióxido de nitrógeno que ocasionan, en orden creciente, efectos en la percepción olfativa, irritación nasal, incomodidades respiratorias, dolores respiratorios agudos, edema pulmonar y muerte. Pruebas con voluntarios humanos, como es lógico a dosis más bajas, produjeron irritación ocular y, sobre todo, nasal.

Por otra parte, los óxidos de nitrógeno y los nitratos derivados de ellos afectan al color de algunos tintes textiles, como los empleados para el algodón; el proceso es muy evidente si se emplean secadores para la ropa ali-

mentados con fuego de gas. Los cables de cuproníquel, usados por las compañías telefónicas como relés, presentan corrosión a niveles elevados de nitratos, causando fallos de tensión.

Controlar la contaminación por óxidos de nitrógeno es muy difícil, dados los distintos tipos de carburantes, de quemadores, de temperaturas alcanzadas y de incidencia con otros contaminantes. Las soluciones aportadas son hasta ahora parciales y se refieren a procesos concretos, bien modificando la fuente o las condiciones de combustión. *Por ejemplo, se puede bajar la temperatura de combustión, el oxígeno disponible, o ambos factores a la vez;* en los automóviles esto es posible de conseguir mediante una recirculación de los gases de escape; dichos gases al recircular funcionan como inertes (no combustibles) y se emplean para diluir la mezcla aire-carburante, con lo que se obtienen los dos efectos mencionados. En las centrales modernas de energía eléctrica se sigue la combustión en dos etapas; la primera se realiza a temperatura alta y con poco aire, con lo que disminuye la emisión de óxidos de nitrógeno, aunque la combustión no sea completa; la segunda, que completa la combustión, es efectuada a temperatura baja, lo que también limita la formación de estos contaminantes.

5. HIDROCARBUROS

Como indica su nombre, los hidrocarburos son sustancias compuestas únicamente por hidrógeno (H_2) y carbono (C) que, a temperatura ambiental, se encuentran como gases, líquidos o sólidos. La mayor importancia en la contaminación atmosférica corresponde a los que se encuentran en estado gaseoso o bien constituyen líquidos muy volátiles (que pasan a gases con facilidad).

La mayor parte de los hidrocarburos presentes en el aire es de origen natural, circunstancia similar a la expuesta para el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno. Dicho origen suele radicar en procesos biológicos, aunque hay otras fuentes naturales que provienen de la actividad geotérmica, yacimientos de carbón, gas natural y petróleo.

El metano (CH_4), aparte de ser el hidrocarburo de constitución más simple, es poco reactivo y el más abundante en la atmósfera. Se genera sobre todo por descomposición bacteriana en medios húmedos (pantanos, marismas, etc.), convirtiéndose parcialmente en monóxido de carbono. Las plantas, en particular los árboles, también emiten hidrocarburos denominados terpenos y hemiterpenos. Frente a estos dos orígenes, *las emisiones antropógenas vienen a representar algo más del 15 %; en su mayoría proceden del transporte y operaciones relacionadas (venta de gasolina), pero también intervienen de forma importante las refinerías de petróleo, la cremación, incluida la cremación agrícola, y la evaporación de disolventes orgánicos (pinturas, barnices, lacas, etc.).*

La importancia de los hidrocarburos como contaminantes no reside tanto en sí como en el hecho de que pueden formar oxidantes fotoquímicos (ya no son contaminantes primarios, sino secundarios). Dichos oxidantes se producen por mediación de la radiación ultravioleta y, en principio, cabe describirlos como sustancias que

oxidan materiales no directamente oxidables por el oxígeno. Los más estudiados han sido el ozono (O_3) y una serie de compuestos conocidos genéricamente con el nombre de nitratos de peroxiacilo ($R-CO_3NO_2$, siendo R un grupo hidrocarbonado).

En las reacciones atmosféricas responsables de la producción de oxidantes fotoquímicos forma una parte importante el ciclo fotolítico del dióxido de nitrógeno, descrito en el apartado anterior. Dicho ciclo puede completarse, al intervenir los hidrocarburos, como se hace en la figura 6. Se observa que los hidrocarburos compiten por el oxígeno atómico (O), dando radicales hidrocarbonados libres, los cuales con ozono (O_3) y óxido nítrico (NO) producen dióxido de nitrógeno (NO_2), oxígeno (O_2) y una mezcla compleja en la que participan los nitratos de peroxiacilo, que es conocida con el nombre de «smog fotoquímico». Hay que anotar que al combinarse los radicales hidrocarbonados libres con cantidades apreciables de óxido nítrico (NO), se produce un descenso en el nivel del mismo en favor del dióxido de nitrógeno (NO_2).

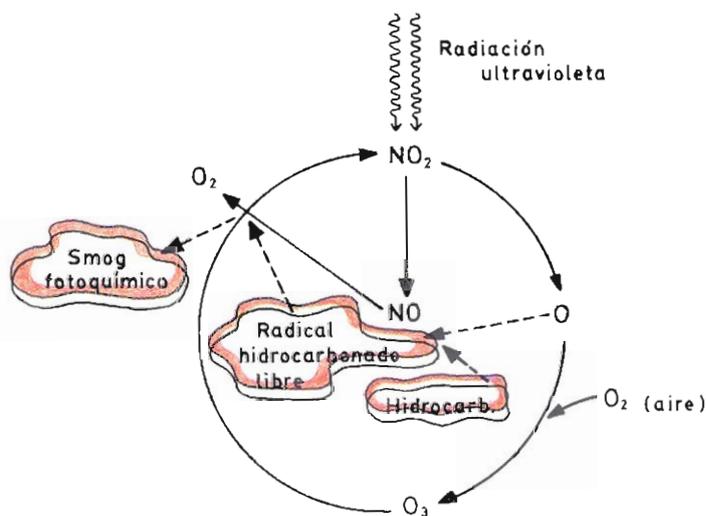


FIG. 6. Modificación del ciclo fotolítico del dióxido de nitrógeno como consecuencia de la degradación de los hidrocarburos, formándose smog fotoquímico.

Los distintos hidrocarburos no presentan la misma tendencia a entrar en el proceso fotoquímico. Por tanto, para evaluar los posibles efectos secundarios es preciso conocer la composición de la mezcla de hidrocarburos. Así, el metano es casi inerte y contribuye muy poco a estas reacciones, de forma que un nivel elevado de hidrocarburos con predominio de metano

presenta un riesgo menor que un nivel más bajo pero constituido por hidrocarburos de otros tipos.

La acción de los hidrocarburos sobre las plantas es poco apreciable. De hecho, el único hidrocarburo que a concentraciones ambientales relativamente bajas presenta efectos adversos para la vegetación es el etileno (C_2H_4), que inhibe su crecimiento, provoca cambios de color en las hojas y ocasiona la muerte de las partes florales. Otra cosa son los oxidantes fotoquímicos; por ejemplo, el ozono y el NPA (nitrato de peroxiacetilo; un miembro de los nitratos de peroxiacilo mencionados), causan daños evidentes. La presencia de ozono se aprecia por las manchas blanquecinas o punteados (acumulaciones de células muertas) que se producen en el haz (parte superior) de las hojas; en cantidades crecientes, reduce el crecimiento, disminuye el desarrollo floral e inhibe la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico. El NPA ocasiona una especie de bronceado en el envés (parte inferior) de las hojas; las hojas jóvenes se ven pronto afectadas y, eventualmente, todo el tejido foliar muere. El NPA es especialmente tóxico para los cítricos, forrajes, hortalizas y coníferas.

Cuando la acción simultánea de dos o más contaminantes produce un efecto superior a la suma de los efectos individuales, se habla de «sinergismos» o «acciones sinérgicas», que ilustran de manera muy clara los problemas ligados a la contaminación ambiental. Por ejemplo, los experimentos con plantas en el laboratorio, basados en la consideración de contaminantes por separado, no concuerdan con los efectos que se producen en las plantas en el ambiente natural, donde están sometidas a mezclas de contaminantes.

Los hidrocarburos de cadena lineal (alifáticos) no son peligrosos para el hombre y los animales a las concentraciones en que se encuentran actualmente en la atmósfera; para que sus efectos fueran patentes la concentración habría de aumentar cientos e incluso miles de veces. Los hidrocarburos con la cadena, o parte de la cadena, cerrada en anillos (aromáticos) pueden llegar, a concentraciones bastante altas, a ser irritantes para las mucosas, pudiendo incluso causar lesiones al ser inhalados. En condiciones experimentales, el ozono, en cantidades crecientes, produce inicialmente irritaciones de nariz y garganta; a continuación, ya en concentraciones altas, por encima de las atmosféricas, da lugar a fatiga, y por último a edemas pulmonares. No hay pruebas de que en la Naturaleza el ozono ocasione enfermedades respiratorias crónicas en el hombre, aunque exposiciones largas a concentraciones medianamente altas suponen cambios irreversibles en la

función respiratoria de algunos animales, que se han interpretado como un envejecimiento de los tejidos pulmonares. *Los nitratos de peroxiacilo producen irritación de los ojos, efecto muy común cuando se origina smog fotoquímico.*

Los daños causados en materiales parecen centrarse en el ozono y en su repercusión en las fibras textiles y en el caucho, sobre los que presenta efectos de rotura y agrietamiento a concentraciones ambientales. En los neumáticos, por ejemplo, se añaden aditivos antiozonantes para evitar el agrietamiento.

El control de las emisiones de hidrocarburos a partir de los automóviles es complejo, ya que las emisiones se deben tanto a las pérdidas por los escapes como a la evaporación. Para la evaporación son posibles algunas soluciones tecnológicas y, en cuanto a los escapes, cabe incluirlos con los dos contaminantes primarios comentados en los apartados anteriores. Para las fuentes fijas también hay soluciones tecnológicas, que consisten, básicamente, en técnicas de *incineración* (empleando quemadores auxiliares), *adsorción* (con paso de los gases a través de carbón activado), *absorción* (con paso de los gases a través de un líquido en el que se disuelven o quedan en suspensión los hidrocarburos) y *condensación* (utilizando bajas temperaturas).

6. OXIDOS DE AZUFRE

La mayor cantidad de óxidos de azufre emitidos hacia la atmósfera corresponde al dióxido de azufre (SO_2); existe además una proporción muy pequeña de trióxido de azufre (SO_3), que normalmente reacciona casi de inmediato con el vapor de agua, formando ácido sulfúrico (SO_4H_2). La mayor parte del dióxido de azufre presente en el aire se debe a un proceso secundario que es la oxidación del sulfuro de hidrógeno (SH_2), gas que se produce de forma natural en la descomposición de la materia orgánica. *Una pequeña parte del sulfuro de hidrógeno es de origen antropogénico, lo que unido a las emisiones del mismo origen de dióxido de azufre como tal, da una cifra debida a las actividades humanas próxima al 45 %.*

La procedencia de esta considerable cantidad de dióxido de azufre hay que buscarla sobre todo en la combustión de carburantes en fuentes estacionarias, y de manera muy particular en la combustión del carbón. El quemado de fuel-oil y la fundición de minerales sulfatados también influyen de manera significativa, aunque más reducida. Por el contrario, los transportes tienen un efecto muy pequeño.

El dióxido de azufre presente en la atmósfera puede ser lavado por el agua de lluvia o ser absorbido por la vegetación. Su oxidación en el aire origina trióxido de azufre, proceso que puede tener lugar en pocas horas. A su vez, el trióxido de azufre, debido a la ya mencionada afinidad que presenta por el agua, se disuelve en ella con rapidez. El resultado es una niebla de gotas de ácido sulfúrico, que bien en esta forma, o en la de sulfatos, es precipitado por la lluvia. El origen y destino del dióxido de azufre queda recogido en la figura 7, indicando de manera aproximada el grosor de las flechas la importancia relativa de los procesos.

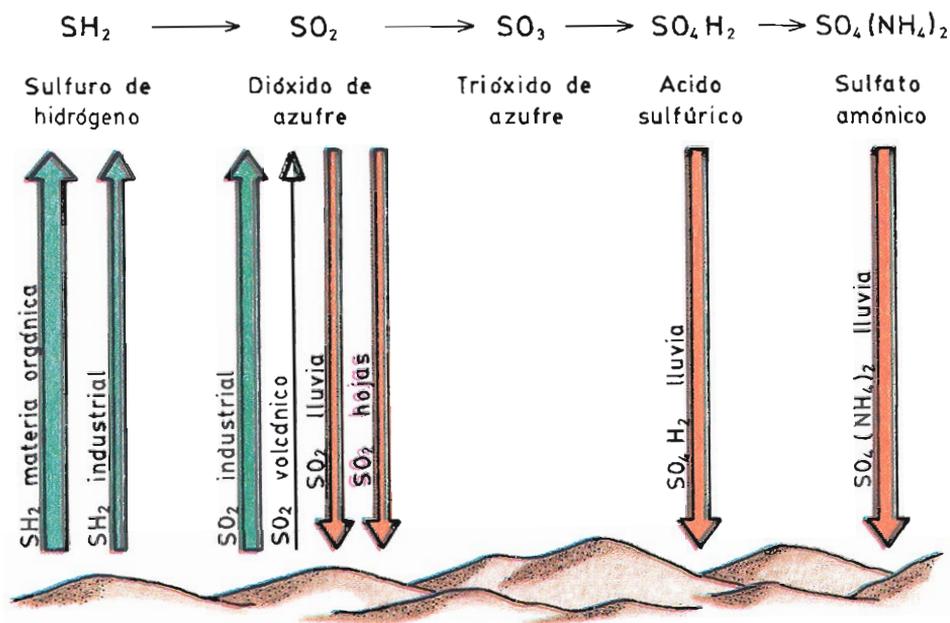


FIG. 7. Origen y destino del dióxido de azufre. El grosor de las flechas viene a indicar de forma muy general la importancia relativa de los procesos.

Los daños causados por el dióxido de azufre a las plantas dependen, como es lógico, de la concentración del gas y del tiempo de exposición. Las lesiones pueden dividirse en agudas y crónicas. Las primeras se producen con concentraciones altas en un tiempo relativamente breve; *se van destacando áreas muertas en las hojas, progresivamente mayores hasta la sequía total*. Las lesiones crónicas aparecen con exposiciones prolongadas a niveles más bajos; *un efecto muy evidente es el amarilleo gradual de las hojas, al bloquearse el proceso de síntesis de la clorofila, lo que lleva a una caída precoz*; en consecuencia, se produce menor asimilación al disminuir la velocidad de fotosíntesis, disminuye la fructificación y, según algunos autores, se produce una resistencia menor a parásitos y agentes abióticos dañinos.

La susceptibilidad de las distintas especies vegetales a los daños causados por el dióxido de azufre es muy variable. De hecho, se han elaborado tablas de sensibilidad que se van completando a medida que los efectos van siendo mejor conocidos.

Por ejemplo, las coníferas, salvo algunas excepciones, son muy sensibles; en las acículas (hojas finas y alargadas) de los pinos aparece un color rojo oscuro a partir de la base, que se extiende con mayor o menor rapidez según la intensidad de la intoxicación. Las hayas también muestran gran sensibilidad, tomando las hojas un color rojizo por el centro que se va extendiendo hacia los bordes, hasta arrugarse y caer. Por último, *recordaremos el caso de los líquenes, muy sensibles incluso a concentraciones mínimas de dióxido de azufre, por lo que son buenos indicadores de este tipo de contaminación, desapareciendo de las cercanías de cualquier foco de origen por pequeño que sea.* Hay que añadir las influencias que pueden tener para una misma especie las condiciones ambientales, como temperatura, humedad, etc., lo que provoca cambios en su sensibilidad.

Por supuesto que las brumas de ácido sulfúrico y la precipitación de éste por el agua de lluvia también ocasiona daños considerables. Pero este aspecto será tratado de manera más amplia al hacer referencia a la denominada *lluvia ácida*.

La mayor parte de los efectos del dióxido de azufre sobre el hombre se relacionan con el sistema respiratorio, si bien, para que sean detectables, se precisan concentraciones superiores a las que causan daños a las plantas. Concentraciones inferiores a 25 ppm afectan a los ojos y a la parte alta del tracto respiratorio (irritación de garganta, tos, etc.), lo cual es lógico si se piensa que el dióxido de azufre, dada su gran solubilidad en el agua, se disuelve en la mucosa húmeda de este tracto superior; de esta forma, sólo pequeñas cantidades penetran en los pulmones. La mucosa bucal no contribuye de forma tan eficiente como la nasal a la eliminación del dióxido de azufre, de aquí que, aparte de los niños que son muy sensibles a las afecciones respiratorias por exposición a largo plazo, son las personas con problemas respiratorios previos (respiración bucal) las más afectadas por este contaminante.

El dióxido de azufre puede penetrar en los pulmones en la forma de sulfatos, al ir unidos a materia particulada (polvo atmosférico) o disueltos en gotitas de agua que llegan hasta los mismos. *El poder irritante de los sulfatos es muy superior al del dióxido de azufre; concentraciones muy bajas son graves para ancianos, asmáticos y personas con distintos problemas respiratorios crónicos;* sin embargo, dado que los sulfatos se suelen formar en capas altas y son precipitados por la lluvia, el peligro respiratorio disminuye en cierta medida. Ahora bien, la tecnología empleada en los automóviles para controlar las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos, se ha comprobado que es capaz de generar sulfatos (la gasolina contiene azufre que tras la combustión pasa a dióxido de azufre). El riesgo debido a

estos sulfatos se ha pensado que podría no compensar los beneficios de las bajas emisiones de los otros contaminantes mencionados, con lo cual se comprueba que *los tecnólogos que basan todos los problemas de contaminación ambiental en «ajustes tecnológicos», pueden caer en una carrera sin fin de ajustes tras ajustes, sin que a veces se llegue a resultados medianamente satisfactorios.*

Las principales influencias del dióxido de azufre sobre los materiales pueden resumirse en que afecta a las capas de pintura, al cuero y al papel (posiblemente previa conversión en ácido sulfúrico) y aumenta la corrosión de la mayoría de los metales, en especial hierro, acero y cinc. Esta corrosión también es extensible al vapor de ácido sulfúrico, que además ataca a una amplia gama de otros materiales empleados en la construcción, en particular si contienen carbonatos, como el mármol y las calizas.

Los carbonatos, al ser atacados, se convierten en sulfatos, que son solubles en agua, de manera que a medida que se disuelven la piedra se debilita, presentando un aspecto picado o escamoso, proceso conocido como «enfermedad de la piedra», de gran importancia en el deterioro de los patrimonios artísticos monumentales.

Los métodos para reducir la contaminación por dióxido de azufre se refieren principalmente a su fuente más importante, que es la combustión del carbón, el carburante fósil que cuenta con mayores reservas y por ello difícil de sustituir. Las soluciones aportadas tienen una doble faceta: hacer mínimo el contenido en azufre del carbón antes de quemarlo y eliminar el dióxido de azufre antes de que pase a la atmósfera. Tanto en un sentido como en otro se están ensayando distintos procedimientos.

7. PARTICULAS

Prescindiendo del agua en estado sólido, en la atmósfera se encuentran materiales sólidos que consisten en partículas inorgánicas, organismos y detritos orgánicos. Nos limitaremos a las partículas inorgánicas, por ser las más propias de la contaminación ambiental.

Se denomina partículas primarias a aquellas que son introducidas en la atmósfera como tales, bien sean de origen natural (la mayoría) o antropogénico. Dichas partículas pueden tener procedencias muy variadas:

a) Al romper las olas, la evaporación de minúsculas gotitas de agua provee a la atmósfera de cloruro sódico impuro; la sal marina es la partícula atmosférica que se presenta en mayor cantidad (más de 1/3 del total, considerando tanto las partículas primarias como las secundarias). Conviene añadir que puesto que la película superficial del agua contiene muchas bacterias, el mismo mecanismo suspende en la atmósfera a numerosos microorganismos.

b) Las áreas erosionadas y los desiertos proveen a la atmósfera de gran cantidad de polvo; en zonas situadas a sotavento (tras una barrera que retiene gran parte de la humedad del aire) de las regiones áridas este fenómeno es muy manifiesto.

c) Las erupciones volcánicas y los incendios forestales son fuentes menores de material sólido, aunque la influencia de la actividad volcánica puede ser grande por el transporte a largas distancias. Así, las partículas depositadas en el centro de los grandes océanos y sobre el hielo de las regiones glaciadas suelen tener este origen.

d) La industria y la combustión de carburantes en fuentes estacionarias introducen en la atmósfera gran cantidad de partículas de distinto tipo, cuya concentración disminuye rápidamente con la altura.

Las partículas primarias vienen a representar un 50 % del total. El otro 50 % está constituido por las partículas secundarias, que se originan por reacciones que ocurren en la atmósfera a partir de materias gaseosas de origen natural, o producto de las actividades humanas; sulfatos, nitratos, sales inorgánicas de amoníaco e hidrocarburos ocupan un lugar destacado.

En conjunto, las partículas primarias y secundarias de origen antropogénico vienen a representar el 11 % de las emisiones globales, si bien la mayoría corresponde a las secundarias.

En las partículas atmosféricas cabe considerar su composición química, su tamaño y su concentración. *La composición química* es sumamente variable, dependiendo del origen; prácticamente cualquier elemento o compuesto inorgánico, así como muchas sustancias orgánicas, pueden hallarse en volúmenes grandes de aire utilizando medios analíticos lo suficientemente sensibles. *El tamaño* también oscila entre límites amplios, pudiendo estar comprendido entre 0,0002 μ (micras; milésima parte del milímetro) y 5.000 μ ; el tamaño depende en parte de la fuente emisora, pero en la atmósfera se pueden formar agregados mayores por coagulación en el caso de partículas pequeñas; las partículas mayores de 10 μ permanecen poco tiempo en el aire, ya que tienden a sedimentarse por acción de la gravedad; como consecuencia de la coagulación y de la sedimentación, el tamaño de partículas que predomina en la atmósfera está comprendido entre 0,1 y 10 μ . *La concentración* de partículas en el aire es muy variable, dependiendo de la localización; a modo de ejemplo, pueden considerarse los siguientes datos, expresados en número de partículas por cm^3 de aire:

Gran ciudad	150.000
Ciudad pequeña	35.000
Campo cultivado	10.000
Colinas (hasta 1.000 m)	6.000
Alta montaña (más de 2.000 m)	1.000
Alta mar	1.000

El destino final de las partículas es su deposición en la superficie terrestre, bien sea en seco o por medio de la precipitación húmeda. A la deposición húmeda corresponde el 80 % de la eliminación de partículas atmosféricas, y puede ser originada por las nubes (las partículas actúan como núcleos de condensación del agua o de formación de hielo) o por la lluvia o la nieve que, en su caída, transporta partículas hasta el suelo.

Se sabe poco del efecto conjunto de las partículas que se depositan sobre la vegetación. La mayoría de los estudios realizados han sido específicos sobre un determinado tipo de partícula. En general, los efectos mecánicos parecen incidir sobre la obturación de los estomas y la formación de costras más o menos persistentes. De esta manera, *quedan interferidas la fotosíntesis y la respiración, con lo que se inhibe el crecimiento*. La nocividad de los compuestos químicos no ha sido bien dilucidada, aunque se piensa que pueden tener efectos tanto para las plantas como para los animales que las comen.

Las partículas afectan al hombre a través del sistema respiratorio. La capacidad de penetración es función de su tamaño; las más grandes (superiores a 5 μ) quedan retenidas por los pelos del conducto nasal, la mucosa nasal y la tráquea; con menor tamaño (0,5 a 5 μ) penetran en los pulmones, pero sin llegar a los alvéolos pulmonares; al quedar en bronquios y bronquiolos pueden eliminarse por el movimiento de los cilios (estructuras en forma de pelos que cubren sus paredes) que las empujan hacia la faringe, siendo deglutidas o saliendo al exterior por expectoración; a tamaños más reducidos (menos de 0,5 μ) penetran en los alvéolos, donde llegan a permanecer incluso durante años; a esta última categoría pertenece el humo del tabaco, del petróleo, escapes de coches, etc. (ver en la figura 8 la anatomía elemental del sistema respiratorio humano).

Por otra parte, las partículas pueden ser tóxicas, aunque su concentración en el aire suele ser baja. El peligro de un eventual aumento de partículas tóxicas ha llevado a que se experimente con animales el efecto del níquel, berilio, cadmio, estaño, antimonio, bismuto, plomo y mercurio; los efectos consisten en retrasos en el crecimiento, disminución del tiempo de vida, desórdenes en el comportamiento, tumores carcinógenos y principios de enfermedades crónicas (cardiovasculares, cerebrales, hepáticas, etc.), según el elemento de que se trate.

La disminución de la visibilidad por dispersión de la luz o por la formación de neblinas de smog, al condensar el agua, también puede considerarse como un efecto peligroso en determinadas circunstancias.

Los daños sobre los materiales, aparte de los pasivos que condicionan limpiezas frecuentes, se centran en el efecto químico cuando las partículas son corrosivas, o cuando por adsorción o absorción transportan sustancias corrosivas. Las partículas aceleran la corrosión de metales, sobre todo en medios húmedos, ya que actúan como núcleos que condensan la humedad. Las pinturas, tanto antes como después del secado, y las fibras textiles también se ven influenciadas.

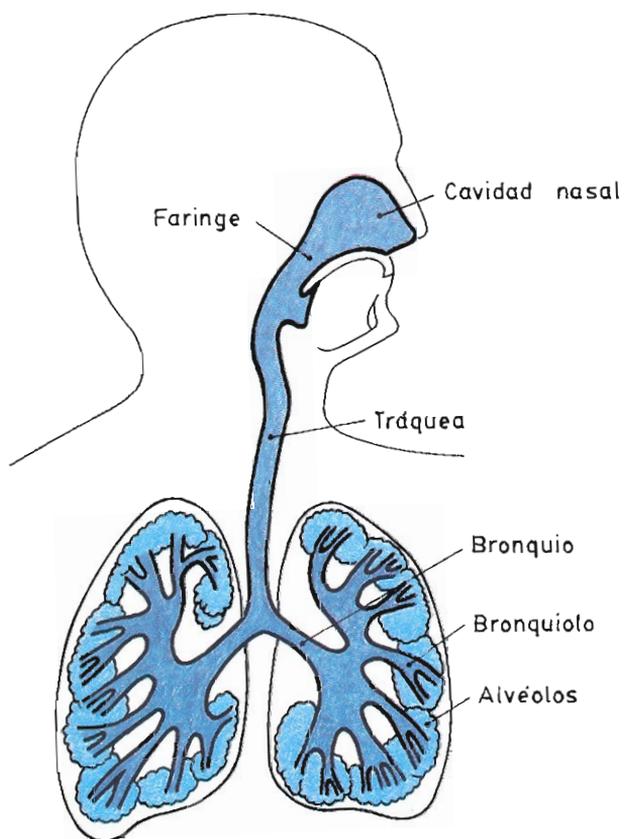


FIG. 8. Sistema respiratorio humano. Se indican, de forma muy elemental, las partes a las que se hace referencia en la contaminación por partículas.

Las técnicas para el control de partículas se basan en su captura antes de que entren en la atmósfera, empleándose distintos procedimientos en la actualidad, con grados variables de sofisticación.

8. LAS INVERSIONES DE TEMPERATURA

Como se ha indicado en el primer apartado, en la troposfera, la capa de la atmósfera más inmediata a la superficie terrestre y por tanto la que nos afecta más directamente, se produce un descenso de la temperatura, a medida que se gana en altura, cifrado en $6,5^{\circ}\text{C}$ cada kilómetro. Este hecho se debe a que la atmósfera próxima se calienta sobre todo desde abajo por contacto con el suelo (el cual a su vez es calentado por el Sol), de manera que el calor se disipa con el aumento de altitud.

Ahora bien, *las condiciones reales no siempre coinciden con las teóricas. Por ejemplo, el enfriamiento puede producirse con mayor rapidex que la descrita*; la situación es fácil de observar contemplando el humo de las chimeneas que, en este caso, al estar mucho más caliente que el aire ambiental tiende a subir, ayudando a que los contaminantes se diluyan. *Otro caso posible es que el enfriamiento con la altura se produzca de forma más lenta*; los penachos de humo de las chimeneas adquieren una posición horizontal, tardando mucho más tiempo en disiparse. *Una tercera posibilidad, representada como las anteriores en la figura 9, es que la temperatura descienda en principio, a continuación se produzca un ascenso y posteriormente vuelva a descender.* La capa más caliente interpuesta se denomina «capa de inversión térmica» y puede provocar graves problemas de contaminación, porque los contaminantes se acumulan por debajo de ella sin llegar a disiparse; muchos casos graves de contaminación severa, con efectos nocivos para la salud, se producen como consecuencia de la formación de estas capas de inversión. Como se indica en la figura 9, las chimeneas más altas (recordemos que la mayor del mundo, con 380 m. está situada en Ontario, Canadá) pueden lanzar humo por encima de la capa de inversión, pero los contaminantes liberados por debajo quedan atrapados.

El porqué de este hecho es fácil de comprender. La capa de inversión supone la existencia de aire caliente y ligero que se estable-

ce sobre aire más frío y denso. Un contaminante que se libera próximo al suelo tenderá a subir mientras que la temperatura del ambiente vaya disminuyendo; a medida que asciende el aire contaminado sufrirá un cierto enfriamiento y aumento de la densidad, de manera que al llegar a la capa de inversión, más cálida y ligera, no puede sobrepasarla.

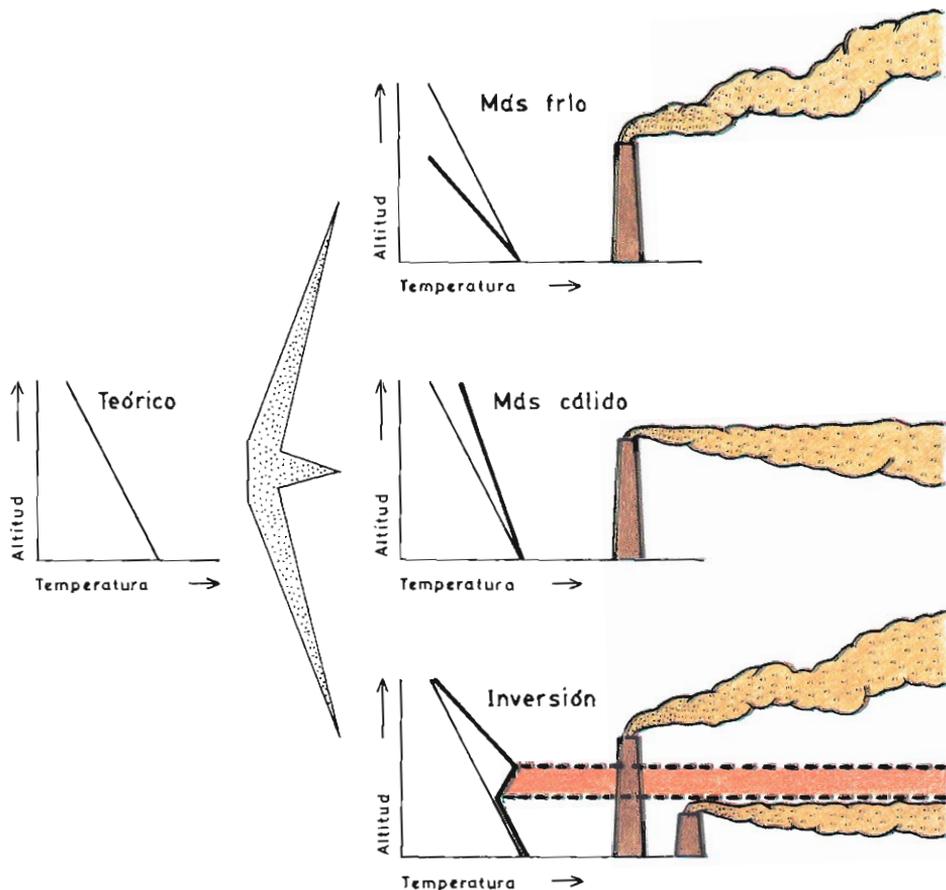


FIG. 9. Modelo teórico del descenso de la temperatura con la altitud y tres posibles modificaciones que influyen en la facilidad o dificultad de dispersión de los contaminantes. Los penachos ascendentes de las chimeneas indican pronta dispersión, y los horizontales retención de los contaminantes.

En las ciudades, el mayor número de contaminantes tiende a emitirse en su núcleo, de manera que por él asciende el aire contaminado hasta al-

canzar la capa de inversión; dicho aire, que durante su ascenso se ha enfriado volviéndose más pesado, desciende por la periferia, estableciéndose células de convección en forma de cúpula que se cargan progresivamente de impurezas (fig. 10) y que obligan a tomar medidas preventivas como el funcionamiento mínimo de los sistemas calefactores por combustión.

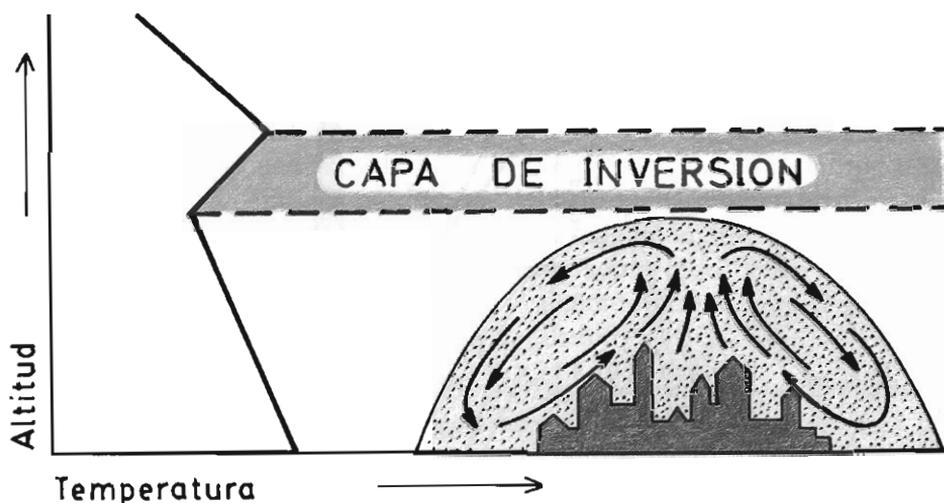


FIG. 10. Capa de inversión térmica y formación de una cúpula de contaminación sobre una gran ciudad. Las flechas indican el movimiento de las corrientes de convección.

La formación de la capa de inversión empezaría una o dos horas antes del ocaso en un día soleado; en este momento el suelo ya ha empezado a perder calor y el aire de sus cercanías se enfría. La situación se prolonga durante toda la noche hasta alcanzar su mayor intensidad antes del amanecer. La nueva salida del Sol provoca el calentamiento del suelo y, en consecuencia, la del aire en contacto con él; el ascenso de este aire caliente puede originar una mezcla turbulenta que llega a romper la inversión. Sin embargo, si como se ha comentado el aire se enfría demasiado en su ascenso, el estado puede prolongarse varios días, hasta que el viento o la lluvia acaban destruyendo la capa de inversión de temperaturas; por tanto, la frecuencia de los vientos y velocidad de los mismos, en unión con las irregularidades del terreno, son factores que inciden de forma decisiva en su aparición y desaparición.

Hay un problema que viene a añadirse a la formación de capas de inversión. *Dicha capa es normalmente, aparte de cálida, seca y sin nubes, por lo que el paso de la radiación solar permite que se produzcan reacciones fotoquímicas con los contaminantes atrapados, formándose grandes cantidades de smog.* De esta forma, las neblinas contaminantes es frecuente que aparezcan asociadas a la contaminación atmosférica acentuada por las inversiones.

9. LA PANTALLA DE OZONO: IMPORTANCIA Y PELIGRO DE SU DISMINUCION*

La radiación electromagnética que nos llega del Sol se caracteriza por una gama amplísima de longitudes de onda (Fig. 11). *Cuanto menor sea esta longitud de onda mayor es la energía asociada, y de aquí el peligro que entrañan para la vida las radiaciones de onda corta.* Las radiaciones γ y X son las de menor longitud de onda, pero su absorción en la ionosfera impide que lleguen a afectar a los organismos. A continuación, y en un orden ascendente de longitudes de onda, se encuentran la radiación ultravioleta, la luminosa (luz visible) y la infrarroja (calor).

La radiación ultravioleta lleva asociada mucha energía y altera cualquier organización molecular; la radiación luminosa lleva la energía necesaria para que pueda ser captada con eficacia, con precisión, en una estructura molecular viva (fotosíntesis, visión, etc.); la radiación infrarroja lleva poca energía asociada y su efecto es acelerar reacciones o aumentar la movilidad molecular de una forma general y vaga.

En dosis moderadas y con tiempos de exposición cortos, la radiación ultravioleta resulta beneficiosa para determinados organismos. Estos efectos favorables ya fueron puestos de manifiesto por Finsen, a finales del siglo XIX, cuando hizo un uso espectacular de su acción bactericida curando y poniendo freno a un número de casos de «lupus vulgaris», una tuberculosis de la piel que era común en aquel tiempo en la Europa septentrional. Surgió una tradición, ayudada sin duda por el aspecto saludable de una persona bronceada, de que se trataba de una radiación beneficiosa para la salud. Esta tradición fue alentada por el descubrimiento hacia 1920 de que la vitamina D, «la vitamina de la luz del Sol», se forma cuando sus precursores

* Ver Addenda.

se exponen al ultravioleta. Por tanto, en lo que se refiere al hombre, el aspecto positivo de la radiación ultravioleta se centra en que mata los gérmenes, evita el raquitismo e imparte una apariencia de vigor.

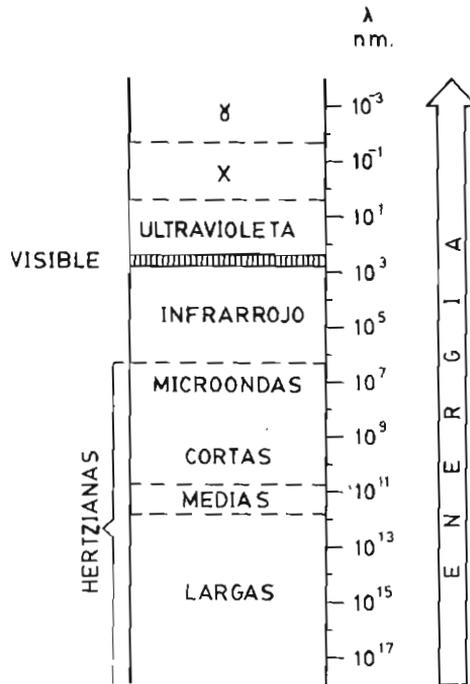


FIG. 11. Espectro de radiación electromagnética, caracterizado por la longitud de onda. A menor longitud de onda mayor es la energía asociada.

El aspecto negativo comenzó a conocerse (también hacia 1920) cuando se observó que los ratones desarrollaban cánceres de piel después de una exposición al ultravioleta, a condición de que haya sido aplicada a la piel una sustancia (alquitrán, cloroformo, etc.) que lo absorba. Hoy día conocemos que la radiación ultravioleta causa mutaciones de los genes, aberraciones de los cromosomas y carcinogénesis.

Desde el punto de vista ecológico y biológico en general, los efectos de la radiación ultravioleta son función de la importancia de las moléculas afectadas. Aquellas moléculas que están menos repetidas y que tienen una especial misión organizadora (como el ácido desoxirribonucleico) son decisivas para evaluar los efectos de la radiación. En los organismos pequeños (bacterias) estas moléculas son más asequibles y más sensibles que en los organismos mayores, donde existe una pantalla absorbente formada por otros

materiales orgánicos reconstruibles o menos esenciales. Podemos concluir que la acción de la radiación ultravioleta es principalmente mutagénica y bactericida.

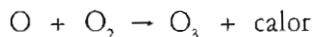
Afortunadamente, en la actualidad la radiación ultravioleta que llega a la superficie de la Tierra es comparativamente muy pequeña respecto a la que entra en la atmósfera superior (menos del 10 %), gracias a la denominada pantalla de ozono. Sin embargo, en la prehistoria de la vida, cuando dicha pantalla no existía dado que la atmósfera era reductora (sin oxígeno), la radiación ultravioleta no filtrada pudo tener importancia induciendo la formación de muchas moléculas variadas. Lo curioso es que cuando la vida comenzó a organizarse, la misma radiación ultravioleta que influyó en inducirla resultaba perjudicial por sus efectos para esa organización. Por ello es probable que, antes del desarrollo de la fotosíntesis productora de oxígeno, la vida quedara confinada a aguas más o menos profundas, donde estaba protegida de la radiación.

El desarrollo de los organismos fotosintetizadores hizo que la vida pudiera invadir plenamente la superficie de los continentes, al dar lugar la producción de oxígeno (O_2) a que se formara la pantalla de ozono (O_3). La manera en que actúa dicha pantalla se puede explicar fácilmente gracias a una serie de reacciones fotoquímicas.

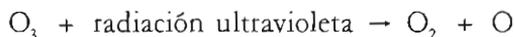
En una primera fase, la radiación que incide sobre una molécula de oxígeno la desintegra en dos átomos de oxígeno, de manera que la radiación queda absorbida, transformándose en energía química:



El oxígeno atómico reacciona muy fácilmente, combinándose con el molecular para formar ozono. En esta reacción se libera energía, pero es particularmente energía calorífica:



Por supuesto, el ozono no está constantemente en aumento, sino que se desintegra absorbiendo de nuevo radiación ultravioleta de longitud de onda ligeramente superior a la absorbida por el oxígeno:



De manera que *la radiación ultravioleta queda eliminada tanto por la formación como por la destrucción del ozono.* Existe, con todo, otra forma de suprimir el ozono, que tiene lugar en la atmósfera superior de forma

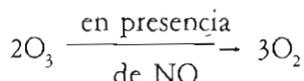
natural y en la que no interviene la radiación ultravioleta. Dicha forma corresponde a la reacción:



La consecuencia obvia es que gracias a la pantalla de ozono la superficie de la Tierra está defendida de la radiación de onda corta de origen exterior, ya que en la propia Tierra existen otras fuentes de radiación de onda corta, que son las sustancias radioactivas, cuya importancia ha aumentado mucho recientemente por acción del hombre.

Hacia la década de los sesenta se empezó a pensar en la posibilidad de una preocupante disminución de la capa de ozono debido a la presencia de óxidos de nitrógeno en la alta atmósfera. Aún hoy día no se cuenta con respuestas definitivas, porque los procesos que tienen lugar a altitudes tan elevadas son complejos y de difícil estudio, de manera que son más frecuentes las especulaciones que los datos veraces.

De todas formas, el tratado de 1963 entre los Estados Unidos y la Unión Soviética *prohibiendo las pruebas nucleares atmosféricas supuso una considerable disminución del riesgo*. Las altas temperaturas generadas por dichas pruebas harían reaccionar oxígeno y nitrógeno para dar grandes cantidades de óxidos de nitrógeno. La reacción subsiguiente, en lo que se refiere a la capa de ozono, puede expresarse en su modalidad simplificada como:



Pero otros hechos más cotidianos pueden tener efectos análogos. Así, *los motores de los aviones a reacción producen óxidos de nitrógeno*. Esto no es un peligro si nos limitamos a los reactores convencionales, que vuelan a altitudes relativamente bajas. Pero los reactores supersónicos lo hacen en la estratosfera (18-24 Km. de altitud), de manera que los óxidos de nitrógeno se liberan directamente en ella. Los programas Concorde (franco-británico) y TU-144 (ruso) pueden ser el inicio de un peligro, al menos potencial, si se incrementa el número de vuelos supersónicos sin tomar medidas para desarrollar motores y carburantes de baja emisión en óxidos de nitrógeno (Fig. 12).

En los últimos años (a partir de 1974) ha aumentado la preocupación acerca de la existencia de *otros productos contaminantes que podrían estar*

ocasionando el deterioro de la capa de ozono. Son de particular interés los clorofluorometanos o halometanos (denominados freones comercialmente), entre los que pueden citarse como más comunes el CFCl_3 y el CF_2Cl_2 . El CFCl_3 es un impelente de las latas de aerosoles, y por tanto pasa a la atmósfera cuando estos son utilizados; el CF_2Cl_2 es un refrigerante, que también puede pasar a la atmósfera cuando se deterioran las máquinas en que es empleado, como ocurre con los refrigeradores domésticos.

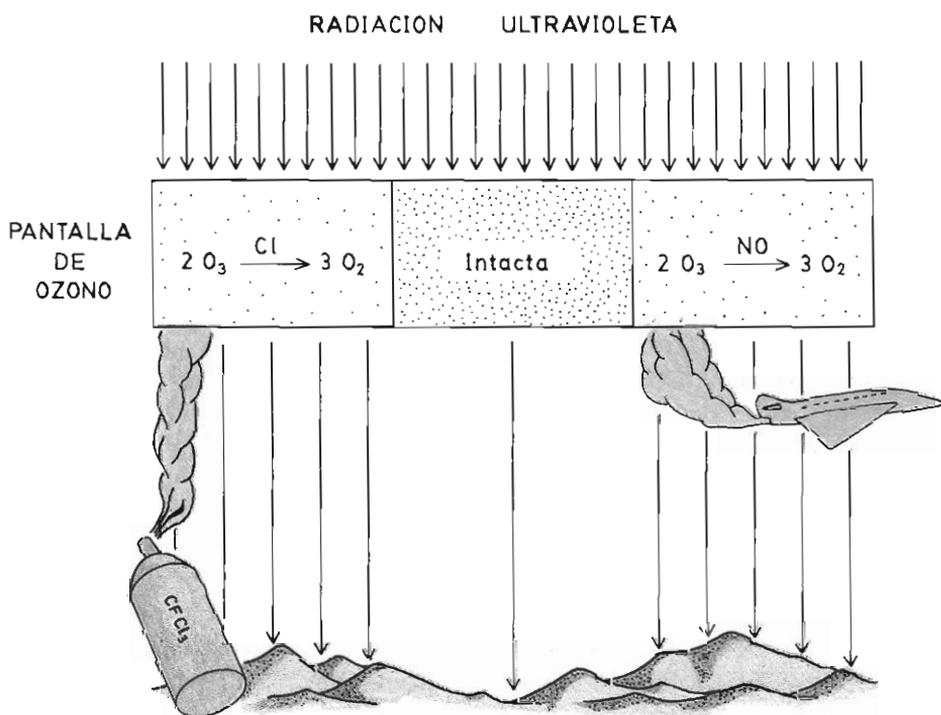
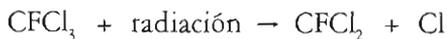
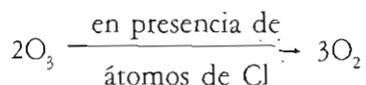


FIG. 12. Posibilidades de disminución de la pantalla protectora de ozono. Se indica el efecto de los freones y de los escapes de los reactores supersónicos.

Ambos son inertes, y por consiguiente inocuos, en la atmósfera inferior, y de aquí el uso generalizado que se ha hecho de ellos. Sin embargo, cuando el gas alcanza la capa de ozono en la atmósfera superior, se producen una serie de reacciones, que para el CFCl_3 son las siguientes:



Este primer fraccionamiento da lugar a cloro atómico (Cl), el cual es un potente catalizador (su eficacia es seis veces superior a la del NO) de la transformación del ozono en oxígeno:



La eliminación del ozono por este procedimiento (Fig. 12) u otros similares, permitiría que grandes cantidades de radiación ultravioleta llegaran a la superficie terrestre, constituyendo una amenaza para la vida. Parecen existir pruebas de que el nivel de ozono comienza a disminuir, y cálculos efectuados en 1975 indicaban que de seguir la tendencia en 50 años el ozono podría bajar en un 20 %. No obstante, hace falta proseguir las investigaciones para evaluar la gravedad de la presencia de clorofluorometanos en la alta atmósfera.

10. LA LLUVIA ACIDA

Hace unos veinte años comenzó en la Península Escandinava un fenómeno hasta entonces desconocido, que se hizo notar preferentemente en la desaparición de la vida de los lagos y en la destrucción de los bosques. En la actualidad, ya conocemos de qué se trata, habiéndosele dado un nombre que está adquiriendo paulatinamente una fama cada vez más temible: la «lluvia ácida».

Como se ha indicado en apartados anteriores, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y de azufre (SO_x) son eliminados de la atmósfera principalmente como ácido nítrico (NO_3H) y sulfúrico (SO_4H_2).

Si bien los óxidos mencionados quedan más o menos restringidos a las áreas cercanas a los focos de emisión, los ácidos a que dan lugar, formando parte de las nubes, pueden ser transportados por el viento a cientos e incluso miles de kilómetros de distancia, hasta depositarse finalmente por la lluvia o la nieve, de manera que los compuestos que caen al suelo desde la atmósfera son mucho más peligrosos que los que llegan a ella (Fig. 13).

Por ejemplo, gran parte de las emisiones contaminantes del Reino Unido van a parar a los países escandinavos, y las de algunos estados norteamericanos (Indiana, Ohio, Illinois) desembocan en los lagos y bosques canadienses.

Por supuesto, aquí reside la causa principal de la acidificación creciente de la lluvia, si bien la lluvia siempre es ligeramente ácida, como indica su pH medio de aproximadamente 5,7 (el pH de 7 supone neutralidad; a medida que esta cifra desciende la acidez se intensifica). Esta acidez de fondo se debe a que el dióxido de carbono (CO_2) disuelto en el agua reacciona formando un ácido débil, el ácido carbónico (CO_3H_2), y al proceso natural

de liberación de óxidos de nitrógeno y azufre; pero el fenómeno se ha visto muy aumentado por la emisión antropogénica diaria de toneladas de compuestos de nitrógeno y azufre y su posterior transformación en ácidos fuertes; ocasionalmente se han llegado a registrar lluvias extremadamente ácidas, con pH inferior a 2.

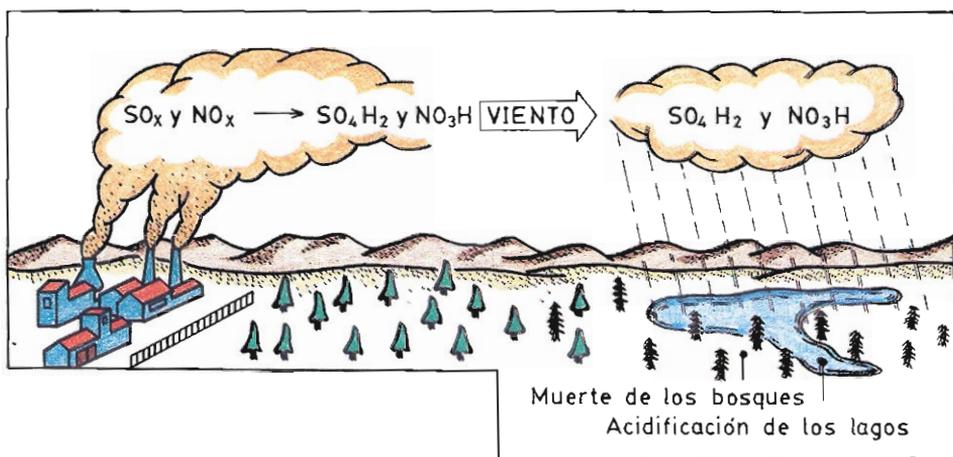


FIG. 13. Formación, deposición y efectos de la lluvia ácida.

El aumento de acidez de la lluvia no parece representar una seria amenaza para la salud del hombre. Pero en términos de los perjuicios causados a estructuras y equipos (corrosión) y, sobre todo, en lo que se refiere a los sistemas ecológicos, las implicaciones son enormes.

En cuanto a *los suelos y a las aguas dulces*, hay que apuntar que las precipitaciones ácidas presentan un efecto mayor si los suelos proceden predominantemente de rocas pobres en calcio, como ocurre en los territorios escandinavos, ya que entonces carecen de la capacidad suficiente para neutralizar la acidez. Las aguas ácidas, bien sea directamente o por escorrentía, concurren hacia ríos y lagos, sufriendo perturbaciones el equilibrio hidrológico; así, peces como el salmón no pueden vivir a un pH inferior a 5,5 y el pH por debajo de 4,0 restringe en gran manera las posibilidades de vida orgánica. Además, en las aguas acidificadas el contenido de aluminio, elemento tóxico para muchos organismos, se eleva, mientras que otros metales

como cadmio, cinc y plomo se hacen más solubles y por tanto más accesibles para plantas y animales. El aluminio en particular tiene otros efectos; por su causa, muchos peces que llegan a salvarse de la lluvia ácida acaban por morir de hambre; esto es debido a que los fosfatos indispensables para el crecimiento del fitoplancton (plancton vegetal), que constituye el inicio de las cadenas alimentarias, quedan fijados al aluminio y pierden toda su capacidad nutritiva.

En los lagos muy acidificados el agua es clara y límpida, casi translúcida, dando una falsa sensación de vitalidad. *Los períodos de lluvias son por supuesto los más críticos para la vida piscícola, pero también la fusión de la nieve ocasiona que grandes cantidades de ácidos se incorporen a ríos y lagos en un tiempo muy corto.* Se calcula que 18.000 de los 85.000 lagos de Suecia están acidulados y 2.500 totalmente muertos. En Noruega, de los 5.000 lagos que se encuentran al sur del país, unos 1.750 carecen prácticamente de flora y fauna.

También se encuentran *efectos acusados en la vegetación superior*, siendo muy patentes los daños sufridos por los árboles. La lluvia ácida puede influir en ellos directamente por corrosión del follaje, al ser atacada la cutícula de las hojas, iniciándose así un proceso irreversible de deterioro. Asimismo, causa alteraciones a través de la acidificación del suelo, ya que en este caso se produce una pérdida de nutrientes, a la vez que aumentan los niveles de metales tóxicos. Si el peligro evidente para los lagos comenzó a detectarse en la Península Escandinava, fue en la Selva Negra alemana donde empezó a apreciarse la decoloración de los árboles, cuyas hojas, cada vez más amarillentas y frágiles, terminaban por morir; en 1982 un 8 % de los bosques estaban afectados y en 1983 la cifra se había elevado a un 30 %.

Los lagos y bosques canadienses y los bosques estadounidenses de los Apalaches son otros ejemplos posteriores. Pero el efecto ha comenzado a manifestarse en otros muchos países, como Polonia, Checoslovaquia, Suiza y Francia. En España, el problema no es aún muy grave, pero los carbones con alto contenido de azufre que se extraen en proporciones cada vez mayores en el sur de Francia no hacen esperar un futuro prometedor.

Las soluciones pueden ser preventivas y curativas. En la reunión de Ginebra de 1979, con asistencia de la mayoría de países europeos junto con Canadá y los Estados Unidos, se llegó al compromiso de reducir drásticamente (al menos en un 30 %) las emisiones de óxidos de nitrógeno y azufre para paliar el problema, pero en 1983 prácticamente no se había avanzado nada. Los acuerdos de la Comunidad Económica Europea parecen

condenados a los mismos resultados. Mientras, los países se enzarzan en áridas quejas diplomáticas. A las de los países escandinavos contra el Reino Unido y a las del Canadá contra los Estados Unidos, se unen las de Alemania contra Francia y, en un curioso viraje, las de Suiza y Polonia contra Alemania.

Una de las soluciones curativas, aunque no sea más que parcial y temporal, consiste en verter cal sobre ríos y lagos. La eficacia de los proyectos de este tipo ya iniciados y sus repercusiones económicas están por ver. Algunos investigadores se muestran muy escépticos en este sentido, dado que las cantidades de productos básicos a emplear serían ingentes y habría que renovarlas con frecuencia, llegando a comparar el proceso con el hecho de tomar una aspirina para curar el cáncer.

Añadiremos por último una circunstancia notable que indica las grandes implicaciones que existen entre distintos contaminantes. Los precipitadores electrostáticos (que atraen partículas) que se colocan en las chimeneas de algunas industrias para reducir la emisión de partículas, pueden resultar contraproducentes para la lluvia ácida. En efecto, al reducirse la cantidad de ceniza emitida, que es alcalina, aumenta la nocividad de la precipitación ácida.

11. EL DIOXIDO DE CARBONO Y EL EFECTO DE INVERNADERO

El dióxido de carbono (CO_2) no se considera comúnmente como un contaminante atmosférico, ya que forma parte natural del aire. Al ser fijado por las plantas mediante el proceso de la fotosíntesis y liberado por la respiración de plantas, animales y microorganismos, experimenta fluctuaciones tanto diarias (su cantidad es mayor por la noche, ya que la luz es fundamental para la fotosíntesis) como estacionales (disminuye en las estaciones de mayor producción de la vegetación). También hay otros fenómenos naturales que pueden provocar variaciones en la concentración de dióxido de carbono; por ejemplo, dicha concentración suele ser más elevada después de la lluvia, por incrementarse la respiración de los organismos del suelo. En el mismo suelo se miden frecuentemente concentraciones de 0,5 % y, localmente, mucho más altas; valores de 3-4 % tienen efecto inhibitorio sobre diversos organismos, incluyendo los hongos entre ellos, lo que es de interés dada su gran importancia como descomponedores de la materia orgánica muerta.

Los excesos de dióxido de carbono en la atmósfera, a largo plazo, pueden ser compensados por los océanos. *Pero el hombre, mediante la quema de combustibles fósiles, la quema de madera, las prácticas agrícolas (que aumentan la velocidad de descomposición del humus), las conversiones de caliza en cemento, y otras actividades, está inyectando dióxido de carbono en la atmósfera a un ritmo que no puede ser amortiguado por su paso y almacenamiento en el mar bajo la forma de carbonatos, ni por el aumento de la capacidad fotosintética de las plantas.* Así, durante el siglo XIX su concentración era de unas 290 ppm, mientras que en la actualidad se centra en unas 325 ppm. La cifra correspondiente al siglo pasado no es muy fiable, pero de lo que sí existe certeza es de que el incremento se produce; las mediciones muy precisas realizadas en el observatorio de Mauna Loa (islas Hawai) a partir de 1958 así lo demuestran.

Como complemento a este aumento, *el dióxido de carbono presenta una propiedad interesante que comparte con el agua, y es que tiene una absorción muy intensa para la radiación infrarroja (calor)*. De esta forma, la mayor parte de longitudes de onda que procedentes del Sol alcanzan la superficie de la Tierra, pertenecen a la luz visible, ya que la radiación ultravioleta queda muy disminuida en la pantalla de ozono y la infrarroja es en gran medida absorbida por el vapor de agua y el dióxido de carbono atmosféricos.

Parte de la luz visible que llega a la superficie terrestre es reflejada, pero una proporción mayor es absorbida y posteriormente vuelve a emitirse en forma de radiación infrarroja (calor), que es retenida por el dióxido de carbono y el vapor de agua. De esta manera, el dióxido de carbono se comporta como un filtro selectivo, dejando que pase la luz visible pero impidiendo que la radiación infrarroja, de mayor longitud de onda, se desplace en sentido opuesto; de igual manera actúa el vapor de agua, pero su efecto aquí es de menor interés al no estar sus cantidades apreciablemente afectadas por las actividades humanas.

El resultado es que como consecuencia del aumento de dióxido de carbono de origen antropogénico se produciría un incremento de la temperatura de la Tierra, al retenerse más calor de lo que sucede en condiciones naturales (fig. 14). A este efecto se le ha denominado «efecto de invernadero», porque en un tiempo se creyó que las altas temperaturas del interior de los invernaderos se debían a que el vidrio actuaba como un filtro de un solo sentido respecto a la radiación, dejando pasar la luz y reteniendo el calor (hoy se sabe que influyen más otros factores, como la falta de transporte de calor debida a la inmovilidad del aire).

Los cálculos realizados llevan a suponer que una duplicación del dióxido de carbono en la atmósfera aumentaría la temperatura entre 0,8 y 2,9°C, situación en la que se llegaría a fundir el hielo de los casquetes polares y de los glaciares; el nivel del mar podría subir unos 70 m., sumergiendo grandes superficies costeras.

Se conoce que en el período comprendido entre 1885 y 1940 la temperatura media mundial aumentó 0,6°C. Pero, sin embargo, desde 1940 hasta la actualidad ha disminuido unos 0,2°C. Este descenso indudablemente no está de acuerdo con lo esperado, habiéndose propuesto una serie de explicaciones alternativas:

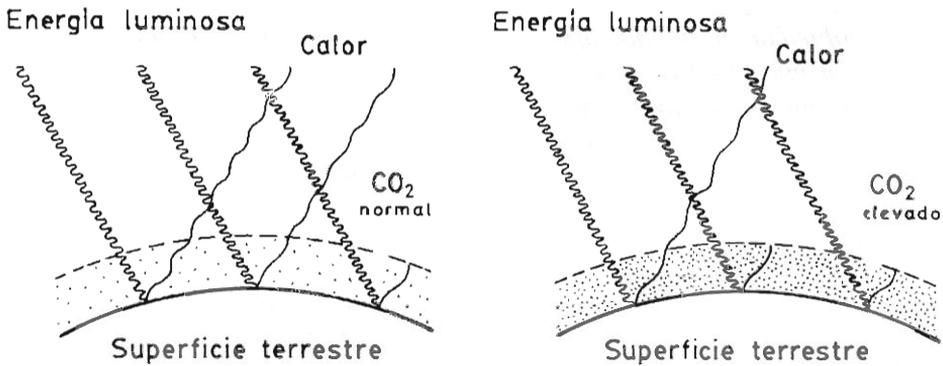


FIG. 14. El efecto de invernadero como consecuencia del incremento del dióxido de carbono en la atmósfera. El aumento de temperatura subsiguiente es hoy día una cuestión de constatación polémica.

a) El aumento inicial de la temperatura podría haber incrementado la evaporación, y con ello la nubosidad. La mayor densidad de nubes contribuiría a que menor cantidad de radiación visible alcanzara la superficie terrestre, produciéndose un enfriamiento posterior.

b) La emisión antropogénica de partículas a la atmósfera disminuiría igualmente la radiación solar. La reflexión de la radiación por las partículas puede compensar e incluso superar el efecto ocasionado por el aumento de dióxido de carbono.

c) Existen variaciones climáticas de tipo natural que se superponen a los posibles efectos, pudiendo potenciarlos, mitigarlos o anularlos.

En definitiva, no existe aún ninguna prueba directa que relacione de manera incuestionable los incrementos en la concentración de dióxido de carbono con los cambios climáticos. Esto no significa que se descarte el peligro de que nos encontramos ante un «experimento» realizado a escala global, en el que todos estamos implicados, pero no cabe duda de que hasta ahora nos estamos moviendo en un terreno conjetural y polémico.

ADDENDA

Durante el tiempo transcurrido desde que el original fue entregado hasta su paso por la imprenta, las investigaciones científicas han ido desvelando hechos poco claros y precisando peculiaridades que se recogen en el texto que antecede. Los cambios en la legislación y una tecnología cada vez más avanzada pueden dejar anticuadas en pocos años las estadísticas actuales, sustituyéndolas por otras futuras que esperamos sean más favorables. A las dudas obvias sobre lo que está por ocurrir, se une la falta de coincidencia en la interpretación de los nuevos logros, por lo que no pretendemos efectuar matizaciones sobre aspectos que tal vez sean desechados o que precisen de información adicional para ser admitidos, aunque sólo sea provisionalmente, dentro de lo que pomposamente se suele denominar «cuerpo de doctrina».

No obstante, sí queremos apuntar algo sobre un fenómeno que ha llamado poderosamente la atención a través de las revistas científicas, de divulgación e incluso de la prensa diaria. Se refiere a la *capa de ozono*, y si bien adolece de los defectos a los que se acaba de aludir, el impacto causado puede hacer disculpable la excepción.

Todo empezó a finales de julio de 1986, cuando el investigador de la NASA D. F. Heath presentó una ponencia en el último congreso celebrado por la Organización Meteorológica Mundial. Dicha ponencia, que fue preciso repetirla hasta tres veces dado el interés creciente que iba despertando, aludía a una disminución muy fuerte de la capa de ozono en la Antártida, cerca del Polo Sur, que progresa de año en año. En realidad, estas disminuciones han sido constatadas repetidas veces desde la década de los 50, aunque no se les había dado importancia, porque las variaciones atmosféricas son continuas y dependientes de muchos agentes. Además, los cambios se han evaluado tradicionalmente desde la Tierra por medio del espectrofotómetro de Dobson, aparato de concepción sencilla, pero cuyos datos son difíciles y engorrosos de interpretar. Hasta tal punto existía desconfianza en las medidas realizadas que incluso el satélite Nimbus 7, que desde 1978 proporciona un cuarto de millón de mediciones diarias de ozono, estaba programado para que no transmitiese datos anormalmente bajos, por entenderse de antemano que no eran reales.

En 1985, tras detectarse gran número de anomalías en la Antártida por el sistema Dobson, el Nímbus 7 fue reprogramado, confirmando la existencia de lo que se ha dado en llamar el «agujero» de la Antártida. Aún más, el mismo profesor Heath anunciaba en otoño de 1986 un nuevo «agujero», menor que el anterior, pero situado en el Artico.

Las posibles causas se han interpretado en coincidencia con lo comentado en páginas anteriores, pero de hecho aún no se sabe si se trata de un fenómeno nuevo o del descubrimiento de algo que está ocurriendo desde hace muchos años, ligado a la dinámica atmosférica. Pero el agente causal puede ser algo en lo que todavía no se ha pensado, y entonces no podría aludirse a los freones, a las perturbaciones que afectan a la estratosfera (incluidas las erupciones volcánicas), o a la circulación atmosférica. De momento se investiga sin que existan pruebas en ningún sentido, pero como ha indicado C. Farmer, científico también de la NASA, «pudiera ser que la Naturaleza nos estuviese haciendo una suave advertencia».

INDICE

INTRODUCCION	9
1. ESTRUCTURA Y COMPOSICION GENERAL DE LA ATMOSFERA	12
2. AIRE NATURAL Y AIRE CONTAMINADO	16
3. EL MONOXIDO DE CARBONO	21
4. OXIDOS DE NITROGENO	26
5. HIDROCARBUROS	30
6. OXIDOS DE AZUFRE	34
7. PARTICULAS	38
8. LAS INVERSIONES DE TEMPERATURA	42
9. LA PANTALLA DE OZONO: IMPORTANCIA Y PELIGRO DE SU DISMI- NUCION	46
10. LA LLUVIA ACIDA	52
11. EL DIOXIDO DE CARBONO Y EL EFECTO DE INVERNADERO	56

TEMAS MONOGRAFICOS

1. Estudio del Suelo. S. Cuadrado y L. F. Lorenzo. 1980 (Agotado).
2. Sobre los recursos minerales de la Provincia de Salamanca. A. García Sánchez, J. Saavedra Alonso y A. S. García Plaza. 1980 (Agotado).
3. Los materiales arcillosos. Composición, propiedades y aplicaciones. M. A. Vicente Hernández y M. Sánchez Camazano. 1981 (Agotado).
4. Cenurosis e hidatidosis. El perro como principal reservorio. F. Simón Vicente y V. Ramajo Martín. 1981 (Agotado).
5. Importancia de la reacción del suelo. L. Prat Pérez. 1981 (Agotado).
6. La materia orgánica del suelo. Su importancia en suelos naturales y cultivados. J. Gallardo Lancho, M. Isabel González y C. Pérez García. 1982.
7. Conceptos de Ecología. A. Puerto Martín. 1982 (Agotado).
8. El río. Aspectos limnológicos. B. G. de Vicuña Redondo, A. Amor Morales y A. Escudero Besian. 1983 (Agotado).
9. Sobre los recursos minerales de la Provincia de Salamanca. Algunos yacimientos de interés. A. García Sánchez, J. Saavedra Alonso, A. S. García Plaza y P. Pellitero Pascual. 1983 (Agotado).
10. La presencia del hombre en la naturaleza. Pasado, presente y previsión de futuro. M. Rico Rodríguez, A. Puerto Martín y J. M. Gómez Gutiérrez. 1983 (Agotado).
11. La alimentación mineral de las plantas. L. Sánchez de la Puente. 1984 (Agotado).
12. Malas hierbas de regadíos, cultivos cereales y medios acuáticos salmantinos. J. A. Sánchez Rodríguez. 1984 (Agotado).
13. Aspectos ecológicos de la Provincia de Salamanca. J. A. García Rodríguez, A. Puerto Martín y R. Rodríguez González. 1984 (Agotado).
14. Los plaguicidas. Adsorción y evolución en el suelo. M. J. Sánchez Martín y M. Sánchez Camazano. 1985.
15. La alimentación humana. Aspectos fundamentales. J. C. Rivas Gonzalo y C. Santos Buelga. 1985.
16. La fijación de nitrógeno atmosférico. Una Biotecnología en la Producción Agraria. C. Rodríguez Barrieco, F. Sevillano García y P. Subramaniam. 1985.
17. El Bosque: su importancia como recurso natural. I. Santa Regina y J. Gallardo Lancho. 1986.
18. El Agua: y el medio físico del suelo. F. Ingelmo Sánchez y S. Cuadrado Sánchez. 1986.

Las opiniones o «tomas de postura» de los autores son respetadas en la publicación de los trabajos. Por tanto, quedan al margen de ellas la Dirección de la Serie y las Entidades que participan en su edición.