

1985-2

REG. No. 078375728

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

FACULTAD DE CIENCIAS



CUCBA

EL IMPACTO ECOLOGICO DE LA LLUVIA ACIDA,
UN ACERCAMIENTO A SUS BASES TEORICAS.

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

LICENCIADO EN BIOLOGIA

P R E S E N T A

RICARDO GUTIERREZ PADILLA

GUADALAJARA, JAL.



BIBLIOTECA CENTRAL

EL IMPACTO ECOLOGICO DE LA LLUVIA ACIDA

Un acercamiento a sus bases teóricas

Ricardo Gutiérrez Padilla

Director de Tesis: Eduardo Avalos Guzmán

DEDICATORIA

ESTUDIOS

INER

LOCUCIONES

ALABROS

VERBOS

PREPOSICIONES

CONJUNCIÓN *A mis padres*

ARTÍCULOS

PRONOMBRES

ADVERBOS

PREPOSICIONES

CONJUNCIÓN

ARTÍCULOS

A mis asesores académicos

PRONOMBRES

ADVERBOS

PREPOSICIONES

CONJUNCIÓN

ARTÍCULOS

A Cristina

PRONOMBRES

ADVERBOS

PREPOSICIONES

CONJUNCIÓN

ARTÍCULOS

PRONOMBRES

ADVERBOS

PREPOSICIONES

CONJUNCIÓN

ARTÍCULOS

PRONOMBRES

ADVERBOS

INDICE

	página
1. OBJETIVOS	1
2. RESUMEN	2
3. INTRODUCCION	3
3.1 La Atmósfera	7
3.2 El viento	9
3.3 Movimiento vertical del aire	11
3.4 Gradiente de temperaturas	11
3.5 Inversiones y Episodios	14
4. LOS CONTAMINANTES	17
4.1 Oxidos de azufre	17
4.2 Oxidos de nitrógeno	19
4.3 Materiales particulados	20
4.4 Hidrocarburos	21
4.5 Oxidantes fotoquímicos	22
5. PROCESOS ATMOSFERICOS	23
5.1 Transporte y mezcla de contaminantes	24
5.2 Transformaciones químicas	25
5.2.1 En la fase gaseosa	27
5.2.2 En la fase acuosa	29
6. DEPOSICION	
6.1 Deposición seca	31
6.2 Deposición húmeda	32
7. INCORPORACION	33
8. IMPACTO ECOLOGICO	36
8.1 Efectos sobre los sistemas acuáticos	36
8.2 Efectos sobre los sistemas terrestres	37
8.3 Efectos sobre la salud humana	42
8.4 Efectos sobre los materiales	44
9. ANALISIS DE LA INFORMACION	45
10. APENDICE	
Revisión histórica de la Lluvia Acida	49

OBJETIVOS.

1. Introducir a los estudiantes de la Licenciatura en Biología al conocimiento de la lluvia ácida y de sus efectos sobre sus ecosistemas, exponiendo las bases teóricas de que se dispone hasta hoy para la comprensión del fenómeno.
2. Hacer accesibles algunos artículos importantes y poco conocidos que tratan sobre el tema.
3. Poner a disposición de los maestros una obra de consulta que sirva como apoyo didáctico.
4. Hacer del conocimiento general que la lluvia ácida es un fenómeno que nos afecta ya y que puede volverse muy nocivo en un futuro cercano, en caso de que no se tomen las medidas adecuadas para su conocimiento y solución.

RESUMEN

La lluvia ácida es un fenómeno de contaminación atmosférica que afecta a una gran extensión de nuestro planeta. Aún cuando no es un tema nuevo (fué descrita por primera vez hace más de un siglo), sólo recientemente se le ha identificado como un problema ecológico de grandes magnitudes. Anteriormente se le consideraba como un factor asociado a los grandes centros urbanos e industriales. Sin embargo, en la actualidad se sabe que es un fenómeno que puede presentarse en cualquier parte del mundo, incluso en las zonas consideradas como ecosistemas no modificados. Por ser un proceso eminentemente atmosférico, el transporte de los contaminantes puede realizarse sobre grandes extensiones, con lo que se genera la acidificación de las lluvias en lugares muy lejanos de las fuentes de emisión. La lluvia ácida resulta principalmente de la emisión de los gases precursores (óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno) que se generan en los procesos de combustión de energéticos. Tanto los óxidos de azufre (SO_x) como los de nitrógeno (NO_x) reaccionan en la atmósfera con la humedad del ambiente para convertir a la lluvia en soluciones diluidas de ácido sulfúrico y ácido nítrico. La precipitación de los ácidos no solo se realiza en forma de lluvia. También existen deposiciones "secas" que son de gran importancia en la determinación del impacto ecológico.

Sus efectos mas comunes son la acidificación de ríos y lagos, con la consecuente muerte de los organismos que en ellos habitan; el daño a los suelos, la movilización de metales, la reducción de la productividad primaria de los ecosistemas forestales, el aumento en la incidencia de enfermedades respiratorias, etc.

INTRODUCCION

En años recientes, el mundo ha enfrentado un problema ecológico que en la actualidad está considerado como uno de los mas graves: el de la lluvia ácida. Los países industrializados que se localizan en la zona templada del hemisferio norte son los mas estrechamente relacionados con este fenómeno. Las medidas del pH de la lluvia que cae en esta zona demuestra un claro incremento en la acidez de las precipitaciones. El término "lluvia ácida" puede utilizarse para designar a una serie de fenómenos que, en última instancia depositan contaminantes atmosféricos. Se ha encontrado que tiene un gran potencial de efectos nocivos sobre los ecosistemas, de ahí la creciente atención que comienza a recibir. Tales efectos incluyen la acidificación de los lagos, ríos y aguas subterráneas; cambios probables en la productividad agrícola y forestal; simplificación en la diversidad de los organismos y el deterioro de los materiales hechos por el hombre.

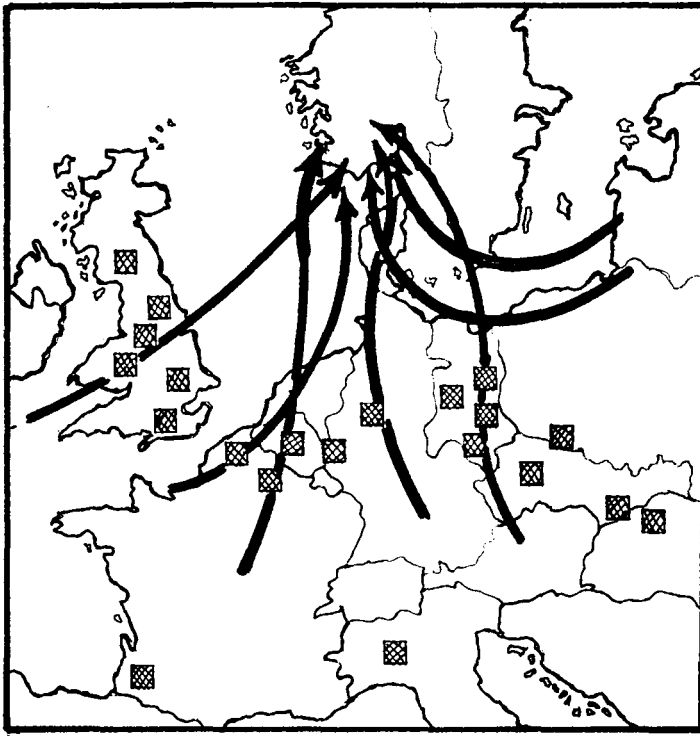
La lluvia ácida es un fenómeno originado en las etapas posteriores a la Revolución Industrial. La medición del pH de las precipitaciones ocurridas antes de este periodo, que se han preservado en los glaciares de Groenlandia así lo indican. Tales medidas registraron valores de pH entre 6 y 7.6 . La actividad humana ha sido el factor de mayor importancia para la inducción de este fenómeno. Cada año se liberan hacia la atmósfera una gran cantidad de óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno como resultado de la combustión de los carburantes fósiles y por los procesos de fundición de metales. Estos óxidos son convertidos en la atmósfera en ácidos fuertes (sulfúrico y nítrico), los cuales son transportados por la atmósfera y eventualmente removidos para precipitarse de nuevo hacia el suelo en forma de lluvia o nieve. El término acidez en una solución (como la lluvia) es sinónimo de la presencia de hidrogeniones (H^+). Una medida común de la acidez es el pH, el cual se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno. La escala de pH va de 0 a 14, con un valor de 7 representando a las soluciones neutras. Los valores inferiores a 7 indican mayor acidez y los superiores a 7, de

notan mayor alcalinidad. Debe tomarse en cuenta que el pH es una escala logarítmica; así que, las soluciones con pH 6, 5 y 4 contienen uno, diez y cien microequivalentes de acidez por litro, respectivamente.

El agua que se evapora de los suelos o es transpirada por las plantas, es esencialmente destilada o pura. Sin embargo, cuando el vapor de agua llega a la atmósfera se condensa en partículas sólidas y rápido alcanza un equilibrio con los gases atmosféricos. Uno de estos gases es el bióxido de carbono (CO_2). Cuando el CO_2 se disuelve en agua se forma ácido carbónico (H_2CO_3). Como el ácido carbónico es un ácido débil solo se disocia parcialmente en agua destilada, produciendo iones de hidrógeno e iones bicarbonato. A concentraciones y presiones normales de CO_2 en la atmósfera, el pH de las lluvias y de la nieve es de 5.6. El término "lluvia ácida" se aplica a las precipitaciones cuyo valor sea inferior al de 5.6.

En Europa Central, Noruega, Suecia, Inglaterra, Canadá, Los Estados Unidos de Norteamérica, Japón y México, entre otros países, se ha notado un claro descenso en los valores promedio del pH de las lluvias. Por ejemplo, en Los Estados Unidos casi todo el territorio muestra niveles de pH inferiores a 5. Las zonas industriales del Este y los centros urbanos que se localizan viento abajo de éstas, tienen valores considerados como muy ácidos (promedio anual de 4,1). Las zonas montañosas aumentan la precipitación de una zona, con lo cual remueven los contaminantes atmosféricos y los llevan hacia el suelo. En la región austral de Noruega se extiende una cordillera montañosa que recibe una gran cantidad de masas de aire provenientes de la Europa Central y de las Islas Británicas. Los contaminantes emitidos por las fuentes Europeas son transportados por cientos de kilómetros, hasta que se encuentran con las montañas de Noruega, en donde se precipitan con la lluvia, causando un severo daño ecológico (ver fig.1).

Hasta hoy, el pH más bajo que se ha registrado para una tormenta individual es de 2.4 y ocurrió el 10 de abril de 1974 en Pitlochry, Escocia. En ese mismo mes se registraron valores de 2.7 y 3.5 en la costa oeste de Noruega y en un paraje de Islandia, res



■ Centros de alta emisión de óxidos de azufre.

Figura 1. Transporte transfronterizo de los contaminantes.

pectivamente. El promedio anual mas bajo ha sido de 3.8; se registró en 1967 en De Bilt, Holanda. En la figura 2 se muestra una escala de valores de pH y se ubica en ella al fenómeno de la lluvia ácida.

La lluvia ácida debe ser entendida como una parte del fenómeno general de deposición atmosférica. Se designa como deposición atmosférica a la serie de procesos por medio de los cuales los contaminantes son transferidos del aire hacia la superficie de la Tierra o los objetos que se encuentran sobre ella.

La deposición de sustancias de la atmósfera en los ecosistemas se realiza por uno o mas de los siguientes procesos: (1) Deposition húmeda de las sustancias disueltas o suspendidas en las gotas de lluvia o los copos de nieve; (2) Deposition gravitacional e impactación de partículas gruesas y aerosoles finos; y (3) Absorción o adsorción de gases. El proceso (1) incluye a todas las for-

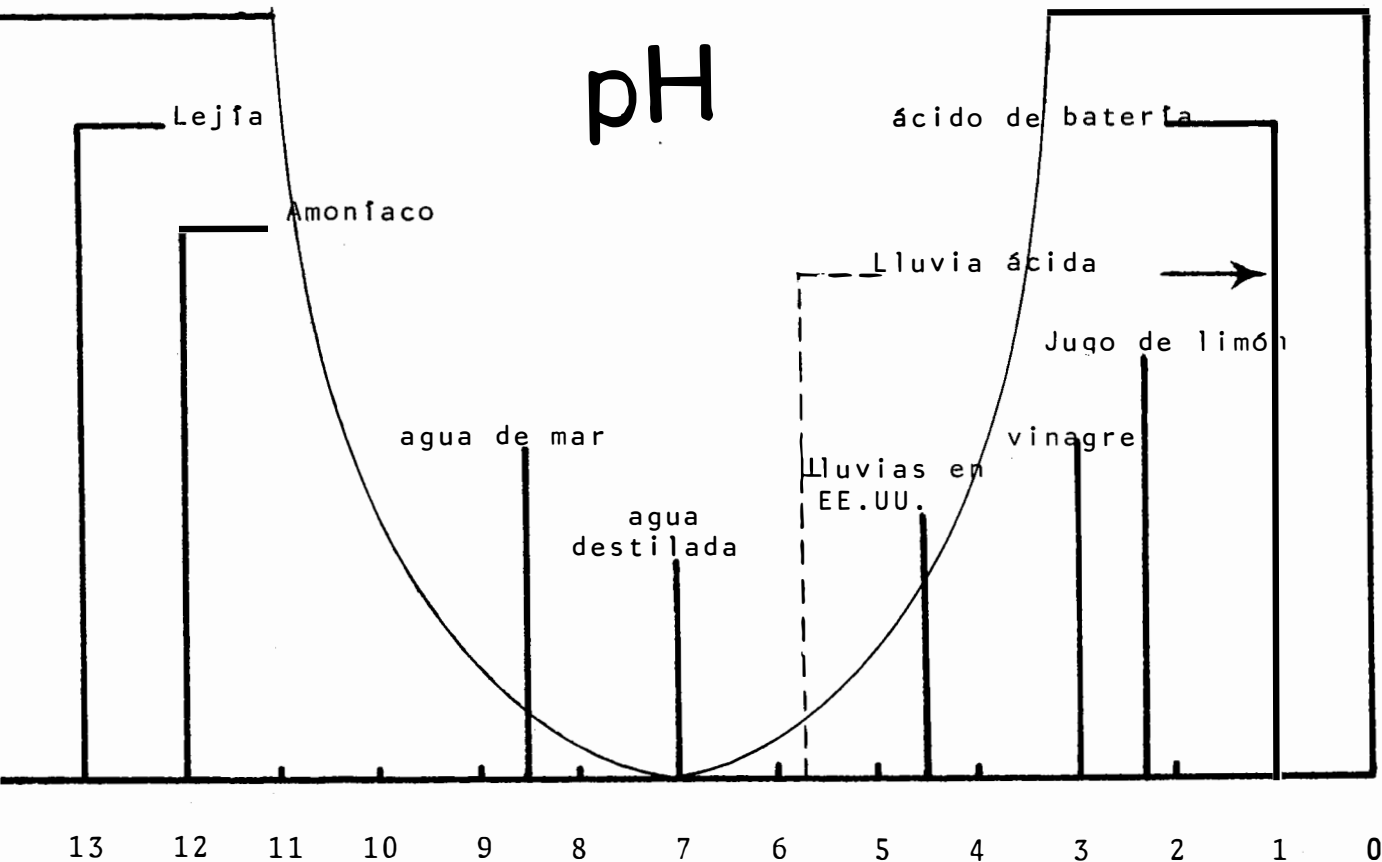


Figura 2. *Escala de pH.*

mas de precipitación: lluvia, nieve, granizo, rocío, niebla y escarcha. Los procesos (2) y (3) son componentes del fenómeno llamado "deposición seca" ^{*1}. En ocasiones se denota como lluvia ácida solo a la deposición húmeda. Sin embargo, en este trabajo se l utiliza para designar a los fenómenos de deposición en general.

La lluvia ácida es el último de una serie de tres eventos que se suceden de manera bien definida. Esta serie inicia con la emisión de los gases precursores, continúa con las reacciones químicas que ocasionan la disminución del pH de la lluvia y concluye con la deposición de los contaminantes. El impacto ecológico sólo puede ser entendido una vez que se conozcan los procesos atmosféricos y las vías de deposición. En los capítulos siguientes se analizan ambos aspectos en forma detallada. Se omite un análisis de las fuentes de emisión por no ser el objetivo de este trabajo. Además, se hace una revisión de los contaminantes que parti

cipan en la formación de la lluvia ácida y hacia el final se considera el impacto ecológico.

LA ATMOSFERA

La Atmósfera que rodea a la Tierra realiza dos funciones básicas para nosotros. Nos protege ante la llegada de objetos extraños y funciona como un medio de almacén y transporte para muchas sustancias que son esenciales en los procesos biológicos. La primera actividad se realiza en las capas superiores de la atmósfera y por ello, tiene escasa relación con el fenómeno que nos interesa. Sin embargo, su función protectora impide el ingreso excesivo de agentes extraterrestres que pudieran causar daños en la superficie de la Tierra, tales como meteoritos, o radiaciones ultravioleta y cósmica.

La segunda función atmosférica, de almacén y transporte de sustancias, actúa sobre muchos de los componentes de la biosfera. La atmósfera distribuye el vapor de agua y la energía calorífica para regular el clima. Almacena y distribuye el oxígeno y el CO_2 ; además, regula la distribución de los contaminantes que forman parte del proceso de la lluvia ácida.

En condiciones normales*² la atmósfera actual está formada por una serie de gases unidos a la Tierra por atracción gravitacional y que se presentan en cantidades diferentes. La composición química de la atmósfera se puede apreciar en la tabla 1.

Tabla 1. COMPOSICION DE LA ATMOSFERA ACTUAL

Gases	% del volumen total	ppm
Nitrógeno	78.03	780 030
Oxígeno	20.99	209 900
Argón	0.94	9 400
Bióxido de Carbono	0.03	300
Otros gases	0.01	100

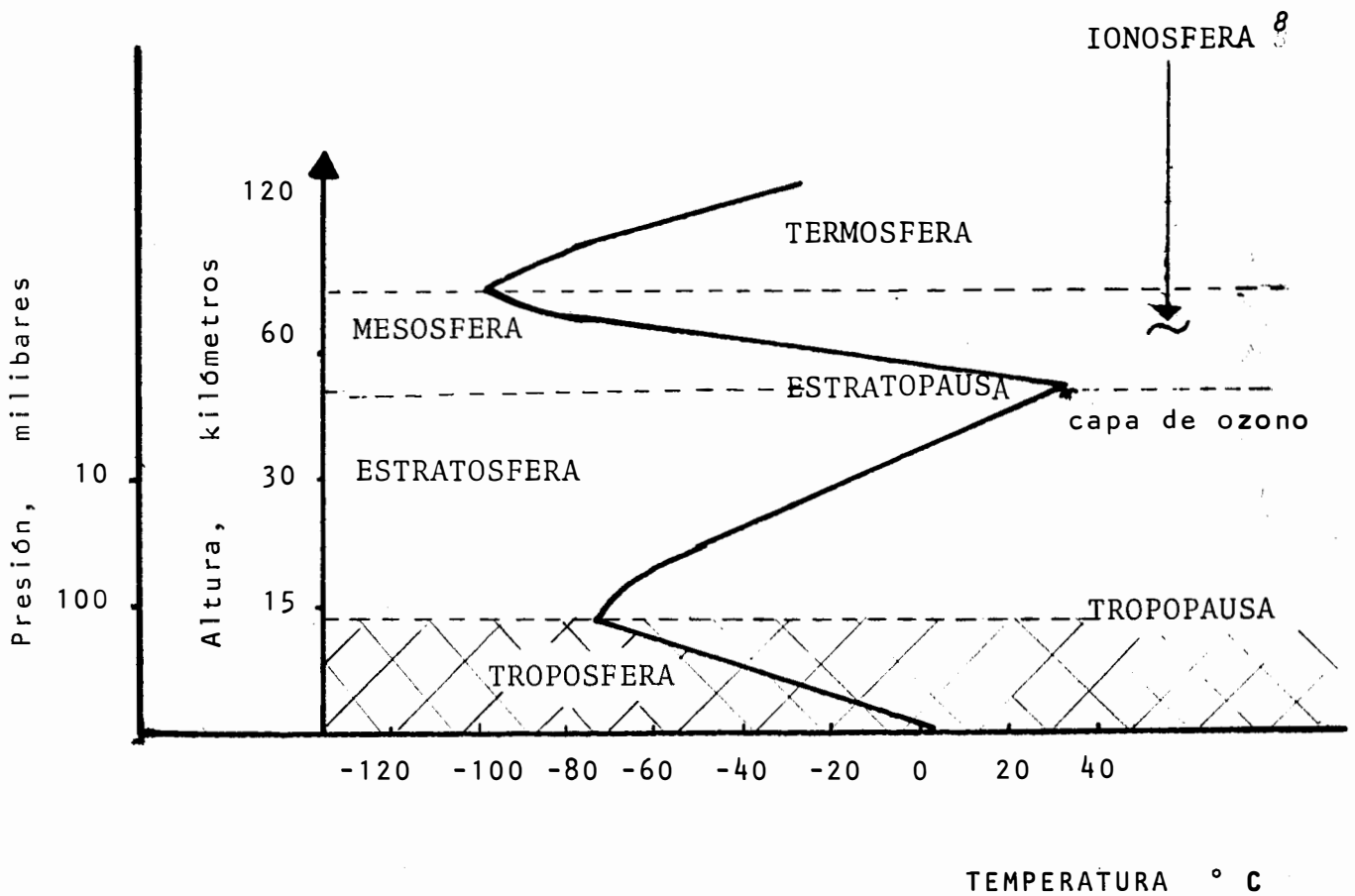


Figura 3. Variación vertical de la temperatura.

La masa total de la atmósfera es de 5.7×10^{15} toneladas de aire. Aunque la cifra es muy grande, la atmósfera constituye sólo una delgada capa que se encuentra rodeando a la Tierra. La presión, densidad y masa de la atmósfera disminuye a medida que aumenta la altura. La figura 3 muestra una variación vertical de la temperatura en la atmósfera y denota las diferentes capas en que se subdivide, debido principalmente a los bruscos cambios de temperatura que en ella ocurren. Generalmente, sólo el nivel más bajo, la Troposfera, está involucrado en los procesos de contaminación atmosférica.

EL VIENTO

Todos los fenómenos de contaminación atmosférica están influidos por los factores climáticos. El viento (movimiento horizontal del aire) es un factor de gran importancia en la lluvia ácida. La velocidad del viento determina el grado de dilución de los contaminantes y las distancias de transporte, mientras que su dirección determina los posibles lugares afectados y por tanto, la diseminación de los contaminantes. Por ejemplo, si una fuente está liberando una cantidad determinada de contaminantes por unidad de tiempo, la mayor parte de ellos serán distribuidos en la cantidad de aire que pase por ahí en la misma cantidad de tiempo. Esto determina la concentración del contaminante en dicha cantidad de aire. Ahora supongamos que la velocidad del viento se duplica, la cantidad de aire también se duplica, por lo que la concentración de los contaminantes se reduce a la mitad de la concentración original. Bajo esta idea, la cantidad de viento que pasa sobre una fuente se considera como un determinante primario de la concentración de los contaminantes en los lugares que se localizan viento abajo en relación a las fuentes de emisión.

El viento es el resultado de las disparidades entre temperatura y presión de la capas de aire. Las fuerzas generadas sobre estas disparidades conducen a la circulación de las capas en patrones y amplitudes bien caracterizados. Los movimientos que resultan de la aplicación de fuerzas en la atmósfera son detallados en la tabla 2.

Tabla 2. ESCALAS DE MOVIMIENTO EN LA ATMOSFERA

NOMBRE	DIMENSIONES HORIZONTALES TIPICAS	DESCRIPCION
PLANETARIA	1,000 - 10,000 km.	Patrones de circulación global; causado por las disparidades de temperaturas. Es casi permanente.
SINOPTICA	100 - 1,000 km.	Ciclones y anticiclones en las latitudes medias; también resulta de la disparidad de temperaturas. Duran varios días y en ocasiones semanas.
MESOESCALA	1 - 100 km.	Pequeñas células conectivas dadas por diferencias térmicas locales, tales como brisas, tierra-mar, montaña-valle y tormentas eléctricas; generalmente duran varias horas.
MICROESCALA	1 cm - 1 km.	Remolinos pequeños, causados por las superficies rugosas, los edificios y los árboles. Cada remolino dura solo unas horas. Son un factor muy importante en la mezcla de los contaminantes.
MOLECULAR	10^{-6} cm -	Ondas sonoras y movimientos moleculares propios de un gas.

MOVIMIENTO VERTICAL DEL AIRE

Los movimientos verticales son completamente diferentes a los movimientos horizontales del aire. Las distancias verticales son mucho menores que las horizontales y las fuerzas que actúan sobre ellos son completamente diferentes. La diferencia de temperaturas es también uno de los factores que determinan el movimiento vertical del aire, aunque con un resultado muy diferente al de los movimiento horizontales.

Comparados con los vientos, los movimientos verticales son menos rápidos, mas azarosos y duran mucho menos. Sin embargo, el movimiento vertical es un aspecto crucial de la capacidad de la atmósfera para mezclar y diluir a los contaminantes. Por ello, se considera a continuación al factor que gobierna el movimiento vertical del aire: el gradiente de temperaturas.

GRADIENTE DE TEMPERATURAS

El gradiente vertical de temperaturas se define como la tasa a la cual la temperatura cambia al aumentar la altura. En la figura 3 se aprecia que el aire se hace cada vez mas frio con el incremento de la altitud, por lo menos hasta los 10-12 km. Esto es el resultado de las leyes físicas que relacionan a la presión, el volumen y la temperatura de los gases, así como del hecho de que el aire se calienta a nivel del suelo. La reversión de esta tendencia —que se da en la Tropopausa— es causada por un fenómeno muy diferente, la absorción de radiación ultravioleta en la capa de ozono.

La tasa cuantitativa a la cual decrece la temperatura al aumentar la altura, determina si la contaminación emitida a nivel del suelo habrá de mezclarse con una franja de 2 km. de espesor para produ

circuncentraciones relativamente bajas, a si habrá de estacionarse en una franja angosta de, digamos, solo unos 300 o 400 mts., produciendo concentraciones mucho mayores. Si la temperatura desciende mas de un grado Centígrado por cada 100 metros de altura adicional, el aire se agitará y mezclará violentamente, dispersando los contaminantes de manera homogénea en un gran vólumen de aire. Por otra parte, si la temperatura decrece en menos de un grado Centígrado por cada 100 metros, o si la temperatura se incrementa con la temperatura, el aire tenderá a permanecer estático, la mezcla de contaminantes se verá inhibida y la concentración de los contaminantes será mucho mayor. A la tasa específica de descenso vertical de la temperatura, un grado Centígrado por cada 100 metros, se le conoce como tasa adiabática de descenso.

La importancia del perfil vertical de temperaturas para la contaminación atmosférica se muestra en la figura 4, la cuál ilustra diferentes perfiles y su efecto sobre una sola fuente contaminante. La pendiente de la línea a (adiabática) es de un grado Centígrado por cada 100 mts.; en la tasa adiabática la atmósfera es neutral con respecto a la mezcla de contaminantes (v.gr. no favorece ni detiene el proceso de mezcla). La línea b es super adiabática; representa una temperatura que desciende mas aprisa que en el proceso adiabático. La pendiente de la línea c es menor que la de la línea a y por ello, será difícil que lo haga aún en caso de que influya un factor externo (p.ej., fenómenos de mesoescala). El cuarto perfil, la línea d, tiene una pendiente opuesta, indicando que la temperatura se incrementa al aumentar la altura. Esta condición es conocida como inversión térmica —el aire caliente se localiza por encima del aire frío. En esta condición de inversión, cualquier mezcla de aire se ve suprimida, incluyendo la ocasionada por factores externos como la turbulencia; por lo tanto, el aire permanece estático y la contaminación se mantiene a la altura en que se emite.

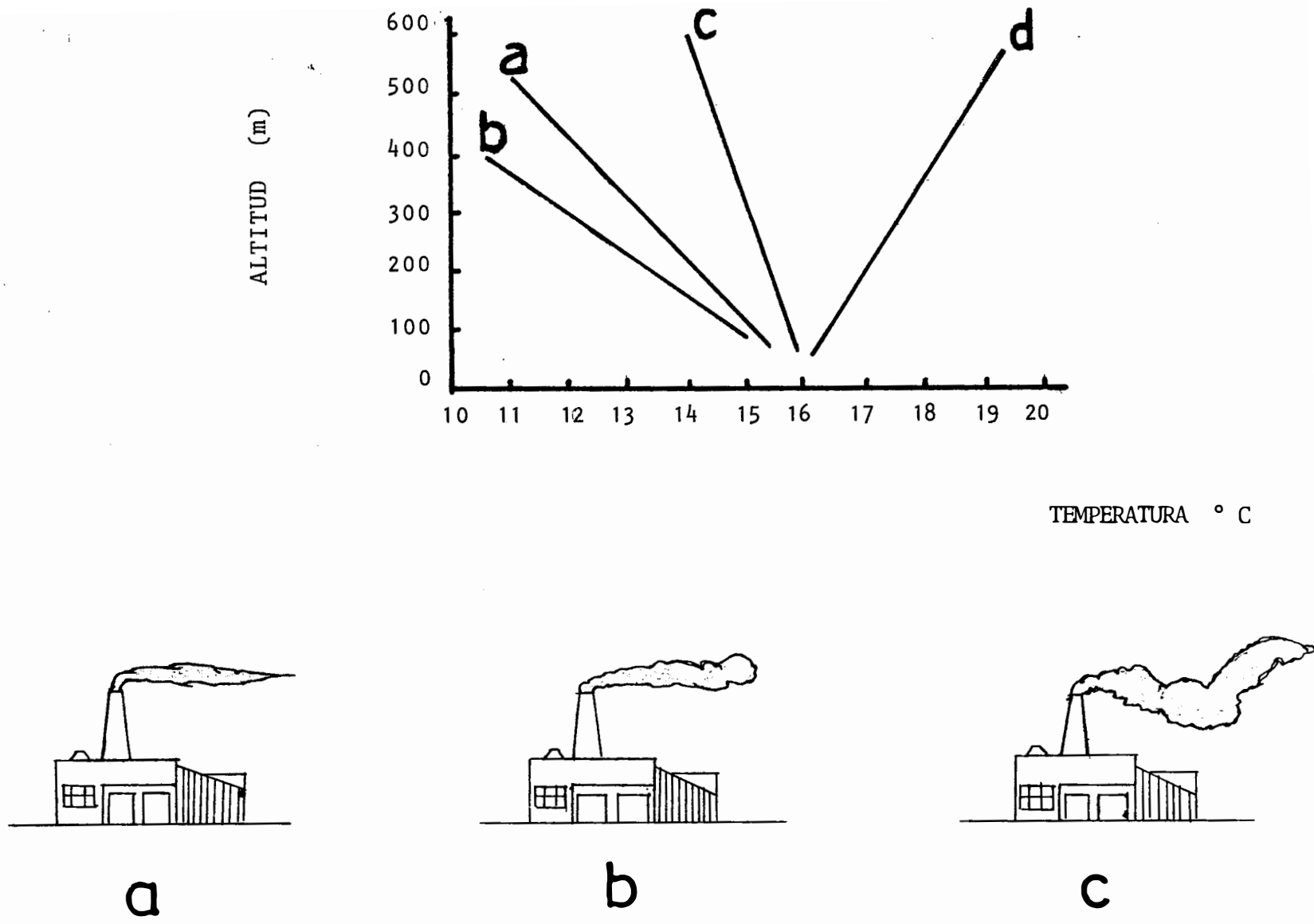


Figura 4. *Proceso adiabático. Tres perfiles de temperatura y su efecto sobre una fuente.*

INVERSIONES Y EPISODIOS

Las inversiones térmicas son catalogadas en dos tipos diferentes. El primer tipo ocurre comunmente en las noches y es conocido como inversión nocturna por radiación. Por la noche, la Tierra irradia energía calorífica, al igual que todos los cuerpos; en las noches nubladas, las nubes regresan ese calor hacia la superficie; pero en las noches despejadas el calor se libera hacia el espacio ocasionando un descenso en la temperatura de la superficie. A medida que la superficie terrestre se va enfriando, las capas de aire que entran en contacto con ella también se enfrían, con lo que se genera una inversión térmica. Cuando amanece el calor del sol aumenta la temperatura de las capas de aire con lo que se retoma una distribución adiabática de la temperatura. En ocasiones, como en los días nublados y sin viento, la temperatura del sol no es suficiente para calentar a las parcelas de aire, por lo que la inversión persiste a lo largo del día.

Las inversiones nocturnas por radiación tienen varios efectos sobre la contaminación atmosférica. Especialmente en el invierno, las inversiones pueden verse asociadas con la intensa actividad matutina de las ciudades, ocasionando, un aumento importante en los niveles atmosféricos de ciertos contaminantes.

El segundo tipo de inversiones, las frontales, son menos frecuentes y surgen cuando se encuentran dos masas de aire con temperaturas diferentes. La capa más caliente, por ser menos densa se desliza sobre la capa más fría, causando una estructura invertida (figura 5). Debido a que las inversiones frontales son generalmente transitorias, no tienen una importancia relevante en el proceso de contaminación atmosférica. Sin embargo, las inversiones frontales se relacionan frecuentemente con lluvias, que actúan como removedores de los contaminantes del aire.

En algunas ocasiones, el estancamiento de las capas de aire que resulta de las inversiones térmicas, se ve asociado con la acumulación excesiva de contaminantes en una zona, o con emisiones accidentales de grandes proporciones. Cuando esto sucede, generalmente se producen intoxicaciones masivas que incrementan los

índices de morbilidad y que en ciertos casos se han convertido en verdaderas tragedias. A tales eventos se les asigna el nombre de episodios. En la tabla 3 se muestran algunos de los mas graves episodios de contaminación atmosférica.

Figura 5. INVERSIONES FRONTALES

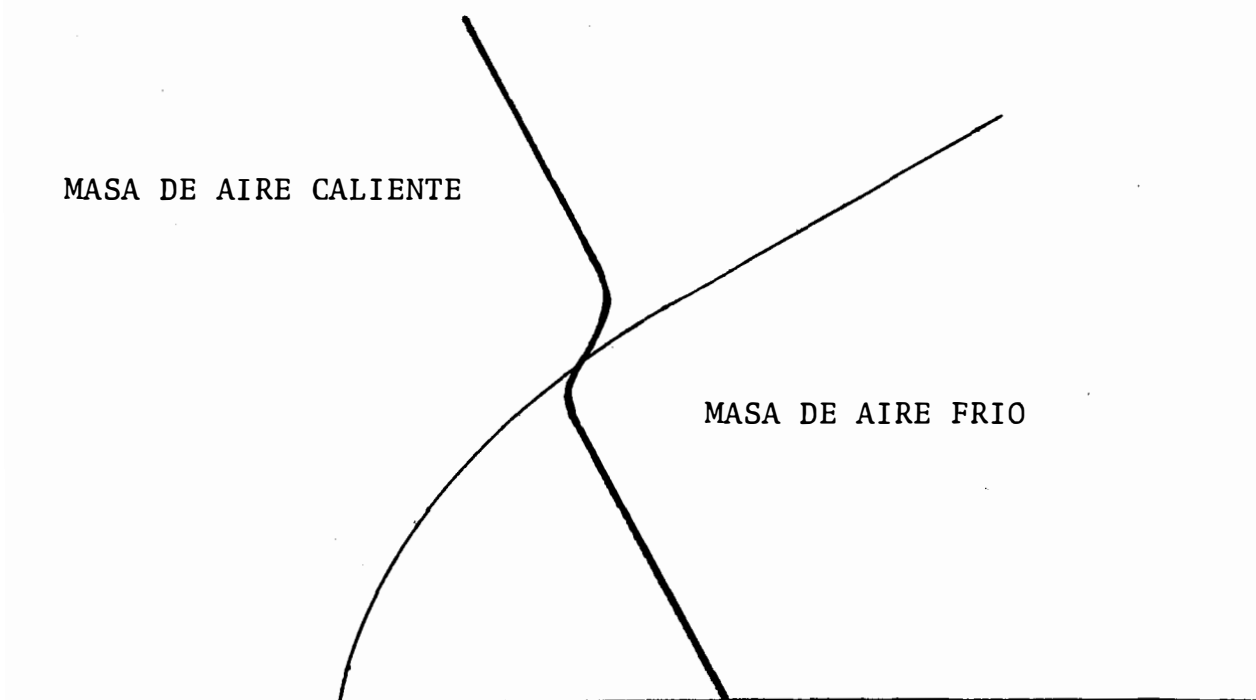


Tabla 3. EPISODIOS DE CONTAMINACION ATMOSFERICA

LUGAR	FECHA	CONTAMINANTES	SINTOMAS Y EFECTOS
Valle del Meuse	1-5 Dic. 1930	SO ₂ (9.6 - 38.4 ppm)	63 muertos, dolor de pecho, irritación de ojos y nariz, todas las edades afectadas.
Donora (EE.UU.)	26-31 Oct. 1948	SO ₂ y partículas (0.3 - 2 ppm)	20 muertos, dolor de pecho, tos, irritación de ojos y nariz. Principalmente afectados los ancianos.
Posa Rica (México)	24 Nov. 1950	SO ₂ y H ₂ S	22 muertos, 320 hospitalizados, todas las edades afectadas.
Londres (Inglaterra)	5 Dic. 1952	SO ₂ y partículas	4,000 muertos.
Nueva York (EE.UU.)	24-30 Nov. 1966	SO ₂ y partículas	168 muertos

LOS CONTAMINANTES

Los agentes químicos que forman parte del proceso de contaminación atmosférica y que, a su vez, se constituyen como precursores de la acidificación de las lluvias son catalogados en una serie de grupos de compuestos. Cada uno de los grupos tiene propiedades y comportamientos específicos, de ahí que sean considerados como entidades individuales. Los cinco*⁴ grupos han sido identificados como los principales agentes de contaminación.

Oxidos de Azufre

Este grupo de contaminantes, designado genéricamente como SO_x , es una combinación de dos gases —el dióxido de azufre (SO_2) y el trióxido de azufre (SO_3)— que reaccionan en la atmósfera para generar otros elementos contaminantes. Los óxidos de azufre resultan de la combustión de los energéticos fósiles, la descomposición de la materia orgánica, así como, de los aerosoles marinos y de las erupciones volcánicas. Se estima que la relación de emisiones naturales y antropogénicas es de 1:1 .

Tradicionalmente se ha considerado a los óxidos de azufre como los contaminantes típicos de las áreas urbanas. La inmensa mayoría de los SO_x liberados hacia la atmósfera son de forma SO_2 y solo una pequeña fracción (1-3%) pertenecen al género SO_3 . En la actualidad, se estima que el proceso de acidificación de las lluvias se debe en un 70% a la emisión de los óxidos de azufre. Debido a ello, en el pasado se implementaron medidas para el control de las emisiones de SO_2 que han permitido mantener relativamente constantes las emisiones de este gas. En la tabla 4 se pueden apreciar los valores actuales (1985) y estimados (1990) para los óxidos de azufre y, en general para todos los contaminantes atmosféricos en el mundo entero.

Tabla 4. VALORES ACTUALES Y PROYECTADOS PARA LAS EMISIONES DE CONTAMINANTES

	EE.UU. y Canadá	PMDs	Países Socialistas	Todo el Mundo
1985				
Bióxido de carbono (billones de tons. cortas)	7.54	2.81	8.99	27.1
Monóxido de carbono (millones de tons. cortas)	15.2	17.2	25.4	96.0
Dióxido de azufre (millones de tons. cortas)	14.2	7.76	36.8	78.1
Oxidos de nitrógeno (millones de tons. cortas)	17.1	8.99	23.4	72.5
Partículas (millones de tons. cortas)	9.85	7.17	38.1	64.1
Hidrocarburos (millones de tons. cortas)	2.08	1.90	3.46	11.8
1990				
Bióxido de carbono (billones de tons. cortas)	8.29	3.42	10.2	30.9
Monóxido de carbono (millones de tons. cortas)	15.6	21.1	28.9	112.0
Dióxido de azufre (millones de tons. cortas)	15.6	9.40	41.9	88.5
Oxidos de nitrógeno (millones de tons. cortas)	18.2	11.0	26.7	82.0
Partículas (millones de tons. cortas)	11.0	8.63	43.4	73.1
Hidrocarburos (millones de tons. cortas)	2.17	2.32	3.94	13.7

Oxidos de Nitrógeno

Este grupo comprende a los dos compuestos químicos que están estrechamente relacionados, el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2), ambos gases. Los óxidos de nitrógeno son designados como NO_x . Resultan de la combustión de todos los combustibles; el calor de la combustión produce la combinación del nitrógeno y el oxígeno que son componentes normales del aire. Los óxidos de nitrógeno están asociados a la producción de smog fotoquímico. En los procesos de combustión se produce principalmente NO , el cual reacciona en la atmósfera para convertirse en NO_2 . Los óxidos de nitrógeno también son producidos de manera natural. Se estima que el 90% de las emisiones de óxidos de nitrógeno provienen de fuentes naturales, incluyendo al óxido nitroso (N_2O) que es el más abundante. La actividad de las bacterias anaerobias y la descomposición química de los nitratos son consideradas como las principales fuentes naturales de NO_x . Sin embargo, aún cuando las fuentes naturales de NO_x son grandes comparadas con las fuentes antropogénicas (de origen humano), deben considerarse dos puntos importantes al respecto. Primero, el óxido nitroso constituye más de la mitad del total de NO_x que se emiten actualmente en todo el mundo, pero no se le considera como un contaminante atmosférico debido a su baja concentración en el ambiente y a que no se le ha encontrado participación en el ciclo fotolítico del dióxido de nitrógeno (formación del smog fotoquímico). Segundo, las concentraciones locales de los NO_x de origen humano son mucho mayores comparadas con las emisiones naturales y además, participan como precursores de la formación de la lluvia ácida.

Actualmente, se considera a los NO_x como responsables de un 30% de la acidificación de las lluvias. Sin embargo, va en aumento su importancia, debido a que por su naturaleza fueron ignorados durante mucho tiempo y, a diferencia de los óxidos de azufre, no estuvieron sujetos a medidas de control.

Materiales Particulados

Estos agentes forman la imágen mas representativa de la contaminación atmosférica. Resultan de las columnas de humo liberadas por las chimeneas de las fábricas. La palabra "particulado" se deriva de "partícula" y se usa para incluir a todos los sólidos o líquidos que se encuentran en el aire.

Existe una inmensa variedad de sustancias aéreas, principalmente sólidos. Su tamaño, forma, composición y origen es extremadamente variable; en ellos pueden incluirse partículas de metal, polvos de los suelos, arena de las playas, segmentos de alas de insectos, polen, esporas, trozos de hifas, gránulos de carbón, etc. Además de ser compuestos no gaseosos, la característica que define a los materiales particulados es su tamaño.

Es importante considerar el tamaño de las partículas, debido a que su talla determina —casi totalmente— el comportamiento de estas en el aire, la distancia en que serán transportados y los posibles efectos que pudieran tener sobre los pulmones de los individuos, o sobre las plantas y los edificios. Los tamaños de las partículas son muy pequeños, van desde unos cien micrómetros como máximo, hasta valores del nivel molecular. El tamaño de la partícula es el valor que refleja sus propiedades de deposición. Se asumen que todas las partículas tienen una forma esférica, o se comportan como una partícula esférica determinada. En la figura 6 se ilustra un espectro de los tamaños de las partículas atmosféricas. Para considerar a las partículas en relación a su tamaño, es conveniente dividir las en tres grupos, trazando líneas divisorias en las dimensiones de 0.1 y 10 micrómetros. Las líneas divisorias no son parámetros naturales, pero generalmente las partículas que se encuentran en estos tres grupos provienen de fuentes diferentes y tienden a permanecer en el aire por períodos de tiempo también diferentes.

Los materiales particulados suelen dividirse en dos categorías: "partículas suspendidas" y "polvos depositables". La primera, incluye a las partículas mas pequeñas, las cuales permanecen en el aire por un tiempo considerable; la segunda categoría com-

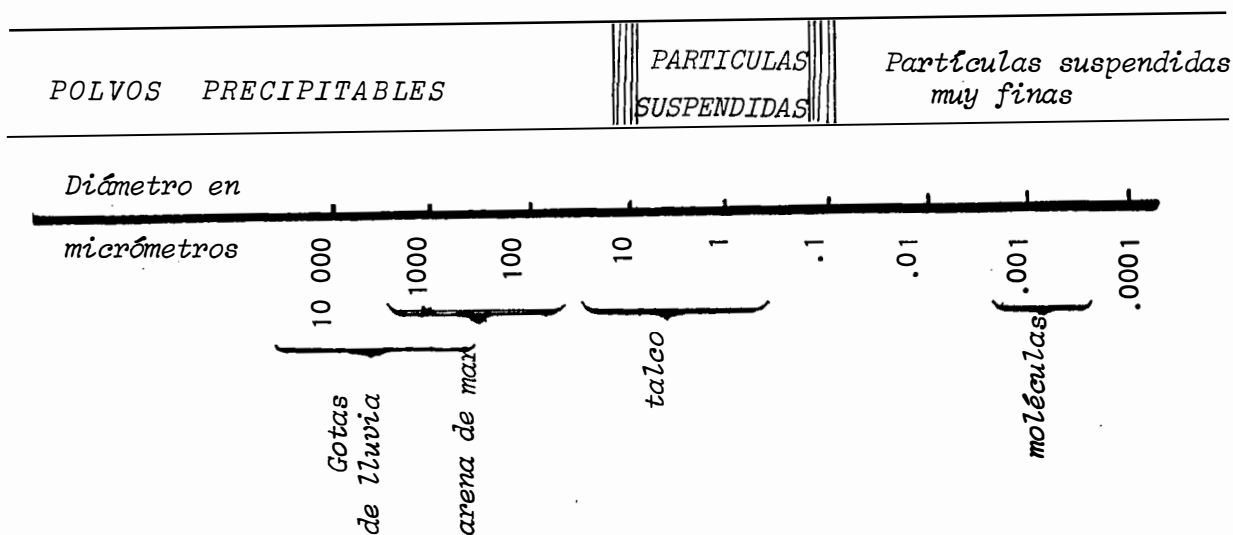
prende a las partículas mas grandes y que se depositan sobre el suelo con cierta rapidez.

Dentro de las partículas pueden quedar contempladas las nieblas y los aerosoles. Se define como niebla a la suspensión de pequeñas gotas líquidas formadas por la condensación de un vapor. Generalmente se forman de partículas superiores a los 10 micrómetros y en concentraciones relativamente bajas. Los aerosoles son nubes de partículas microscópicas y submicroscópicas que se localizan en el aire, pudiendo ser humos, polvos, emanaciones, etc.

Hidrocarburos

Por definición, los hidrocarburos son compuestos químicos formados solamente por carbono e hidrógeno. Comprenden a una gran variedad de compuestos orgánicos que se encuentran tanto en forma sólida, como líquida y gaseosa. Para efectos de este trabajo (de acuerdo con los principios de la contaminación atmosférica) se consideran como contaminantes a los hidrocarburos de forma gaseosa o que son muy volátiles a temperatura ambiente. De todos los hidrocarburos, el metano (CH_4) es el mas abundante. Las reaccio-

Figura 6. Espectro de los tamaños de las partículas



nes de descomposición bacteriana y los pantanos son los principales productores de metano. El grupo de los hidrocarburos es un elemento precursor en la formación del smog fotoquímico, junto con el complejo de los óxidos de nitrógeno.

Oxidantes Fotoquímicos

De los cinco grupos de contaminantes, el de los oxidantes fotoquímicos es el único que no se genera de manera directa por la actividad humana. Por lo anterior, se considera a los oxidantes fotoquímicos como contaminantes secundarios; se forman en la atmósfera a partir de los contaminantes primarios (aquéllos introducidos por el hombre directamente en la atmósfera). Este grupo de compuestos comprende a una variedad de agentes químicos que poseen una capacidad de oxidación superior a la del oxígeno. Los más importantes son: el ozono (O_3), los nitratos de peroxiacetilo (PAN, por sus siglas en inglés), el radical hidroxilo (HO) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2).

- CONTAMINANTES SIN REACCIONAR
- CONTAMINANTES REACTIVOS
- AGUA CONDENSADA

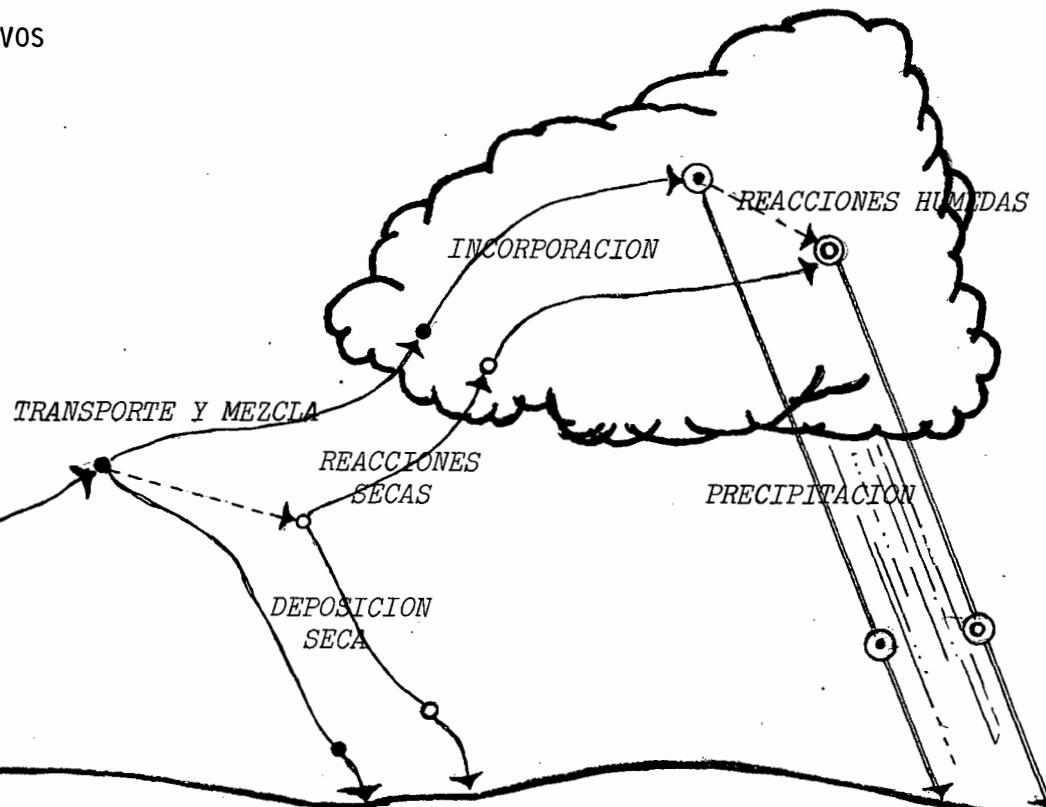


Figura 7. *Secuencia de eventos de la contaminación atmosférica.*

PROCESOS ATMOSFERICOS

Los procesos físicos y químicos que ocurren en la atmósfera determinan el destino de las emisiones de los gases precursores y, por tanto, la exposición de los receptores primarios a los contaminantes. Por conveniencia, se considera a estos procesos como una secuencia de eventos claramente definida (ver figura 7). Se asume que los procesos se presentan como sigue:

1. Transporte y Mezcla de los contaminantes.
2. Reacciones químicas en la fase gaseosa (reacción seca).
3. Deposición seca.
4. Incorporación.
5. Reacciones químicas en la fase acuosa (reacciones húmedas)
6. Deposición húmeda.

1. Transporte y mezcla de los contaminantes

El transporte y la mezcla de los contaminantes por el proceso atmosférico de advección es de suma importancia para el fenómeno de deposición. El factor transporte determina en forma directa la ruta que han de seguir los contaminantes antes de ser depositados, y por consiguiente, afecta el tiempo de residencia atmosférica de los materiales contaminantes. Por ejemplo, a menudo la deposición seca se ve limitada por la velocidad a la cual la atmósfera puede transportar verticalmente los contaminantes hacia la superficie.

El transporte puede afectar de manera indirecta a la deposición de contaminantes en varias formas diferentes. Por ejemplo, el proceso de transporte puede llevar a los contaminantes hacia un sistema de tormentas, en donde se efectúa la depuración del aire por medio de la lluvia. El transporte también puede introducir contaminantes en los ecosistemas, que conduzcan a transformaciones químicas de mayor o menor extensión.

Usualmente se divide al transporte atmosférico en dos categorías. La primera es conocida como advección, y se refiere al movimiento neto de una parcela de aire que flota en el viento dominante. La segunda categoría, difusión, define a la intermezcla de una parcela de aire con sus alrededores. Con frecuencia, los dos términos son usados de manera inapropiada o como sinónimos, debido a la incapacidad de modelar de manera adecuada el proceso de contaminación atmosférica y al escaso conocimiento que se logra sobre la participación de la difusión en tal proceso.

Las distancias asociadas con el transporte de los contaminantes dependen en gran medida del tiempo de residencia de los contaminantes en la atmósfera y por consiguiente, de su capacidad para actuar en los procesos de advección y difusión. En este contexto es importante notar que los tiempos de residencia atmosférica para los contaminantes típicos de las plantas de energía (por ejemplo: compuestos de azufre) están definidos de manera más precisa; algunas moléculas contaminantes se depositan rápidamente y en lugares cercanos a la fuente de emisión, mientras que otras son depositadas más lentamente y por ello, en lugares más leja-

nos. En base a las mejores estimaciones de que se dispone, es normal encontrar que hay moléculas transportadas a lo largo de cientos o miles de kilómetros. Se sabe que mientras mas extenso sea el rango de transporte, menores serán los efectos sobre los receptores.

Otro factor que debe tomarse en cuenta para evaluar el transporte es la altura a la cual se liberan los contaminantes hacia la atmósfera. Una de las medidas tomadas para solucionar los problemas de calidad del aire ha sido el incrementar la altura de las chimeneas, de acuerdo a la idea de que entre mas alto sea el punto de liberación, menores serán los efectos sobre el área circundante. Esta medida de "control" fué aplicada en la construcción de nuevas plantas, cuyas chimeneas son cada vez mas altas. En las fábricas viejas, las chimeneas relativamente bajas fueron reemplazadas por otras de mayor altura. Con la aplicación de esta medida se transformó al fenómeno de la lluvia ácida en un factor de alcance regional, en vez de local.

TRANSFORMACIONES QUIMICAS

En el transporte atmosférico, el SO_2 , los NO_x , los hidrocarburos y sus productos de oxidación participan en complejas reacciones químicas que transforman a los contaminantes primarios en sulfatos y nitratos. Los procesos de transformación son importantes debido a que la deposición de los contaminantes primarios y la de sus productos de transformaciónson gobernadas por procesos diferentes.

Existen muchos patrones químicos a través de los cuáles el SO_2 y los NO_x pueden ser transformados (oxidados) hasta sulfatos y nitratos. La figura 8 muestra los patrones por los que el SO_2 y los NO_x se convierten en ácidos de fase líquida y de fase gaseosa. Los estudios de campo indican la importancia relativa de las reacciones de fase líquida y de fase gaseosa, la cual se basa en las condiciones meteorológicas, como la presencia de nubes, la humedad relativa, la presencia y concentración de otros contaminantes, etcétera.

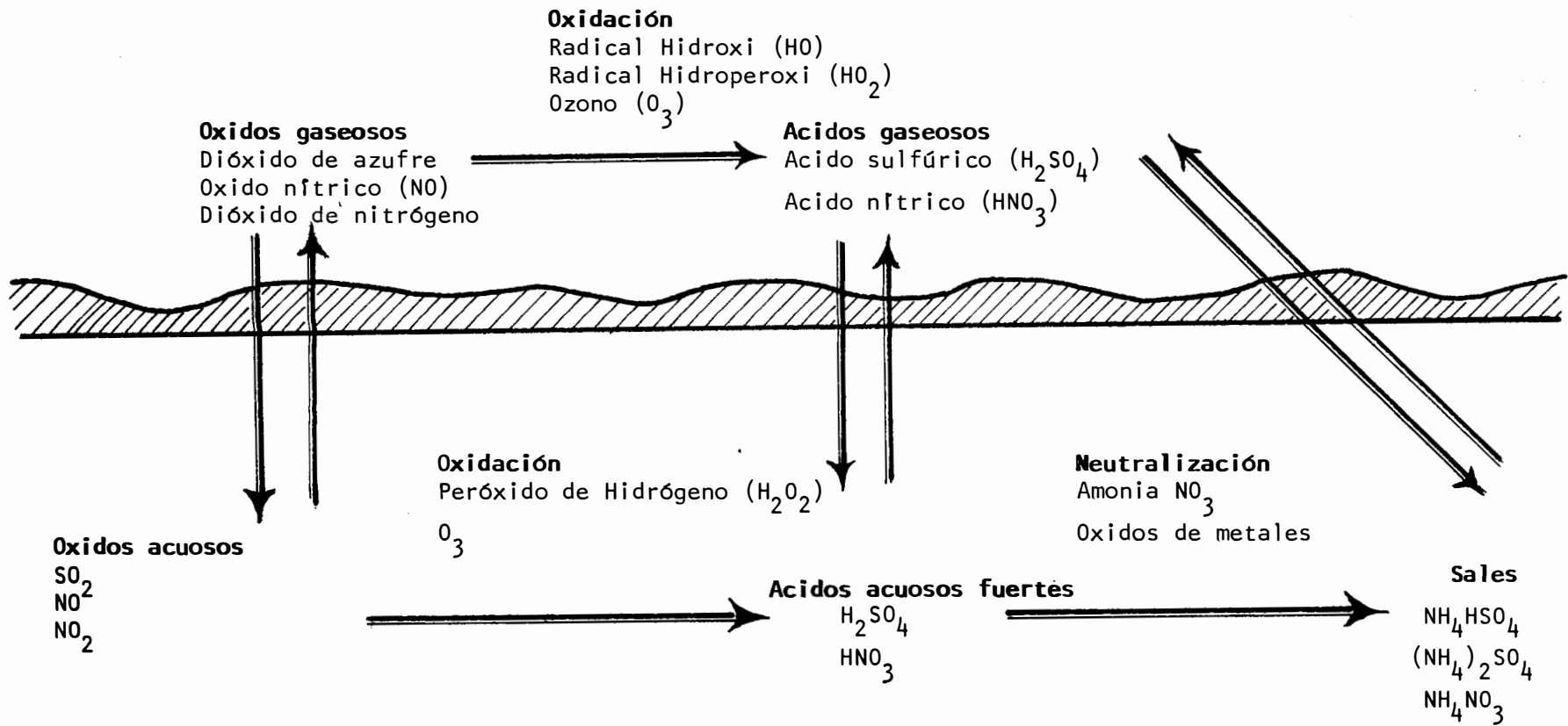


Figura 8. Vías de oxidación de los SO_x y los NO_x.

2. Reacciones químicas en la fase gaseosa

Se ha observado que el SO_2 y los NO_x son oxidados en la atmósfera por medio de las reacciones de la fase gaseosa a velocidades del 20 y el 30% por hora, respectivamente (paso II en la figura 7). Las tasas observadas no pueden ser explicadas por la oxidación directa realizada por el oxígeno atmosférico, reacciones que ocurren muy lentamente en las concentraciones típicas de los contaminantes y, en el caso del SO_2 , en ausencia de catalizadores. Asimismo, aunque existen vías directas para la formación de ácido sulfúrico y ácido nítrico, partiendo de la absorción de radiación solar por el SO_2 y del NO_2 , estos procesos parecen ser insignificantes bajo las condiciones típicas de la Tropósfera.

De acuerdo al conocimiento actual, la mayor parte de las reacciones de fase gaseosa que se dan en la Tropósfera y que resultan de la oxidación del SO_2 , NO y NO_2 implican reacciones con una variedad de intermediarios sumamente reactivos —moléculas excitadas, átomos y radicales libres— que son generados en reacciones iniciadas por la absorción de luz solar que realizan los gases traza. El más importante de los intermediarios para la oxidación de la fase gaseosa es el radical hidroxilo, HO .

El radical hidroxilo se puede formar en la tropósfera por diferentes reacciones. Un proceso común empieza con la fotodisociación del NO_2 , con lo que se forma un átomo de oxígeno muy reactivo, el cuál se combina rápidamente con una molécula de oxígeno para formar la molécula triatómica de oxígeno, el ozono. El ozono puede ser fotodisociado, produciendo una molécula de oxígeno electrónicamente excitada y un átomo de oxígeno también excitado. Este último reacciona fácilmente con una molécula de agua para producir radicales hidroxilo. El HO , a diferencia de muchos radicales que son fragmentos de moléculas complejas que contienen carbón, no reacciona fácilmente con el oxígeno molecular; el HO permanece en la atmósfera para reaccionar con la mayoría de los gases contaminantes, tales como hidrocarburos, NO , NO_2 , SO_2 y monóxido de carbono (CO). Las reacciones entre el HO y varios de los gases contaminantes producen nuevas especies reacti-

vas transitorias, las cuales, a su vez, reaccionan con los constituyentes atmosféricos para formar otros reactivos. Por ejemplo, las reacciones de HO con CO e hidrocarburos producen radicales peroxi; éstos reaccionan rápidamente con el NO para formar NO₂ y radicales alcoxi, entre otros.

El resultado neto de todas estas interacciones es la formación de un gran número de vías químicas para la oxidación del SO₂ y los NOx hasta ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido nítrico (HNO₃) respectivamente. La mayor parte de estas vías dependen de la formación inicial de HO. Se puede construir una secuencia con estas reacciones, en la cuál un solo radical HO oxidaría CO, hidrocarburos o aldehídos, facilitando la oxidación del NO a NO₂ y permitiendo la producción de mas radicales HO. El reciclaje de la secuencia dá como resultado una oxidación continua de NO a NO₂ y concentraciones relativamente constantes de radicales HO.

Existen algunas reacciones químicas entre el SO₂ y las especies reactivas transitorias que podrían conducir a la formación de H₂SO₄. Aún cuando existe una incertidumbre que podría ser hasta de el 50%, parece ser que la reacción mas importante es la que se dá entre el SO₂ y el HO, produciendo HOSO₂. Hay buenas evidencias de que esta reacción finalmente conduce a la formación de H₂SO₄. Es probable que la oxidación de SO₂ por el HO sea una reacción de propagación de la cadena.

Los principales agentes para la oxidación de NO a NO₂ son los radicales peroxi, mientras que el NO₂ se oxida hasta HNO₃ en una reacción bien caracterizada por el HO.

De acuerdo a lo anterior, las tasas de formación de ácido sulfúrico y ácido nítrico en la fase gaseosa de la atmósfera dependen de las concentraciones ambientales del radical hidroxilo. La medición directa del radical HO en la atmósfera es difícil, pero existen estimaciones teóricas y experimentales que permiten conocer las tasas de conversión de SO₂ y NO₂ en H₂SO₄ y HNO₃ respectivamente. Se sabe que para altas concentraciones de HO —características de cielos contaminados y soleados, principalmente en verano— el SO₂ se convertirá en H₂SO₄ por una reacción con HO a una tasa diaria promedio de aproximadamente 0.7% / hora (16.4% en un periodo de 24 horas), mientras que el NO₂ es convertido a una tasa promedio de aproximadamente 6.2% / hora (100% en un periodo de 16 horas). A con

centraciones típicas de un clima soleado de invierno en una atmósfera contaminada, las tasas promedio son de 0.12 y 1.1% / hora respectivamente (3 y 25% en un período de 24 horas). Estas tasas dependen de la concentración de HO y por consiguiente, decaen rápidamente después del ocaso, dado que el HO es formado principalmente por procesos fotoquímicos.

3. Reacciones químicas de la fase acuosa

La oxidación del SO_2 es rápida en el agua, con frecuencia alcanza el 100% / hora. Las tasas de oxidación en la fase acuosa son mucho más altas que las de la fase gaseosa. Sin embargo, los tiempos de vida de las nubes son cortos, de ahí que, a largo plazo, la tasa promedio de oxidación del SO_2 en un cielo nublado podría ser similar a la de la fase gaseosa.

Cuando el SO_2 se disuelve en agua se forman varias especies químicas: el hidrato ($\text{SO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y los iones bisulfito (HSO_3^-), sulfito ($\text{SO}_3^{=}$) e hidrogeniones (H^+). A medida que aumenta la concentración de H^+ una solución se hace más ácida, correspondiendo a valores más bajos en la escala de pH. El SO_2 es menos soluble en soluciones ácidas. Rápidamente se establece un equilibrio entre el SO_2 de la fase gaseosa y el azufre total disuelto (a.t.d.), de ahí que el azufre total disuelto en las gotas de las nubes o en las partículas de aerosol sea una función del pH y de la concentración del SO_2 gaseoso que existe en el ambiente.

La evidencia actual sugiere que dos agentes, el peróxido de hidrógeno y el ozono, podrían ser inicialmente responsables de la oxidación del a.t.d. hasta H_2SO_4 en el agua atmosférica. Este proceso es muy efectivo y relativamente independiente del pH.

Tanto el H_2O_2 como el O_3 tienen sus orígenes en las reacciones homogéneas de la fase gaseosa. La química de la producción de O_3 fue descrita anteriormente. Las principales fuentes de H_2O_2 en la Tropósfera son reacciones que involucran al radical hidroperoxi (HO_2). En la atmósfera contaminada existe una fuerte competencia entre el NO, el NO_2 , los aldehídos y otras especies para reaccionar con el HO, por lo que la eficiencia con que se genera H_2O_2 es una

compleja función de las concentraciones de éstas y de otras impurezas. En teoría, la cantidad de H_2O_2 formado en las reacciones de la fase gaseosa y absorbido en el agua de las nubes, es suficiente para oxidar a una gran parte del a.t.d. El ozono también es absorbido por el agua atmosférica, aún cuando su solubilidad es considerablemente menor que la del H_2O_2 .

Si las masas de aire que contienen H_2O_2 , O_3 y SO_2 se encuentran con aerosoles acuosos o nubes de lluvia, la oxidación del SO_2 en fase acuosa se ve favorecida debido a la alta tasa de conversión de esta reacción. Sin embargo, las condiciones óptimas para la formación de H_2O_2 y O_3 en la Tropósfera son diferentes, por lo que la importancia relativa de los dos oxidantes de fase acuosa dependerá de las condiciones de la fase gaseosa que determinen la tasa relativa de producción de los dos oxidantes. Por ejemplo, condiciones de bajas concentraciones de NO_x y los altos niveles de aldehídos e hidrocarburos favorecen la formación de H_2O_2 , mientras que altas concentraciones de NO_2 , hidrocarburos y aldehídos favorecen la formación de ozono.

Es poco lo que se sabe con relación a la química de la fase acuosa que da por resultado la formación de ácido nítrico en los aerosoles, el vapor atmosférico o la lluvia. Las evidencias teóricas y experimentales sugieren que el dinitropentóxido (N_2O_5) formado en las reacciones de la fase gaseosa, que se dan entre el ozono y el NO_2 , podría ser rápidamente recogido por las gotas de agua para formar ácido nítrico directamente.

La mayoría de las nubes se evaporan antes de que se realice la precipitación. Por consiguiente, los procesos ocurridos en las nubes pueden afectar la naturaleza química de los compuestos de azufre y de nitrógeno, y pueden contribuir a su redistribución en la Tropósfera.

DEPOSICION

4. Deposición seca

El término deposición seca se utiliza para denotar a una variedad de procesos por medio de los cuales los contaminantes (gases, partículas y aerosoles) pueden alcanzar la superficie de la Tierra, incluyendo también a los organismos y a los objetos inhertes que se localizan sobre el suelo (por ejemplo: vegetación y edificios). Los procesos se basan en las concentraciones de los contaminantes y en los fenómenos meteorológicos de microescala, así como, en las características de la superficie receptora.

Superficialmente la deposición seca parece carecer de importancia en comparación con otros aspectos relacionados con la emisión y la deposición. La deposición seca se realiza muy cerca de la superficie de la Tierra y es inactiva en la porción de la atmósfera en que las transformaciones químicas conducen a la formación de la deposición húmeda.

Sin embargo, es un hecho que la deposición seca no se conoce completamente. Existen varias razones para ello. La primera consiste en la dificultad tan grande que representa la medición de las tasas de deposición seca. La segunda razón es resultado de la complejidad de los procesos físicos que ocurren en la atmósfera; especialmente por el desconocimiento de las tasas de deposición para los aerosoles. La tercera razón de incertidumbre se localiza en las características del sustrato sobre el cual se depositan los materiales contaminantes.

Contraria a la visión superficial, que considera a la deposición seca como un fenómeno de superficies, en ocasiones se piensa que el fenómeno juega un papel importante sobre y dentro de los individuos receptores. Por ejemplo, se sabe que la apertura de los estomas de las hojas vegetales está influida por la deposición de gases como el SO_2 y el O_3 . Se ha detectado la reemisión de compuestos de azufre en la superficie de las plantas. Estos resultados hacen que el concepto de fenómeno de superficies sea cuestionado, con el consecuente aumento de las incertidumbres en el campo de la deposición seca.

Las dificultades antes expuestas se combinan para generar una serie de estimaciones diferentes que no permiten fijar la eficiencia de la deposición seca para la eliminación de contaminantes atmosféricos. Sin embargo, se considera que la deposición seca es tan efectiva como la deposición húmeda en la remoción de contaminantes. Casi el 30% de las emisiones producidas en el noreste de los Estados Unidos son depositadas por esta vía (deposición seca). Además, algunos estudios han obtenido valores que indican la deposición de algunos contaminantes en longitudes superiores a los 10 000 kilómetros, lo cual sugiere interacciones con los patrones de circulación a escala global. Estos estudios concuerdan con la observación de contaminantes depositados en Groenlandia y el Artico.

5. Deposición húmeda

El término deposición húmeda engloba a todos los procesos por los cuales los contaminantes atmosféricos son transportados hacia la superficie de la Tierra en alguna de las muchas formas de precipitación: lluvia, nieve y niebla. Es por ello que la deposición húmeda involucra al proceso de incorporación de los contaminantes en el agua de la atmósfera e incluye a las reacciones químicas de la fase acuosa, así como, el proceso de precipitación en sí. Los procesos químicos de la fase acuosa han sido descritos con anterioridad, por lo que ahora sólo se considera a los procesos físicos por medio de los cuales los contaminantes se incorporan a las gotas de la lluvia y después, la forma en que se precipitan.

Para tener una indicación de la importancia de la deposición húmeda, basta con observar un mapa en donde se aprecien las precipitaciones anuales para las diferentes zonas en particular. En las zonas con alta precipitación, la deposición húmeda es más importante que la deposición seca a medida que se alejan de la fuente de emisión.

6. Procesos de incorporación

Los procesos físicos a través de los cuales los contaminantes son incorporados a las gotas de agua y a otros hidrometeoros precipitantes, como cristales de hielo y copos de nieve, han sido el objeto de extensas investigaciones.

El proceso de incorporación más importante bajo la mayoría de las condiciones de un cielo nublado es indudablemente la nucleación. La nucleación es un proceso cinético en el cual las moléculas de agua de la fase gaseosa se condensan sobre una superficie adecuada. El polvo y las partículas contaminantes en forma de aerosol proveen tales superficies en el aire. Como resultado, se forma una nube de gotas (o cristales de hielo) que contiene a los contaminantes. Las gotas pueden crecer por el mismo proceso (condensación) o pueden perder agua por evaporación.

La tendencia del vapor de agua a condensarse en las partículas de aerosol se basa en las características de las partículas y en el grado de saturación del aire con el vapor de agua. En consecuencia, los aerosoles y otras partículas compiten por las moléculas de agua. Algunas moléculas capturan agua de manera eficiente, con lo que aumentan rápidamente de tamaño. Otras sólo obtendrán pequeñas cantidades de agua y algunas más, permanecerán esencialmente "secas". Además, algunas partículas funcionan solamente para la nucleación de cristales de hielo, mientras que otras son efectivas para la formación de agua líquida. La capacidad de nucleación de una partícula está determinada por su tamaño, naturaleza, características morfológicas y composición química. Las partículas ácidas que se forman en la atmósfera son químicamente competitivas para el vapor de agua y por ello, tienden a participar activamente como núcleos de condensación. Esta propiedad aumenta su predisposición a ser "arrastradas" en los inicios de una tormenta y tienen un efecto significativo sobre la naturaleza del proceso de formación de la lluvia ácida.

Los procesos de incorporación más comunes son los que se detallan a continuación.

La incorporación difusional, como su nombre lo indica, resulta de la difusión de la molécula o partícula contaminante hacia la superficie de una gota de agua. El proceso puede ser muy efectivo, tanto en elementos suspendidos en las nubes como en hidrometeoros precipitantes. Depende principalmente de la magnitud del coeficiente de difusión del contaminante; debido a que el coeficiente de difusión es inverso al tamaño de la partícula, este mecanismo es menos importante para partículas de gran tamaño. Con fines prácticos, la incorporación difusional puede ser ignorada para partículas con un diámetro superior a dos décimas de micrómetro.

El desplazamiento de una molécula o partícula hacia la superficie de una gota de agua por el proceso de difusión depende del gradiente de concentración del contaminante alrededor de la superficie. Esto es, si la nube puede captar fácilmente el flujo del contaminante (por ejemplo, que el contaminante sea altamente soluble en agua), producirá un despoblamiento del aire circundante, induciendo así una mayor amplitud del gradiente de concentración y estimulando una posterior difusión hacia las gotas de agua. Si por alguna razón (como en el caso de los gases de baja solubilidad) la gota no puede asimilar al contaminante, la difusión posterior se verá reprimida.

La incorporación inercial surge por el hecho de las partículas contaminantes y las gotas que han de "arrastrarles" se encuentran en constante movimiento y presentan un volumen y una masa finitos. El ejemplo más importante de la incorporación inercial es la impactación de aerosoles por hidrometeoros precipitantes. En este caso el hidrometeoro cae bajo la influencia de la fuerza de gravedad, chocando contra las partículas de aerosol y produciendo así la incorporación.

La efectividad de la impactación depende del tamaño de la partícula de aerosol y del hidrometeoro. Generalmente se requieren tamaños superiores a los 40 micrómetros. Es importante hacer notar la posible existencia de un mecanismo de dos pasos, en el cual un aerosol pequeño crece primero por medio de nucleación para formar una gota de mayor tamaño, y después, ésta es capturada por medio de incorporación inercial. Este proceso de dos pasos, llamado

acreción es un factor esencial en la formación de lluvia dentro de las nubes y se le ha postulado como un importante mecanismo en la depuración de contaminantes que se localizan por abajo de las nubes.

El segundo ejemplo de incorporación inercial es la colisión turbulenta. En este caso, las partículas y los elementos de depuración sometidas a un campo turbulento, chocan a causa de sus diferentes respuestas dinámicas a las fluctuaciones del aire local. Este mecanismo de depuración es considerado de segunda importancia y ha recibido poca atención en la literatura.

IMPACTO ECOLOGICO

Como ya se mencionó con anterioridad, el impacto ecológico es considerado aquí como el último de los tres eventos a considerar en este trabajo.

Para conocer y evaluar el impacto ambiental de la deposición ácida resulta útil distinguir entre receptores primarios, secundarios y terciarios, de acuerdo a la distancia que los separe del punto de contacto inicial entre los objetos y el material depositado. Los receptores primarios experimentan un contacto directo con los contaminantes atmosféricos. Ejemplos de ellos son las superficies de las estructuras y de los materiales, la folia externa de las coberturas vegetales y la superficie de los suelos que no están recubiertos de vegetación. Los receptores secundarios están sujetos a la influencia de la lluvia ácida sólo de manera indirecta y una vez que ésta ha entrado en contacto con otros materiales. Como ejemplos tenemos al follaje interno de las coberturas vegetales, los suelos recubiertos de vegetación y las capas que se localizan por abajo de la superficie en los suelos expuestos. Los receptores terciarios se localizan aún mas lejos del punto de contacto inicial. Los ejemplos comprenden al subsuelo, la roca madre, lagos y ríos que reciban la mayor parte de su agua a través de los escurrimientos de las cuencas, así como los sedimentos, tanto de lagos como de ríos.

El efecto ecológico de la deposición ácida depende de la composición química de los materiales depositados; la duración e intensidad de los episodios de deposición; las especies y características genéticas de los organismos receptores; su condición de receptor (primario, secundario o terciario), y el estado fisiológico, estructura y grado de madurez de tales organismos. Por ello, resulta virtualmente imposible hacer una generalización que comprenda a una serie de individuos con características diferentes. Sin embargo, se puede trazar un panorama amplio que permita

tener una idea de la importancia de la acidificación de las pre cipitaciones sobre la estructura y el funcionamiento de los eco sistemas.

Efectos sobre los sistemas acuáticos

El primer impacto ecológico que se hizo aparente fué el daño a los lagos y ríos. El ingreso de H_2SO_4 y HNO_3 en tales sistemas ha producido una serie de cambios importantes entre las comuni das biológicas que en ellos existen. La muerte de los peces es el efecto mas visible. En Escandinavia, los Estados Unidos de Nor teamérica y Canadá existen una gran cantidad de embalses en los que ya no hay peces. Todos estos países presentan lagos que se u bian en zonas geológicas constituidas por suelos de cuarzo y granito, los cuales poseén una muy baja capacidad de amortigua- ción al ingreso de H^+ en ellos. Dado que tales suelos no son muy reactivos en el proceso de intemperización, no existen cantida- des de calcio suficientes para mantener mas o menos constante su pH. Por ejemplo, en un estudio realizado por James Galloway en los montes Adirondack (EE.UU.) se encontró que el comportamiento de tres lagos, localizados en la misma zona a igual altura y re- cibiéndolo la misma cantidad y tipo de precipitación era diferente. Uno de los lagos registró valores de pH de 7.0, el segundo de 6.0 y el tercero de 4.8. Los tres lagos se encuentran a 35 kilómetros uno del otro; sin embargo, la constitución rocosa de los embalses era diferente.

En Suecia, el daño a las pesquerías ha sido muy grave; 2,500 lagos ubicados en la región sur presentan signos de grave acidi ficación y se sospecha que otros 6,500 ya comienzan a manifestar los primeros signos. Asimismo, en Noruega, el muestreo de 5,000 lagos ubicados en una extensión de 28 000 kilómetros cuadrados a- proximadamente, arrojó los siguientes resultados: 1,750 lagos no presentaron peces y otros 900 se consideraron como severamente a- fectados. En Canadá, se estima que el 20% de los lagos ubicados

en la zona de Ontario son demasiado ácidos para permitir el desarrollo de los organismos.

A medida que desciende el pH del agua, elementos como el aluminio (que normalmente se encuentra en proporciones muy bajas) aumentan su solubilidad y comienzan a hacerse más abundantes. Se piensa que la muerte de los peces de un sistema acuático está relacionada con la movilización del aluminio. Investigadores suecos determinaron que la desaparición de peces en sus embalses se debía a que el aluminio se deposita en las agallas, produciendo irritación. Para contrarrestar tal efecto, los peces producen una secreción mucosa que reviste al aluminio, pero que indirectamente produce la muerte del organismo al obstruir el intercambio de gases. Además, el propio aumento de la concentración del aluminio produce una reducción en la disponibilidad de fosfato para el fitoplancton y las plantas acuáticas que lo requieren, con lo que se genera una reducción en la productividad primaria y, en consecuencia, una alteración de las cadenas alimenticias del embalse. El aumento de la acidez induce una mayor solubilidad de los metales pesados como en zinc, plomo, cadmio y mercurio, que en ocasiones ingresan a los organismos por medio de las cadenas alimenticias y generan con ello una serie de trastornos.

Algunos otros investigadores han sugerido que la muerte de los peces se debe a una deficiencia de osmoregulación en sangre o a trastornos en el metabolismo del calcio que finalmente llevan a la alteración de los períodos de ovulación o la producción de huevos deficientes.

Se han estimado los niveles de pH a los cuales se detiene la reproducción en varias especies de peces. El límite inferior para el salmón es de 5 a 5.5, para la trucha café de 4.5 a 5, de 5.5 a 6 para la lobina y de 4.5 a 5 para la perca amarilla.

Los lagos y ríos acidificados presentan una clara tendencia a la retrogresión de sus comunidades. Comienzan a desaparecer las formas superiores de vida y se hacen más abundantes los organismos inferiores. Los hongos desplazan a las bacterias como reductores dominantes, desaparecen las algas clorofíceas y las plantas vasculares y son sustituidas por las briofitas (*Sphagnum sp.*).

Se dan procesos de eutroficación al verse reducida la tasa de

descomposición de la materia orgánica. Resultan afectadas tanto las poblaciones bénticas como las de la columna de agua. Los organismos ácido-resistentes proliferan rápidamente; se destacan los remeros, las pulgas de agua y larvas de jején.

Tanto las ranas como las salamandras son afectadas por el pH de las aguas en que habitan. En un estudio realizado en la Universidad de Cornell se expusieron embriones de salamandra de unos días de nacidos a un pH de 5.0. Tales embriones fueron incapaces de utilizar los nutrientes contenidos en el vitelo, mientras que el grupo de control, expuesto a un pH de 7 mostró un desarrollo normal. Posteriormente se expusieron individuos de dos semanas y media de edad a los mismos niveles de pH. Los organismos expuestos a pH de 5 mostraron abultamientos carnosos en la zona del corazón y en la parte posterior. Los individuos expuestos a pH 7 tuvieron un desarrollo normal.

En otros estudios se determinó el índice de mortalidad para los huevos de salamandra en diferentes valores de pH. Entre los huevos depositados en estanques con pH cercano al neutro, la mortalidad fué menor al 1%. Sin embargo, entre los individuos desarrollados a pH 6 la mortalidad fué superior al 60%.

La salamandra desova al inicio de la primavera, en estanques formados con agua de lluvia o de los deshielos. Tales lugares podrían tener altos índices de acidez, la cual podría ser la causante de trastornos en la función y diferenciación celular.

Efectos sobre los ecosistemas terrestres

Los ecosistemas terrestres son muy complejos, comprenden a una gran variedad de elementos vivos e inertes en continua interacción. Considerando que la lluvia ácida es sólo uno de los factores ambientales que influyen sobre ellos, su efecto puede ser cinérgico, antagónico o nulo para los diferentes sistemas. Se han reportado estudios que demuestran efectos sobre los campos de cultivo y los pastizales. Sin embargo, los bosques han sido el

principal sujeto de investigación en este campo.

El daño a los ecosistemas terrestres es mucho menos claro que el registrado en los ecosistemas acuáticos. Generalmente el aporte extraordinario de nitrógeno a dichos sistemas produce un efecto de fertilización que se manifiesta, sobre todo, en los sistemas con escasa disponibilidad de nutrientes. Sin embargo, tal efecto tiende a opacar a toda una serie de daños que se registran en este tipo de sistemas y de los cuales algunos se detallan a continuación.

Experimentos recientes indican que la deposición ácida puede dañar a las hojas y acelerar la erosión de las ceras cuticulares. Cuando el SO_2 depositado en forma seca alcanza a las hojas, se introduce por los estomas y reacciona en el parénquima para formar ácido sulfúrico o iones de sulfato. Los compuestos de azufre se translocan por la planta y al final son intercambiados con el suelo a través de las raíces, o son eluidos por las hojas. En ocasiones, el azufre es liberado por las hojas en forma de ácido sulfhídrico.

Las reacciones del sulfato con las membranas, enzimas y otros componentes celulares puede producir una alteración de las funciones metabólicas y cambios ultraestructurales en el interior de las células. Si la exposición es prolongada o los niveles son altos, se manifiesta una pérdida de moléculas de clorofila (clorosis) y la muerte de las células (necrosis). Tales efectos se pueden manifestar en una deficiente apertura de los estomas, una disminución en la tasa de fijación de CO_2 y por tanto, en una disminución de la tasa de actividad fotosintética. La acumulación gradual de sulfato en el tejido foliar podría alcanzar niveles tóxicos y conducir a un envejecimiento prematuro a la desfoliación. La disminución de la fotosíntesis altera el crecimiento del vegetal y la reproducción.

Uno de los efectos más importantes de la acidificación en los ecosistemas terrestres es la potencial movilización de elementos del suelo a causa del aumento de su solubilidad y la posible ingestión por los vegetales o la lixiviación hacia las aguas subterráneas. En muchos suelos, el aluminio existe sólo en cantidades limitadas —al igual que en los sistemas acuáticos. El aumento de

movilización de metales tiene los mismos resultados que en los ecosistemas acuáticos.

El ingreso de H^+ en un suelo, además de inducir la lixiviación de los nutrientes orgánicos y de los metales pesados, genera una disminución del pH de éste, convirtiéndolo en un medio no habitable para una gran diversidad de organismos.

La acidificación detiene el proceso de intemperización de los suelos. Si se considera que la gran mayoría de los nutrientes esenciales son ingeridos por las plantas a consecuencia de dicho proceso, resulta fácil comprender que la lluvia ácida llevará en algún momento a la paralización de la productividad primaria en los ecosistemas terrestres, como consecuencia de la pérdida de fertilidad.

También los individuos que habitan en la rizósfera se ven afectados. Los hongos y bacterias son los principales degradadores de los sistemas terrestres; tienen una participación muy importante en el reciclaje de los nutrientes y algunos, como los hongos que forman micorrizas son necesarios para la absorción de nutrientes por los vegetales. Las bacterias de los géneros *Rhizobium* y *Azotobacter* son importantes fijadoras de nitrógeno atmosférico. Aún cuando se carece de estudios específicos, se sospecha que todos estos organismos se ven seriamente afectados por la disminución del pH de los suelos. En algunas ocasiones, la alteración de tales comunidades de organismos produce una acumulación excesiva de materia orgánica parcialmente descompuesta, con la posible concentración de toxinas en el medio que inhiben el desarrollo de plantas superiores en dichas áreas.

Además, se han realizado investigaciones del efecto de la lluvia ácida sobre los sistemas terrestres, los cuales reportaron:

- . Modificación de las relaciones de los vegetales con organismos parásitos, simbioses y saprófitos.
- . Disminución de la germinación de semillas de coníferas.
- . Dificultad de los vegetales para obtener nitrógeno.
- . Reducción de la tasa de intercambio catiónico de los suelos.

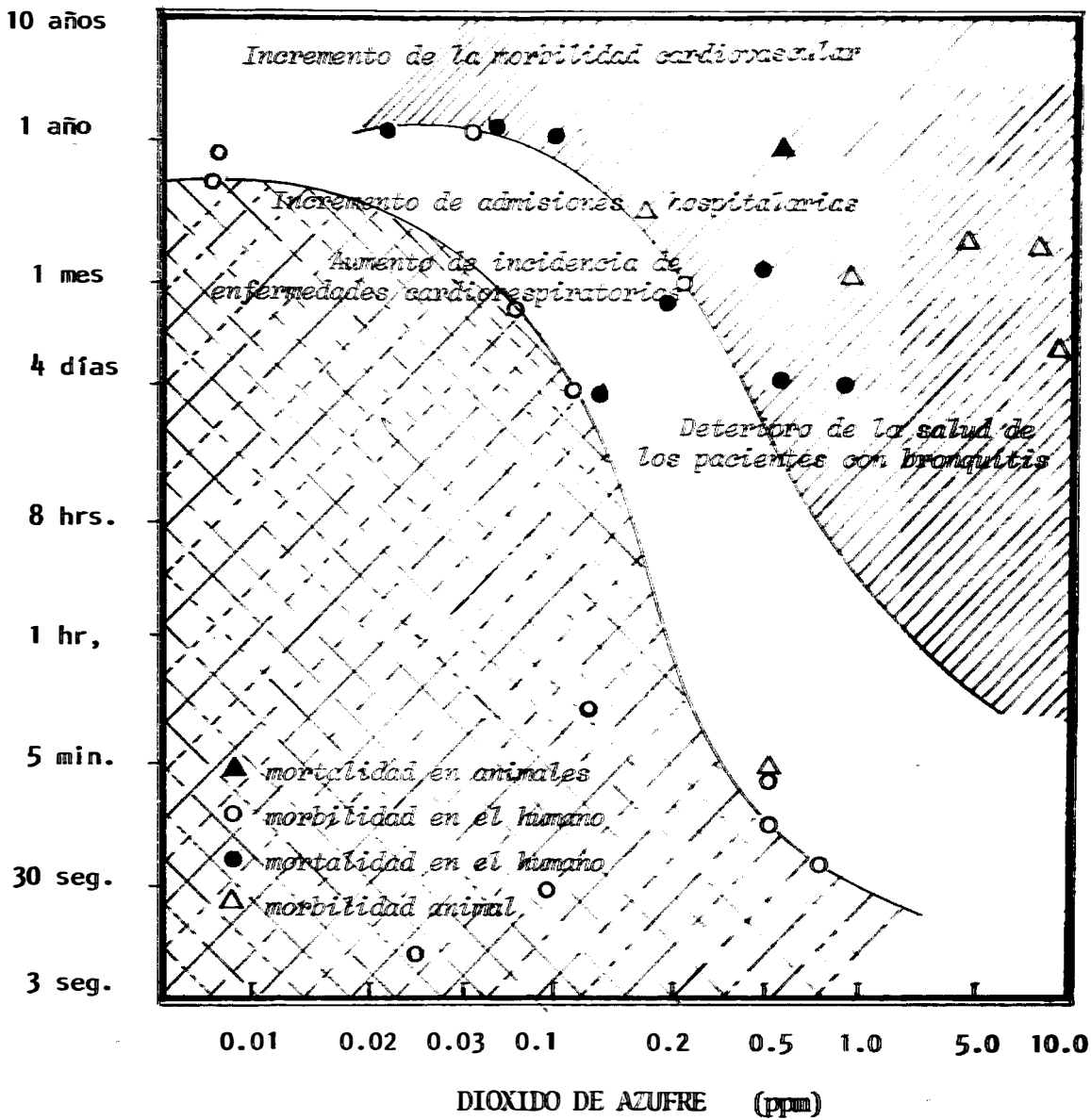
EFECTOS SOBRE LA SALUD HUMANA

Aún cuando no se ha evaluado el impacto directo de la lluvia ácida sobre la salud humana, se argumenta que actúa como un factor cinérgico para individuos con padecimientos respiratorios y cardiovasculares. Tal vez el efecto directo más representativo sea la ingestión de agua cargada con metales pesados. Sin embargo, no se han reportado casos extremos de intoxicación en humanos.

Por otra parte, existen estimaciones de los niveles a los cuales resultan tóxicos los principales agentes precursores de la lluvia ácida, estimaciones que nos permiten formar una imagen aproximada de la importancia del fenómeno. Como ejemplo, la figura 9 muestra los principales efectos del dióxido de azufre para diferentes concentraciones y tiempos de exposición.

No obstante que los NO_x son considerados de menor importancia como agentes de daño directo a la salud humana, su principal efecto es la participación en la formación del smog fotoquímico. Algunos investigadores han reportado que concentraciones relativamente altas de NO_2 en el ambiente puede causar fibrosis y enfisemas pulmonares; es decir, la formación de cicatrices y la distensión del tejido pulmonar. Dichas manifestaciones se presentan en personas expuestas regularmente a niveles de 10-40 partes por millón.

Si se desea conocer más al respecto, favor de consultar a Waldott, George L.; Health effects of environmental pollutants. The C.V. Mosby Company; St. Louis. 1973.



MUERTES POR ARRIBA DE LO NORMAL



DAÑOS SIGNIFICATIVOS A LA SALUD



SE SOSPECHAN DAÑOS A LA SALUD

EFFECTOS SOBRE LOS MATERIALES

Además del daño producido a los ecosistemas, la lluvia ácida es causa de preocupación en los países más afectados por el deterioro que ocasiona en los materiales. Se sabe que la lluvia ácida puede acelerar la corrosión de los metales ferrosos y de algunos no ferrosos, como los productos galvanizados de zinc. Así mismo, reduce la durabilidad de las pinturas, ataca monumentos historicos construídos con cantera, marmol y piedra caliza. Puede afectar al mortero, el concreto y los ladrillos. Deteriora las fibras textiles derivadas de la celulosa. Produce cambios de color en algunas fibras y perjudica la resistencia del papel y el cuero, siendo éste un problema muy grave en las bibliotecas y museos de Europa.

El costo económico de tales efectos alcanza varios miles de millones de dólares.

En las zonas afectadas de Suecia, la acidificación del agua de los embalses que es usada con fines domésticos, se ha constituido como un problema grave. Cuando dicha agua circula por las tuberías de conducción reacciona con los metales para formar sulfato de cobre. Las personas que se bañan con dicha agua experimentan la tinción del cabello, que va tomando una coloración verdosa. Ante esta situación, los individuos de esta zona deben herbir el agua durante 15 minutos por lo menos, antes de utilizarla en la preparación de los alimentos.

Durante la erupción del volcán "El Chichonal" en 1984, las ruinas Mayas de Palenque, Mex., fueron cubiertas con una capa de cenizas volcánicas. En la época de lluvias las cenizas reaccionaron con el agua para formar ácido sulfúrico, ocasionando la erosión de las pinturas aplicadas a las inscripciones de dicho centro ceremonial. En este caso, resulta claro que no se puede estimar el costo económico del efecto; sin embargo, se advierte que es de gran importancia el perjuicio histórico que esto representa.

ANALISIS DE LA INFORMACION

La lluvia ácida resulta de la creencia generalizada de que la biosfera es un gran depósito para los desperdicios del humano. Tradicionalmente se ha pensado que tanto los mares y lagos como los suelos y el aire tienen una capacidad infinita para aceptar los desechos que producimos en cantidades cada vez mayores.

Es posible que los efectos de tal conducta no se hicieran aparentes con anterioridad por la serie de interacciones de los elementos y los organismos que permiten metabolizar, transformar o "retirar de la circulación" algunos de los principales agentes de contaminación. Sin embargo, con el enorme desarrollo industrial que se ha alcanzado, la velocidad de producción de desechos supera ya en forma clara a la capacidad de la biosfera para eliminarlos o inactivarlos, por lo que los efectos se manifiestan cada vez con mayor claridad. No se pueden ignorar trastornos tan aparentes como la muerte masiva de los peces o la pérdida de la fertilidad de los suelos. Pasarlos por alto sería equivalente a colocar sobre nuestros ojos una venda como medida para la solución de los problemas. Ante esta situación, entre los países más afectados se nota una clara disposición a la investigación de las causas y efectos del fenómeno para poder plantear soluciones al respecto.

En general, se considera al fenómeno de la lluvia ácida como propio de los países con gran desarrollo industrial. Sin embargo, esto no resulta totalmente cierto. Si bien existe una gran correlación entre desarrollo industrial y efecto ecológico nocivo en muchos países, también hay casos en los que un país con escaso desarrollo industrial presenta un severo daño ecológico; o por el contrario, casos en los que países sumamente industrializados, tienen bajos índices de alteraciones en sus ecosistemas. Tales casos se deben principalmente a la influencia que ejerce el factor transporte en la diseminación de los elementos precursores y a la distribución geográfica de las tormentas. Estos resultados son más

comunes a nivel regional y local.

La asociación de fenómenos climatológicos con altos niveles de contaminantes agrava aún más la situación de las áreas afectadas. La posibilidad de que ocurra una disminución en el pH de la lluvia es mayor en las zonas donde se presentan con mayor frecuencia las inversiones térmicas. En la ciudad de México por ejemplo, en el año de 1985 se registraron más de 280 inversiones. La gran estabilidad de las capas de la atmósfera durante el proceso de inversión, retiene a los contaminantes en una área fija, concediéndoles más tiempo para reaccionar con la humedad del ambiente y en consecuencia causar una disminución en el pH de las lluvias. Los valles rodeados por montañas y las zonas costeras son los lugares en donde más frecuentemente se registran inversiones.

La biósfera es una entidad universal en la que no se pueden trazar límites político-geográficos, por ellos la responsabilidad de enfrentar al problema de la lluvia ácida debería ser compartido por todos los países. Sin embargo, la disposición de estos ante el problema no siempre es la misma. Algunos países por su desarrollo y ubicación geográfica se han convertido en exportadores netos de agentes contaminantes, mientras que otros reciben más contaminantes de los que emiten y son por tanto importadores netos; de ahí que sus responsabilidades ante el fenómeno no sean las mismas. Además, los recursos que pueden destinar los países a la investigación están en función de su desarrollo económico, por lo que los países de escasos recursos no pueden, aunque así lo deseen, destinar presupuestos al estudio de la lluvia ácida.

El conocimiento del daño ecológico nos permite evaluar la magnitud del problema. Existen alteraciones prácticamente en todos los niveles: desde el molecular hasta en biomas enteros, pasando por los individuos, poblaciones, comunidades y ecosistemas. Ante tal amplitud de elementos afectados, resulta clara la apremiente necesidad de expandir los estudios realizados en esta área. Tales estudios se han encaminado a los campos de la Limnología, Química Atmosférica y Agricultura. Se requieren también de más investigaciones en el campo de la Silvicultura, Microbio-

logía y Entomología, entre otras.

No obstante los estudios realizados, ha sido prácticamente im posible determinar con exactitud una relación de causa-efecto entre la emisión de los contaminantes precursores y el daño ecológico. Esto se explica por la serie de modificaciones que sufren los contaminantes en la atmósfera y por la gran complejidad que representa el estudio de ésta y de los ecosistemas.

Por lo anterior sería apropiado investigar tanto en campo como en el laboratorio la susceptibilidad de los sujetos a la exposi ción de los contaminantes en general y a los bajos niveles de pH, en particular. El propósito de dichas investigaciones sería el de poder determinar, a partir de los resultados obtenidos, los índi ces máximos de emisión de los gases precursores para cada una de las zonas en particular, con el fin de evitar el daño ecológico. Es lógico suponer que la solución de este problema se debe encon trar en el proceso de emisión, dado que los procesos subsecuentes son una consecuencia del primero. Mediante la reducción de las em isiones se limitaría el ingreso de los agentes precursores a la atmósfera y por tanto se verían reducidas en magnitud y frecuencia las alteraciones sobre los ecosistemas.

Además, es necesario destinar más tiempo y recursos al estudio de la deposición seca. Aunque aparentemente este proceso es poco importante, actualmente surgen evidencias que sugieren cada vez más una participación mucho más importante de la deposición seca en la determinación del impacto ecológico.

A pesar de que desde hace algunos años se han implementado me didas para la reducción de las emisiones de los SOx, y que con ello han permanecido relativamente constantes desde entonces, el hecho de ignorar a los óxidos de nitrógeno en los procesos de con trol de emisiones puede llevar a estos a ser los responsables de un porcentaje cada vez mayor en la acidificación de las presipita ciones. Sin embargo, considerando que la mayoría de los ecosistemas afectados tiende a metabolizar más fácilmente el ingreso de nitrógeno en ellos, posiblemente tal efecto pudiera ser el de una mayor fertilización temporal al principio, ocultando con ello a toda una serie de alteraciones de tal magnitud que pudieran ser i rreversibles hacia el momento de ser apreciadas. Es por ello doble

mente riesgoso dejar que los óxidos de nitrógeno se sigan liberando hacia la atmósfera sin ningún control.

Las acciones emprendidas para la restauración de los ecosistemas han sido sólo paliativos. Por ejemplo, la aplicación de cal en los lagos neutraliza la acidez y permite la resiembra de peces. A pesar de ello, dicha neutralización será sólo temporal si no se restringe el posterior ingreso de los elementos que inducen a la acidificación, mediante el control de las emisiones de contaminantes atmosféricos.

Parece ser que el conocimiento del fenómeno en su totalidad está aún muy lejano. Se requiere de la vinculación de los procesos industriales a los procesos de conservación ecológica. En tanto no se adopte una verdadera conciencia ecológica, seguiremos actuando sobre la biósfera como si fuésemos los elegidos de la creación y seguiremos considerando que todos los demás organismos existen sólo para hacer con ellos lo que nos plazca.

APENDICE

Revisión Histórica de la Lluvia Acida

Hace algunos años, el término lluvia ácida era utilizado sólo por los científicos de ciertas áreas, como la Ecología y la Química Atmosférica. Recientemente se le ha reconocido como un problema de alcance mundial y que ha estimulado la investigación profunda para conocer sus causas y efectos. Ahora, mediante su estudio se pretende conocer la influencia de la actividad humana sobre los ciclos biogeoquímicos de los elementos y sobre el clima mundial.

En este apartado se hace una recopilación cronológica de los principales eventos e investigaciones que han convertido al problema de la lluvia ácida en un aspecto de interés colectivo y generalizado.

La descripción de las investigaciones se expresa a continuación, considerando la fecha de su publicación, el nombre del o de los investigadores, el país donde se realizó la investigación y sus contribuciones principales.

1661-1662 Evelyn - Graunt; Inglaterra

Notaron la influencia de las emisiones industriales sobre la salud de los humanos y de los vegetales, junto con el intercambio transfronterizo de los contaminantes entre Francia e Inglaterra. Sugirieron medidas de control, como el establecimiento de las industrias fuera de las ciudades y el uso de chimeneas mas altas para diseminar el humo a "partes mas distantes".

1727 Hales; Inglaterra

Observó que la lluvia y el rocío "contienen sales, azufre, etc. porque el aire esta lleno de particulas ácidas y sulfurosas..."

- 1734 Lineé; Suecia
Descubrió una fundidora de más de 500 años de antigüedad, localizada en Falun, Suecia: "...sentimos un fuerte olor de azufre... aumentando hacia el oeste de la ciudad... un venenoso, punzante humo de azufre envenenaba el aire en todos los alrededores... corroe la hierba, de ahí que no crezca ninguna hierba por ese lugar"
- 1852 Smith; Inglaterra
Analizó la química de la lluvia cerca de Manchester, Inglaterra y notó que existían zonas concéntricas con tres tipos de aire —uno con carbonato de amonio que se localizaba en los campos lejanos, otro con sulfuro de amonio en los suburbios y el tercero con ácido sulfúrico en la ciudad, que causaba decoloración en las telas y corrosión de los metales.
- 1872 Smith; Inglaterra
En una extraordinaria publicación titulada "Aire y Lluvia: Los inicios de la Climatología Química", Smith es el primero en utilizar el término **Lluvia Ácida** y enuncia muchas ideas que ahora se consideran parte del fenómeno. Tales ideas incluyen a la variación regional en la química de la precipitación, al estar influida por factores como la combustión del carbón, la descomposición de la materia orgánica, la dirección del viento,, la proximidad del mar, la cantidad de lluvia, etc. Propuso experimentos de campo y diseñó métodos para la colecta y el análisis de las precipitaciones. Notó el daño a las plantas y a los materiales, y la deposición atmosférica de arsénico, cobre y otros metales, en las regiones industriales.
- 1881 Brögger; Noruega
Observó smudsig snesfeld (nieve sucia) en Noruega y lo atribuyó a una gran ciudad o a un complejo industrial británico.
- 1909 Sörensén; Dinamarca
Desarrolló la escala de pH para medir la acidez de soluciones acuosas.

- 1911 Crowther y Ruston; Inglaterra
Demostraron que el valor de la acidez aumentaba en el centro de Leeds, Inglaterra; asociaron tal acidez con la combustión del carbón y mostraron que tanto la lluvia natural como las soluciones diluidas de ácido sulfúrico inhibían el crecimiento de las plantas, la germinación de las semillas, la amonificación, nitrificación y la fijación del nitrógeno atmosférico en los suelos.
- 1921 Dahl; Noruega
Reconoció la relación entre la acidez de las aguas superficiales y la producción de truchas.
- 1922 Atkins; Inglaterra
Midió la alcalinidad de las aguas superficiales y notó una relación entre alcalinidad y productividad biológica.
- 1926 Sunde; Noruega
Demostró la importancia de adicionar cal en las aguas de los embalses piscícolas.
- 1939 Erichsen - Jones; Suecia
Demostraron la relación entre acidez y toxicidad del aluminio para los peces.
- 1939 Bottini; Italia
Detectó ácido clorhídrico en una lluvia cercana al volcán Vesubio, demostrando así la existencia de fuentes naturales de ácidos fuertes que participan en el fenómeno.
- 1948 Egnér; Suecia
Inició el primer registro a gran escala de la química de las lluvias en Europa.
- 1950-1955 Eriksson; Suecia
Enunció una teoría general de la circulación biogeoquímica de la materia a través de la atmósfera.
Extendió el monitoreo regional iniciado por Egnér hasta abarcar toda Europa. La Red Europea de Química del Aire, fundada por Eriksson, ha generado la información continua de la química de las lluvias por más de 30 años.

- 1953-1958 Tamm; Suecia
Demostró la gran dependencia de los musgos para las fuentes atmosféricas de nutrientes, especialmente del nitrógeno. Posteriormente extendió este concepto a todos los árboles forestales.
- 1954-1961 Gorham; Inglaterra
Demostró la gran influencia de la lluvia ácida sobre la intemperización de los suelos y sobre la química de los lagos, ríos y suelos.
Demostró que el ácido clorhídrico formado en la combustión del carbón rico en cloro, predomina en la lluvia urbana, mientras que el ácido sulfúrico predomina en la precipitación rural.
Estableció que la acidez de las lluvias afecta la alcalinidad y la capacidad de amortiguación de los lagos y demás cuerpos de agua.
Estableció que la incidencia de bronquitis en los humanos puede estar relacionada con la acidez de las precipitaciones.
- 1958-1959 Jungle y Werby, Jordan y col.; EE.UU.
Hicieron el primer estudio regional de la química de la precipitación en los Estados Unidos de Norteamérica y notaron la importancia del azufre atmosférico como una fente de nutrientes para los cultivos.
- 1959 Dannevig; Noruega
Reconoció la relación entre lluvia ácida, acidez de los cuerpos de agua y desaparición de los peces.
- 1962 Carson; EE.UU.
Simuló una catástrofe ecológica mundial al publicar "Primavera Silenciosa", en el cual utilizó el término "lluvia venenosa" para describir su preocupación por el transporte y la deposición de contaminantes atmosféricos.
- 1967-1968 Odén; Suecia
Registró el cambio de la acidez de la lluvia en Europa y lo consideró como un fenómeno regional y temporal.

Utilizó el análisis de trayectorias de masas de aire para demostrar que la acidez de la lluvia en Escandinavia se debía principalmente a las emisiones de azufre producidas en Inglaterra y Europa Central.

Demostó el aumento de la acidez de los ríos en Escandinavia.

Describió la ingestión biológica y el intercambio de iones, procesos que al unirse con la lluvia ácida, aceleran la acidificación natural de los suelos.

Postuló que la lluvia ácida conduciría al desplazamiento de cationes nutrientes, reducción de la fijación de nitrógeno y a la liberación de metales pesados (especialmente mercurio), los cuales podrían dañar tanto a las aguas superficiales como a las subterráneas.

Postuló a la acidez de las lluvias como una causa probable de la muerte de los peces, el empobrecimiento de los suelos forestales, la disminución del crecimiento forestal, el aumento de las enfermedades vegetales y una acelerada corosión de los metales, además del daño a otros materiales.

1970

Odén y Ahl; Suecia

Descubrieron que los contaminantes solubles acumulados en las las capas de nieve eran liberados subitamente con el primer deshielo de la primavera.

1971-1972

Rhode y col.; Suecia

Desarrolló el primer análisis cuantitativo del transporte de azufre a largas distancias, en Europa. Mostró que las distancias de transporte con frecuencia exceden los mil kilómetros, que el tiempo de residencia del azufre en el aire es de 2-4 días y que los campos de deposición se localizan hacia el noreste de las fuentes de emisión.

1972

Jonhson y Sundberg; Suecia

Establecieron un modelo experimental para evaluar la hipótesis de que la lluvia ácida estaba deteniendo el crecimiento de los bosques en Suecia.

- 1972 Likens y col.; EE.UU.
 Discutió la distribución regional de la lluvia ácida y su significancia para los ecosistemas acuáticos y terrestres en Norteamérica (Canadá y Estados Unidos).
 Indicó que el ácido nítrico que resulta de las transformaciones de los NOx, se suma a la acidez de las precipitaciones en el Este de los Estados Unidos.
- 1972-1980 Munshower, Huckabee, Tyler y Blaylock
 Varios países.
 Mostraron que los hongos y musgos, y algunos vegetales de los bosques acumulan metales pesados, especialmente cadmio y plomo. Encontraron que los animales silvestres que se alimentan de estos organismos acumulan también a dichos metales, por lo que en ocasiones ponen en peligro la salud humana.
- 1973-1977 Ottar; Noruega.
 Dirigió el estudio de la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo, en el cual se evaluó el transporte a grandes distancias de los contaminantes atmosféricos en toda Europa.
- 1974 Grahn y col.; Suecia.
 Descubrieron que *Sphagnum sp.* ("musgo de la turba") invade los lagos y ríos acidificados, induciendo a una oligotrofiación acelerada de los cuerpos de agua.
- 1974 Shiriner; EE.UU.
 Demostró que una lluvia ácida simulada (con ácido sulfúrico) puede acelerar la corrosión de las ceras cuticulares de las hojas de los vegetales, inhibir la nodulación de las plantas leguminosas y alterar las relaciones huésped-parásito en los vegetales.
- 1976 Schfield; EE.UU.
 Reportó los resultados de su muestreo de lagos en las montañas Adirondack del estado de Nueva York. En ellos, se apreciaba un descenso en las poblaciones de los peces, junto con la acidificación de los lagos.

1979

Galloway; Canadá

Desarrolló un nuevo muestreo de las emisiones de azufre en Norteamérica y mostró que el azufre atmosférico de esta región es predominantemente de origen humano (casi el 95%) y que una parte importante de tales emisiones (un 30%) se depositan fuera de esta región.

1980

Abrahamsen; Noruega

Resumió muchos años de investigación acerca del efecto de la lluvia ácida sobre los bosques y concluyó que el efecto de fertilización, especialmente por la deposición de nitrógeno atmosférico, tiende a opacar la movilización de metales y otros efectos detrimentales. También enfatizó que los efectos negativos de la deposición atmosférica sobre los árboles es más probable cuando la deficiencia de nutrientes se vé estimulada por la deposición ácida.

1980

Drabløis y Tollan; EE.UU.

Establecieron un Estudio Integrado de la Acidificación de las Aguas de los Lagos (ILWAS, por sus siglas en inglés), para determinar de manera detallada los valores de H^+ , SO_4 , NH_4^+ , NO_3 , Cl^- y otros iones en tres lagos con diferentes grados de acidificación.

1981

Rodhe, Crutzen y Vanderpol; Suecia

Desarrollaron un modelo fotoquímico para la formación de ácido sulfúrico y ácido nítrico durante el transporte a largas distancias. El modelo muestra que la transformación de los dos ácidos son procesos acoplados y que sus tasas de transformación y distancias de transporte están influidas por la existencia de hidrocarburos y agentes oxidantes en la atmósfera.

BIBLIOGRAFIA

1. Aerosoles, Reporte Técnico. Instituto SEDUE, 1984, 19 pp.
2. Bolea, Estevan. Evaluación del Impacto Ambiental. MAPFRE, Madrid, 1984, p. 139-181.
3. Cowling, Ellis and Linthurst, Rick. The Acid Precipitation Phenomenon and its Ecological Consequences. *BioScience*, vol. 31, No. 9, October 1981.
4. Cowling, Ellis. Acid Precipitation in Historical Perspective. *Environmental Science Technology*. Vol. 16, No. 2, 1982.
5. Chovin, Paul y Roussel, André. La Polución Atmosférica. *Oikos* Tau. Barcelona, 1970.
6. Cámara de Diputados LII Legislatura. Reunión Regional sobre Legislación Ambiental. Material Nacional. R 13-17. No. 13.
7. Galloway, James and Cowling, Ellis. The Effects of Precipitation on Aquatic and Terrestrial Ecosystems: A Proposed Precipitation Chemistry Network. *Journal of the Air Pollution Control Association*. Vol. 28, No. 3, March 1978.
8. Glass, Norman R. Environmental Effects of Increased Coal Utilization: Ecological Effects of Gaseous Emissions from Coal Combustion. *Environmental Health Perspectives*. Vol. 33, 1979.
9. Likens, Gene y col. "Acid Rain". *Scientific American*, October, 1979.
10. Likens, Gene, Bormann, Herbert and Johnson, Noye. Acid Rain Environment, Vol. 14, No. 2, 1972.
11. ONU. Programa del Medio Ambiente. Naerobi, 1983, pp. 38.
12. Seinfeld, John. Contaminación Atmosférica: Fundamentos Físicos y Químicos. Madrid, 1978. 558 pp.

13. Torrens, Ian. El Problema de la Lluvia Acida. Contextos, Año II, No. 35, México, 1984. Traducción del original aparecido en The OECD Observer, No. 129, Vol. 6, 1984.
14. USDA Forest Service. "Proceedings of the First International Symposium on Acid Precipitation and The Forest Ecosystem. General Technical Report NE 23, Northeastern Forest Experiment Station, Upper Darby, PA, 1976.
15. Water, Air and Soil Pollution. Teknekron Research Inc., Vol. 6, 1976.
16. Wisniewsky, Joe and Kinsman, John. An Overview of Acid Rain Monitoring Activities in North America. Bulletin American Meteorological Society. Vol. 63, No. 6, 1982.



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
Facultad de Ciencias

Expediente

413/86

Número

Sr. Ricardo Guitérrez Padilla
P r e s e n t e . -

Manifiesto a usted que con esta fecha ha sido aprobado el -
tema de Tesis "EL IMPACTO ECOLOGICO DE LA LLUVIA ACIDA. Un acercamiento
a sus bases teóricas" para obtener la Licenciatura en Biología con Orien-
tación Biomédica.


Al mismo tiempo informo a usted que ha sido aceptado como -
Director de dicha Tesis el Biol. Eduardo Avalos Guzmán.



FACULTAD DE CIENCIAS

A T E N T A M E N T E
"PIENSA Y TRABAJA"
Guadalajara, Jal., Abril 29 de 1986

El Director


Ing. Edmundo Ponce Adame.

El Secretario

Arq. Mario Patricio Castillo Paredes.

c.c.p. El Biol. Eduardo Avalos Guzmán, Director de Tesis.-Pte.
c.c.p. El expediente d l alumno.

. 'mjsd

Dr. CARLOS ASTENGO OSUNA
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
P R E S E N T E

Por este conducto me permito informar a usted que, una vez revisada y corregida la Tesis intitulada "EL IMPACTO ECOLOGICO DE LA LLUVIA ACIDA. Un acercamiento a sus bases teóricas" presentada por el pasante de la Licenciatura en Biología Ricardo Gutiérrez Padilla, no tengo ningún inconveniente en que esta sea impresa, y solicito a usted atentamente realizar ante las autoridades correspondientes los trámites para efectuar el exámen respectivo.

Sin otro particular, quedo de usted como su atento amigo y seguro servidor.

ATENTAMENTE



BIOL. EDUARDO AVALOS GUZMAN
DIRECTOR DE TESIS