

# LA LLUVIA ÁCIDA Y SUS EFECTOS

**Armando R. Montellano**  
**Claudia Sánchez Sejas**

Lee M. & Thomas señalaron en 1986 que el agua de la lluvia natural, suele ser ácida, dado que su pH viene a ser de 5,6, esto es debido a que el agua es un excelente solvente, y cuando esta cae disuelve algo del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente en la atmósfera que retorna a la superficie en forma "ácido carbónico".

La lluvia se vuelve lo que denominamos ácida, debido al descenso del pH, hasta 4,0 ó 4,2, debido a la combinación con dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ).

Estos gases pueden alcanzar niveles muy altos en la atmósfera, donde se mezclan y reaccionan con agua, oxígeno y otras sustancias químicas, para dar paso a la formación de la lluvia ácida

Actualmente la lluvia ácida es uno de los problemas ambientales que sufre nuestro planeta.

Armando Rodríguez Montellano

Claudia Sánchez Sejas

## **LA LLUVIA ÁCIDA Y SUS EFECTOS**

Universidad Mayor de San Simón UMSS. Facultad de Ciencias  
y Tecnología

Maestria en Ingenieria Ambiental

Edición digital: C. Carretero

Difunde: Confederación Sindical Solidaridad Obrera

[https://solidaridadobrero.org/ateneo\\_nacho/biblioteca.html](https://solidaridadobrero.org/ateneo_nacho/biblioteca.html)

# **ÍNDICE DE CONTENIDO**

I. Introducción

II. La lluvia ácida

III. Efectos de la lluvia ácida

IV. Reducción de los componentes de la lluvia ácida

V. Medidas de mitigación

VI. Conclusiones

## INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas asociado a la contaminación atmosférica es la lluvia ácida, las primeras apariciones de este fenómeno se observaron en Suecia (1848), Inglaterra (1877) y en Alemania (1867), donde se publicó que por alguna razón las lluvias eran mas ácidas de lo normal, fue en ese sentido que Lee M. & Thomas (1986)<sup>1</sup> señalaron que el agua de lluvia naturalmente se suele considerar ácida, dado que su pH suele ser de 5,6 estos debido a que el agua es un excelente solvente, y cuando esta cae disuelve algo del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente en la atmósfera y retorna a la superficie en forma "ácido carbónico", por esta razón estos autores reportaron que ese daño ambiental no empeoraría materialmente si las emisiones ácidas no extendiesen el nivel actual reportado en ese año.

A fines de la década de los 80 y principio de los 90 los países

---

1 Lee M & Thomas. 1986. "The Next Step: Acid Rain," EPA Journal, June/July 1986, pp. 2-3.

industrializados comenzaron a desarrollar estrategias y políticas medioambientales para el control de la emisión de gases de efecto invernadero, y como medida precautelaría se fueron emitiendo impuestos a todas las industrias que emitían SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> u otro tipo de contaminante atmosférico. Lamentablemente esta medida reguladora adoptada no fue efectiva, pues durante más de una década la emisión de gases de efecto invernadero avanzó a pasos agigantados y pese a todas las medidas de control y mitigación los efectos adversos medioambientales sobre la atmósfera no pudieron ser controlados. Actualmente la lluvia ácida es uno los problemas ambientales que sufre nuestro planeta (Robertson, N. & Wunder, S. 2005)<sup>2</sup>.

De acuerdo a los reportes del Noroeste de los Estados Unidos y varios otros países industrializados considerados como primeros emisores de gases de efecto invernadero, éstos ponen en manifiesto que la degradación del aire está teniendo un efecto significativo sobre las plantas, pues estos países están viendo morir sus fragmentos boscosos por efecto de la lluvia ácida, fenómeno que sin duda alguna está afectando varias zonas de cultivo y poniendo en peligro la sostenibilidad de los bosques al verse afectado todo el ecosistema.

En este sentido y según la convención del cambio climático

---

<sup>2</sup> Robertson, N. & Wunder, S. 2005. Evaluación de Iniciativas Incipientes de Pagos por Servicios Ambientales en Bolivia. Pp 5-29

de Rio de Janeiro (1992) se estableció un mecanismo de compensación o pagos por servicios ambientales, el cual permite que los países menos desarrollados puedan adquirir recursos de los países industrializados, entre estos servicios ambientales están; protección de cuencas, conservación de la biodiversidad, fijación-almacenamiento de carbono y el mantenimiento de bosques, debido a que estos ecosistemas son los únicos que pueden mantener el equilibrio ecológico por ser reguladores del clima en forma global.

En todo el mundo, una nueva generación de iniciativas de conservación pretende crear sistemas en los cuales los usuarios de uno o más servicios ambientales compensen a los regentes del recurso por la conservación de dichos servicios.

Estos sistemas, denominados 'pagos por servicios ambientales' (PSA), podrían tener el potencial de proteger servicios ambientales, al mismo tiempo que estos países en vías de desarrollo pudiesen adquirir beneficios económicos, por mantener los ecosistemas sin perturbaciones que alteren su equilibrio (Robertson, N & Wunder, S. 2005)<sup>3</sup>.

La falta de conocimientos sobre procesos de contaminación global y conciencia ambiental, no genera una idea clara sobre el valor de los ecosistemas y su biodiversidad, que son afectados por agentes contaminantes

---

3 Ibid.

que son incluidos en procesos naturales, que afectan en gran magnitud con el transcurrir del tiempo.

A partir de esta compilación técnica de información referida a la lluvia ácida, se pretende generar un conocimiento básico que permita comprender de manera general este fenómeno, identificando las causas y efectos de las lluvias ácidas sobre los diferentes ecosistemas.

## II. LA LLUVIA ÁCIDA

De manera general y según referencia bibliográfica se pueden discriminar tres tipos de lluvias que son detalladas a continuación:

### ***Lluvia normal***

La lluvia se forma cuando las moléculas de vapor de agua se condensan sobre cristales de hielo o de sal en la atmósfera, o sobre minúsculas partículas de polvo en las nubes, para formar gotitas de agua que responden a la gravedad terrestre y caen formando lluvia. A medida que la lluvia cae atravesando la atmósfera, puede "ir levantando" o "lavando" elementos y productos químicos y otros contaminantes (Stumm, W, et al 1987)<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Stumm, W, Laura S, y Jerald L. S, 1987, "Aquatic Chemistry of Acid

El agua de la atmósfera natural registra un pH de 5.0 a 5.5 por lo que es considerada ácida, ya que contiene ácido carbónico que viene de la disolución del dióxido de carbono (Castro, *et al* 2000)<sup>5</sup>.

### ***Lluvia radiactiva***

La lluvia radiactiva son deposición de partículas radiactivas sobre la superficie de la Tierra, liberadas en la atmósfera por explosiones atómicas o escapes de instalaciones y centrales nucleares. Este fenómeno se observó desde el periodo de las pruebas nucleares atmosféricas a gran escala realizadas en la década de 1950 y comienzos de la de 1960. Se hicieron alegatos sobre sus efectos dañinos durante muchos años, pero hasta 1984 no se adoptó una decisión trascendental, cuando un juez federal de Utah dictaminó que 10 personas habían enfermado de cáncer debido a la negligencia del gobierno en lo referente a la exposición de los ciudadanos a la lluvia radiactiva en aquel Estado.

En 1985 el Tribunal de apelación de pensiones de Inglaterra y Gales llegó a una conclusión similar en el caso de

---

Deposition," Environmental Science & Technology, Vol. 22.

5 Lee, J. & Weber, D. (1982). Effects of Sulfuric Acid Rain on Major Cation and Sulfate Concentrations of Water Percolating Through Two Model Hardwood Forests Journal of Environmental Quality Vol 11, No 1, p 57-64, January-March, 1982. 5 Fig, 2 Tab, 40 Ref.

un veterano de las pruebas nucleares británicas en las islas Christmas durante la década de 1950. Desde la firma del tratado de limitación de pruebas nucleares en 1963, los niveles de lluvia radiactiva han disminuido en todo el mundo. (Lee, J & Weber, D. 1982)<sup>6</sup>

### ***Lluvia ácida***

La lluvia se vuelve ácida debido al descenso del pH, encontrándose de 4,0 a 4,2 (Fig. 1) esto debido a la combinación con dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

Estos gases pueden alcanzar niveles muy altos en la atmósfera, donde se mezclan y reaccionan con agua, oxígeno y otras sustancias químicas, para dar paso a la formación de la lluvia ácida (Lee, J & Weber, D. 1982)<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> Ibid.

<sup>7</sup> Lee, J. & Weber, D. (1982). Effects of Sulfuric Acid Rain on Major Cation and Sulfate Concentrations of Water Percolating Through Two Model Hardwood Forests Journal of Environmental Quality Vol 11, No 1, p 57-64, January-March, 1982. 5 Fig, 2 Tab, 40 Ref.

## ***Tipo de deposiciones de lluvia ácida***

Esta lluvia ácida puede retornar a la superficie terrestre en dos tipos de deposiciones, que son detalladas a continuación:

- **Deposiciones húmedas;** que pueden ser lluvia, llovizna y rocío.
- **Deposiciones secas;** son deposiciones en forma de nieve, niebla o granizo, este tipo de deposición registran niveles más ácidos que la deposición húmeda, por tener elevadas concentraciones de Sulfatos y Nitratos, que se encuentran suspendidas en el aire.



Figura 1 Variación del pH y efectos en el medio

Ambos tipos de deposición pueden ser acarreados por el viento, agua u otro vector a distancias sumamente grandes (Fig.2) (Landsberg, H.1984)<sup>8</sup>.

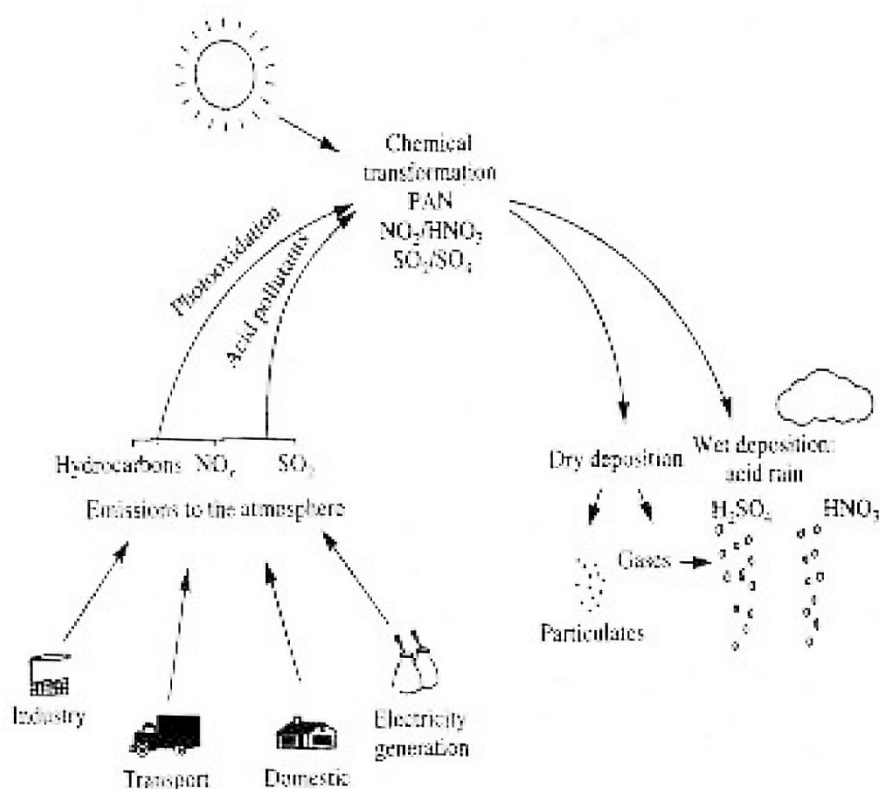
### ***Fuentes de origen de la lluvia ácida***

Los contaminantes atmosféricos como el  $\text{SO}_2$  y el  $\text{NO}_x$  se oxidan hasta sulfatos ( $\text{SO}_4^{=}$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), que combinados con el vapor de agua retornan al suelo como ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) en forma de lluvia, llovizna, rocío, nieve, niebla o granizo (Manahan, S. 1994)<sup>9</sup>.

---

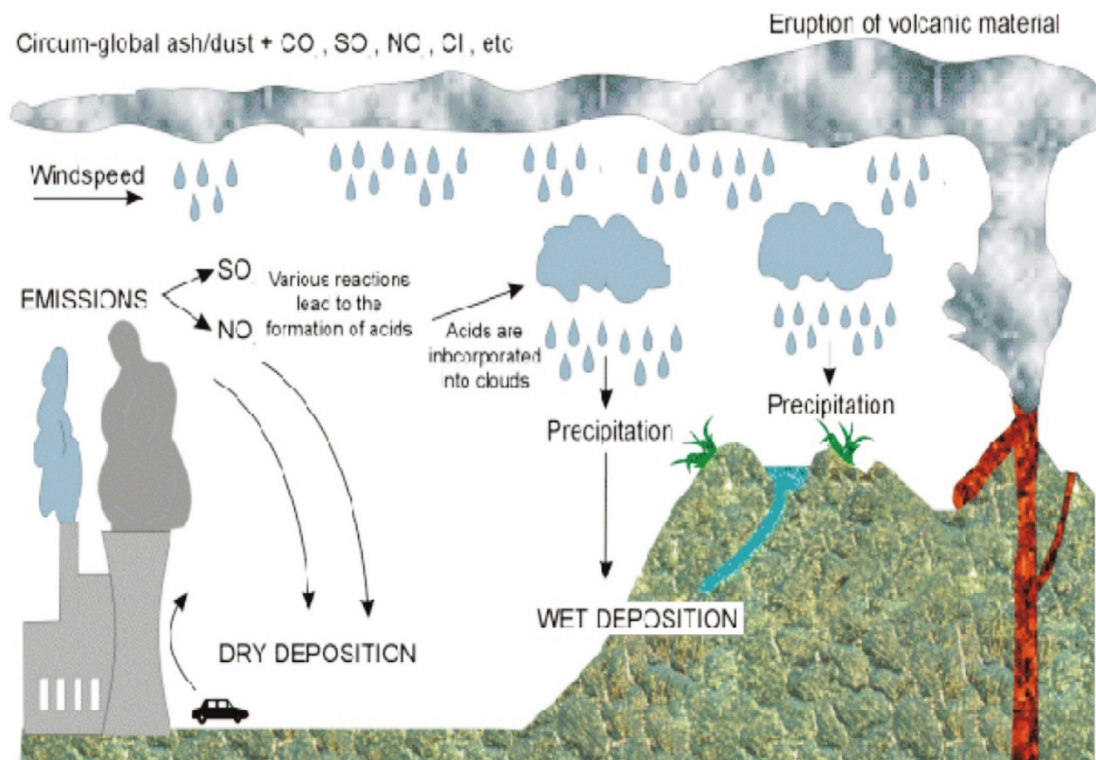
<sup>8</sup> Landsberg, H. E., 1984, The Resourceful Earth.

<sup>9</sup> Manahan, S. 1994 “Environmental chemistry”. Lewis publishers. USA.



**Figura 2** Formación de acidez atmosférica y la deposición ácida (adaptado de CEE, 1992b)

Las fuentes de origen de la lluvia ácida pueden ser; Contaminación (actividad antrópica industrial) o Polución (actividades naturales) cada una con las siguientes consideraciones técnicas (Fig. 3):



**Figura 3 Una combinación natural y las actividades industriales producen la deposición de compuestos ácidos**

### ***Contaminación antrópica o industrial***

La deposición de sustancias ácidas ha sido calificada como un problema ambiental de carácter mundial cuyas principales causas se encuentran en la emisión de óxidos de azufre y nitrógeno durante las actividades industriales, el transporte y la quema de combustibles fósiles, estos compuestos son considerados como las principales fuentes de la lluvia ácida, por otra parte la sociedad industrial genera otros tipos de contaminantes que pueden contribuir a la formación de lluvias ácidas tales como los compuestos orgánicos volátiles y los hidrocarburos que pueden

reaccionar por si mismos o pueden combinarse (Eichler, M. & Fagundes, L. 2004)<sup>10</sup>.

### **a) Combustibles fósiles**

Los combustibles fósiles son hidrocarburos, que son compuestos formados por hidrógeno y carbono; algunos contienen también pequeñas cantidades de otros componentes. Los hidrocarburos se forman a partir de antiguos organismos vivos que fueron enterrados bajo capas de sedimentos hace millones de años. Debido al calor y la presión creciente que ejercen las capas de sedimentos acumulados, los restos de los organismos se transforman gradualmente en hidrocarburos. Los combustibles fósiles más utilizados son el petróleo, el carbón y el gas natural. Estas sustancias son extraídas de la corteza terrestre y, si es necesario, refinadas para convertirse en productos adecuados, como la gasolina, el gasóleo y el queroseno. Algunos de esos hidrocarburos pueden ser transformados en plásticos, determinadas sustancias químicas, lubricantes y otros productos no combustibles (Landsberg, H.1984)<sup>11</sup>.

---

10 Eichler, M. & Fagundes, L. 2004. Conductas cognitivas relacionadas con el análisis de problemas ambientales. Brasil.

11 Landsberg, H. E., 1984, The Resourceful Earth.

## **b) Centrales eléctricas**

Las centrales eléctricas térmicas, son instalaciones que producen energía eléctrica a partir de la combustión de carbón, fuel o gas en una caldera diseñada al efecto. El funcionamiento de todas las centrales térmicas, o termoeléctricas, es semejante. El combustible se almacena en parques o depósitos adyacentes, desde donde se suministra a la central, pasando a la caldera, en la que se provoca la combustión. Esta última genera el vapor a partir del agua que circula por una extensa red de tubos que tapizan las paredes de la caldera.

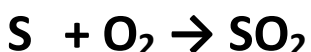
### ***Fuentes de Óxidos de Azufre, SO<sub>2</sub>***

El SO<sub>2</sub> es un gas incoloro, no explosivo, no combustible, de olor astringente. Entre los gases que contienen azufre están SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>4</sub><sup>=</sup> donde el SO<sub>2</sub> es la emisión más importante de los contaminantes con S.

Los más representativos de los compuestos de azufre son:

SO<sub>2</sub>: incoloro, de olor picante e irritante.

SO<sub>3</sub>: incoloro y muy reactivo que condensa fácilmente.





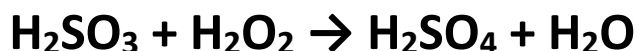
**Tabla 1 Fuentes de contaminación antropogénica de SO<sub>2</sub>**

Fuente de SO <sub>2</sub>	Porcentaje
Centrales térmicas de carbón o combustibles líquidos	66
Industrias que usan combustible fósil	25
Refinerías de petróleo	6
Transporte	3

Fuente: Wigley T.M.L 1999<sup>12</sup>.

Oxidación heterogénea del SO<sub>2</sub>:

En las superficies de gotas de agua o de partículas:




---

<sup>12</sup> Wigley T.M.L., 1999. The Science of Climate Change: Global and U.S. Perspectives. Pew Center on Global Climate Change.

Por oxidación homogénea del SO<sub>2</sub>.

Fotooxidación directa:



En condiciones normales el SO<sub>3</sub> no se encuentra en la atmósfera ya que reacciona con el agua atmosférica formando H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Miguel, M. 2006)<sup>13</sup>.



### ***Fuentes de Óxidos de Nitrógeno NO<sub>x</sub>***

Los óxidos de nitrógeno están conformados por un grupo de compuestos químicos gaseosos muy reactivos que son generados por las siguientes actividades antropicas (tabla 2).

---

<sup>13</sup> Miguel, M. 2006. Lluvia ácida - España

**Tabla 2 Fuentes de contaminación antropogenica de NOx.**

Fuente de NOx		Porcentaje
Producción eléctrica	➡	61
Otros procesos industriales	➡	31
Transporte (combustible fósil)	➡	6
Otras actividades residenciales	➡	2

Fuente: Wigley T.M.L 1999. [19]

*Dentro de los óxidos de nitrógenos se consideran las siguientes especies:*

- Como óxidos están,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,
- Como ácidos  $\text{HNO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$

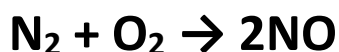
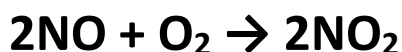
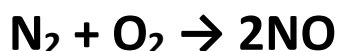
Donde los más importantes son:  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$  y  $\text{N}_2\text{O}$  (concentraciones muy bajas).

- $\text{N}_2\text{O}$ : Gas no toxico, que no participa en los procesos fotoquímicos troposféricos.

- NO: incoloro, inodoro y tóxico participa en los procesos fotoquímicos troposféricos

- NO<sub>2</sub>: pardo-rojizo y olor asfixiante, interfiere en los procesos fotoquímicos troposféricos (Manahan, S. 1994)<sup>14</sup>.

Combustión a altas temperaturas (> 1200°C)



### ***Contaminación natural (polución)***

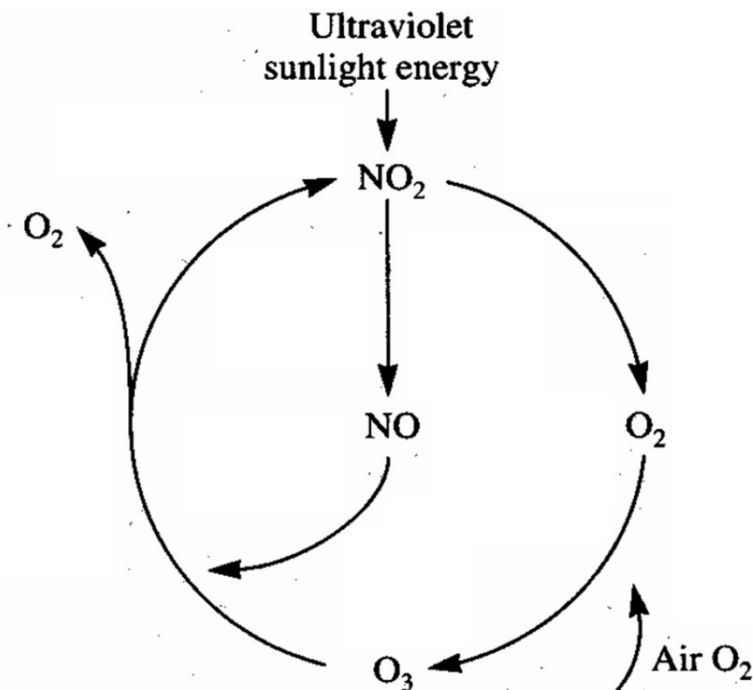
Los compuestos de azufre y nitrógeno son producidos por la descomposición de la materia orgánica en pantanos, humedales, áreas de mareas y aguas poco profundas del océano, estos compuestos emiten gases a la atmósfera contribuyendo a la formación de la lluvia ácida.

La cantidad que se produce de esta manera no es bien

---

14 Manahan, S. 1994 “Environmental chemistry”. lewis publishers. USA.

conocida, pero es muy considerable. Las estimaciones de la producción natural de los sulfatos y otros compuestos de azufre son del 35 al 85% del total –un rango bastante amplio. Y los compuestos de nitrógeno de origen natural se calculan entre el 40 al 60% del total.



**Figura 4** Proceso fotolítico de formación de oxidantes fotoquímicos

La contribución de los relámpagos a la acidez de las lluvias es importante. Dos ocurrencias de relámpagos sobre un kilómetro cuadrado, producen suficiente ácido nítrico para que 20 mm de lluvia tengan un pH 3,5. De hecho, se calcula que solamente los relámpagos mantienen al promedio mundial de lluvias con un pH de 5,0.

Aunque se reconoce que la contribución del dióxido de azufre de los volcanes es considerable, nunca se ha tomado muy en serio pues los que estudian estos fenómenos afirman

que es difícil de predecir estos eventos y por lo tanto es difícil medirlos (Stumm, W, et al 1987)<sup>15</sup>.

De manera natural los compuestos que forman la lluvia ácida son producidos por diversas formas entre ellas las más importantes se resumen en la tabla siguiente:

**Tabla 3 Fuentes de contaminación natural**

Fuente Polución	Producción Total Aprox.
Óxidos de Nitrógeno NOx	
Descomposición de MO	35%
Relámpagos	85%
Óxidos de azufre SO <sub>2</sub>	
Descomposición MO	35%
Actividad volcánica	más de 100
Fumarolas	millones de toneladas
Termas	
Spray de los mares	

Fuente: Wigley T.M.L. 199<sup>16</sup>

1515 Stumm, W, Laura S, y Jerald L. S, 1987, "Aquatic Chemistry of Acid Deposition," Environmental Science & Technology, Vol. 22.

16 Wigley T.M.L., 1999. The Science of Climate Change: Global and U.S. Perspectives. Pew Center on Global Climate Change.

En el suelo la degradación anaeróbica del Nitrógeno proteico hasta  $\text{N}_2\text{O}$ , (desnitrificación) y la liberación bacteriana de  $\text{NO}$ , cuando llegan a la atmósfera experimentan una lenta pero constante oxidación a  $\text{NO}_2$  (ciclo fotolítico de los  $\text{NO}_x$ ).

### III. EFECTOS DE LA LLUVIA ÁCIDA

La lluvia ácida está afectando la estabilidad de diversos ecosistemas, ya que este fenómeno esta llegando a formar parte del ciclo del agua y, por tanto, está modificando los patrones climáticos, llegando a alterar los siguientes ecosistemas:

#### ***a) Efectos en la salud***

La lluvia ácida al caer en la superficie terrestre libera partículas pequeñas cuyos efectos son perjudiciales para la salud humana, cuando estas partículas ingresan a los pulmones estos pueden causar enfermedades respiratorias tales como el asma o la bronquitis crónica, neumonía dificultando de esta manera que la gente pueda respirar sin ningún tipo de contratiempo, por otra estas pueden derivar

a afecciones cardiovasculares (Cabrera, R. & Robles E. 1997)<sup>17</sup>.

### ***b) Efecto sobre el agua***

La lluvia ácida ha hecho que muchos lagos y arroyos en la región noreste de los Estados Unidos y en otros lugares tengan niveles de pH mucho más bajos.

Este aumento de la acidez y de los niveles de aluminio puede ser mortal para la vida acuática silvestre, incluido el fitoplancton, las efímeras, las truchas arco iris, las alubinas de boca chica, las ranas, las salamandras manchadas, los cangrejos de río, y si la acidez aumenta, más especies de plantas y animales declinan o desaparecen y la relación presa-depredador de la red de alimentación se verá afectada.

Actualmente mas de 18.000 lagos están acidificados lo que esta provocando grandes daños sobre la vida acuática así como la perdida de sus poblaciones piscícolas.

Este problema puede llegar a ser mucho más grave durante

---

<sup>17</sup> Cabrera, R. & Robles, E. 1997. Evaluación Preliminar del Impacto en la Salud Pública de comunidades seleccionadas expuestas a polución y contaminantes atmosféricos.

las lluvias fuertes o el escurrimiento de la nieve cuando se derrite en la primavera. Estos tipos de aumentos breves se conocen como acidificación episódica (Pacheco, M. 2002)<sup>18</sup>.

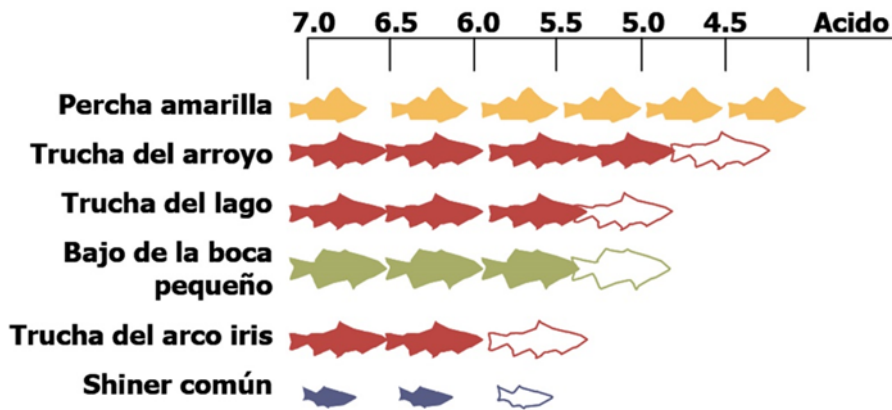


Figura 5 pH crítico para el Pez Seleccionado en los Lagos y Arroyos

### ***C) Efecto en los bosques***

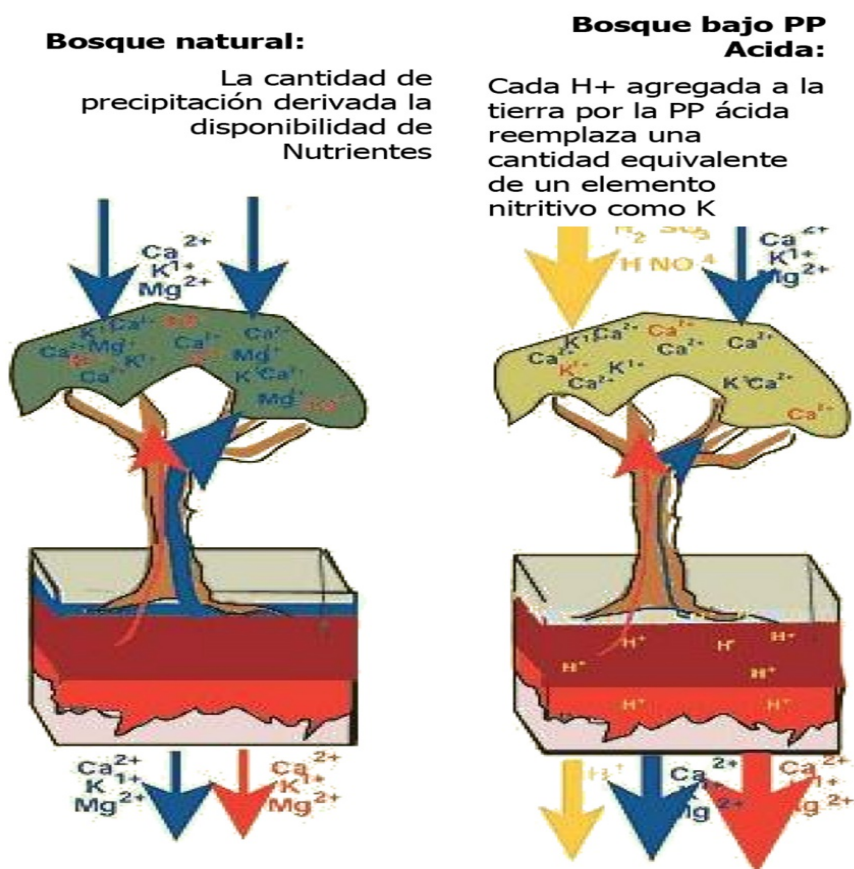
La lluvia ácida puede ser extremadamente perjudicial para los bosques, debido a que el agua que cae al suelo puede disolver muchos minerales y nutrientes que los árboles necesitan para mantenerse sanos y crecer.

Dentro del ciclo hidrológico este fenómeno penetra a las reservas de aguas subterráneas y solubiliza los metales entre ellos al  $\text{Ca}^{+2}$  y el  $\text{Mg}^{+2}$  presentes en el suelo, incrementando los niveles de metales tóxicos tales como cobre, mercurio y aluminio siendo este último el mas toxico para las plantas

---

<sup>18</sup> Pacheco, M. 2002. Tratamientos de gases tóxicos mediante tecnologías de plasma.

pues si la concentración de  $\text{Al}^{+3}$  y además la proporción de  $\text{Ca}^{+2}/\text{Al}^{+3}$  es menor a uno ( $<1$ ) aumenta la absorción de Al por las raíces de los árboles de manera tal que los bosques se tornan susceptibles a ingreso de bacterias, patógenos u otro tipo de vectores que generan enfermedades que pueden derivar en la muerte de estos ecosistemas, este siniestro fenómeno no solo altera a los bosques sino que también genera alteraciones en la regeneración natural y el sotobosque (Labandeira, X. 1995)<sup>19</sup>.



**Figura 6 Efectos de la Lluvia ácida en el Bosque.**  
(Modificado)

<sup>19</sup> Labandeira, X. (1995). "Spanish  $\text{SO}_2$ , emissions and the damage to forests in Europe", manuscrito, cserge (centre for social and economic research on the global environment), university college London.

Los árboles que se hallan en regiones montañosas muy elevadas, tales como *Piceas* y *Abetos*, corren mucho más riesgo porque están expuestos a las nubes y la niebla ácidas, con mucha más acidez que la lluvia. Las nubes y la niebla ácidas disuelven los nutrientes importantes que los árboles tienen en sus hojas y asículas. Esta pérdida de nutrientes disminuye la resistencia de los árboles y los bosques a los daños causados por infecciones e insectos, y también por el frío del invierno (Dutka,B. 1989)<sup>20</sup>.

#### ***d) Daños en los edificios y objetos***

La lluvia ácida y la deposición seca de partículas ácidas contribuyen a la corrosión de metales (como bronce) y el deterioro de pintura y piedra (como mármol y caliza). Daña construcciones que tienen carbonatos  $\text{CaCO}_3$ .



Estos efectos reducen el valor social de los edificios, los puentes y significativamente los objetos culturales (como las

---

<sup>20</sup> Dutka,B. 1989. Short - Term Root Elongation Toxicity Bioassay. Method for Toxicological Analysis of Waters, Wastewatwers and Sediments. National Waters Research Institute (NWRI). Environment Canadá.

estatuas, monumentos, y lápidas), al igual que los automóviles también son afectados (Letts, M & Roger W, 1986)<sup>21</sup>.

Cuando esta lluvia es captada por alcantarillas puede disolver Pb y Cu, además de trasportarlos a grandes distancias, que podrían ser perjudiciales.

---

21 Letts, M. & Roger, W. 1986, Dioxin in the Environment:Its Effects on Human Health, informe del American Council on Science and Health, 1986.

## IV. REDUCCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA LLUVIA ÁCIDA

Los científicos han encontrado diversas maneras de reducir el volumen de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  basadas en las siguientes consideraciones estratégicas:

### *a) Uso de convertidores catalíticos*

Son dispositivos que fueron desarrollados para la eliminación del dióxido de azufre  $\text{SO}_2$  y el  $\text{NO}_2$  dióxido de nitrógeno que son gases rutinariamente presentes en los escapes de los automóviles. A continuación se detalla una lista de estos componentes:

- Monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), de la combustión incompleta del combustible,

- Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), de la combustión completa del combustible,
- Vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ )
- Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ , etc.)
- Óxidos de azufre ( $\text{SO}$ ,  $\text{SO}_2$ , etc.)
- Hidrocarburos varios ( $\text{HX}$  -  $\text{CY}$ , etc.) cíclicos y cadenas de todo tipo.
- Todo lo que el convertidor hace es “convertir” una sustancia en otra, y lo hace mediante la ionización de los diferentes gases que pasan a través suyo (Manion, D. & Bragg, R 1982)<sup>22</sup>.

De manera breve, cuando el dióxido de carbono pasa por un convertidor, hace contacto con el platino que está en su interior, y es descompuesto en iones de carbono y oxígeno. Cuando el agua es descompuesta, forma iones de hidrógeno y oxígeno. Lo mismo sucede con cualquier otro gas que ingresa al convertidor catalítico.

---

22 Manion, P. & Bragg, R. 1982. Effects of Acid Precipitation on Scleroderris Canker Disease of Red Pine, pp. 55-56, reunión del Simposio del Estado de Nueva York en Depósitos Atmosféricas, Center for Environmental Research, Cornell University, Ithaca, N.Y.

## ***b) Tecnología Plasma para desagregación de gases tóxicos.***

Cuando el plasma se forma, se tendrá una descarga luminosa compuesta de electrones, (partículas ligeras), iones, moléculas y átomos (partículas pesadas). Si en un plasma hay un gran intercambio de energía, entre las diversas especies de partículas, las temperaturas de los iones, moléculas, átomos y electrones será aproximadamente la misma, por lo que se dice entonces que el plasma está en equilibrio térmico.

En cambio, cuando no hay suficiente intercambio de energía, las partículas pesadas tendrán temperaturas mucho menores que las de los electrones y se dice entonces que el plasma está fuera de equilibrio o que es plasma frío. Para la desagregación de gases tóxicos se utilizará este tipo de plasma, mas específicamente una combinación de descargas, estas se forman al aplicar una descarga eléctrica a un gas que pasa entre dos electrodos que pueden tener forma de placa o de cilindro concéntrico. Este tipo de descargas ha sido utilizado para degradar compuestos como NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, vapor de mercurio y compuestos orgánicos volátiles. (Yamamoto, K *et al* 1998)<sup>23</sup>.

---

23 Yamamoto, K. Shimizu, Y. Fujiyama, Tsunoda, Y. 1998. Wet Ttype Plasma Reactor for Incinerator, IEEE Industry Applications Society.

### ***d) Otras medidas***

Entre otras medidas que pueden reducir el SO<sub>2</sub> y los NO<sub>x</sub> están:

- \*Lavar el carbón para quitarle parte del azufre.

- \*Las centrales eléctricas también pueden instalar equipos llamados torres de lavado de gases, los cuales eliminan el dióxido de azufre de los gases que salen por la chimenea. Debido a que los óxidos de nitrógeno son creados durante el proceso de combustión de carbón y otros combustibles fósiles.

- \*Energía solar y la energía eólica.

- \*Diseño de automóviles de acuerdo a la Guía verde de vehículos de la EPA [http: / /www.epa.gov/greenvehicle](http://www.epa.gov/greenvehicle).

### ***Fuentes de energía alternativas***

La posibilidad de reducir la dependencia mundial de los combustibles fósiles plantea problemas. Existen energías

alternativas como la hidráulica, la solar, la energía eólica y la energía geotérmica, pero en la actualidad el conjunto de esas fuentes de energía sólo alcanza el 14% del consumo mundial de energía. Hasta la fecha, la utilización de energías alternativas se ha visto frenada por dificultades tecnológicas y medioambientales debido a que las energías solar y eólica parecen seguras desde un punto de vista medioambiental, pero son poco fiables como fuentes de energía estables. Como el consumo global de energía crece cada año, el desarrollo de ciertas fuentes alternativas de energía se hace cada vez más importante.

## V. MEDIDAS DE MITIGACIÓN

La ratificación de 129 países al protocolo de Kyoto confirma la preocupación de la comunidad mundial por la problemática citada anteriormente.

En dicho protocolo se establecen objetivos para que los países industrializados reduzcan las emisiones de los gases de efecto invernadero.

De origen las industrias tendrán que optimizar aun mas sus procesos para disminuir la contaminación, aplicar tecnologías limpias y desarrollar nuevos combustibles, además de apoyar la investigación de nuevas tecnologías (FAO 1998)<sup>24</sup>.

---

24 FAO 1998. El protocolo de Kyoto: nuevas oportunidades para financiar el desarrollo forestal sostenible. Nota informativa, Abril 1998 LACFC/98/1.

A medida que las amenazas a los ecosistemas de la Tierra aumentan y cambian, se ha prestado mayor atención a los importantes servicios que éstos brindan a la humanidad.

Estos servicios incluyen fijación y almacenamiento de carbono, protección de cuencas, belleza paisajística y conservación de la biodiversidad. En todo el mundo, una nueva generación de iniciativas de conservación pretende crear sistemas en los cuales los usuarios de uno o más servicios ambientales compensen a los regentes del recurso por la conservación de dichos servicios.

El concepto de pagos por ciertos servicios ambientales (PSA) ha surgido, en años recientes, como posible instrumento para lograr la conservación de ecosistemas y la mejora de los sistemas de sustento de suministradores y consumidores de servicios ambientales.

En Bolivia, como en otras partes, existe considerable incertidumbre en cuanto a qué son servicios ambientales, qué significa PSA, hasta qué grado se están implementando actualmente y cuáles son sus perspectivas de éxito (Brown, S. *et al* 2000)<sup>25</sup>. La definición general de 'servicios ambientales' se refiere a los beneficios que el mundo natural suministra a las personas. Estos beneficios son numerosos y

---

25 Brown, S., Burnham, M., Delaney, M., Powell, M., Vaca, R. & Moreno, A. 2000. Issues and challenges for forest-based carbon-offset projects: A case study of the Noel Kempff climate action project in Bolivia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Climate Change* 5(1): 25-37.

variados, e incluyen servicios que mejoran la calidad de la tierra, el aire y el agua.

Si bien estos beneficios son en general considerables, frecuentemente se ignoran en la toma de decisiones acerca de uso y manejo de recursos. La falta de inversión en protección y manejo de bosques y otros recursos naturales conlleva al agotamiento de la cobertura vegetativa natural y de los suelos, al deterioro de cuencas y a la extinción de especies. Estos efectos, frecuentemente, derivan en considerables pérdidas económicas y sociales (Pagiola, S. & Platais, G. 2002)<sup>26</sup>.

El Protocolo de Kioto establece la opción de transacciones de derechos de emisión sólo entre los países que firmaron el convenio.

Este sistema se asemeja al modelo teórico clásico de Dales (1968) y al Sistema de Derechos Negociables para Control de la Lluvia Ácida desarrollado en Estados Unidos (1990)<sup>27</sup>, por esta razón este mecanismo probablemente tendrá características de un mercado fluido, sencillo y eficiente para el intercambio de derechos oferentes y demandantes.

---

26 Pagiola, S. & Platais, G. 2002. Payments for environmental services. Environment Strategy Notes No. 3. The World Bank Environment Department, Washington, DC, USA.

27 Estudio de Estrategia Nacional para la Implementación del MDL en Colombia. The World Bank, 2000.

Entre las medidas de mitigación destinadas a la reducción o la captura de algunos contaminantes están: (FAO 1998)<sup>28</sup>.

- Conservación y restauración de bosques naturales y suelos de vocación forestal
- Rehabilitación de tierra agrícola degradada para mejorar el contenido de carbono en el suelo siempre orientadas hacia el uso sostenible de la tierra.
- Manejo de plantaciones y bosques para maximizar la captura de carbono
- Desarrollo de energía eólica y otras nuevas alternativas
- Electrificación rural con sistemas fotovoltaicos
- Construcción de mini y microplantas hidroeléctricas
- Mejoramiento de la eficiencia de plantas de energía térmica
- Manejo de la demanda de energía eléctrica
- Programas de mantenimiento de la flota vehicular
- Readecuación de equipo industrial de alto consumo energético

---

28 FAO 1998. El protocolo de Kyoto: nuevas oportunidades para financiar el desarrollo forestal sostenible. Nota informativa, Abril 1998 LACFC/98/1.

- Generar proyectos de conservación de biodiversidad orientados a reducir la erosión genética.
- Protección de cuencas hidrográficas
- Reducción y captura de gases de contaminación de agua y aire
- Reducción de consumo de combustibles fósiles, buscando nuevos sustitutos.

## VII. CONCLUSIONES

¿Qué se ha estudiado en esta compilación técnica?

- Se ha podido llegar a comprender los efectos de la lluvia ácida sobre los ecosistemas.
- Se ha podido entender que este fenómeno es influenciado por la emisión de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  de origen natural y antropogénico siendo los principales emisores los países industriales.