

ALGUNOS ELEMENTOS BÁSICOS SOBRE LA LLUVIA ÁCIDA
Información complementaria

Luis Reinaldo Barreto Pedraza

CONTENIDO

LA LLUVIA ÁCIDA.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
GENERALIDADES DE LA LLUVIA ÁCIDA.....	3
1 INTRODUCCIÓN.....	3
2 LA QUÍMICA DE LA LLUVIA ÁCIDA.....	4
2.1 FORMACIÓN DE LOS ÁCIDOS SULFÚRICO, NÍTRICO Y OTROS ÁCIDOS.....	6
2.2 FORMACIÓN DEL ÁCIDO SULFÚRICO.....	6
2.2.1 Oxidación en fase gaseosa.....	6
2.2.2 Oxidación en fase acuosa.....	7
2.3 FORMACIÓN DEL ÁCIDO NÍTRICO.....	7
2.4 OTROS ÁCIDOS.....	7
2.4.1 Ácido carbónico.....	7
2.4.2 Ácido clorhídrico.....	7
2.5 LA DEPOSICIÓN ÁCIDA.....	8
2.5.1 LA DEPOSICIÓN DE FORMA SECA.....	9
2.5.2 LA DEPOSICIÓN DE FORMA HÚMEDA.....	9
3 EL PROBLEMA DE LA LLUVIA ÁCIDA.....	10
3.1 EL TRANSPORTE A LARGA DISTANCIA DE LOS CONTAMINANTES.....	12
3.2 EFECTOS DE LA LLUVIA ÁCIDA.....	13
3.2.1 Efectos de la deposición ácida en los ecosistemas forestales.....	14
3.2.2 Efectos de la deposición ácida en los ecosistemas acuáticos.....	16
3.2.3 La lluvia ácida y la salud humana.....	18
3.2.4 Efectos en materiales.....	19
4 PROGRAMA DE VIGILANCIA GLOBAL Y EL PROBLEMA DE LA LLUVIA ÁCIDA.....	21
4.1 GLOSARIO.....	22

GENERALIDADES DE LA LLUVIA ÁCIDA

1 INTRODUCCIÓN.

La lluvia ácida puede ser causada por las emisiones de fuentes naturales como los volcanes, sin embargo, la principal causa es la liberación de dióxido de azufre, óxido de nitrógeno, durante la combustión de combustibles fósiles. Cuando estos gases se descargan en la atmósfera, reaccionan con el agua, el oxígeno y otros gases, ya presentes en la atmósfera, para formar ácido sulfúrico y ácido nítrico. Estos ácidos luego se dispersan sobre grandes áreas debido a los patrones de viento y caen de nuevo al suelo como lluvia ácida u otras formas de precipitación¹. Otras las emisiones corresponden a las de los ácidos derivados del azufre, del nitrógeno o del cloro, entre otros, por procesos industriales. O son los residuos de la generación de energía eléctrica, la cocción de alimentos y calefacción por la quema de carbón y los derivados del petróleo.

Como tal, la deposición de ácidos hechos por el hombre comenzó a convertirse en un problema importante durante la revolución industrial y fue descubierta por primera vez por un químico escocés, Robert Angus Smith, en 1852. En ese año, descubrió la relación entre la lluvia ácida y la contaminación atmosférica en Manchester, Inglaterra. Los resultados de sus hallazgos se publicaron en el libro Aire y lluvia: el nacimiento de la climatología química, en 1873, donde acuña el término lluvia ácida².

Desde el período de Smith hasta mediados del siglo XX, no hubo una investigación notable sobre la lluvia ácida hasta finales de la década de 1960. La investigación sobre la deposición de SO_4^{2-} atmosférico se realizó en Sudbury, Ontario, Canadá, y más tarde en lugares de Europa, América del Norte y Australia. A finales de los años sesenta, Svante Oden, un científico sueco del suelo, estableció una comprensión moderna de la lluvia de aguas superficiales en Escandinavia y en Norteamérica por Gene Likens³. La atención pública aumentó aún más en la década de 1970, cuando el New York Times publicó informes sobre los problemas que ocurren en el experimento forestal de Hubbard Brook en New Hampshire⁴.

Una limnóloga estadounidense, Eville Gorham, y sus colegas publicaron una serie de artículos sobre lluvia ácida entre 1955 y 1965 (Gorham, 1976). Durante la década de 1980, la medición de la acidez de la lluvia y la nieve debido a la contaminación industrial se realizó por primera vez en los EE. UU. (EPA, 1980). En 1976, J. N. Galloway y E. B. Cowling iniciaron un Programa Nacional de Deposición Ácida (NADP) en los Estados Unidos. El NADP descubrió que la deposición ácida era muy alta en la parte noreste del país (Galloway y Cowling, 1978). En 1980, el Congreso de los Estados Unidos estableció el Programa Nacional de Evaluación de la Precipitación Ácida (NAPAP) que incorporó la red NADP original en una red nacional llamada Red de Tendencias Nacionales (NTN). Las principales actividades de NAPAP fueron llevar a cabo un programa integral de 10 años para investigar, monitorear y evaluar el problema de la precipitación ácida en los EE.

¹ Briney, Amanda, (2018). "Contributing Writer Acid Rain: What You Need to Know: The Causes, History, and Effects of Acid Rain. Thought.co. Recuperado: <https://www.thoughtco.com/acid-rain-definition-1434936>. 18/08/2019.

² Seinfeld, J; Pandis, S. (2016). "Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change". Ed. John Wiley & Sons, 3 ed.

³ Mohajan, Haradhan (2018); 3(5). "Acid Rain is a Local Environment Pollution but Global Concern". Open Science Journal of Analytical Chemistry: 47-55

⁴ Op. cit.

NADP es una red de más de 100 agencias federales, universidades, naciones tribales y compañías que proporciona emisiones de ácido precisas a largo plazo (NAPAP, 1990). La demanda de productos y servicios industriales ha aumentado debido al crecimiento de la población y al desarrollo económico. El desarrollo y la disponibilidad de nuevas tecnologías, el descubrimiento de nuevos usos para los recursos y productos, los desarrollos de instalaciones de transporte influyen en las emisiones de SO_2 y NO_x (Singh, 1994).

La industrialización rápida y no planificada es la causa principal de la lluvia ácida. Alrededor del 60-70% de SO_2 es responsable de la deposición ácida global. Más del 90% del SO_2 en la atmósfera se crea a partir de actividades humanas como; combustión industrial (69.4%), transporte (3.7%), quema de carbón (2-3%), fundición de minerales de sulfuro de metal para obtener los metales puros (aproximadamente 14%). El 10% restante de SO_2 se emite a partir de erupciones volcánicas, incendios forestales, rocío marino, vegetación podrida, plancton, descomposición orgánica, etc. (Ramadán, 2004).

Alrededor del 95% de NO_x se emite en la atmósfera a partir de actividades humanas como; proceso de cocción de temperaturas extremadamente altas en automóviles (56%), reacción química en la producción de fertilizantes (5%), combustión de combustible (34%), etc. El 5% restante se emite por incendios forestales, vegetación podrida, acción bacteriana en el suelo, acción volcánica, rayos, etc. (United States Geological Survey, USGS, 2013). La lluvia ácida causa la contaminación del aire en muchos países desarrollados e industrializados, principalmente en la sección noreste de los EE. UU., La sección sureste de Canadá, India, Japón, China y Europa Central (Kolhe y Deshmukh, 2016).

Los óxidos de azufre y nitrógeno emitidos a la atmósfera, sufren diferentes procesos de transporte y transformación química, en los cuales intervienen componentes meteorológicos como los vientos, la precipitación y la radiación solar, procesos del ciclo hidrológico como la condensación del vapor de agua y la emisión de gases contaminantes a la atmósfera.

El cambio más importante generado por este fenómeno, es la disminución del pH natural de la lluvia, la cual, después de que es depositada, genera la acidificación relacionada con los efectos negativos que ocasiona sobre ecosistemas acuáticos y terrestres, afectando árboles, plantas y cultivos, acidificando lagos y ríos y deteriorando edificaciones y demás infraestructura física.

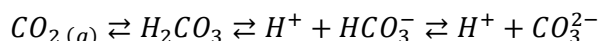
La recopilación de información presentada, tiene como objetivo dar una idea general del fenómeno y de las medidas para contrarrestar sus efectos. Se analizan procesos de generación, transporte, transformación de los precursores de lluvia ácida, la forma de deposición de estos contaminantes en el medio; el problema en torno al fenómeno, el seguimiento y monitoreo para su mitigación. Además, se presenta el fenómeno de la precipitación ácida como un asunto a tener en cuenta a nivel investigativo y político, por lo que se describen los esfuerzos desarrollados a nivel internacional y nacional, en el que definen las precipitaciones ácidas como un indicador de calidad del aire, pero principalmente, como un asunto a tener en cuenta para la prevención y el control de la acidificación del medio.

2 LA QUÍMICA DE LA LLUVIA ÁCIDA

Las sustancias se pueden clasificar en función de su comportamiento químico con ácido o como base. El químico sueco Svante Arrhenius definió ácidos y bases en términos del

efecto que estas sustancias tienen en el agua. Según Arrhenius, los ácidos son sustancias que aumentan la concentración de iones de H en solución acuosa, y las bases aumentar la concentración del ion OH en solución acuosa⁵. Las sustancias ácidas se forman a partir de elementos químicos no metálicos y las básicas a partir de los metales. Con un pH⁶ menor que 7 son ácidas, por el contrario, las sustancias con un pH mayor a 7 son consideradas básicas o alcalinas.

La lluvia ácida ha tenido una particular importancia desde su aparición, debido a que está caracterizada por tener un pH menor al de la lluvia en su estado natural, considerada como una sustancia ácida, ya que tiene un pH alrededor de 5,6. La acidez natural del agua lluvia se genera por el equilibrio existente entre el bióxido de carbono (CO₂) en el aire y el ácido carbónico (H₂CO₃), formado en el agua por disolución del CO₂, el cual es un ácido débil. La formación de H₂CO₃ y su disociación iónica se presentan a continuación (ver la sección 2.3.1):



La lluvia es considerada “contaminada”, o lluvia ácida, cuando los óxidos de azufre y de nitrógeno intervienen en la química de la atmósfera y en su equilibrio, causando que el pH de la lluvia, disminuya a menos de 5,6 en la escala de pH. Como ejemplo se tiene, que la lluvia con un pH de 4, es 40 veces más ácida que la lluvia en su estado natural, esto debido a la escala logarítmica del pH (potencial de hidrógeno). En la Figura 1 muestra diferentes sustancias en la escala de pH, entre las cuales se encuentra la lluvia en su estado natural.

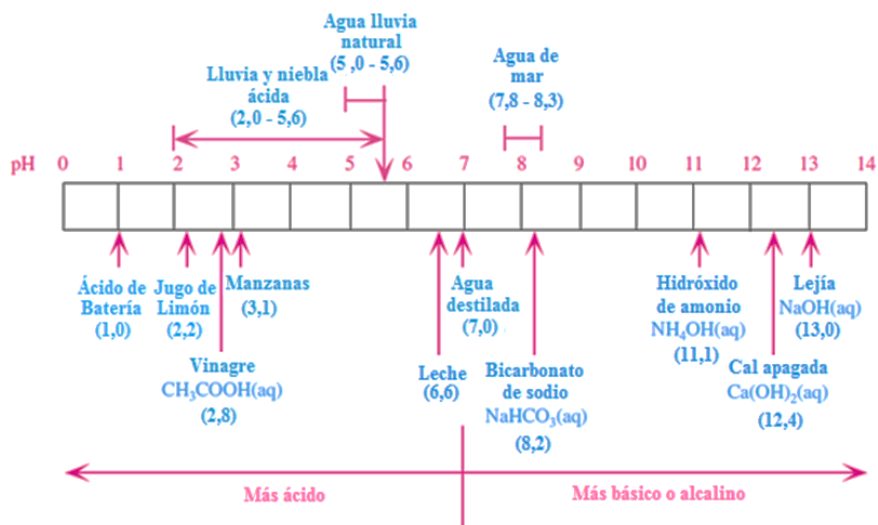


Figura 1. Los valores de pH de algunas soluciones acuosas conocidas. Fuente: Jacobson, Mark Z. (2002), “Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions”, Ed Cambridge University Press.

La lluvia ácida y en general su proceso de precipitación en el medio es también

⁵ Ebbing, D y Gammon, S. (2009) “General Chemistry”. Ed Houghton Mifflin Company. Boston (EUA)

⁶ El pH es indicador del comportamiento ácido o básico de una sustancia en función de la concentración de protones o iones de hidrógeno y se define como $pH = -\log_{10}[H^+]$, donde [H⁺] es la molaridad del ion hidrógeno en mol/litro.

denominado deposición ácida. Esta puede ser de dos tipos: la deposición seca o la deposición húmeda y depende de las formas precursoras (gaseosas o en aerosol) de las precipitaciones ácidas. En la

Tabla 1 se presenta la clasificación de la lluvia de acuerdo con el pH.

Tabla 1. Clasificación del agua lluvia de acuerdo con el pH.

pH	CLASIFICACIÓN DE LA LLUVIA
pH > 5,6	Lluvia no ácida
4,7 < pH ≤ 5,6	Lluvia ligeramente ácida
4,3 < pH ≤ 4,7	Lluvia medianamente ácida
pH ≤ 4,3	Lluvia fuertemente ácida

2.1 FORMACIÓN DE LOS ÁCIDOS SULFÚRICO, NÍTRICO Y OTROS ÁCIDOS

Los ácidos llegan a la atmósfera por emisiones de actividades industriales, como los casos del ácido sulfúrico, del ácido nítrico, del ácido clorhídrico y de varios ácidos orgánicos. De la naturaleza, el ácido sulfhídrico procede de la descomposición de la materia orgánica y en las emisiones de volcanes; los ácido sulfuroso, sulfúrico y clorhídrico de emisiones volcánicas. Sin embargo, la mayor contribución de ácidos corresponde a la transformación química de óxidos ácidos, principalmente del azufre, del nitrógeno, en menor medida los óxidos de los halógenos (Bromo, Cloro y otros) emitidos por fuentes naturales (volcanes) y principalmente por actividades humanas. Las reacciones se desarrollan en su mayoría en la tropósfera⁷ donde participa la radiación solar como catalizador, el oxígeno y el vapor de agua como unos de los principales reactivos.

La formación de los radicales libres, especialmente radical hidroxilo (OH), el cual se forma por la secuencia de reacción de formación del ozono, el cual produce un átomo de oxígeno singlete O(¹D) que reacciona con el agua en la atmósfera y genera dicho radical.

2.2 FORMACIÓN DEL ÁCIDO SULFÚRICO

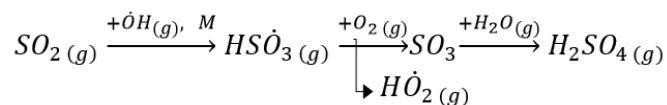
El óxido de azufre IV (SO₂), corresponde al constituyente mayoritario de las emisiones de compuestos de azufre por combustión y procesos industriales (reducción de menas de sulfuros metálicos). Para la formación del H₂SO₄ se produce básicamente por dos vías:

2.2.1 Oxidación en fase gaseosa.

El mecanismo de conversión de S (IV), o estado de oxidación +4, a S (VI), o estado de oxidación +6, se inicia con la oxidación del SO₂ a óxido sulfúrico, SO₃, mediante radicales libres, en este caso el radical hidroxilo (OH) en presencia de un catalizador (M) y la adición

⁷ La tropósfera es la capa de la atmósfera que va desde la superficie terrestre hasta unos 18 km de altura en la zona tropical. En ella se encuentra el vapor de agua y se desarrollan la mayor parte de los fenómenos meteorológicos.

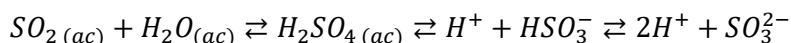
de O_2 . Para la formación del ácido sulfúrico. H_2SO_4 se hidrata el SO_3 con vapor H_2O .⁸



El H_2SO_4 , por tener baja presión de vapor de saturación, se condensa, en especial sobre partículas o superficies de gotas. Este mecanismo se presenta en condiciones de humedad menores al 70 %.

2.2.2 Oxidación en fase acuosa.

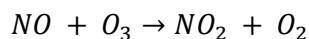
El SO_2 se absorbe en la gota de agua, para formar ácido sulfuroso, el cual en la primera disociación se obtiene un ion de hidrógeno (H^+) y un ion bisulfito (HSO_3^-), y en la segunda disociación quedan dos iones H^+ y un ion de sulfito (SO_3^{2-}):



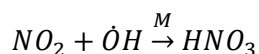
El H_2SO_4 se forma de la oxidación de HSO_3^- con peróxido de hidrógeno, previamente formado por reacciones del agua con el radical $\dot{O}H$:

2.3 FORMACIÓN DEL ÁCIDO NÍTRICO

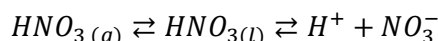
En el caso ácido nítrico, a la atmósfera ingresa óxido de nitrógeno, NO , y óxido nítrico, NO_2 , en pequeñas cantidades. El NO se oxida con el ozono troposférico (O_3), formado durante el día, como parte final del ciclo de la formación y consumo de O_3 , en la tarde y noche^{9,10}:



El NO_2 , con un radical $\dot{O}H$, forma el ácido nítrico, HNO_3 :



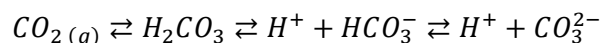
En contacto con las gotas de agua se disuelve rápidamente disociándose en H^+ y NO_3^- .



2.4 OTROS ÁCIDOS

2.4.1 Ácido carbónico.

La disolución del dióxido de carbono, CO_2 , en el agua produce ácido carbónico, H_2CO_3 . Este se disocia en un ion hidrógeno, H^+ , y un ion bicarbonato, HCO_3^- . El ion HCO_3^- se disocia en H^+ , y un ion carbonato, CO_3^{2-} :



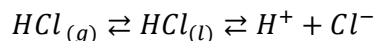
⁸ Jacobson, Mark Z. (2012), "Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions", Ed Cambridge University Press.

⁹ Heicklen, Julian (1976) "Atmospheric Chemistry", Ed. Academic Press, New York.

¹⁰ Seinfeld, J; Pandis, S. (2016). "Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change". Ed. John Wiley & Sons, 3 ed.

2.4.2 Ácido clorhídrico

El ácido clorhídrico, HCl , es emitido directamente especialmente por actividades humanas. Este se disuelve en el agua:



En la atmósfera estas reacciones siguen diferentes mecanismos por la presencia de otras sustancias como metales, sales, compuestos orgánicos entre otras y acción de la radiación solar. En la fig

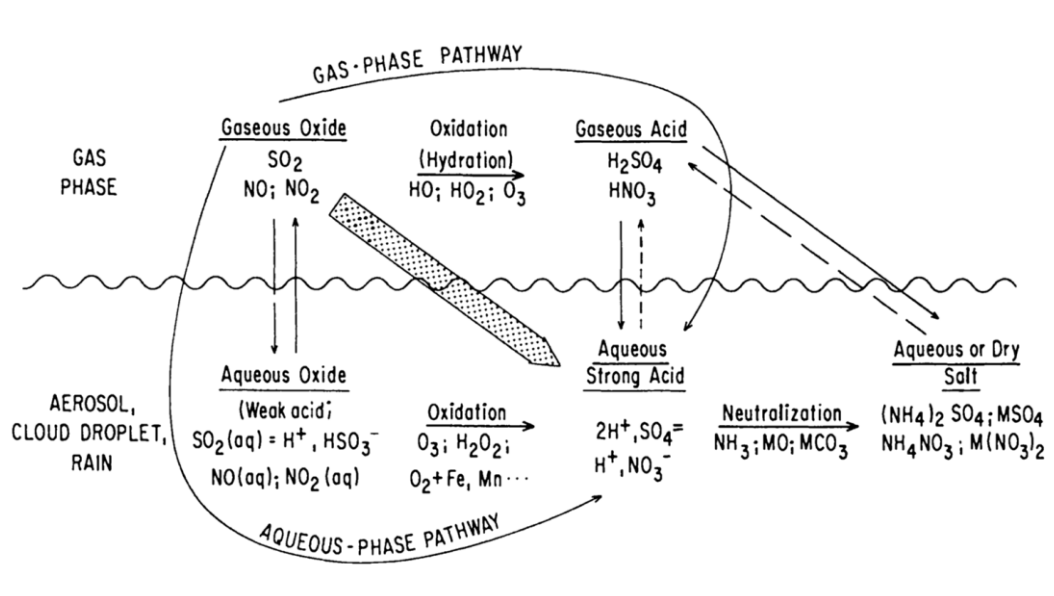


Ilustración 1. Representación esquemática de vías para la formación atmosférica de ácidos sulfúrico y nítrico y sus sales. (Reproducido con permiso de la Ref. 28. Copyright 1986, Lewis Publishers, Inc.) Fuente: Johnson, R; Gordon, G. (1987). The Chemistry of Acid Rain. ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, DC

2.5 LA DEPOSICIÓN ÁCIDA.

La deposición es el fenómeno de caída partículas sólidas o líquidas, por la acción de la gravedad ¹¹. La deposición se realiza por dos vías: la deposición seca (partículas sólidas) y la deposición húmeda, llamada lluvia ácida. Estos mecanismos por los cuales tanto los gases trazas (de muy bajas concentraciones) y las partículas son eliminados de la atmósfera.

Si se comparan los aportes de la deposición seca y de la deposición húmeda, como lo presentan Seinfeld y Pandis, se observa que la deposición seca opera lentamente, pero continuamente, mientras que la deposición húmeda ocurre episódicamente en eventos de precipitación. Se sigue el cálculo simple de Schwartz (1989)¹² para comparar la magnitud de varios procesos. Los flujos de emisión promedio de SO_2 y NO_x en el noreste de los Estados Unidos a finales de la década de 1980 fueron de $130 \text{ mmol m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (milimoles por metro cuadrado y por año) y $120 \text{ mmol m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectivamente. En comparación, las

¹¹ Termodinámicamente, es el paso de la fase gaseosa (vapor) a la fase sólida.

¹² Schwartz, S. E. (1989), Acid deposition: Unraveling a regional phenomenon, Science 243, 753–763, citado por Seinfeld y Pandis.

emisiones anuales totales en Ohio fueron de $360 \text{ mmol m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ y $201 \text{ mmol m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. A efectos de este cálculo, se puede suponer una velocidad de deposición seca de SO_2 de 1 cm s^{-1} como valor representativo y se puede utilizar las mediciones de concentración de SO_2 disponibles para obtener un rango de concentraciones medias anuales de SO_2 durante los Estados Unidos para ese período. Schwartz estimó un valor medio anual de concentración de SO_2 igual a $0,16 - 1,25 \mu\text{mol m}^{-3}$, lo que llevó a la deposición seca de flujos de azufre entre 16 y $125 \text{ mmol m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Los flujos de deposición húmeda de sulfato medio medido oscilaron entre 10 y $40 \text{ mmol m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en estas regiones. Tales estimaciones indican que, sobre una base anual, la deposición seca de azufre excedió la deposición húmeda en regiones cercanas a la fuente (correspondiente a altas concentraciones de SO_2) y fue comparable a la deposición húmeda más alejada de las regiones de origen.

2.5.1 LA DEPOSICIÓN DE FORMA SECA

Los gases ácidos reaccionan con partículas u otros gases para la formación de sales u otros tipos de compuestos. Las sales son el resultado de la neutralización entre los ácidos y las sustancias básicas o alcalinas, las cuales llegan a la atmósfera por el arrastre del viento, la combustión de biomasa, la quema de combustibles líquidos y sólidos o por emisiones de sustancias gases.

Seinfeld y Pandis¹³ define la deposición seca como aquella que, en términos generales, el transporte de especies gaseosas y partículas desde la atmósfera a las superficies en ausencia de precipitación. Los factores que rigen la deposición seca de una especie gaseosa o una partícula son el nivel de turbulencia atmosférica, las propiedades químicas de la especie depositante, y la naturaleza de la superficie misma. El nivel de turbulencia en la atmósfera, especialmente en la capa más cercana al suelo, rige la velocidad a la que las especies se entregan hasta la superficie. En el caso de los gases, la solubilidad y la reactividad química pueden afectar a la toma en la superficie. Para las partículas, el tamaño, la densidad y la forma pueden determinar si se produce la captura por la superficie. La superficie es un factor en la deposición seca. Una superficie no reactiva puede no permitir la absorción o adsorción de ciertos gases; una superficie lisa puede provocar rebotes de partículas. Las superficies naturales, como la vegetación, donde tan variables y a menudo difíciles de describir teóricamente, generalmente promueven la deposición seca.

2.5.2 LA DEPOSICIÓN DE FORMA HÚMEDA

Según Seinfeld y Pandis¹⁴, La deposición húmeda se refiere a los procesos naturales por los cuales son removidos por hidrometeoros (Las gota de las nubes, de la niebla, la lluvia, la nieve) y son llevados a la superficie terrestre, en forma de lluvia, nevada. De acuerdo a estos autores, El proceso se realiza en tres etapas: primero, la sustancia se absorbe en el agua condensada. Entonces la sustancia es lavada por los hidrometeoros, y finalmente es llevada al suelo.

En la realidad, no solo se considera que se tienen las sustancias en la fase gaseosa o en la líquida, dada los cambios químicos que sufren en cada fase, las sustancias ácidas como

¹³ Op. cit.

¹⁴ Ibid.

el SO_2 , después de transformadas en ácidos, pueden reaccionar con partículas o aerosoles, óxidos metálicos como Na_2O , o con gases como el NH_3 para formar sales, las cuales son sólidas en condiciones anhidras (sin agua). Por eso se considera que realmente se presentan muchas fases en la deposición húmeda. En una gota de agua lluvia, puede tenerse iones de Cl^- o Ca^+ , Al_2O_3 sólido e incluso burbujas de aire con gases insolubles en el agua. El fenómeno de caída de la gota es en sí complejo, debido que la gota está siempre en contacto con sustancias en el aire que tienen un intercambio con la fase líquida de la gota, como es el caso de los vapores de ácido nítrico o de amoníaco, los cuales son absorbidos y reaccionan más fácil en la fase líquida. En la Figura 2, se presenta los procesos que sufren los contaminantes gaseosos y sólidos en la formación de la deposición húmeda.

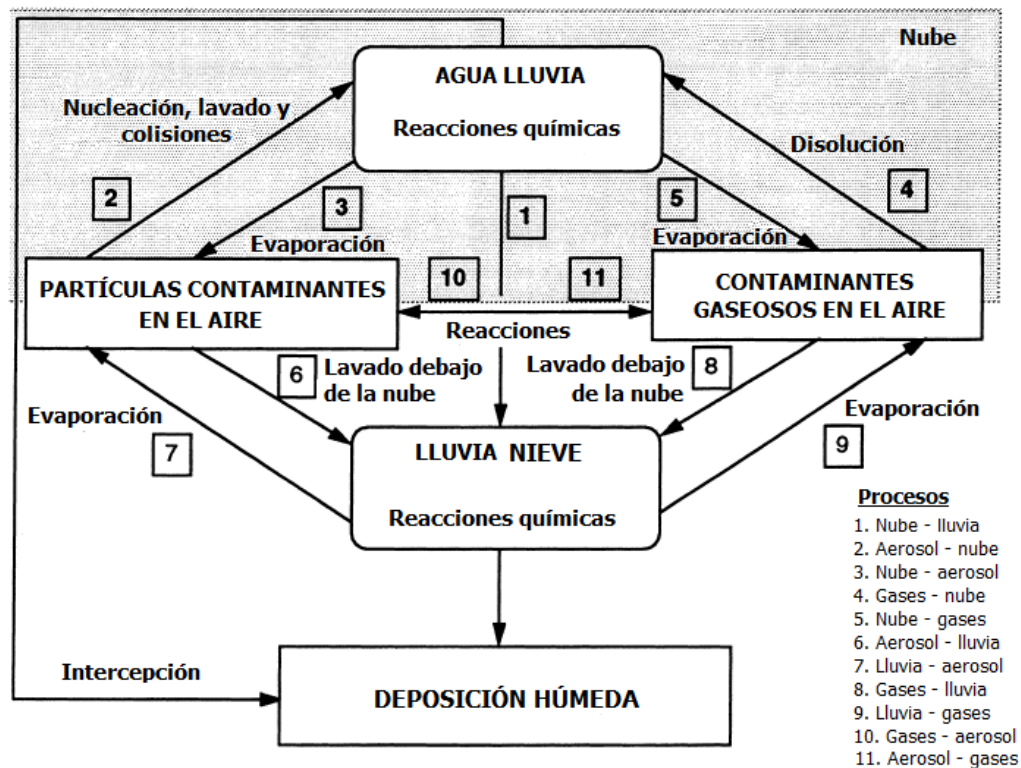


Figura 2. Esquema conceptual de los procesos de deposición húmeda. Fuente Seinfeld, J; Pandis, S. (2016).

3 EL PROBLEMA DE LA LLUVIA ÁCIDA

La atmósfera brinda las condiciones para los procesos de oxidación, las sustancias como el SO_2 o los NO_x son transformados a sulfatos y nitratos mediante procesos químicos en la fase gaseosa o acuosa, como se mostró en páginas anteriores. Otros compuestos como los ácidos orgánicos son producidos en la atmósfera. Además, se debe considerar las partículas que aportan sustancias básicas, óxidos metálicos y compuestos orgánicos, que entran en reacción de neutralización, en las fases mencionadas o simplemente son adsorbidas y se contribuyen a la deposición ácida. El problema se presenta cuando se tiene valores de pH menores al natural del agua lluvia, ya mencionado, de 5.6. El dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno son las principales sustancias contaminantes responsables de la lluvia ácida.

Cientos de lagos en América del Norte, y Escandinavia se han pasado a condiciones ácidas a tal punto que ya no pueden mantener la vida de los peces. En un estudio, realizados en los años 80 y 90, de los lagos noruegos, más del 70% de los lagos que tenían un pH de menos de 4,5 no contenían peces, y casi todos los lagos con un pH de 5,5 o más si los mantenían. El bajo pH no sólo afecta directamente a los peces, sino que también contribuye a la liberación de metales potencialmente tóxicos como el aluminio, magnificando así el problema¹⁵.

En América del Norte, la lluvia ácida ya ha diezmando las poblaciones de numerosos peces y muchas plantas en el 50% de los lagos de alta montaña en los Adirondacks. El pH en ciertos lagos ha alcanzado niveles de acidez que ha inducido el reemplazo de la trucha y las plantas nativas por especies de peces muy tolerantes a los ácidos y por conglomerados de algas¹⁶.

¿De dónde provienen estas sustancias? La presencia de estas sustancias ácidas en la atmósfera, es el resultado de emisiones de gases resultado de la combustión de materiales usados para las actividades agrícolas, la generación de energía, producción y transformación de subproductos y bienes intermedios y finales, el funcionamiento del transporte, la calefacción y la cocción de alimentos entre otros usos. Otras emisiones provienen de procesos químicos o manufactureros que usan o producen derivados de estas sustancias ácidas. Los combustibles usados son el carbón, el petróleo y sus derivados, la biomasa y el gas natural. La mayoría de estas sustancias contienen azufre asociado a compuestos orgánicos que las constituyen. En el caso del nitrógeno, si bien se encuentra como constituyente de algunos compuestos orgánicos, la principal fuente de emisiones corresponde al transporte que usa motores combustión interna, donde el nitrógeno (N₂) se oxida para formar dióxido de nitrógeno, NO₂, dado que el N₂ se vuelve reactivo a altas temperaturas dentro de los motores. En síntesis, las consecuencias del desarrollo de la economía mundial a base de combustibles fósiles es la responsable de la contaminación atmosférica de la lluvia ácida. De acuerdo a las estadísticas del proyecto Nuestro Mundo en datos de la Universidad de Oxford¹⁷ muestran la evolución de las emisiones mundiales de SO₂, por continente, entre 1850 hasta el año 2010, las cuales se presentan a continuación en la Figura 3.

De acuerdo a esta información, en general las emisiones de SO₂ han disminuido desde 1980, debido a la implementación de políticas en el cambio de combustibles, desarrollo de tecnologías de generación de energía diferentes a los combustibles fósiles, mayores restricciones en las emisiones del transporte automotor, modificación y diversificación de los medios de transporte público y mejoras en su eficiencia, especialmente en Europa, Estados Unidos, Canadá, Australia y en algunos países de Suramérica. Sin embargo, en Asia y África la tendencia es hacia el aumento, esto debido al alto requerimiento de energía por la industria china e hindú para mantener los índices de crecimiento económico mayores al 6% del PIB.

¹⁵ VALLERO, Daniel (2008) "Fundamentals of Air Pollution". Ed. Elsevier. 4 ed.

¹⁶ Op Cit.

¹⁷ Nuestro mundo en datos es un sitio web que muestra cómo las condiciones de vida globales y el entorno de la Tierra están cambiando. La publicación es un esfuerzo de colaboración entre los investigadores del Programa Oxford Martin sobre Desarrollo Global de la Universidad de Oxford, que son los editores científicos del contenido del sitio web; y la organización sin fines de lucro Global Change Data Lab, que publica y mantiene el sitio web. Rescatada el 21 de agosto de 2019 en: <https://ourworldindata.org/air-pollution#the-future-of-global-so2-emissions>.

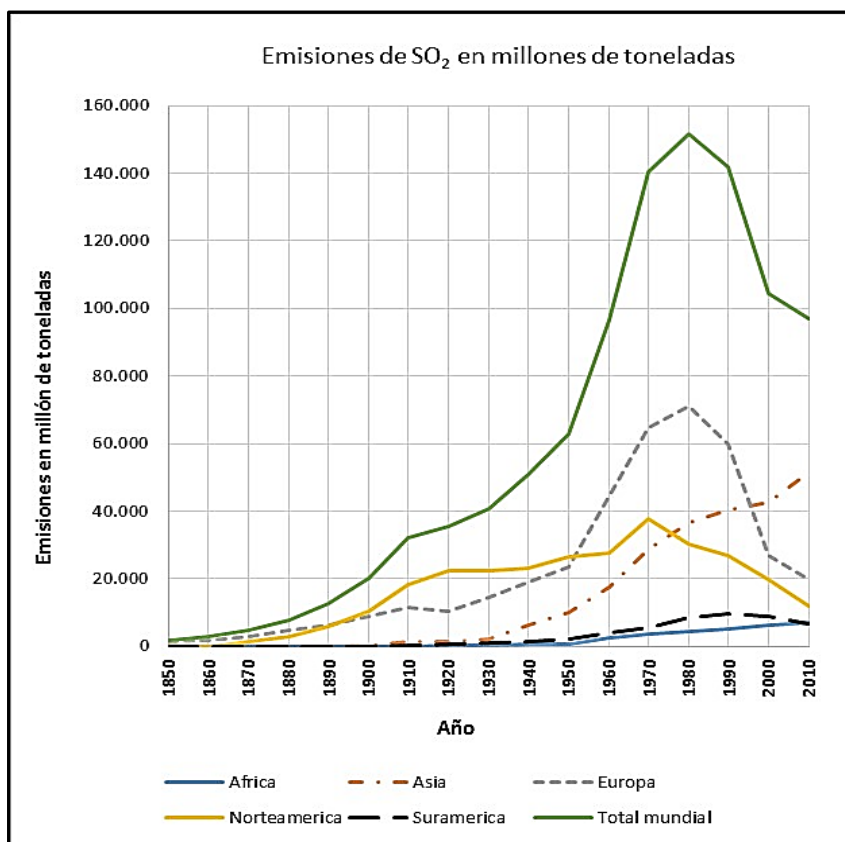


Figura 3. Emisiones anuales de SO₂ en millones de toneladas, por continente. Fuente: Our World in Data, Global Change Data Lab, Universidad de Oxford (2019)

3.1 EL TRANSPORTE A LARGA DISTANCIA DE LOS CONTAMINANTES

Las concentraciones ambientales de contaminación del aire generalmente se consideran una función de las tasas de emisión, dispersión, transporte, transformación y deposición. En el pasado, las exposiciones de los ecosistemas a través de estos procesos solo ocurrían en las inmediaciones de las fuentes de un área. La contaminación del aire, en forma de penachos urbanos o industriales, se consideró estrictamente como un fenómeno discreto y localizado que causa violaciones frecuentes de las normas de calidad del aire a nivel del suelo. Los esfuerzos para mejorar la calidad del aire local dieron como resultado una dispersión de contaminantes más eficiente, trayectorias de transporte más largas y un mayor tiempo de residencia durante el cual puede tener lugar la transformación química de la contaminación antropogénica. La evidencia de una mejor calidad del aire a nivel del suelo condujo a suposiciones generales de que las exposiciones a los ecosistemas estaban disminuyendo¹⁸.

Las concentraciones de aire ambiente continúan siendo determinadas por estos mismos procesos fundamentales; sin embargo, frente al aumento y ahora tienen lugar en una

¹⁸ Peterson, M.; Adler, D. (1982). The effects of air pollution and acid rain in fish, wildlife and their habitats. Biological Services Program. Office of Research and Development U. S. Environmental Protection Agency. Report # 3.

escala regional e incluso intercontinental. Junto con el creciente reconocimiento de la importancia de la contaminación por el transporte a largas distancias o también llamado contaminación transfronteriza, y la integración completa de los contaminantes del aire dentro del ciclo biogeoquímico global, se ha entendido que las sustancias nocivas pueden depositarse en vastas regiones, a menudo ingresando a ecosistemas remotos en cantidades iguales o superiores a las de los depósitos cerca de las fuentes¹⁹.

La lluvia ácida se produce después de un recorrido realizado, determinado por el viento, desde las áreas de importantes emisiones de SO₂ y de NO. Por lo tanto, es considerada como un fenómeno producto de la difusión y transporte de los contaminantes, el cual es determinado por la dirección y velocidad del viento, además de otros aspectos como la topografía, la altitud, la latitud, factores meteorológicos como la altura de capa de mezcla, la de inversión térmica, entre otros. Las distancias recorridas antes que las sustancias ácidas se depositen en forma de lluvia debido a los mecanismos de transporte y transformación de la lluvia ácida, la convierten en un problema de la contaminación transfronteriza.

3.2 EFECTOS DE LA LLUVIA ÁCIDA

Tabla 2. Sensibilidad de las especies acuáticas a la acidificación²⁰

CAMBIO DE pH	EFECTOS BIOLÓGICOS GENERALES
6.5 a 6.0	Poco cambio de comunidad; posibles efectos en especies de peces altamente sensibles (por ejemplo, pez gordo, bajo rayado).
6.0 a 5.5	Pérdida de especies sensibles. Quizás disminución de la reproducción de lucioperca y trucha de lago; aumento de la acumulación de algas verdes filamentosas. Cambios en la composición de especies y disminución de la riqueza de especies en fitoplancton, zooplancton y comunidades de invertebrados bentónicos. Pérdida de algunas especies de zooplancton y muchas especies de almejas, caracoles, moscas de mayo, anfípodos y algunos cangrejos de río.
5.5 a 5.0	Pérdida de trucha de lago, lucioperca, trucha arcoiris, lubina, creek chub. Aumento adicional de algas verdes filamentosas. Pérdida de muchas especies de zooplancton, así como de todos los caracoles, la mayoría de las almejas y muchas especies de moscas de mayo, moscas de piedra y otros invertebrados bentónicos.
5.0 a 4.5	Pérdida de la mayoría de las especies de peces. Disminución adicional de la biomasa y la riqueza de especies de las comunidades de zooplancton e invertebrados bentónicos. Pérdida de todas las almejas y muchos insectos y crustáceos. Falla reproductiva de algunos anfibios sensibles al ácido, incluidas las salamandras manchadas, las salamandras Jefferson y la rana leopardo del norte.

¹⁹ Ibid

²⁰ Baker, J.P., D.P. Bernard, S.W. Christensen and M.J. Sale. 1990. Biological effects of changes in surface water acid-base chemistry. In: Acidic Deposition: State of Science and Technology, Volume II. Aquatic processes and effects. National Acid Precipitation and Assessment Program, Washington, D.C.

Tabla 3. Efectos de algunos elementos y compuestos ácidos en el suelo y en el agua.

CONTAMINANTES	EFFECTOS GENERALES	EFFECTOS TERRESTRES	EFFECTOS ACUÁTICOS
Nitrógeno	Contribuye a la deposición ácida, el ozono a nivel del suelo y el sobre-enriquecimiento del suelo y las aguas superficiales.	<p>Reduce la productividad forestal (bajo alta carga).</p> <p>Aumenta la vulnerabilidad potencial a plagas y patógenos.</p> <p>Causa disminuciones en algunas poblaciones de plantas de humedales sensibles.</p> <p>Altera la composición de especies de plantas.</p>	<p>Aumenta el crecimiento de algas y reduce la claridad del agua en algunos sistemas.</p> <p>Contribuye a la disminución del oxígeno disuelto y la degradación de los hábitats de vivero en los estuarios.</p>
Deposición ácida	Acidifica suelos y aguas, y mejora el proceso de disponibilidad del mercurio tóxico para los animales.	<p>Aumenta la acidificación de los suelos.</p> <p>Mejora la movilización de aluminio tóxico de los suelos a las raíces de los árboles.</p> <p>Aumenta la lixiviación de sulfatos y nitratos de los suelos a las aguas superficiales.</p> <p>Promueve la pérdida de nutrientes amortiguadores importantes de los suelos.</p> <p>Mejora la metilación de mercurio en humedales.</p>	<p>Moviliza aluminio tóxico en aguas superficiales que pueden matar peces y otros organismos acuáticos.</p> <p>Reduce la productividad del ecosistema.</p> <p>Reduce la riqueza de especies de peces.</p> <p>Disminuye la riqueza y abundancia de invertebrados.</p>

3.2.1 Efectos de la deposición ácida en los ecosistemas forestales

Hasta hace poco, la comprensión de los efectos de la deposición ácida en los suelos era limitada. Sin embargo, la investigación actual ha demostrado que la deposición ácida ha alterado químicamente los suelos forestales con graves consecuencias para los ecosistemas sensibles al ácido. Los suelos comprometidos por la deposición ácida pierden su capacidad de neutralizar los aportes continuos de ácidos fuertes, proporcionan condiciones de crecimiento más pobres para las plantas y extienden el tiempo necesario para que los ecosistemas se recuperen de la deposición ácida. La deposición ácida ha alterado y continúa alterando los suelos forestales de base pobre de tres maneras importantes. La deposición ácida agota el calcio disponible y otros cationes nutrientes (por ejemplo, magnesio, potasio) del suelo; facilita la movilización de aluminio inorgánico disuelto en el agua del suelo; y aumenta la acumulación de azufre y nitrógeno en el suelo.²¹

El ciclo del calcio y otros cationes de nutrientes en los ecosistemas forestales implica los

²¹ C. Driscoll, K. Lambert y L. Chen. "Acidic Deposition: Sources and Ecological Effects", en: G. Visgilio y D. Whitelaw (2007). "Acid in the Environment: Lessons Learned and Future Prospects". Springer Science+Business Media, NY.

insumos y pérdidas de estos materiales. Para la mayoría de los ecosistemas forestales, el suministro de calcio y otros cationes de nutrientes se produce en gran medida por la meteorización (es decir, la descomposición de rocas y minerales en el aceite). El calcio y otros cationes nutritivos también pueden ingresar a los bosques por deposición atmosférica, aunque esta vía es generalmente mucho más pequeña que la meteorización. Las pérdidas ocurren en gran medida por la absorción de vegetación y las aguas de drenaje. Un grupo importante de cationes de calcio y nutrientes del ecosistema es el grupo disponible del suelo o el complejo de intercambio catiónico del suelo. Las plantas generalmente pueden utilizar esta fuente de nutrientes. Los ecosistemas forestales que son naturalmente sensibles a la deposición ácida generalmente se caracterizan por bajas tasas de meteorización y generalmente bajas cantidades de cationes básicos disponibles (es decir, calcio, magnesio, sodio, potasio). Bajo condiciones de aportes elevados de deposición ácida y posterior transporte de sulfato y nitrato en las aguas infiltradas, los cationes nutrientes serán desplazados de los depósitos disponibles y lixiviados del suelo. Esta condición no es problemática para áreas con altas tasas de intemperismo y altas reservas de cationes nutrientes disponibles. Sin embargo, durante el siglo pasado, la deposición ácida ha acelerado la pérdida de grandes cantidades de calcio y magnesio disponibles del suelo en áreas sensibles al ácido. El agotamiento ocurre cuando los cationes base se desplazan del suelo por deposición ácida a un ritmo más rápido de lo que pueden reponerse por la descomposición lenta de las rocas o la deposición de cationes base de la atmósfera. Este agotamiento de los cationes base altera fundamentalmente los procesos del suelo, compromete la nutrición de algunos árboles y dificulta la capacidad de los suelos sensibles para recuperarse de los aportes de la deposición ácida.²²

Aunque es difícil separar los efectos de la contaminación del aire de otras tensiones, investigaciones recientes muestran que la deposición ácida parece haber contribuido a la disminución de los abetos rojos en todo el este de América del Norte y los arces de azúcar en el centro y oeste de Pensilvania en los Estados Unidos. Los síntomas de la disminución de los árboles incluyen un mal estado de la copa, un crecimiento reducido de los árboles y niveles inusualmente altos de mortalidad de los árboles. Se presenta en la En la Ilustración 2, se muestra un ejemplo en Alemania del impacto de la deposición ácida sobre los bosques en Baviera.

²² Óp. cit.



Ilustración 2. Árboles en el bosque de Baviera muerto a causa de la caída de lluvia ácida - Foto de stock. Enciclopedia Británica.

<https://www.britannica.com/explore/savingearth/acid-rain/> Créditos: ©RelaxFoto.de/iStock.com. Consultada 24/01/2020

El abeto rojo y el arce azucarero son las especies arbóreas que se han investigado más intensamente, por lo tanto, proporcionan estudios de caso instructivos sobre los efectos de la deposición ácida en los árboles. La investigación sobre el abeto rojo y el arce azucarero ha demostrado que la deposición ácida tiene efectos tanto directos como indirectos en los árboles. En los bosques afectados por el ácido, la deposición ácida daña los árboles directamente al lixiviar el calcio de las hojas y las agujas (es decir, el follaje) de los árboles, haciéndolos más susceptibles a las lesiones de invierno. La deposición ácida también puede afectar a los árboles indirectamente al cambiar la química subyacente del suelo. En suelos sensibles al ácido, la deposición ácida agota los cationes de nutrientes disponibles, como el calcio y el magnesio, que son nutrientes importantes para las plantas que son necesarios para mantener la salud y el vigor de los árboles. El agotamiento de los cationes de nutrientes también conduce a la acidificación del suelo, lo que aumenta la disponibilidad de aluminio para las raíces de los árboles, lo que afecta la capacidad de los árboles para obtener los nutrientes necesarios del suelo.²³

3.2.2 Efectos de la deposición ácida en los ecosistemas acuáticos.

La deposición ácida degrada la calidad del agua al disminuir los niveles de pH (es decir, aumentar la acidez); disminución de la capacidad neutralizante de ácido; y aumentando las concentraciones de aluminio inorgánico disuelto. Si bien las concentraciones de sulfato en lagos y arroyos han disminuido en los últimos 20 años, permanecen altas en comparación con las condiciones de fondo ($<20 \mu\text{eq} / \text{l}$).²⁴

Una característica importante que influye en el estado ácido-base de las aguas

²³ Ibid.

²⁴ Ibid.

superficiales es el suministro de solutos orgánicos naturales. Estos materiales incluyen ácidos orgánicos, que disminuyen la capacidad de neutralización del ácido (CNA) de las aguas y movilizan el aluminio del suelo a través de reacciones de complejos. Las cuencas hidrográficas con abundancia de humedales suelen tener altas concentraciones de carbono orgánico disuelto y las aguas superficiales asociadas pueden ser naturalmente ácidas debido a los ácidos orgánicos. Sin embargo, en contraste con las cuencas hidrográficas que se acidifican por deposición ácida, las aguas que son ácidas debido a los ácidos orgánicos tienen altas concentraciones de aluminio que está en gran parte complejos con solutos orgánicos y, por lo tanto, menos tóxicos para la biota acuática.²⁵

Las disminuciones en el pH y las concentraciones elevadas de aluminio inorgánico disuelto han reducido la diversidad de especies y la abundancia de vida acuática en muchas corrientes y lagos en áreas sensibles al ácido. Las redes alimenticias enteras a menudo se ven afectadas negativamente. La disminución del pH y el aumento de las concentraciones de aluminio inorgánico disuelto han disminuido la diversidad de especies y la abundancia de plancton, invertebrados y peces en las aguas superficiales afectadas por el ácido.

Las altas concentraciones de aluminio inorgánico disuelto son directamente tóxicas para los peces y las legumbres de aluminio inorgánico disuelto durante los episodios ácidos son una causa principal de mortalidad de peces. La alta acidez y los niveles de aluminio inorgánico disuelto interrumpen el equilibrio de sal y agua en la sangre de un pez, provocando la ruptura de los glóbulos rojos y el aumento de la viscosidad de la sangre. Los estudios muestran que la sangre viscosa tensa el corazón del pez, lo que resulta en un ataque cardíaco letal.²⁶En el trabajo desarrollado por Muniz²⁷ se presenta el impacto de la disminución de la población de peces en la península escandinava.

Respecto a la afectación de la flora y la microbiota, la evidencia de cambio florístico en los lagos acidificados proviene de una comparación de las floras contemporáneas en lagos ácidos y no ácidos, de recogidas de sitios, del registro de sedimentos, y de la manipulación experimental de recintos o lagos enteros.

Todas estas fuentes muestran que la acidificación causa cambios importantes en la composición de las comunidades de algas planctónicas y bentónicas. En el plancton, la mayoría de las diatomeas desaparecen a medida que el pH cae por debajo de 5,5, para ser reemplazado por criptofitos²⁸, dinoflagelados²⁹ y crisófitos³⁰.

Hasta ahora, sin embargo, no hay una indicación clara de una disminución de la productividad planctónica. En la mayoría de los sistemas ácidos, las comunidades de algas

²⁵ Ibid.

²⁶ Ibid.

²⁷ Muniz, I. P. (1984). The Effects of Acidification on Scandinavian Freshwater Fish Fauna. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, Vol. 305, No. 1124, Ecological Effects of Deposited Sulphur and Nitrogen Compounds(May 1, 1984), pp. 517-528

²⁸ Conjunto de formas vegetales (algas) en que la parte persistente puede quedar completamente protegida bajo el nivel del agua. © <https://glosarios.servidor-alicante.com>.

²⁹ Extenso grupo de protistas flagelados. El nombre proviene del griego dinos, girar y del latín, flagellum, látigo, describiendo el movimiento rotatorio propio de estos organismos. <https://es.wikipedia.org/wiki/Dinoflagellata>.

³⁰ Extenso grupo de algas del filo Heterokontophyta que viven principalmente en agua dulce. Presentan una gran variedad en morfología y modos de nutrición, siendo la mayoría fotoautótrofos. Generalmente se presentan como formas unicelulares flageladas, aunque muchas especies forman colonias con formas, incluso, muy elaboradas. Muchas especies presentan paredes celulares o intrincados esqueletos silíceos u orgánicos. <https://es.wikipedia.org/wiki/Chrysophyceae>.

perifíticas son más importantes cuando la acidificación provoca un cambio a diatomeas acidofilosas y ácidobionticas y a la aparición del alga verde filamentosa *Mougeotia* como taxón dominante.³¹

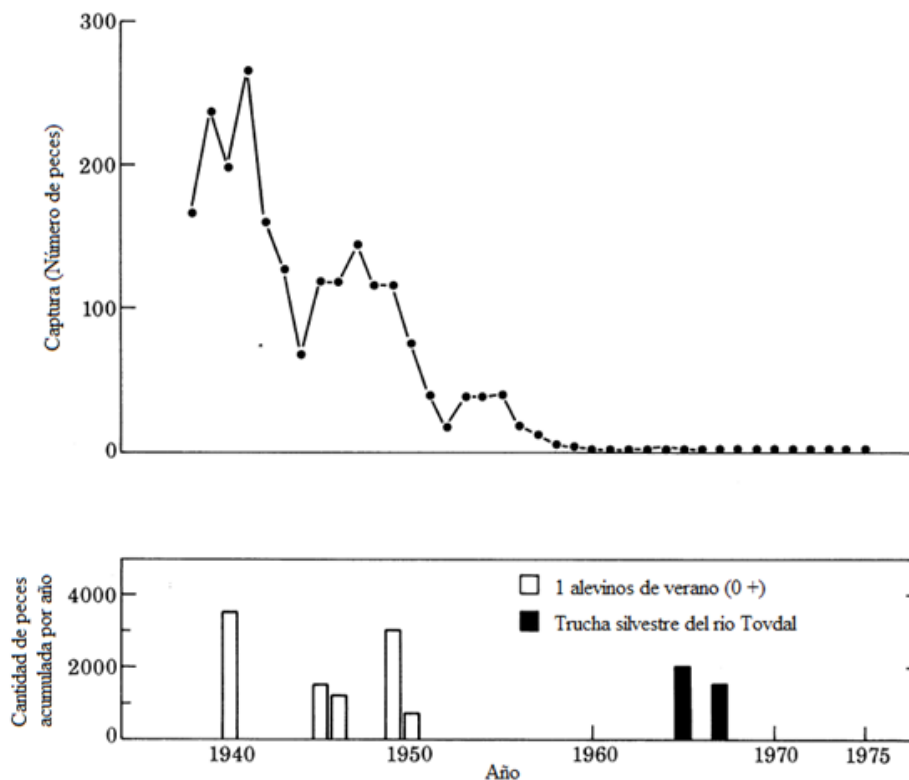


Figura 4. Acumulado y captura de trucha marrón en el lago Holmevatn (Telemark). Las estadísticas de captura son promedio móvil de 3 años, basadas en notas del propietario de la tierra. (Fuente: Overrein et al. 1980).

3.2.3 La lluvia ácida y la salud humana

El profesor Haradhan³² plantea que la lluvia ácida indirectamente puede dañar a los humanos. Los humanos dependemos de las plantas, peces y animales para alimentarse. La deposición ácida reduce la producción de alimentos y trae como consecuencia la escasez (Bennet, 1998; Liu et al., 2011). La contaminación por los metales tóxicos debido a la lluvia ácida, es disuelta y transportada en el agua, y absorbida por los cultivos o los animales que consume el ser humano que causa daño nervioso severo, problemas pulmonares (asma y bronquitis), daño cerebral, problemas renales, cáncer y enfermedad de Alzheimer, que pueden causar muerte (Okita, 1983)".

La contaminación ambiental por precipitación ácida aumenta la solubilización y la movilización de metales tóxicos. A través de la cadena alimentaria, esto puede alterar la ingesta de elementos tóxicos y esenciales en el hombre. Los posibles efectos adversos

³¹ K. Mellanby. F. I. Biol Chairman of a Working Group appointed by The Watt Committee on Energy (Air Pollution, Acid Rain and the Environment Watt Committee Report Number 18).

³² Haradhan, M.(2018) "Acid Rain is a Local Environment Pollution but Global Concern", Open Science Journal of Analytical Chemistry 2018; 3(5): 47-55.

para la salud podrían seguir después de una mayor exposición humana. Para la población general, el patrón de exposición y los efectos sobre la salud causados por el aluminio, el cadmio, el plomo y el mercurio son motivo de especial preocupación. Aunque hay varios indicios de que la exposición a elementos tóxicos (por ejemplo, aluminio, cadmio, plomo y metilmercurio), así como la ingesta de elementos esenciales (por ejemplo, selenio), pueden verse afectados por la precipitación ácida, actualmente no hay evidencia firme de efectos adversos. efectos sobre la salud en el hombre. Sin embargo, los datos actuales indican claramente que los márgenes de seguridad son pequeños. Por lo tanto, la acidificación en curso en muchas áreas debe detenerse antes de que tales efectos se hagan evidentes³³.

3.2.4 Efectos en materiales.

Boden (1989) presenta el papel de los agentes ácidos en el deterioro de materiales y establece los mecanismos de desarrollo del daño, en el cual se presentan los asociados a la deposición ácida:

El ataque químico directo significa que los contaminantes del aire reaccionan de manera irreversible y directa con el material para causar deterioro. Hay que distinguir entre un ataque de conducción y uno de disolución. Durante un ataque de disolución, el contaminante del aire reacciona con el material para formar una sal soluble en agua. Esta sal puede ser transportada o eliminada de la superficie. El ataque de conducción sigue a un ataque de disolución, si las sustancias originalmente disueltas cristalizan. La absorción de agua en la estructura cristalina conduce a un aumento sustancial de volumen que puede conducir a la división del material.

Se produce un ataque químico indirecto si los contaminantes absorbidos sufren reacciones químicas, y los productos de reacción atacan el material considerado.

La corrosión electroquímica es un mecanismo importante que daña los metales ferrosos: las pequeñas células electroquímicas resultan de diferencias físicas en la superficie del metal. Cuando hay agua presente, las corrientes fluyen debido a las diferencias de potencial entre los ánodos y los cátodos. Los contaminantes iónicos del aire aumentan la conductividad del agua superficial y aumentan la tasa de corrosión.³⁴.

En la Tabla 1, se presentan los daños a diferentes materiales.

Tabla 4. Daño de la contaminación del aire a los materiales. (Fuente: Yocum y Baer, 1983).

MATERIAL	TIPO DE IMPACTO	ESPECIES CONTAMINANTES	FACTORES AMBIENTALES
Metales	Corrosión, pérdida de brillo	Óxidos de azufre y otros gases ácidos	Humedad, oxígeno, sales, partículas

³³ Gerhardsson, L.; Oskarsson, A.; Skerfving, S. (1994) "Acid precipitation: effects on trace elements and human health". Science of the Total Environment. Vol 153, Iss 3, 237-245

³⁴ Boden H. (1989) "Approaches in Modeling The Impact of Air Pollution-Induced Material Degradation. International Institute for Applied Systems Analysis

MATERIAL	TIPO DE IMPACTO	ESPECIES CONTAMINANTES	FACTORES AMBIENTALES
Piedra de construcciones	Erosión superficial, suciedad, formación de depósito negra	Óxidos de azufre y otros gases ácidos	Mecanismos de erosión, partículas suspendidas, cambios en la temperatura, sales, vibraciones, CO2, microorganismos
Cerámicas y vidrio	Erosión superficial, formación de depósitos.	Gases ácidos, especialmente con contenido de ácido fluorhídrico.	Humedad.
Pinturas y Recubrimientos Orgánicos	Erosión superficial, decoloración, suciedad.	Óxidos de azufre. sulfuro de hidrógeno	Humedad, luz solar, ozono, partículas, erosión mecánica, microorganismos.

Los daños a estatuas y los monumentos de piedra caliza se presentan en Figura 5). Se acepta que el principal agente corrosivo individual de los materiales de construcción es el dióxido de azufre y sus productos secundarios. Esta contribución antropogénica consiste principalmente en ácido sulfúrico con cantidades menores y más variables de ácido nítrico. El contacto de dicha solución con piedra de carbonato neutraliza esta acidez a través de la reacción:

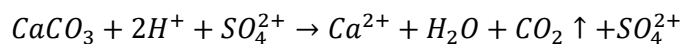


Ilustración 3. Procesos de alteración física que conducen a la erosión del material en la estatua de piedra caliza. Fuente: Lichtfouse y otros (2015) "Pollutants in Buildings, Water and Living Organisms Water Pollution". Springer International Publishing, Switzerland.

4 PROGRAMA DE VIGILANCIA GLOBAL Y EL PROBLEMA DE LA LLUVIA ÁCIDA³⁵

En la década de 1950, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) lanzó un programa sobre química atmosférica y los aspectos meteorológicos de la contaminación del aire que transformó estas mediciones esporádicas tempranas en observaciones regulares. Este programa pronto determinó que la caracterización de la composición atmosférica y sus cambios requiere que todas las mediciones se expresen en las mismas unidades y en la misma escala, lo que permite comparar y combinar mediciones realizadas por diferentes países.

Estas actividades evolucionaron en 1989 en el Programa de Vigilancia Global de la Atmósfera - PVGA (Global Atmosphere Watch Program, GAW, en inglés). El PVGA se estableció en respuesta a las crecientes preocupaciones relacionadas con los impactos humanos en la composición atmosférica y la conexión de la composición atmosférica con el clima y el clima. La misión del PVGA se centra en las observaciones globales sistemáticas de la composición química y las características físicas relacionadas de la atmósfera, el análisis integrado de estas observaciones y el desarrollo de la capacidad predictiva para pronosticar futuros cambios en la composición atmosférica. Estas observaciones y análisis son necesarios para avanzar en la comprensión científica de los efectos de la creciente influencia de la actividad humana en la atmósfera global, como lo ilustran los problemas sociales apremiantes, tales como: cambios en el clima y el clima relacionados con la influencia humana en la composición atmosférica, particularmente, en gases de efecto invernadero, ozono y aerosoles; impactos de la contaminación del aire en la salud humana y del ecosistema y problemas relacionados con el transporte a larga distancia y la deposición de la contaminación del aire; cambios en la radiación ultravioleta como consecuencia de los cambios en las cantidades de ozono atmosférico y el clima, y el impacto posterior de estos cambios en la salud humana y los ecosistemas.

Bajo los auspicios de la OMM Global Atmosphere Watch, y utilizando datos del interior y fuera del sistema de la OMM, estos estudios producen una contribución importante a la ciencia de la química de precipitación. Su objetivo era proporcionar a las comunidades científicas y políticas, la mejor información disponible sobre la deposición atmosférica de los principales iones. Se basa en la combinación complementaria de mediciones de química de precipitación, estimaciones de deposición seca inferidas por medición y resultados de modelos globales³⁶.

El Centro Mundial de Datos para la Química de la Precipitación CMDQP (World Data Center for Precipitation Chemistry, WDCPC) es el centro que recibe y archiva datos de química de precipitación e información complementaria de estaciones de todo el mundo. El CMDQP es uno de los seis centros de datos mundiales del PVGA. Las directrices PVGA para la Química de la Precipitación y las Medidas de Deposición proporcionan orientación sobre todos los aspectos de la recolección de precipitación para el análisis químico.

Para mejorar la cobertura de datos geográficos, el WDCPC mantiene una estrecha cooperación con una serie de programas regionales de monitoreo de precipitaciones, que incluyen:

³⁵ WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Implementation Plan: 2016-2023. GAW Report No. 228. World Meteorological Organization, 2017.

³⁶ Vet, R. & other. (2014). "A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus". Atmospheric Environment 93. pg 3-100

- Red de Monitoreo de Deposición Ácida en Asia Oriental ([EANET](#))
- Red Canadiense de Monitoreo de Aire y Precipitaciones ([CAPMoN](#))
- Programa cooperativo para el monitoreo y la evaluación de las transmisiones de largo alcance de contaminantes atmosféricos en Europa ([EMEP](#))
- Deposición de especies de rastreo biogeoquímicamente importantes ([DEBITS](#))
- Programa Global de Química de Precipitación de los Estados Unidos ([GPCP](#))
- Programa Nacional de Deposición Atmosférica de EE. UU ([NADP](#)).

4.1 GLOSARIO

Aerosoles: Constituyen una amplia gama de contaminantes formados por polvo grueso (mayor de 100 μm), polvo fino (menor de 100 μm de diámetro), vapores (0,001-1 μm) y neblinas (0,1-10 μm).

Atmósfera: Componente vital del ambiente humano, que transmite y altera la energía solar que controla el clima; actúa como escudo protector contra los impactos de meteoritos y la radiación penetrante sustenta las diversas actividades bióticas.

Cinética de reacción de una sustancia: Velocidad o rapidez con la que ocurren las reacciones químicas de una sustancia

Contaminación, Contaminante: Cualquier especie ajena a la composición del medio en el que se genera. Se refiere a aquellos agentes que por su composición química pueden conducir a cualquier tipo de daño en el medio.

Control de Calidad: Sistema compuesto por un sinnúmero de actividades cuyo propósito es medir y controlar un producto o servicio que reúna las necesidades de los usuarios. El objetivo es proveer calidad que sea satisfactoria, adecuada, dependiente y económica del material de referencia

Deposición Húmeda o seca: Es la masa o el material depositado desde la atmósfera a una determinada superficie en forma húmeda o seca por unidad de área.

Catalizador: Agente químico que actúa como iniciador o acelerador de las reacciones

Compuestos Orgánicos Volátiles (COV): emitidos como consecuencia de la combustión incompleta de combustibles líquidos (transporte), incineración de residuos y procesos industriales. Poseen una toxicidad variable y están implicados en la formación de la neblina de contaminación (aerosoles y smog fotoquímico).

Fotoquímica: Etapa en las reacciones en las cuales interfiere la luz del sol.

Lixiviación: Se refiere al proceso de lavar una sustancia por un líquido que disuelve sólo uno o más componentes de la misma.

Material Particulado: Tipo de partículas que son emitidas como elementos contaminantes y se manifiesta en forma sólida o como aerosol en la atmósfera

Nitratos y Sulfatos: Entre los parámetros de caracterización química de la lluvia se encuentran la conductividad, el pH, el contenido de nitratos y sulfatos. De los cuales, estos dos últimos se constituyen como los principales indicadores de intervención de óxidos de azufre y de nitrógeno en la calidad del aire, que son los principales precursores de la lluvia ácida.

Ozono, se refiere para el caso de la lluvia ácida, al ozono troposférico generado en las capas bajas de la atmósfera y que forma parte de las neblinas de contaminación. Es irritante y tóxico para el ser humano, también afecta de manera importante a materiales poliméricos al ser un fuerte oxidante.

pH: Medida de la acidez o basicidad de una solución. Se indica con una escala logarítmica cuyos valores usuales van de 0 a 14. El valor 7 corresponde al agua pura y las soluciones neutras.

Partículas: especies sólidas o líquidas en suspensión en el aire; su origen es muy diverso, originan efectos dañinos según su tamaño y naturaleza, tanto sobre las personas y seres vivos, como sobre los materiales (por ejemplo, el plomo procedente de las gasolinas).

Precipitación o Deposición ácida: incluye tipos húmedos y secos, y es analizada como química de la precipitación.

Procedimientos Estandarizados de Operación: Grupo de procedimientos escritos para la implementación de métodos de operación, análisis, o cualquier actividad cuya técnica y procedimiento se realiza a través de un método prescrito y aceptado para realizar cierto tipo de funciones de rutina

6 BIBLIOGRAFÍA

Baker, J.P., D.P. Bernard, S.W. Christensen and M.J. Sale. 1990. Biological effects of changes in surface water acid-base chemistry. In: Acidic Deposition: State of Science and Technology, Volume II. Aquatic processes and effects. National Acid Precipitation and Assessment Program, Washington, D.C.

Boden H. (1989) "Approaches in Modeling the Impact of Air Pollution-Induced Material Degradation. International Institute for Applied Systems Analysis.

Briney, Amanda, (2018). "Contributing Writer Acid Rain: What You Need to Know: The Causes, History, and Effects of Acid Rain. Thought.co. Recuperado: <https://www.thoughtco.com/acid-rain-definition-1434936>. 18/08/2019.

Driscoll C., Lambert K. y L. Chen. "Acidic Deposition: Sources and Ecological Effects", en: Visgilio G. y Whitelaw D. (2007). "Acid in the Environment: Lessons Learned and Future Prospects". Springer Science+Business Media, NY.

Ebbing, D y Gammon, S. (2009) "General Chemistry". Ed Houghton Mifflin Company. Boston (EUA)

Gerhardsson, L.; Oskarsson, A.; Skerfving, S. (1994) "Acid precipitation: effects on trace elements and human health". Science of the Total Environment. Vol 153, Iss 3, 237-245

Global Change Data Lab, que publica y mantiene el sitio web. Rescatada el 21 de agosto de 2019 en: <https://ourworldindata.org/air-pollution#the-future-of-global-so2-emissions>.

Heicklen, Julian (1976) "Atmospheric Chemistry", Ed. Academic Press, New York.

Haradhan, M.(2018) "Acid Rain is a Local Environment Pollution but Global Concern", Open Science Journal of Analytical Chemistry 2018; 3(5): 47-55.

Jacobson, Mark Z. (2012), "Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions", Ed Cambridge University Press.

Johnson, R; Gordon, G. (1987). The Chemistry of Acid Rain. ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, DC

Mellanby K. F I. Biol Chairman of a Working Group appointed by The Watt Committee on Energy (Air Pollution, Acid Rain and the Environment Watt Committee Report Number 18).

Mohajan, Haradhan (2018); 3(5). "Acid Rain is a Local Environment Pollution but Global Concern". Open Science Journal of Analytical Chemistry: 47-55

Muniz, I. P. (1984). The Effects of Acidification on Scandinavian Freshwater Fish Fauna. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, Vol. 305, No. 1124, Ecological Effects of Deposited Sulphur and Nitrogen Compounds (May 1, 1984), pp. 517-528.

Peterson, M.; Adler, D. (1982). The effects of air pollution and acid rain in fish, wildlife and their habitats. Biological Services Program. Office of Research and Development U. S. Environmental Protection Agency. Report # 3.

Seinfeld, J; Pandis, S. (2016). "Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change". Ed. John Wiley & Sons, 3 ed.

Vallero, Daniel (2008) "Fundamentals of Air Pollution". Ed. Elsevier. 4 ed.

Vet, R. & other. (2014)." A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus". Atmospheric Environment 93. pg 3-100

WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Implementation Plan: 2016-2023. GAW Report No. 228. World Meteorological Organization, 2017.