



Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci). EISSN: 2215-3896.

Julio-Diciembre, 1984. Vol 5-6(1): 33-48.

DOI: [http://dx.doi.org/10.15359/rca.5\\_6-1.3](http://dx.doi.org/10.15359/rca.5_6-1.3)

URL: [www.revistas.una.ac.cr/ambientales](http://www.revistas.una.ac.cr/ambientales)

EMAIL: [revista.ambientales@una.cr](mailto:revista.ambientales@una.cr)

María del Rosario Alfaro

# Revista de CIENCIAS AMBIENTALES Tropical Journal of Environmental Sciences



## Acidificación del medio

Acidification of the medium

*María del Rosario Alfaro*



Los artículos publicados se distribuyen bajo una Creative Commons Reconocimiento al autor-No comercial-Compartir igual 4.0 Internacional (CC BY NC SA 4.0 Internacional) basada en una obra en <http://www.revistas.una.ac.cr/ambientales>, lo que implica la posibilidad de que los lectores puedan de forma gratuita descargar, almacenar, copiar y distribuir la versión final aprobada y publicada (*post print*) del artículo, siempre y cuando se realice sin fines comerciales y se mencione la fuente y autoría de la obra.

## ACIDIFICACION DEL MEDIO Ma. DEL ROSARIO ALFARO\*

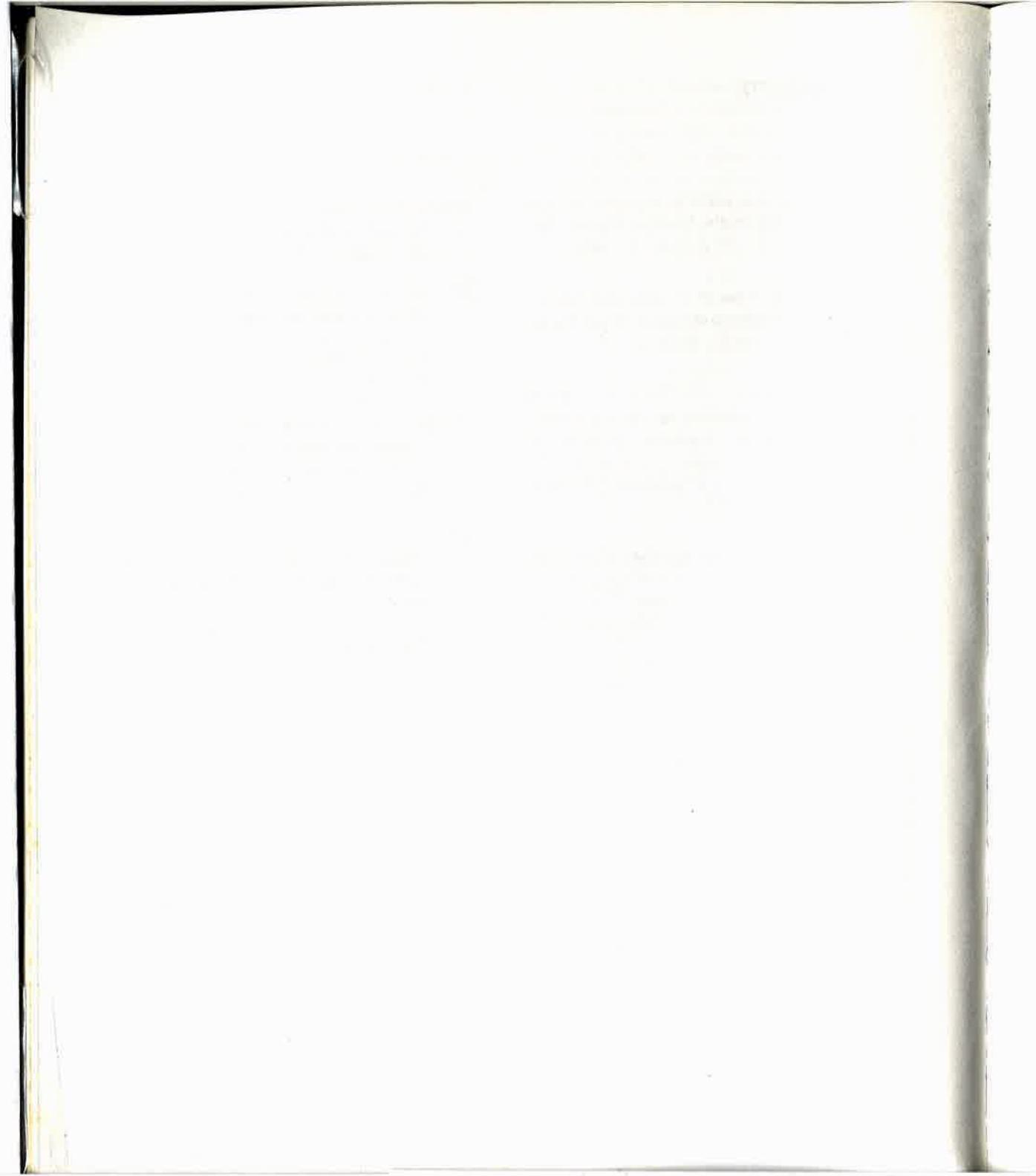
La lluvia ácida es un problema sobre el cual no existen estudios preliminares en Costa Rica\*\*. Sin embargo, en Europa, Estados Unidos y Canadá se cuenta con más de una década de estudio sobre el tema; a nivel mundial actualmente se reconoce que la lluvia ácida es uno de los problemas más serios de contaminación de ecosistemas terrestres y acuáticos, que por la naturaleza de dispersión del mismo no se suscribe al área circundante de la fuente de emisión sino que va más allá de ésta.

En condiciones naturales, la atmósfera es ligeramente ácida debido a la forma-

---

\* Profesora de la Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica.

\*\* Investigadora principal, Proyecto La lluvia ácida de origen volcánico y su impacto en los ecosistemas de los volcanes Poás y Arenal. Investigación conjunta de las escuelas de Ciencias Ambientales y Ciencias Geográficas. Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica .



## ACIDIFICACION DEL MEDIO

### Ma. DEL ROSARIO ALFARO\*

La lluvia ácida es un problema sobre el cual no existen estudios preliminares en Costa Rica\*\*. Sin embargo, en Europa, Estados Unidos y Canadá se cuenta con más de una década de estudio sobre el tema; a nivel mundial actualmente se reconoce que la lluvia ácida es uno de los problemas más serios de contaminación de ecosistemas terrestres y acuáticos, que por la naturaleza de dispersión del mismo no se suscribe al área circundante de la fuente de emisión sino que va más allá de ésta.

En condiciones naturales, la atmósfera es ligeramente ácida debido a la forma-

---

\* Profesora de la Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica.

\*\* Investigadora principal, Proyecto La lluvia ácida de origen volcánico y su impacto en los ecosistemas de los volcanes Poás y Arenal. Investigación conjunta de las escuelas de Ciencias Ambientales y Ciencias Geográficas. Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica .

ción de ácido carbónico ( $H_2CO_3$ , producto de la reacción entre  $CO_2$  y  $H_2O$ ), pero el grado de acidez se ve alterado según las partículas que por acciones antropogénicas son emitidas a la atmósfera.

En una atmósfera no contaminada se considera que el límite más bajo de precipitación ácida es de pH 5-6 (Galloway, 1979).

En este artículo se discutirán las causas de la precipitación ácida, los problemas atmosféricos, las relaciones entre deposición-suelo y agua, y su impacto en la vegetación.

### **Precipitación ácida**

La precipitación es uno de los procesos por los cuales son transferidas sustancias de la atmósfera a los ecosistemas acuáticos y terrestres. Los otros procesos son: deposición seca, impactación de aerosoles y absorción de gases.

Se hipotetiza generalmente que el pH atmosférico más bajo en áreas naturales es de 5,6 (Galloway, 1979). Sin embargo, se encuentran también áreas que producen ácidos fuertes o precursores de ácidos debido a procesos naturales, tales como actividad fumarólica y expansión de suelos anaeróbicos o agregados de sedimentos en el agua (Barret y Benedict, 1970; Segura et ál., 1983).

Algunas áreas naturales remotas presentan precipitaciones ácidas cuyo pH oscila entre 4,6 y 5,7, precipitaciones que tienen su origen en actividades industriales alejadas y que por los movimientos de las masas de aire se desplazan a esas áreas (Galloway, 1979).

## **PROCESOS ATMOSFERICOS QUE INFLUYEN EN LA PRECIPITACION ACIDA**

La precipitación ácida depende fundamentalmente de las partículas contaminantes que de una u otra forma están en la atmósfera, influyen también las corrientes de aire, la temperatura, la humedad y el tipo de emisiones.

### **a. El movimiento de las masas de aire**

Los contaminantes del aire, ya sean gases, partículas o aerosoles son transportados por las corrientes de aire. A su vez, los movimientos del aire se ven influenciados por numerosos factores meteorológicos, tales como velocidad y dirección del viento, la temperatura, la humedad relativa y la precipitación. También influyen las características físicas y geográficas del área (Tattar, 1978; Alfaro, 1983). El conocimiento de

estos factores es fundamental para el análisis, estudio y predicción de los daños que producen la contaminación en el ambiente, ya que modifican la concentración y, en algunos casos, la estructura química de los contaminantes atmosféricos (Alfaro, 1983).

Según el estudio de la transformación del dióxido de azufre a ácido sulfúrico, se tiene que el  $\text{SO}_2$  es producto de la combustión de fósiles con alto contenido de azufre. Los óxidos de azufre se transforman en ácidos,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . En ciertas regiones el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  es el principal componente de la lluvia ácida. Los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$ ) se depositan mediante precipitación seca, y cuando se convierten en ácidos también se depositan mediante la lluvia ácida. Las transformaciones de  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$  en la atmósfera se deben a un proceso fotoquímico que da como resultado nitratos (sal corrosiva) o ácido nítrico ( $\text{H}_2\text{NO}_3$ ) (Swedish Ministry of Agriculture, 1983).

#### **b. La temperatura del aire**

La temperatura del aire es otro factor que afecta la conducta de los contaminantes atmosféricos, ya que determina el movimiento vertical de los contaminantes y modifica la velocidad con la cual estos elementos reaccionan químicamente con las plantas u otros cuerpos susceptibles en contacto. Bajo altas temperaturas se producen reacciones más rápidas y se acelera el intercambio gaseoso a través de los estomas. La oxidación fotoquímica se incrementa a altas temperaturas (Tattar, 1978; Jones et ál., 1976).

#### **c. La humedad**

También la humedad en el aire afecta la conducta de partículas contaminantes, pues la reacción química con el agua hace que los materiales sean más fitotóxicos. Las partículas pequeñas generalmente son hidrosκόpicas y absorben la humedad de la atmósfera, factor que es fundamental en el caso de la vegetación, ya que la alta humedad atmosférica favorece la mayoría de las reacciones químicas. Esto produce un serio efecto en la vegetación, ya que los estomas se abren precisamente en condiciones de humedad relativa alta y, se cierran durante condiciones de humedad relativa baja (EPA, 1973; Tattar, 1978; Alfaro, 1983).

#### **d. La visibilidad**

El ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), formado de la oxidación de  $\text{SO}_2$ , no puede existir en la fase gaseosa pero aparece en forma de aerosoles o disuelto en las gotas de agua de las nubes. Cuando las gotas se evaporan, el sulfato aparece nuevamente como aerosol. El análisis químico de partículas de aerosol ha demostrado que en las regiones in-

dustrializadas la masa de aerosol está constituida de  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{NH}_4^+$ , los cuales presentan partículas de un radio de  $0.1-1\mu\text{m}$ , tamaño que es más efectivo para la disminución de la luz (Rodhe, 1983; Husar y Galloway, 1983). Este fenómeno es considerado como el responsable de la disminución en zonas industriales o de gran tráfico automovilístico.

#### e. Emisiones

La contaminación de la atmósfera en áreas industrializadas se debe a la emisión de gases, partículas, cenizas o vapores que son producto de actividades antropógenas, a las cuales debe sumarse las emisiones naturales. Entre los principales contaminantes atmosféricos se tienen: el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). En las tablas 1 y 2 se presentan los principales contaminantes.

Las emisiones de amoníaco influyen también en la acidificación; en áreas de Europa y Norteamérica son los animales domésticos y los agroquímicos, los que se supone constituyen fuentes principales en el proceso de acidificación, con emisiones comparables a las de  $\text{NO}_x$  (Swedish Ministry of Agriculture, 1983).

#### d. Precipitación-composición

La precipitación es el proceso primario que permite el ciclaje del agua atmosférica hacia el subsuelo y la transferencia de sustancias de la atmósfera a los ecosistemas acuáticos y terrestres. La precipitación como tal involucra la condensación del agua o vapor de agua y, posteriormente, la deposición gravitacional. Vale indicar que las propiedades físicas del agua (alta constante dieléctrica y capacidad dipolar) permiten que la precipitación atrape fácilmente ciertos constituyentes atmosféricos, como gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ), aerosoles ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) y partículas ( $\text{CaCO}_3$ , silicatos). De este acarreo de sustancias, partículas o gases, dependerá la composición química de la precipitación, la cual varía de una región a otra (Galloway y Cowling, 1978). La composición de la precipitación es fundamental para determinar sus efectos sobre los ecosistemas acuáticos y terrestres.

El impacto de la precipitación ácida sobre un ecosistema varía según el tipo de contaminante y el medio receptor; la sensibilidad del ecosistema a las sustancias contaminantes es clave en el efecto que produce sobre el ecosistema.

Los ecosistemas acuáticos reciben el suministro de elementos químicos por dos fuentes:

#### a. precipitación directa (lluvia); y

**TABLA 1**

**PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL AIRE**

<b>GASES</b>	<b>VAPORES</b>	<b>POLVO O CENIZAS</b>	<b>GASES</b>	<b>HUMOS</b>	<b>VAPOR FINO</b>
Gases ácidos	Alcoholes	Alumina	Halógenos metálicos	Cenizas	Acidos crómicos
Monóxido de carbono	Esteres	Fluoruro de Ca.	Oxidos metálicos	Compuestos orgánicos	Fosfórico
Cloruro de hidrógeno	Hidrocarbomos	Cemento	Tetra fluo- ruro de silicón	Hollín	Sulfúrico
Sulfuro de hidrógeno	Cetomas	Carbón			Químicos
Fluoruro de hidrógeno	Mercantenos	Caliza			Orgánicos
Oxido de nitrógeno		Metal			Aceites
Dióxido de azufre		Minerales			Rocío
Gases alcalinos		Rocas			
Amonio		Maderas			

Tomado de: Rapier y Roe, 1968.

TABLA 2

## FUENTES PRINCIPALES DE CONTAMINACION DEL AIRE\*

CLASES	AEROSOLES	GASES Y VAPORES	PERDIDAS TÍPICAS
Procesos de combustión	Humos-cenizas	NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO, ácidos orgánicos	0,05-1,5 % del peso del combustible
Motores estacionarios	Humos-vapor	NO <sub>2</sub> , Co, ácidos orgánicos	4-7 % del peso del combustible (hidrocarburos)
Operaciones petroleras	Cenizas-vapores	SO <sub>2</sub> , CoNH <sub>3</sub> , hidrocarburos, mercaptanos, H <sub>2</sub> S	0,25-1,5 % del peso de material procesado
Procesos químicos	Cenizas-vapores, humos-rocío	Procesos dependientes (SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , ácidos orgánicos, solventes, fragancias, sulfuros)	0,5-2 % del peso del material procesado
Procesos piro y electrometalúrgicos	Cenizas-vapores	SO <sub>2</sub> , CO, fluoruros orgánicos	0,5-2 % del peso del material procesado
Procesos minerales	Cenizas-vapores	Procesos dependientes (SO <sub>2</sub> , CO, fluoruros orgánicos)	1,3 % del peso del material procesado
Operaciones de preparación de comidas	Cenizas-vapores	Materiales o fragancias	0,25-1 % del peso del material procesado

\* Traducción al español de Rose et ál., Prevention and Control of Air Pollution by Process Changes and Equipment, W.H.O Rept. Air Pollution, Monograph Series 46-307-343, como aparece en: Pascal M. Raier y Kenneth A. Roe. Environmental Control en: Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers, 8ta. ed., T. Baumeister, Eugene A. Avallone y Theodore Baumeister. Mc. Graw-Hill Book Company. 1978.

- b. desagüe o arrastre de aguas.

La magnitud del suministro de contaminantes a un ecosistema acuático es relativa, y depende básicamente del área o volumen del río, arroyo u otra fuente de agua y de la constitución del suelo.

El suministro de elementos químicos a un ecosistema terrestre, ocurre por dos medios:

- a. suministro meteorológico (precipitación seca o precipitación húmeda); y  
b. por la liberación de minerales primarios y secundarios como producto de la lixiviación del sustrato.

Al igual que los ecosistemas acuáticos la magnitud del suministro es relativa y está sujeta al tipo de ecosistema y su ubicación.

### **Interacciones entre deposición-suelo y agua**

Varios investigadores han encontrado que la precipitación ácida da como resultado un aumento en la acidez del suelo, los ríos y lagos y provoca alteraciones en la vegetación (Thomas, 1958; Gorham y Gordon, 1969; Smith, 1981; Brannland, 1983).

Se conoce que la vegetación actúa como filtro de los componentes químicos que están presentes en el aire y, en consecuencia, en las precipitaciones (Kozlowski, 1980; Smith, 1981).

La deposición ácida aumenta las pérdidas de ciertos elementos, como Ca y K del follaje. Las sustancias que se depositan en seco sobre la vegetación son arrastradas por efecto del lavado, de tal manera que las aguas que corren por el suelo o subsuelo tienen mayores concentraciones que las precipitaciones incidentes, por ejemplo de dos a tres veces más dióxido de azufre en los bosques de coníferas.

El suelo tiene gran resistencia a la acidificación, comparado con las aguas superficiales, pero el grado de susceptibilidad radica en las características de las rocas madres, además el suelo se acidifica también por las prácticas agrícolas y forestales al que es sometido. El ejemplo de abonos nitrogenados es determinante en la acidificación de un suelo agrícola.

En suelos de bosque de coníferas, el ácido procede en parte como resultado de los procesos biológicos, que se llevan a cabo en el suelo, y por deposición; sin embar-

go, la acidificación por procesos biológicos no suele normalmente dar lugar a una acidificación a gran escala de las aguas (Ecological Effects of Acid Deposition-Report, 1983).

Un incremento en la acidez del suelo puede afectar la disponibilidad de nutrientes para la planta, y puede variar la composición de la población de microorganismos del mismo, lo que produce cambios en el proceso de mineralización y descomposición (USDA. Forest Service, 1976; Wood y Bormann, 1977).

La acidificación del suelo es un proceso lento y, los efectos por deposición pueden detectarse en un período de diez a cincuenta años (Ecological Effects of Acid Deposition, 1983).

Se sabe que los iones hidrógeno en aguas percolantes ácidas tienden a intercambiarse con otros cationes en el suelo, lo que aumenta las pérdidas de calcio, magnesio y potasio, y en suelos con pH por debajo de 5,0 aumenta la movilidad de metales potencialmente tóxica, como el aluminio, manganeso, cobre, cadmio y zinc. Otros procesos que afectan la acidez del suelo son: la absorción de cationes por las raíces, el CO<sub>2</sub> procedente de la respiración, oxidación y reducción de compuestos de nitrógeno y azufre, ácido orgánico resultantes del proceso de descomposición (Ecological Effects of Acid Deposition, 1983).

Los mecanismos de la acidificación del suelo y del agua con extremadamente complicados ya que están sujetos a factores geoquímicos, biológicos e hidrológicos. Debe considerarse que una cuenca es un sistema muy complejo, donde un largo número de procesos juega un papel importante en relación con la acidificación de las aguas, por ejemplo: factores hidrológicos, ácido carbónico, ácidos débiles y orgánicos, acumulación y reducción en la cuenca de compuestos de azufre, interacciones de la atmósfera, reacciones de oxidación y reducción (compuestos de azufre y nitrógeno), toma y liberación de iones por la vegetación y el suelo, movilización de trazas y metales (Seip, 1983).

Según Gorham (1976), la acidificación de los lagos, por ejemplo, trae como consecuencia la oligotroficación, lo que deriva en un incremento de musgos y otras especies en el fondo del lago; estos musgos tienen la propiedad de intercambiar cationes y retardar el reciclaje de éstos a partir de sedimentos.

Se ha indicado que la precipitación ácida tiene la capacidad de lixiviar materiales del suelo, fenómeno que si se da durante un largo período resulta perjudicial para el sistema, pero si ocurre en un corto plazo puede permitir que ciertos nutrientes se vuelvan accesibles a los organismos, particularmente en sistemas acuáticos (Alfaro, 1983).

Almer et ál. (1974) y Wright et ál. (1976) han estudiado los efectos de precipitación ácida en lagos, y han detectado que en lagos afectados por la precipitación ácida la descomposición microbiana sufre cambios, cambios que alteran la renovación de detritus, conservación de energía, ciclo nutricional, producción primaria y detritisura en los sistema acuáticos; una reducción en los microdescomponedores ocasiona una alteración en la cadena alimenticia de los invertebrados (Evans et ál., 1981).

Los efectos biológicos de la acidificación en aguas superficiales son detectables cuando el pH es menos que 6,0, generalmente los peces son impactados severamente a un pH menor de 5,0 y, son totalmente destruidos a un pH de 4,8 (Gorham, 1976; Evans et ál., 1981).

## ALTERACIONES EN LA VEGETACION

Los efectos de los contaminantes del aire sobre la vegetación dependen de la calidad y cantidad depositadas, la composición del suelo, el clima y el tipo de vegetación afectada.

La contaminación de la atmósfera aumenta la deposición de gran cantidad de sustancias químicas, tales como S en forma de  $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , N en forma de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}^+$  y varios metales pesados, sustancias que por diversos medios alteran la fisiología de la planta (Abrattamsen, 1983). Haines et ál. (1980) indican que el hidrógeno libre de la lluvia ácida es el componente que más daño ocasiona a la vegetación, porque altera el ciclo mineral, ya que los iones hidrógeno son disruptores potenciales del ciclo mineral, esto se debe a que estos iones tienen la habilidad de desplazar de las hojas y del suelo elementos minerales e inhibir la absorción de elementos a través de las raíces.

La reacción de la vegetación ante los contaminantes del aire varía según la capacidad de respuesta de ésta ante los factores ambientales, capacidad que va ligada a la composición genética de la especie. El tiempo de exposición y la concentración del contaminante son también determinantes en el daño que causen a la planta. En la tabla 3 se resumen los efectos potenciales de la precipitación ácida sobre la vegetación.

Se ha hipotetizado que la precipitación ácida puede acelerar la lixiviación de nutrientes, tanto del follaje de los árboles como del suelo forestal, y el desgaste de los minerales del suelo altera el crecimiento y desarrollo de árboles y plantas altas (Smith, 1981; Oden, 1976).

La posible influencia de la precipitación ácida sobre el crecimiento de los árboles

se ha estudiado utilizando comparaciones relacionadas con el desarrollo de los anillos de crecimiento. Thompson (1981) afirmó que a través del análisis de los anillos puede detectarse los efectos sobre el crecimiento, porque el daño al tejido fotosintético puede influenciar la cantidad de crecimiento que ocurre en otras partes del árbol, en particular el crecimiento anual de los anillos. También indica que cuando los niveles de contaminación fueron muy altos, el promedio del grosor de los anillos fue más pequeño en los árboles que se encontraban cerca de las fuentes de contaminación, y que el promedio del grosor se incrementó en las que se localizaban a una distancia mayor de las fuentes de contaminación.

Pero se hace necesario señalar que para el estudio de los efectos de la precipitación ácida sobre el crecimiento y desarrollo del bosque, deben considerarse la zoología y microbiología, química del suelo y la variedad genética de la especie. También es necesario considerar otros aspectos no contaminantes, como el factor climático, las prácticas silviculturales que pueden influenciar el crecimiento del bosque.

Es importante hacer la diferenciación entre las vías (seca y húmeda) por las cuales los contaminantes son transferidos de la atmósfera a los sistemas planta-suelo. Los gases son transferidos a las plantas por absorción y adsorción, y pueden, por lo tanto, dañar la planta directamente. El proceso de deposición seca sucede por adsorción de gases y fijación gravitacional de aerosoles y partículas de gruesa granulación. Los contaminantes son transferidos a los sistemas de la planta y el suelo por medio de la precipitación, la cual es conocida como deposición húmeda.

En un ecosistema forestal, por ejemplo, el suministro de nutrientes, ácidos y toxinas permite que el sistema sufra tres fases: de acumulación de compuestos dentro del ecosistema, de desestabilización y de sucesión. La fase de acumulación es posiblemente una explicación al incremento en el crecimiento que sufre el bosque en su etapa de desarrollo, ya que en la etapa de acumulación de nutrientes está presente el nitrógeno, nutriente que es básico en el desarrollo del ecosistema forestal. En la segunda fase, de alteración, se da la desestabilización del ecosistema al existir ciertas toxinas y ácidos orgánicos en solución en el suelo forestal, lo que provoca un daño en las raíces y los descomponedores (Ulrich, 1983; Agren, 1983). Finalmente, es necesario indicar que la desestabilización del sistema se puede iniciar a nivel de las hojas, raíces o corteza, en especial cuando el aluminio se presenta como ion tóxico dominante.

Los efectos de los contaminantes atmosféricos pueden clasificarse en: daños crónicos y daños agudos, donde los primeros se distinguen por un severo deterioro a corto plazo (horas) después de la exposición y por el colapso de las células, con el subsecuente desarrollo de necrosis. Los daños crónicos se producen después de períodos largos de exposición, el resultado es más leve pero al ser la concentración del contami-

**TABLA 3**

***EFFECTOS POTENCIALES DE LA PRECIPITACION ACIDA SOBRE LA VEGETACION\****

**EFFECTOS DIRECTOS**

---

- 1) Daño a las estructuras protectoras superficiales, tales como la cutícula.
  - 2) Interferencia con el funcionamiento de las células protectoras.
  - 3) Envenenamiento de las células de la planta, después de la difusión de sustancias ácidas a través del estoma o cutícula.
  - 4) Alteración del metabolismo normal o procesos de crecimiento sin evidenciar necrosis de las células de la planta.
  - 5) Alteración de hojas y raíces —procesos de exudación.
  - 6) Interferencia de los procesos reproductivos.
  - 7) Interacción sinérgica con otros factores de tensión ambiental.
- 

**EFFECTOS INDIRECTOS**

---

- 1) Acelera la lixiviación de sustancias (elementos minerales y sustancias orgánicas) de los órganos foliares.
  - 2) Incrementa susceptibilidad a la sequedad y otros factores de tensión ambiental.
  - 3) Alteración en el proceso de simbiosis de la planta.
  - 4) Alteración de las interacciones huésped-parásito.
- 

\* (Traducción y adaptación de Tamm y Cowlin, 1977).

nante lo suficiente alta produce la destrucción de algunas células o alteración del metabolismo celular. Este tipo de daño se caracteriza por clorosis y necrosis parcial. Dentro de una clasificación general estos efectos son denominados como "efectos visibles". También existen otras clasificaciones para determinar alteraciones adicionales que produce la contaminación, tales como: efectos no visibles, que afectan especialmente a nivel molecular o microscópico, y efectos fisiológicos, que se resumen en la tabla 3.

## CONCLUSIONES

En este artículo se ha considerado el impacto de la acidificación en el ambiente, la cual es producida principalmente por emisiones de óxidos de azufre y de nitrógeno procedente de acciones antropogénicas. Otros elementos, como los fluoruros, el ozono, las cenizas y los metales pesados, que no han sido considerados en este artículo, también contribuyen a la acidificación del medio.

La acidificación como elemento de deteiorización del suelo, la vegetación y las aguas ha sido objeto de estudio en diversos países, principalmente los muy industrializados o los que se localizan en áreas de mayor susceptibilidad a la acidificación. Sin embargo, es necesario un conocimiento mayor sobre la naturaleza de los contaminantes y su variación en las emanaciones en determinados sitios.

Los efectos de la acidificación varían según dos factores: la escala o grado de concentración del depósito, sea seca o húmeda, y el poder inherente de resistencia del suelo, agua o vegetación. Los efectos de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno se pueden resumir como efectos directos e indirectos.

*Efectos directos:* Alteración de la química de la atmósfera, de la biología y la química del suelo (acidificación del suelo), reducción en la visibilidad, daños a la vegetación (reducción en el crecimiento), acidificación de lagos y ríos, efectos en la salud humana y animal.

*Efectos indirectos:* Daño a las plantas, corrosión del suelo, lo que produce acidificación de aguas superficiales, corrosión de aguas (acidificación de lagos y ríos), efectos en la salud humana y animal.

Es necesario un estudio sobre los efectos indirectos de la acidificación, en especial los producidos por la lluvia ácida, como la lixiviación de sustancias de las hojas, lo cual permite el libre acceso a patógenos, insectos y biocidas y su repercusión en la salud humana y animal.

Las interacciones entre los contaminantes del aire (en este caso  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ) y el medio se han descrito brevemente en este artículo. Pero, es preferible considerar las interacciones entre los diversos ecosistemas y la contaminación del aire como un "continuum" de respuestas, que varían grandemente dependiendo de la especificidad del ecosistema y del contaminante, de ahí que los efectos de la acidificación no deben generalizarse.

A pesar de que se ha indicado que el  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  son los elementos principales de la acidificación, la influencia de estos contaminantes no es bien conocida, especialmente en el caso de los ecosistemas forestales. En nuestro medio a fin de evaluar el impacto de la acidificación, por ejemplo en los bosques, debe considerarse que la susceptibilidad del bosque a los contaminantes del aire varía según la especie, tiempo de exposición, concentración del contaminante y diversos factores ambientales.

Una vez estudiada la susceptibilidad de ciertas especies en nuestro medio, deberá dársele mayor atención a aquellas especies que resulten tolerantes a la contaminación, especies que podrán ser utilizadas en proyectos de reforestación de áreas urbanas e industriales donde la contaminación es más alta. Un mejor entendimiento de las respuestas de los bosques a la contaminación del aire hará posible el desarrollo de nuevas técnicas de manejo forestal, que bien podrían, como en algunos otros países, reducir los efectos de ciertos contaminantes emitidos por las actividades industriales y urbanas de tal manera que se proteja el ambiente.

Finalmente, debemos considerar que en ciertas circunstancias un grado moderado de contaminación del aire puede suplir de ciertos nutrientes a los ecosistemas. Sin embargo, éste es un método de enriquecimiento poco eficaz, por dos razones: primero, los componentes peligrosos están siempre asociados a aquellos que producen beneficios al sistema, y en muchos de los casos hay dominancia de aquellos elementos que provocan un mayor daño al ambiente. Segundo, la contaminación del aire usualmente obedece a la ley de dilución por dispersión, entonces la concentración decrece bastante rápido fuera de los puntos de emisión. Esto significa que concentraciones de alta toxicidad cerca de las fuentes de emisión constituyen un alto precio a pagar a cambio de beneficios marginales, en el caso que los hubiera.

## BIBLIOGRAFIA

- ABRAHAMSEN, Gunnar. Effects of Long Range Transported Air pollutants on forest. Summary Document. En: **Ecological Effects of Acid Deposition**. National Swedish Environmental Protection Board-Report PM 1.636. 1983.
- AGREN, Goran I. Model analysis of some consequences of Acid precipitation of forest growth. En: **Ecological Effects of Acid Deposition**. National Swedish Environmental Protection Board-Report PM 1.636. 1983. Pp. 233-244.
- ALFARO, Ma. del Rosario. Influence of Air Contaminants on Forest Ecosystems. Tesis de Maestría. Missouri University. Inédita. 1983.
- ALMER, B.; DICKSON, W.; HORNSTON, E. y MILLER, V. Effects of Acidification on Swedish lakes. **Ambio**. 3: 30-36. 1974.
- BRANNLAND, R. Background and facts about forest acidification. **Forest Abstracts**. 44 (6) 2.951. 1983.
- BARRET, Thomas W. y BENEDICT, Harris. Sulfur Dioxide. En: **Recognition of Air Pollution Injury to Vegetation: A Pictorial Atlas**. Editado por J.S. Jacobson y A.C. Hill. Air Pollution Control Association. Pittsburgh, Pennsylvania. 1970.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Effects of SO<sub>2</sub> in the atmosphere on vegetation: Revised Chap. 5 for Air Quality Criteria for Sulfur Oxides. Research Triangle Park, North Carolina. EPA-RE-13-030. 1973.
- ECOLOGICAL EFFECTS OF ACID DEPOSITION. Report and Background Papers. 1982. Stockholm Conference on the Acidification of the Environment. Expert Meeting I. Published by National Swedish Environment Protection Board. 1983. Pp. 2, 12-21.
- EVANS, L.S.; HENDREY, G.R.; STENSLAND, G.J.; JOHNSON, D.W. y FRANCIS, A.J. Acidic precipitation: considerations for air quality standards. **Water, Air and Soil Pollution**. 16: 469-509. 1981.
- GALLOWAY, James N. y COWLING, E.B. The Effects of Precipitation On Aquatic and Terrestrial Ecosystems: A proposed Precipitation Chemistry Network. **APCA Journal**. Vol. 28. Nº 3. 1978. Pp. 229-235.
- GORHAM, E. Acid Precipitation and its influence Upon Aquatic Ecosystems. **Water, Air and Soil Pollution**. 6: 457-481. 1976.

- GORHAM, E. y GORDON, A.G. The influence of smelter fumes upon the chemical composition of lake waters near Sudburg, Ontario, and upon the surrounding vegetation. **Can. J. Bot.** 38: 477-487. 1969.
- HAINES, B.L.; CLARK, H.C. y CLARK, K.E. Acid Rain in Venezuela. International Ecology. Inst. Ecology. Univ. Georgia. Athens. 1980.
- HUSAR, Udolf B. y HALOWAY, Jante M. Sulfur and Nitrogen over North America. En: **Ecological effects of Acid Deposition**. National Swedish Environment Protection Board. Report PM 1.636. 1983.
- JONES, J.N.; NETHERVILLE, J.T.; JOHSTON, D.O. y WOOD, J.L. Chemistry, man and society. Segunda ed. 'Sunders Golden. Sunburst Series. Philadelphia. 1976.
- JONSSON, Benot. Soil Acidification by Atmospheric Pollution and Forest Growth. **Water, Air and Soil Pollution**. 7: 497-501. 1977.
- KOZLOWSKI, T.T. Impacts of Air pollution on forest ecosystem. **Bioscience**. 30: 88-93. 1980.
- ODEN, S. The acidity problem-an outline of concepts. En: L.S. Dochinger and T.A. Seliga (Eds.), Proc. 1st. Internat. Symp. Acid Precipitation and the Forest Ecosystem. USDA. Forest Service, Gen. Tech. Rep. NO-NE-23 Opper Darby, Penn. 1976. Pp. 1-36.
- RAPIER, Pascal M. y ROE, Kenneth A. Environmental Control. En: **Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers**. 8ta. ed., T. Baumeister, Eugene A. Avallone y Theodore Baumeister. McGraw-Hill Book Company. 1978. Pp. 18-1 a 18-33.
- ROHE, Hennings. Emission, Transport and deposition of acidifying air pollutants. Summary Effects of Acid Deposition. National Swedish Environment Protection Board. Report PM. 1.636. 1983.
- SEGURA, Juan de Dios; MALAVASSI R., Eduardo y ALFARO G., M. del Rosario. Acid Rain. Poas Volcano. 1983. (Inédito).
- SEIP, Hand M. Deposition-Soild-Water Interactions Summary Document. En: **Ecological Effects of Acid Deposition**. National Sweedish Environment Protection Board. Report PM 1.636. 1983. Pp. 119-127.
- SMITH, W.H. Air Pollution and Forest: Interaction between air contaminants and forest ecosystems. Springer-Verlag. New York Inc. 1981. 379 pp.
- STUMM, W. y MORGAN, J.J. Aquatic Chemistry, Wiley-Inter Science New York. 1980.
- SWEDISH MINISTRY OF AGRICULTURE. Acidification a boundless threat to our environment. National Swedish Env. Protection Board. S-17175 Solma. 1983.

- TAMM, C. y COWLING, E.B. Acidic Precipitation and Forest Vegetation. **Water and Soil Pollution**. 7: 505-511. Tattar, T.A. 1978. Diseases of Shade Trees. Academic Press. New York, 1977.
- THOMAS, M.D. Air Pollution with relation to agronomic crops. General Status of Research on the effects of air pollutions in plants. **Agron. Jour.** 50: 545-550, 1958.
- THOMPSON, M.A. Tree rings and air pollution: a case of *Pinus Monophylla* growing in East-Central Nevada. **Environmental Pollution**. 26: 251-266, 1981.
- ULRICH, B. An ecosystem oriented hypothesis on the effect of air pollution on forest ecosystems. En: **Ecological effects of acid deposition**. National Swedish Environment Protection Board-Report PM 1636. 1983.
- USDA. Forest Service. Workshop Report on Acid precipitation and the forest ecosystem. USDA. Forest Service. Gen. Tech. Rep. No. NE-26, USDA. Forest Service. Upper Darby. Penn. 1976. 18 pp.
- WOOD, T. y BORMANN, F.H. Short-term effects of a simulated acid rain upon the growth and nutrient-relations of *Pinus strobus* L. **Water, Air and Soil Pollution**. 7: 479-488. 1977.
- WRIGHT, R.F.; DALE, T.; GJESSING, E.T.; HENDREG, G.; HENRIKSEN, A.; JOHANNESSEN, M. y MUÑIZ, I. Impact of acid precipitation on fresh water ecosystems in Norway. **Water, Air and Soil Pollution**. 6: 483-499. 1976.