

¿EL AGUA DE LLUVIA SIN TRATAR ES APTA PARA SU CONSUMO?

Rocío García-Martínez^{1*}, Daniela K. Calvo-Ramos², Carolina Muñoz-Torres²,
Alejandro Carrillo-Chávez², José M. Hernández-Solís¹ y Moisés López-Carrasco¹

¹ Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México. C.P. 04510, México.

² Instituto de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla. Blvd. Juriquilla 3001, Juriquilla, Querétaro, C.P. 76230, México.

*gmrocio@atmosfera.unam.mx

RESUMEN

La escasez de agua amenaza el desarrollo la calidad de vida y la salud de los habitantes del mundo. El fenómeno de cambio climático ha acelerado exponencialmente el problema de sequías prolongadas, periodos de lluvia más cortos o lluvias intensas. La necesidad de captar la lluvia y utilizarla para su consumo, aumenta la presión sobre los países para que implementen prácticas más sostenibles e innovadoras. El objetivo general de este trabajo consistió en estudiar la composición química de agua de lluvia colectada durante el periodo 2015-2019 en el Observatorio Atmosférico de la UNAM (Ciudad Universitaria UNAM, Ciudad de México) y en el Observatorio Atmosférico Altzomoni (Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México), pertenecientes a la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. Se obtuvo el factor de enriquecimiento (FE) utilizando, como valor de referencia análisis químicos de relación metal/Al y ión/Ca, obtenidos a partir de la concentración promedio ponderada de los metales analizados. Los FE altos sugirieron que, en general, los metales tienen un origen antropogénico ligado al cambio de uso de suelo y a la deforestación indiscriminada de sitios boscosos adyacentes a los sitios de estudio. Las concentraciones de Al, Cd, Fe, Pb y V fueron consistentes con una contribución antropogénica importante, debido probablemente al transporte desde diferentes ciudades del país, y a la contribución intrínseca de cada sitio de muestreo. El estudio de la persistencia, la presencia y la permanencia de metales pesados en agua de lluvia es necesario para promover proyectos actuales y futuros sobre su tratamiento y uso.

Palabras clave: Cambio climático, sequía, agua de lluvia, nubes, metales pesados.

ABSTRACT

Water scarcity threatens the development, quality of life, and health of the inhabitants of this world. The phenomenon of climate change has exponentially accelerated the problem of prolonged droughts, shorter periods of rain, or intense rains. The need to capture rain and use it for consumption increases pressure on countries to implement more sustainable and innovative practices. The general objective of this work was to characterize the chemical composition of rainwater collected in the period 2015- 2019 at the UNAM Atmospheric Observatory (Ciudad Universitaria UNAM, Mexico City) and Altzomoni Atmospheric Observatory (Izta-Popo National Park, State of Mexico), belonging to the University Network of Atmospheric Observatories (RUOA) of the Institute of Atmospheric Sciences and Climate Change. The concentration of heavy metals (Al, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, and V) was determined. The enrichment factor (EF) was calculated using chemical analysis of the metal/Al and ion/Ca ratio as a reference value, obtained from the weighted average concentration. The high EF suggested that in general, metals have an anthropogenic origin linked to land use change and indiscriminate deforestation of forested sites adjacent to the study sites. The Al, Cd, Fe, Pb, and V concentrations were consistent with an important anthropogenic contribution, due to possible transport from Mexico City and the intrinsic contribution of each sampling site. To the above, it must be added that, in mountainous regions, there are considerable variations in the direction of the winds over relatively small distances. The study of the persistence, presence and permanence of heavy metals in the study of rainwater is necessary to promote current and future projects in the treatment and use of rainwater.

Keywords: Climate change, drought, rainwater, clouds, heavy metals.

INTRODUCCIÓN

La sequía y la escasez de agua son dos de los problemas más alarmantes de nuestro siglo, las necesidades de agua son crecientes y resulta un recurso cada vez más escaso, como un fenómeno del cambio climático se están presentando con mayor frecuencia intensos eventos de lluvia y sequías prolongadas (Velasco *et al.*, 2005). Se conoce que la lluvia es un fenómeno atmosférico que se inicia con la condensación del vapor de agua contenido en las nubes, derivado de los cambios de presión y temperatura en la atmósfera. Para que se produzca la condensación del vapor de agua, el aire debe estar saturado de humedad; este fenómeno se presenta por dos causas diferentes: a) cuando el aire se enfría hasta alcanzar la temperatura del punto de rocío, o b) cuando el aire tiene suficiente vapor de agua. Para que la condensación se produzca en el aire, debe haber partículas microscópicas conocidas como núcleos de condensación (Figura 1).

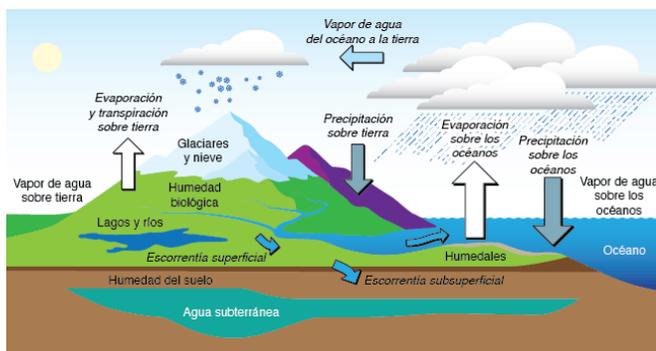


Figura 1. La lluvia es el resultado de la condensación del vapor de agua en la atmósfera que se forma tras la evaporación del agua en la superficie terrestre por la condensación de las gotas, Instituto del agua (Tomada del sitio web del Instituto del Agua)

Núcleos de condensación

Una gota de nube generalmente tiene un diámetro de entre 5 μm y 30 μm , y una gota de lluvia alrededor de 2000 μm (Beard, 1976; Horn *et al.*, 1988). El crecimiento de las pequeñas gotas de nube puede ser por colisión directa entre las gotas o por coalescencia. El agua de la lluvia, desde su formación en las nubes hasta que cae en el suelo, limpia la atmósfera barriendo una gran cantidad de elementos, desde aquellos que podemos ver a simple vista como tierra, partes de plantas o animales, hasta cosas que son invisibles para nuestros ojos como gérmenes, hongos, bacterias, virus. ¿Pero de dónde provienen toda esta tierra y microorganismos que se encuentran en el aire de la atmósfera? De hecho, en la atmósfera no existen microorganismos propios; la tierra y los microorganismos que se encuentran en la atmósfera provienen del suelo o del agua y son transportados por los vientos a grandes distancias.

Todos estos elementos no son perjudiciales para las plantas, pero sí pueden serlo para los seres humanos o para los animales que lleguen a beberla de manera cotidiana. Es por ello que el agua de lluvia se tiene que potabilizar, es decir purificar, para el consumo humano. Las gotas de lluvia también absorben gases, como el dióxido de carbono o el ácido sulfúrico, y le confieren un carácter ácido al agua de lluvia, lo cual se conoce como lluvia ácida. La lluvia ácida no tiene efectos directos sobre las personas, pero sí en los ecosistemas: los bosques del mundo están muriendo y los cuerpos de agua no

pueden sostener a poblaciones normales de peces, y en los océanos afecta a las poblaciones de los arrecifes coralinos, así como, a una gran diversidad de especies acuáticas.

Es importante recordar que las primeras lluvias ensucian notablemente las ventanas de los vehículos y en las calles se puede llegar a formar una desagradable espuma blanca. Las heces de los perros son un problema de salud, aunque no haya contacto directo con ellas. ¿Cómo es posible? Los huevos de los parásitos en las heces pueden flotar en el ambiente debido al viento y ser absorbidos por una persona al respirar. El viento es entonces el principal vehículo y diseminador de infinidad de microorganismos presentes en el suelo, en el agua o en el aire mismo. Si bien hay que apostar por la diversidad de nuevas alternativas para la colecta y uso de agua de lluvia, debemos partir de varios pasos: la recolección, la decantación, la filtración, la purificación y el almacenamiento. En la recolección, el agua de lluvia se almacena en grandes cantidades en contenedores mediante formas de escurrimiento que no permitan una gran contaminación; en la decantación se permite que se asienten en el fondo de los contenedores la tierra y todo aquello que sea más pesado que el agua.

En la filtración se eliminan partículas, partes de animales y plantas mediante sistemas de colado que se venden para ello, o bien de manera doméstica usando arena, carbón y arcillas. En la purificación, la parte más importante de la potabilización del agua de lluvia, se eliminan los microorganismos mediante procedimientos de limpieza del agua como la ebullición, la exposición a la luz ultravioleta, la ozonificación o la ósmosis inversa, entre otros. En el almacenamiento, el agua de lluvia se guarda a la sombra en contenedores limpios y libres de todo mecanismo de contaminación probable. Las características fisicoquímicas del agua de lluvia son importantes para entender la función del transporte de los componentes solubles de la atmósfera, comprender su contribución a las diferentes fuentes de contaminación atmosférica y conocer el grado de deterioro ambiental de una región (García *et al.*, 2006; García *et al.*, 2018; García-Martínez *et al.*, 2020). Por consiguiente, la química de los depósitos húmedos puede proporcionar ideas sobre el desarrollo temporal de la atmósfera y el grado de contaminación de la misma. De igual modo, puede emplearse como indicador en la evaluación de los procesos naturales contra los influjos antropogénicos (Wetangula y Wamalwa, 2015).

Los componentes disueltos en el agua de lluvia se dividen generalmente en tres grupos: aerosoles de sal marina, aerosoles terrestres (suelo, polvo y emisiones biológicas) y aerosoles antropogénicos. Este último grupo está estrechamente relacionado con procesos industriales, quema de combustibles fósiles, incineración de residuos, agricultura, fertilizantes, emisiones vehiculares, actividades mineras y otras prácticas humanas (Salvador, 2005). El agua de lluvia funciona como un importante sumidero para la materia en forma de gases y partículas, las cuales incluyen metales y metaloides en la atmósfera. (Samara *et al.*, 1992). El depósito húmedo es el sumidero dominante de partículas de modo de nucleación Aitken y de acumulación. Se divide en remoción por nucleación (*in-cloud scavenging*), que sólo tiene lugar en la nube, y en remoción por impacto, que tiene lugar dentro y debajo de la nube (*below-cloud scavenging*, Lohmann *et al.*, 2016).

Ambos procesos son descritos a continuación: ***In-cloud scavenging***: proceso de incorporación y remoción de partículas como núcleos de condensación durante la formación de nubes

(Lohmann et al., 2016). Este mecanismo es responsable de eliminar entre el 75 % y el 90 % de la masa total de los aerosoles (Flossmann y Pruppacher, 1988).

Below-cloud scavenging: mecanismo de difusión y gravedad mediante el cual el material atmosférico se incorpora por absorción por debajo de la nube a medida que la precipitación cae a través de ella (Lohmann et al., 2016), determinando la concentración química del agua de lluvia (Hutchinson y Havas, 1978).

A la fecha, se tiene ya una base de datos del 2015 al 2023 sobre la composición química del agua de lluvia colectada en el Observatorio Atmosférico de la UNAM (Ciudad Universitaria, UNAM, Ciudad de México), en el Observatorio Atmosférico de Juriquilla (Campus Juriquilla de la UNAM, Querétaro) y en el Observatorio Atmosférico Altzomoni (Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México), pertenecientes a la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. La RUOA (García-Moctezuma, pág. 28, 2022) ha logrado obtener resultados óptimos de acuerdo a los estándares de investigación internacional del Programa Nacional de Deposición Atmosférica (por sus siglas en inglés, NADP). En este artículo nos enfocaremos en los resultados de metales pesados obtenidos en dos sitios: el Observatorio Atmosférico de la UNAM (Ciudad Universitaria, UNAM) y el Observatorio Atmosférico Altzomoni (Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México).

La contaminación de la atmósfera por metales será determinada por la diferencia entre los presentes en la naturaleza y los que se eliminan a través de los procesos de remoción atmosférica, que incluyen la disolución, la deposición, la precipitación y la erosión de los suelos (Figuras 2A y 2B).



Figura 2. A) Observatorio Atmosférico (Ciudad Universitaria, UNAM, Ciudad de México). B) Observatorio Atmosférico Altzomoni (Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México).

La colecta de muestras de lluvia se realizó bajo un método de acumulación por evento y, en casos aislados, por *bulk precipitation*. El análisis químico de metales en las muestras de lluvia se realizó de acuerdo con el método EPA 6010C, 2007 empleando un Espectrofotómetro de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) marca Thermo Fisher Scientific, modelo iCAP 7000, que puede detectar fracciones de partes de metales en solución por millón (ppm). El análisis se realizó en el laboratorio de Geoquímica de Aguas, perteneciente al Centro de Geociencias de la UNAM, ahora Instituto de Geociencias, campus Juriquilla, Querétaro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Investigaciones realizadas sobre los mecanismos que controlan la deposición de metales pesados en ecosistemas acuáticos y terrestres, toman en cuenta la especiación, biodisponibilidad, reactividad, sedimentación y movilidad de los metales por acción del viento, lo que permite realizar estimaciones del impacto ambiental (APHA, 2005; Basta y Chaney, 2005). La deposición de metales pesados debida al agua de lluvia representa la parte sustancial y el componente principal de la deposición húmeda (Kitagishi y Yamame, 1981). Se llevaron a cabo los cálculos necesarios de deposición húmeda, a partir de la concentración promedio ponderada total (CPP-T) de los metales determinados en la precipitación pluvial. Para calcularla se multiplicó la CPP de cada uno de los metales, por la cantidad total de lluvia en un intervalo de tiempo, se consideró como precipitación pluvial total al periodo de lluvia de 2015 al 2019 que va de mediados de mayo a finales de octubre, para cinco años de muestreo.

En las Tablas 1 y 2 se muestran los valores de deposición para cada metal analizado de los dos sitios de muestreo.

Tabla 1. Deposición de metales pesados en $\text{mg m}^{-2} \text{ periodo}^{-1}$ colectados en el Observatorio Atmosférico (Ciudad Universitaria, UNAM) en el periodo 2015-2019.

Metal	*CPP-T	$\text{mg m}^{-2} \text{ periodo}^{-1}$
	ppm	1537.86*
Al	0.083	157.84
Cd	8.8×10^{-4}	2.35
Cr	1.2×10^{-3}	2.54
Fe	0.077	138.00
Mn	0.014	51.53
Ni	3.2×10^{-3}	3.73
Pb	5.4×10^{-3}	10.30
V	9.3×10^{-3}	21.67

*CPP-T: Concentración Promedio Ponderada Total. **ppm: Partes por millón. *** Cantidad de lluvia total en milímetros (mm).

Tabla 2. Deposición de metales pesados en mg m⁻² periodo⁻¹ colectados en el Observatorio Atmosférico Altzomoni (Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México), en el periodo 2015-2019.

Metal	*CPP-T **ppm	mg m ⁻² periodo ⁻¹ 405.1***
Al	0.107	203.34
Cd	1.4 x10 ⁻³	3.66
Cr	1.5 x10 ⁻³	2.65
Fe	0.086	104.83
Mn	7.6 x10 ⁻³	83.18
Ni	3.0 x10 ⁻³	1.21
Pb	2.4 x10 ⁻³	90.97
V	6.5 x10 ⁻³	72.63

*CPP-T: Concentración Promedio Ponderada Total. **ppm: Partes por millón. *** Cantidad de lluvia total en milímetros (mm).

Factores de enriquecimiento

El cálculo de los factores de enriquecimiento (FE) resulta útil para determinar el mayor o menor enriquecimiento de un elemento teniendo en cuenta las variaciones naturales en su abundancia debidas a la composición litológica. Este método es empleado en numerosos estudios para diversos elementos como medida de aporte antropogénico (Baize y Sterckeman, 2001). Los FE se obtienen normalizando las concentraciones de los metales en elemento conservativo (Schütz y Rahn, 1982); en este caso se utilizó el aluminio (Al) con un valor base promedio ponderado de 81 300 mg L⁻¹ para metales y Calcio (Ca²⁺) para iones, con un valor promedio ponderado de 36 300 mg L⁻¹ por ser trazadores litogénicos, lo cual nos permite determinar el enriquecimiento antropogénico de un sitio (Mason y Moore, 1982). A su vez, estos resultados dados por Mason y Moore (1982), se normalizan con la relación metal/Al e ión/Ca, obtenida a partir de la concentración promedio ponderada (mg L⁻¹ = ppm). Los FE calculados por Mason y Moore (1982) fueron determinados de acuerdo con la composición geoquímica de los suelos, considerando a las especies químicas en diferentes lugares del mundo. Al calcular el FE de un metal o de un ión se puede determinar si su concentración está enriquecida con respecto a la concentración natural. El FE se calcula con base en la concentración natural y la concentración local del metal o ión en el sitio de estudio; si se obtiene un valor >1, entonces se considera que la concentración natural está incrementada antropogénicamente (Mason y Moore, 1982).

Se calcularon los factores de enriquecimiento (FE_C) aplicando la siguiente fórmula:

$$FE_C = ([C_X] / [C_{Al}])_{muestra} / ([C_X] / [C_{Al}])_{corteza}$$

Donde [C_X]_{muestra} es el contenido del elemento analizado en la fracción insoluble de la muestra, [C_{Al}] es el contenido de aluminio (Al) en la muestra, [C_X]_{corteza} es la concentración promedio ponderada del elemento que se determinó en la muestra y [C_{Al}]_{corteza} es la concentración media del elemento de referencia, aluminio (Al), de la corteza (Mason y Moore, 1982). En la Tabla 3 se observan los resultados de los FE para ambos sitios de muestreo, en donde aparece la concentración promedio ponderada (CPP) y concentración promedio ponderada total (CPP-T).

Tabla 3. Factores de enriquecimientos calculados para el Observatorio Atmosférico (Ciudad Universitaria UNAM) y el Observatorio Atmosférico Altzomoni (Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México), en el periodo 2015-2019.

Elemento	Valor en CU	Altzomoni	CU	Altzomoni	
	corteza		(FE) _{corteza del sitio}		
	*CPP ***ppm	**CPP-T ***ppm		***ppm	
Cd	0.2	8.8 x10 ⁻⁴	1.4 x10 ⁻³	4,263.68	5,612.18
Cr	100	1.2 x10 ⁻³	1.5 x10 ⁻³	12.01	11.37
Fe	50,000	0.077	0.086	1.49	1.31
Mn	950	0.014	7.6 x10 ⁻³	14.38	6.11
Ni	75	3.2 x10 ⁻³	3.0 x10 ⁻³	41.36	30.35
Pb	13	5.4 x10 ⁻³	2.4 x10 ⁻³	404.79	142.56
V	135	9.3 x10 ⁻³	6.5 x10 ⁻³	66.74	36.14
Na ⁺	28,300	0.315	0.099	1.99	0.79
K ⁺	25,900	0.094	0.257	0.64	2.25
Mg ²⁺	20,900	0.040	0.074	0.34	0.80

*CPP: Concentración Promedio Ponderada de corteza. **CPP-T: Concentración Promedio Ponderada Total. ***ppm: Partes por millón.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, tanto en el Observatorio Atmosférico (Ciudad Universitaria, UNAM), como en el Observatorio Atmosférico Altzomoni (Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México), es evidente la importancia del proceso “*In-cloud scavenging*”, es decir que la mayoría de los vapores y gases presentes en la atmósfera exhiben una solubilidad finita en agua, la captura de un gas por una gota involucra varios procesos tanto físicos como químicos. Así que, la concentración de los diferentes gases en las gotas depende de su concentración en el aire y de la eficiencia con la cual son atrapados. Las concentraciones Al, Cd, Fe, Pb y V fueron consistentes con una contribución antropogénica importante, debido al posible transporte desde las ciudades de México y de la contribución intrínseca de cada sitio de muestreo. A lo anterior se debe añadir que, en regiones montañosas, existen variaciones considerables en la dirección de los vientos en distancias relativamente pequeñas.

La persistencia, la presencia y la permanencia de metales pesados en el estudio del agua de lluvia es necesario para promover proyectos actuales y futuros en su tratamiento y uso. Finalmente, debemos plantear las siguientes preguntas: ¿El agua de lluvia sin tratar es apta para su consumo? ¿En qué podría utilizarse? El agua de lluvia sin tratar sirve perfectamente para otras tareas como la agricultura, la limpieza del hogar, etc. Así que la próxima vez que llueva hay que recolectar la mayor cantidad posible y no solo emplearla para la limpieza de la casa o para regar el jardín, sino pensar en incorporar un sistema básico de captación: escurrimiento de azoteas (superficie) > colector > purificación > contenedor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA), al Ingeniero Manuel García, integrante del Área de Instrumentación Meteorológica y al M. en C. Enrique Azpra, integrante Grupo de Modelación Matemática de Procesos Atmosféricos.

REFERENCIAS

- American Public Health Association (APHA)-American Public Health Association. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and WasteWater. Recuperado de <https://www.standardmethods.org>.
- Baize, D. y Sterckeman, T. (2001). Of the necessity of knowledge of the natural pedo- geochemical background content of soils by trace elements. *Science of the Total Environment*. 264, 127-139.
- Basta, N., Ryan, J., y Chaney, R. (2005). Trace element chemistry in residual-treated soil: key concepts and metal bioavailability. *Journal of environmental quality*. 1(49-63), 34.
- Beard K. V. (1976). Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 33, 851-864.
- Castañe P. M., Topalián M. L., Cordero R. y Salibián A. (2003). Influencia de la especiación de los metales pesados en medio acuático como determinante de su toxicidad. *Rev. Toxicología*. 20, 13-18.
- EPA 6010C-2007, Método para el análisis de metales. Norma y/o método de referencia (Ba, Cd, Cr, Pb y Ag).
- García, R., Torres, M.C., Padilla, H., Belmont, R., Azpra, E., Arcega-Cabrera, F., y Báez, A. (2006). Measurement of chemical elements in rain from Rancho Viejo, a rural wooded area in the State of México, México. *Atmospheric Environment*, 40, 6088-6100.
- García, R., Pérez, R., Kotsarenko, A., Álvarez, H., Barrera, H., Carrillo-Chavez, A., Peralta, O., Campos, J., Torres, R., Hernández, G. (2018). Concentrations of Mercury and Other Inorganic Ions in Wet Precipitation Collected from a Mountain Mining Zone and an Urban Area in Central Mexico. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 101(2), 145-152.
- García-Martínez, R., Carrillo-Chávez, A., Torres-Jardón, R., Ramírez-Guzmán, A., Ramírez-Guzmán, A., López-Carrasco, M. (2020). Chemical composition of rainwater collected from 2006 to 2009 in Mexico City and at a rural site in Morelos State, south central Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37(1), 1-8.
- García-Moctezuma, F. (2022). Efemérides meteorológicas para entender la dinámica de la atmósfera. *Revista de Enseñanza y Comunicación de las Geociencias*. 1(1), 27-31
- Horn H. G. H. Bonka, E. Gerhards, B. Hieronimus, M. Kalinowski, L. Kranz, and M. Maqua. (1988). Collection efficiency of aerosol particles by raindrops. *Journal of Aerosol Science*. 19(7), 855-858.
- Instituto del Agua, sitio web consultado el 29 de mayo de 2024: https://institutodelagua.es/hidrologia/o-que-e-ciclo-hidrologico/hidrologia/#google_vignette
- Flossmann, A.L., y Pruppacher, H.R. (1988). A theoretical study of the wet removal of atmospheric pollutants. Part II: The uptake, redistribution, and deposition of (NH₄)₂SO₄ particles by convective cloud using a two-dimensional cloud dynamical model. *Journal Atmospheric Science*, 45, 1857-1871.
- Hutchinson, T.C., y Havas, M. (1978). Effects of acid precipitation of terrestrial ecosystems. New York, Estados Unidos de América: Plenum Press.
- Kitagishi, K. Yamame, I. 1981. Heavy metal pollution in solis of Japan. *Tokio Japan Scient. Soc*. 32, 302-312.
- Lohmann, U., Lüönd, F., y Mahrt, F. (2016). An introduction to clouds: from the microscale to climate. Cambridge University Press.
- Mason, B. y Moore, C. B. (1982) Principles of Geochemistry. John Wiley and Sons.
- Salvador, P. (2005). Caracterización de la Contaminación Atmosférica producidas por Partículas en Suspensión en Madrid (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Madrid, España.
- Samara, C., Tsitouridou. R., y Balafoutis, C. (1992). Chemical composition of rain in Thessaloniki, Greece, in relation to meteorological conditions. *Atmospheric Environment*, 26(3), 359-367.
- Schütz, L. y Rahn, K. A. (1982). Trace-element concentrations in erodible soils. *Atmospheric Environment* (1967), 16 (1), 171-176.
- Pain D. J. (1995). Lead in the environment en D. J. Hoffman, B. A. Rattner, G. A. Burton y J. Cairns (Eds.), *Handbook of ecotoxicology* (Section II, Chap. 16, pp. 356-391). Lewis Publishers USA.
- Perera, W. A. K. y Magana-Arachchi, D. N. (2022). Microbial Diversity in Rainwater with Correspondence to Particulate Matter and Environmental Factors. *Journal of Sustainability and Environmental Management*. 1(4), 410-418.
- Velasco, I., Ochoa, L., y Gutiérrez, C. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región y sociedad*, 17(34), 35-71.
- Wetangula, G., y Wamalwa, H. (2015). Trace Elements in rainfall collected around Menengai area Kenya. *Proceedings World Geothermal Congress: Melbourne Australia*, 19-25.

Manuscrito recibido: 1 de abril de 2024

Manuscrito corregido recibido: 14 de mayo de 2024

Manuscrito aceptado: 29 de mayo de 2024