

La lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local

Luis Fernando Garcés Giraldo ¹ / Marta Lucía Hernández Ángel ²

¹Ingeniero Sanitario. Magíster en Ingeniería Ambiental. Decano Facultad de Ingeniería, Corporación Universitaria Lasallista /

²Ingeniera química. Candidata a Magíster en Ingeniería Ambiental. Profesora del programa de Ingeniería Ambiental, Corporación Universitaria Lasallista.

Correspondencia: Luis Fernando Garcés Giraldo. e-mail: lugarces@lasallista.edu.co

Línea de investigación: Tratamiento de Aguas. Semillero de investigación en Gestión y Medio Ambiente SIGMA

Acid rain, a physiochemical phenomena that occurs locally

Resumen

La lluvia ácida es un fenómeno ligado con la alta producción dependiente, principalmente, del consumo de combustibles fósiles y de ciertas prácticas agrícolas como las quemadas, que al liberar indiscriminadamente sustancias como los óxidos de azufre y de nitrógeno a la atmósfera, aportan la materia prima para la formación de los ácidos sulfúrico y nítrico, que posteriormente retornan a la superficie terrestre, bien sea como líquidos o como aerosoles y afectan a los ecosistemas naturales.

El agua lluvia es ligeramente ácida porque contiene ácido carbónico formado a partir del bióxido de carbono atmosférico. La lluvia que debería tener un pH de aproximadamente 5.6, puede alcanzar un valor cercano a un 7.0, debido a la presencia en la atmósfera de otras sustancias de carácter alcalino que neutralizan el ácido carbónico.

Palabras claves: Lluvia ácida. Precipitación ácida. Contaminación atmosférica. Contaminantes en el aire. Efectos de la combustión.

Abstract

Acid rain is a phenomena associated to high production, depending mainly of fossilized fuel consuming and of certain agro cultural practices as burnings, which release several substances like sulphur and nitrogen oxides to the atmosphere, aporting the raw material to make up the sulphuric and nitric acids which later return to the hearth surface as liquids as sprays and affect the natural ecosystems.

Rain water is slightly acid because it contains carbonic acid, formed from the atmospheric carbonic dioxide. Rain, which usually has a pH of approximately 5.6, can reach a measure close to 7.0, due to the presence of other alkaline substances in the atmosphere, and those substances neutralize the carbonic acid.

Key words: Acid rain. Acid precipitation. Atmospheric contamination. Air contaminants. Combustion effects.

Introducción

Las personas en las diferentes ciudades están expuestas a mas de 500,000 sustancias extrañas al medio ambiente natural, muchas de las cuales invaden el aire que respiramos y son nocivas para la salud. Otras sustancias de naturaleza coloidal o gaseosa como el monóxido de carbono, el ozono, polvos y humos son prácticamente ubicuas en el ambiente aéreo y resultan de procesos naturales abióticos y bióticos: actividad volcánica y geotérmica, descargas eléctricas, incen-

dios forestales, fermentación y respiración celular, como ejemplos^{1,2}.

Todas las sustancias mencionadas se mantienen durante largo tiempo en rangos de concentración bajos, debido a los eficientes mecanismos de la naturaleza. Sin embargo, la actividad industrial genera tan grandes cantidades de sustancias extrañas, que están alcanzando ya el nivel de contaminantes peligrosos para la vida en el planeta. Al rebasar la capacidad del ecosistema para transformarlos, sus niveles tienden hacia el au-

mento, permanencia e irreversibilidad². La mayor fuente de contaminación atmosférica es el uso de combustibles fósiles como energéticos: Petróleo, gas y carbón son usados en cantidades enormes, del orden de millones de toneladas por día, y los desechos de su combustión se arrojan a la atmósfera en forma de polvo, humo y gases. Los dos primeros se pueden ver y desagradan, pero los gases que no se pueden ver, y son los más peligrosos².

En teoría, al menos polvo y el humo pueden evitarse, pero los gases no, y pueden causar desde lluvia ácida hasta el calentamiento de la tierra (efecto invernadero), así como el incremento en los niveles del ozono y el monóxido de carbono, que son altamente tóxicos para los humanos.

Las principales causas de la lluvia ácida son los óxidos de nitrógeno y azufre que se generan en la combustión: el nitrógeno lo aporta la atmósfera. Estos compuestos, en forma de gotas de lluvia y de niebla, son de corta vida: pronto reaccionan con algo orgánico e inorgánico. Al reaccionar se consumen, pero dejan un daño que puede ser irritación de mucosas en humanos y animales o deterioro en la cutícula de las hojas de los vegetales. En ambos casos, facilitan la entrada de patógenos y reducen la producción agrícola^{3,4}.

Generalidades

El término lluvia ácida comprende tanto a la precipitación, depósito, deposición, depositación húmeda de sustancias ácidas disueltas en el agua lluvia, nieve y granizo, como a la precipitación o depositación seca, por la cual los aerosoles o compuestos gaseosos ácidos son depositados como cenizas, hollín o como gases en el suelo, en las hojas de los árboles y en las superficies de los materiales. En realidad, estas partículas no tienen carácter ácido mientras están en la atmósfera, pero cuando entran en contacto con la neblina, el rocío o el agua superficial, se convierten en ácidos y tienen efectos similares a los de la precipitación húmeda⁵.

El origen de compuestos como los óxidos de azufre y de nitrógeno puede aparecer por efecto natural o antropogénico. Las fuentes naturales comprenden emisiones volcánicas, tormentas eléctri-

cas, biomasa, actividad microbiana, entre otros. Las fuentes antropogénicas corresponden a las emisiones de fuentes fijas provenientes de plantas industriales de combustibles fósiles como carbón y petróleo y fuentes móviles, representadas principalmente por las emisiones de los motores de combustión interna de los vehículos de transporte⁶. Cuando ciertas sustancias como los óxidos de azufre y de nitrógeno entran en la atmósfera, pueden ser desplazados por el viento miles de kilómetros antes de retomar a la superficie terrestre. Su tiempo de permanencia en la atmósfera depende de los procesos físicos de dispersión, transporte y depositación. Cuanto más tiempo permanezcan estos óxidos en la atmósfera, es más probable que se transformen en sustancias de carácter ácido. El pH es el símbolo que utiliza la química para medir la acidez o alcalinidad de las soluciones. La lluvia ácida tiene un pH inferior a 5,6 y puede ir hasta 2,5 y excepcionalmente a 1,0^{1,3,5,7}.

El agua lluvia es ligeramente ácida porque el agua y el dióxido de carbono del aire forman ácido carbónico y tiene un pH entre 5.7 y 7. En lugares contaminados por ácido sulfúrico y ácido nítrico el pH de esa lluvia varía entre 5 y 3^{3,6}.

El químico inglés Angus Strutt en 1872 fue quien dio el nombre de lluvia ácida a este tipo de precipitación destructiva. Aunque sólo fue en la Conferencia de Estocolmo en 1972, donde se habló por vez primera del tema. Al inicio de la década de los 70, ya se tenían cifras alarmantes de la contaminación de ríos y bosques de los países industrializados por esta causa⁸.

En 1983, muchas naciones industrializadas reconocieron la terrible amenaza y acordaron restringir la contaminación por dióxido de azufre, aunque hoy es superada por los óxidos de nitrógeno (NOx), provenientes de los escapes de los vehículos automotores, fuentes domésticas e industriales^{1,8}. (Figura 1)

La lluvia ácida también tiene impactos negativos sobre ecosistemas artificiales y sobre el hombre. Puede deteriorar edificios, puentes, construcciones, monumentos, materiales metálicos y equipos electrónicos, así como afectar la salud humana. Este último aspecto es uno de los más difíciles de evaluar por la complejidad de contaminantes que se generan².

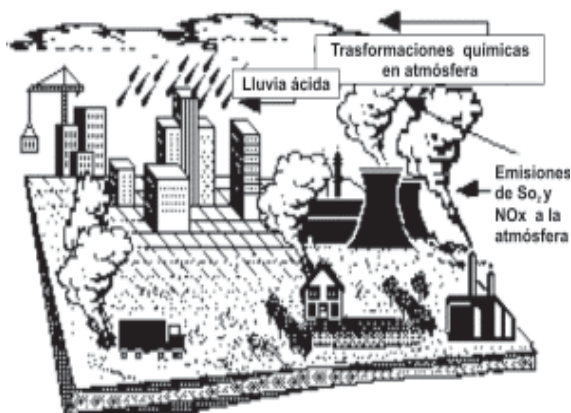


Figura 1. Proceso de generación de la lluvia ácida

Los niveles de contaminantes dependen del grado de emisiones atmosféricas de las diferentes fuentes, lo que aumenta la concentración de éstos en la atmósfera. Su presencia se ve disminuida en la medida que las precipitaciones sean mayores. Dependiendo de la intensidad y duración de la lluvia, se realiza un lavado atmosférico, que termina con el transporte de los elementos contaminantes hacia la tierra, donde sus efectos son sentidos⁹.

Este último aspecto es de gran importancia, ya que la lluvia se convierte en uno de los principales mecanismos por los cuales los contaminantes atmosféricos retornan a la superficie, lo que posibilita la toma de mediciones de la concentración de éstos, presentes en la atmósfera, en función de la cantidad de agua caída y almacenada mediante un proceso de captación. Lo anterior es aplicable especialmente a los centros urbanos industrializados que, en general, presentan los mayores problemas de contaminación, susceptibles de ser medidos. Mediante la caracterización de la lluvia, se determina su composición y grado de acidez, con el objeto de conocer su estado de agresividad hacia el suelo, el agua y los materiales, entre otros, permitiendo el análisis y diseño de técnicas de control, orientadas a reducir su incidencia en el medio y las concentraciones emitidas a la atmósfera¹⁰.

En los bosques la situación es un tanto distinta. Aunque los científicos no se han puesto de acuerdo con respecto a los efectos inmediatos concretos, todos estiman que la lluvia ácida no mata di-

rectamente a plantas y árboles, sino que actúa a través de ciertos mecanismos que los debilitan, haciéndolos más vulnerables a la acción del viento, el frío, la sequía, las enfermedades y los parásitos. La lluvia ácida afecta directamente las hojas de los vegetales, despojándolas de su cubierta cerosa y provocando pequeñas lesiones que alteran la acción fotosintética. Con ello, las plantas pierden hojas y, así, la posibilidad de alimentarse adecuadamente. En ocasiones la lluvia ácida hace que penetren al vegetal ciertos elementos como el aluminio (éste bloquea la absorción de nutrientes en las raíces), que afectan directamente su desarrollo^{9,11}.

Los efectos de la lluvia ácida en el suelo pueden verse incrementados en bosques de zonas de alta montaña, donde la niebla aporta cantidades importantes de los contaminantes en cuestión. Los cultivos no son tan vulnerables a los efectos de la lluvia ácida, por ser abonados con fertilizantes que restituyen nutrientes y amortiguan la acidez^{12,13}.

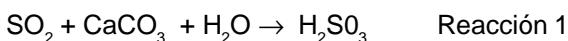
La naturaleza posee mecanismos para regular la acidez. El suelo, ejerce una acción amortiguadora (buffer) que impide que el pH se torne demasiado ácido. No obstante, la mayor cantidad de contaminantes llegan al medio como producto de la actividad humana, que los produce en grandes cantidades, que no logran ser amortiguadas¹².

Química de la lluvia ácida

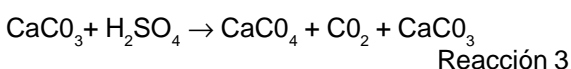
Los Óxidos de azufre han sido ampliamente estudiados. Ellos incluyen seis compuestos gaseosos diferentes que son: monóxido de azufre (SO), dióxido de azufre (SO₂), trióxido (SO₃), tetraóxido (SO₄), sesquióxido (S₂O₃) y heptóxido (S₂O₇). El SO₂ y SO₃ son los dos óxidos de mayor interés en el estudio de contaminación del aire^{2,14}.

El SO₂ es altamente soluble en agua y relativamente estable en la atmósfera. Se estima que permanece en esta de 2 a 4 días, intervalo durante el cual puede ser transportado a más de 1000 km. del punto de emisión. Actúa como agente oxidante o reductor y reacciona fotoquímicamente o catalíticamente con otros componentes en la atmósfera. El SO₂ puede producir SO₃, H₂SO₄ y sales del

ácido sulfúrico como se presenta en las reacciones 1 y 2, siendo uno de los mayores precursores de la lluvia ácida^{6,15}. Las reacciones que se llevan a cabo son:

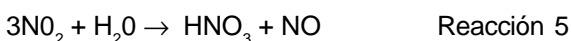
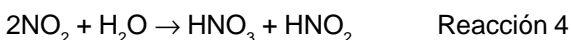


Los carbonatos son reemplazados por sulfatos, los cuales son más solubles en agua, como se indica en la reacción 3:



El sulfato de calcio, o yeso, formado en este proceso es lavado de nuevo dejando una superficie descolorida y "picada".

Los Óxidos de nitrógeno incluyen los compuestos gaseosos: óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), óxido nitroso (N₂O), sesquióxido (N₂O₃), tetraóxido (N₂O₄) y pentóxido (N₂O₅). Los dos óxidos de nitrógeno considerados como mayores contaminantes atmosféricos primarios son el NO y el NO₂^{4,15}. El NO₂ es fácilmente soluble en agua, más pesado que el aire, en el rango ultravioleta el NO₂ es un buen absorbedor de energía. Por lo tanto, juega un papel importante en la producción de contaminantes secundarios y con el vapor de agua existente en el aire por la humedad forma ácido nítrico, ácido nitroso y óxido nítrico como se indica en las reacciones 4 y 5^{12,15}:



Ambos ácidos producen acidez en el agua lluvia. Además, se combinan con el amoníaco (NH₃) de la atmósfera para formar nitrato de amonio (NH₄NO₃).

El óxido nítrico (NO) es emitido a la atmósfera en cantidades mayores que el dióxido de nitrógeno (NO₂). Se forma en procesos de combustión a altas temperaturas cuando el oxígeno atmosférico se combina con el nitrógeno, de acuerdo a la reacción 6:



Efectos de la lluvia ácida

La lluvia ácida sólo fue descubierta a partir de los desastres ecológicos que causó en algunos países de Europa, lo que inquietó a los científicos de esta zona del mundo y generó grandes investigaciones. A continuación se enumeran algunos de esos episodios y, posteriormente, los efectos que se han identificado en los diferentes componentes del ambiente^{9,21}.

Desastres causados por la lluvia ácida en diferentes países^{5,8}

En el siglo XX, en Sudbury (Ontario, Canadá) existía la minería de sulfuros más grande del mundo (NiS, CuS, ZnS, CoS). La explotación se realizaba por métodos tradicionales como la tostación, con lo que se emitía gran cantidad de SO₂ a la atmósfera. En 1920 la ciudad se torna de color amarilloso y las aguas del río Sudbury presentan gran cantidad de metales pesados, sulfuros, Al, Fe, SH₂ (tóxico en disolución). Se perdieron grandes masas de vegetación, el medio se volvió abiótico y el suelo sufrió fuertes erosiones. La superficie afectada superó el medio millón de hectáreas. Se intentó su recuperación, pero los costos de recuperación fueron mayores que los beneficios de la mina.

En la década de los 70, en Europa, también se identificaron desaparición de especies en los ríos y coloraciones amarillentas de las ciudades. Algunas especies de peces morían. En Finlandia se vieron afectados los suelos, así como un debilitamiento forestal que afectó a las coníferas cuyas hojas amarilleaban y caían.

En los Países Nórdicos los suelos poseen bajo poder amortiguador frente a la acidez, por lo que con las lluvias ácidas el pH bajaba rápidamente produciendo grandes cantidades de aluminio tóxico que iba a los ríos y afectaba la vida en ellos. En los países mediterráneos se identificaron pocos efectos de las lluvias ácidas, debido a que los suelos se encuentran fuertemente taponados frente a la acidez (neutralizador de acidez), por la riqueza de materiales carbonatados en el suelo.

Efectos de la lluvia ácida en la naturaleza^{3,7,15}

Lagos y corrientes de aguas	Muerte de crustáceos, insectos acuáticos y moluscos y la desaparición del fitoplancton, causando con el tiempo la imposibilidad de sobrevivencia del resto de la fauna por falta de alimento
Suelo	Penetra en la tierra y afecta las raíces, a las hojas las vuelve amarillentas, generando un envenenamiento de la flora que termina con la muerte de las plantas y árboles.
Edificios y las construcciones de hormigón	Serio compromiso al volver porosa la construcción y causar la pérdida de resistencia de los materiales, por lo que deben ser continuamente restaurados.
Animales	Pérdida de pelo y desgaste prematuro de mandíbulas
Seres humanos	Incremento de las afecciones respiratorias (asma, bronquitis crónica, síndrome de Krupp, entre otras) y un aumento de los casos de cáncer
En todos los organismos	Disminución de las defensas y una mayor propensión a contraer enfermedades.

Causas de la lluvia ácida

La lluvia ácida es causada por las actividades industriales, principalmente por las emisiones de las centrales térmicas y por las producidas por la combustión de hidrocarburos que llevan S, N y Cl⁷. También son responsables los procesos de desnitrificación de fertilizantes añadidos a los suelos en dosis excesivas¹⁵, como los procesos naturales similares que se producen en las zonas de manglares, arrozales y volcanes¹⁶.

Referencias

1. HERRERA L, María Ugia. Lluvia ácida, aspectos fisicoquímicos y ambientales. Instituto de Estudios Ambientales, Palmira, Colombia 1999. P129
2. LIKENS, E. E. Bormann F.H. Acid rain: a serious regional environmental problem Science. 184. 1974.
3. BENITEZ, Jaime. Process Engineering and Design for Air Pollution Control. New Jersey: Pentice- Hall, 1993. 466 p.
4. LEGORRETA, J., Y A. FLORES. (1992). La contaminación atmosférica en el valle de México. Comisión Nacional de Derechos Humanos C.G.R.P.E. (1990). Programa Integral

Contra la Contaminación Ambiental D.D.F. México, D.F.

5. LISJESTRAND, H. M., Morgan J. J. Chemical composition of acid precipitation in Pasadena. California . Env. Sci. And Tech. 12. 12, 1978.
6. JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY. Osaka city's Air Pollution- control measures. Tokio: Environment División. Osaka Municipal Government, 1990. 100 p.
7. KIRKWOOD. R.C. y LONGLEY. A.J. Clean Technology and the Environment. Londres: Blackie Academic y Professional, 1995. 350 p.
8. BOOK OF ASTM STANDARDS. Atmospheric Analysis. V. 11-03. 1983. (Occupational Health and Safety; Annual).
9. BRAVO, A.H., et al. Ozono y lluvia ácida en la Ciudad de México. En: Ciencias: UNAM. México. No. 22, (1991). P. 33-40.
10. BENKORITS, C.M. Compilación on inventory of antropogenic emissions in the United States and Canadá . Atm. Env. 16, 6. 1982.
11. BENKORITS, C.M. Compilación on inventory of antropogenic emissions in the United States and Canadá . Atm. Env. 16. 6. 1982.

12. LEWIS W.M-, Grant M.C. Acid precipitation in the Western United States . Science. 207. 1980.
13. BRASIL. GOBERNACIÓN DE SAO PAULO. Controle de emissao de fontes movéis no estado de Sao Paulo. Sao Paulo: Cetesb. Serie documentos. Febrero1993.Vol-4.56p.
14. Deposición ácida. [10 de enero de 2005] URL disponible en <http://www1.ceit.es/>
15. Lluvia ácida. [10 de enero de 2005] URL disponible en <http://www.monografías.com>
16. LACY TAMAYO, Rodolfo. Memorias Seminario Internacional Contaminación Atmosférica. Medellín. 1997.
- asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/340DepAc.htm