

EMISIONES VOLCÁNICAS: ORIGEN E IMPACTO EN LA ATMÓSFERA

Volcanic emissions: origin and impact on the atmosphere

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Benedetto Schiavo ¹
Claudio Inguaggiato ²
Thania Elizabeth Arredondo-Palacios³
Diana Meza-Figueroa⁴

Recibido: 13 / 06 / 2021
Aceptado: 02 / 12 / 2021
Publicado: 07 / 12 / 2021
DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i30.160>

Autor de Correspondencia:
Benedetto Schiavo
Correo: benedetto@igeofisica.unam.mx

Resumen

El estudio de los gases volcánicos abarca diferentes procesos que van desde escalas regionales a globales, y que acontecen en una larga escala de tiempo. Las emisiones de gases volcánicos contribuyeron a la creación de la primera atmósfera primordial y actualmente contribuyen a la regulación de los procesos superficiales, como el clima, los procesos biogeoquímicos y la química de aguas superficiales. En la historia de la Tierra, grandes emisiones de gases perturbaron el equilibrio climático y fueron responsables de extinciones masivas. Erupciones catastróficas también emitieron grandes cantidades de gases reactivos, perturbando la química atmosférica generando efectos climáticos importantes e inmediatos. El monitoreo de las emisiones volcánicas constituye un campo muy activo en la investigación de los gases y su interacción con la atmósfera.

Palabras clave: emisiones, gases volcánicos, fumarolas, atmósfera,

Abstract

The study of volcanic gases includes different processes ranging from regional to global scales, and that occur over a long timescale. Volcanic gas emissions contributed to the creation of the first primordial atmosphere and currently contributes to the regulation of surface processes, such as climate, biogeochemical process and chemical properties of surface waters. In the history of the Earth, large emissions of gases perturbed the climate balance and were responsible for massive extinctions. Catastrophic eruptions also emit large amounts of reactive gases, causing disturbance in atmospheric chemistry and generating significant and immediate climatic effects. The monitoring of volcanic emissions constitutes an active field in the investigation of gases and their interaction with the atmosphere.

Keywords: emissions, volcanic gases, fumaroles, atmosphere.

¹ Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México. benedetto@igeofisica.unam.mx, ORCID: 0000-0002-0882-0404.

² Departamento de Geología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), inguaggiato@cicese.mx, ORCID: 0000-0003-1332-3602

³ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México. thanizs@ciencias.unam.mx.

⁴ Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México. diana.meza@unison.mx, ORCID: 0000-0002-8934-0321



INTRODUCCIÓN

Alrededor de 1500 volcanes han estado activos durante el último siglo [1]. La actividad volcánica no se distribuye aleatoriamente sobre la Tierra, sino que está vinculada a las zonas activas de la tectónica de placas, como se muestra en la Figura 1, donde se aprecia también que más de la mitad de los volcanes del mundo se encuentran en el hemisferio norte y en regiones tropicales.

Otra relativamente pequeña cantidad de volcanes se encuentran en zonas intraplaca, como Hawaii, Canarias y Cabo Verde. Los *volcanes* son estructuras geológicas que se forman en zonas de la superficie terrestre donde se registran anomalías de calor, es decir, presencia de magma. La forma típica de los volcanes es cónica, la cual se genera mediante la sobreposición de los productos que van erupcionando, pero que dependiendo del tipo de actividad eruptiva pueden tener forma y dimensiones diferentes. La actividad volcánica efusiva, típica de los volcanes Hawaianos, tiende a formar un volcán por sobreposición de flujos de lavas, por otra parte, las erupciones explosivas, típicas de volcanes como el Soufrière Hills (Montserrat), pueden destruir partes del volcán. La parte interior está formada por el conducto volcánico principal y la cámara magmática. Los conductos secundarios, generalmente de menor diámetro que el principal, se forman por fracturas a causa de la presión del magma a lo largo de

las paredes del volcán. En términos geológicos, cuando se habla de *magma* se hace referencia a la roca fundida que aún se encuentra bajo la superficie terrestre, por otra parte, el término *lava* se entiende como la roca fundida que llega a la superficie de la Tierra. El magma se forma en el interior de la Tierra a diferente profundidad: i) desde las profundidades del manto terrestre en áreas llamadas *puntos calientes* (hotspot en inglés), que crean islas volcánicas como las de Hawaii, ii) en zonas de divergencia continental, generalmente situadas en medio de los océanos, llamadas *dorsales medio oceánicas*, y iii) en zonas de convergencia, también llamadas zonas de subducción, donde parte de la corteza oceánica desciende hasta el manto terrestre superior y viene parcialmente fundida (ejemplo, la Cordillera de los Andes). El ascenso del magma desde las profundidades se debe principalmente a 3 factores: densidad, temperatura y presión. Este ascenso se produce porque el magma fundido tiene una densidad más baja que la roca circundante.

Cuando la presión litostática está equilibrada, el magma se acumula y forma una cámara magmática. Posteriormente, debido al enfriamiento y la cristalización, la presión del gas dentro de la cámara magmática aumenta hasta que los gases escapan [2]. En el momento que los volcanes entran en erupción, pueden arrojar gases calientes, cenizas, bombas volcánicas, clastos y lava que pueden causar pérdidas de vidas y afectaciones a la infraestructura, sobre todo en áreas pobladas. Entre los



años 1998 y 2017, a nivel mundial las actividades volcánicas y los incendios forestales afectaron alrededor de 6 millones de personas y causaron 2400 muertes [3].

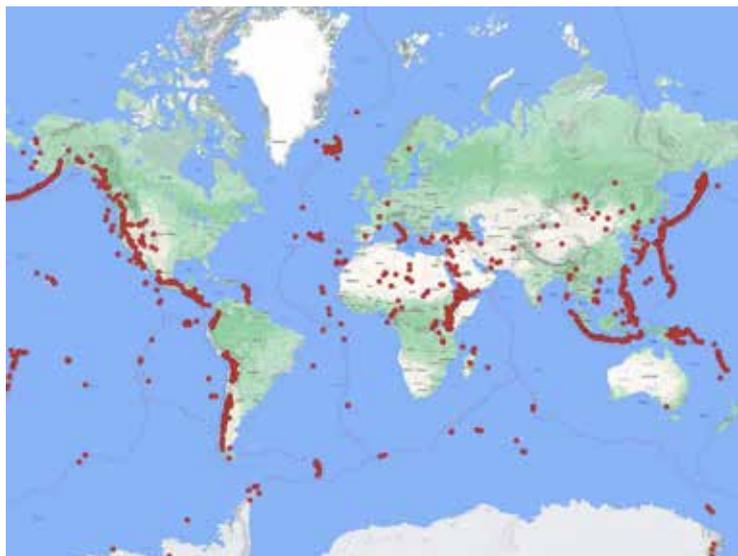


Figura 1: Volcanes activos (puntos rojos) alrededor del mundo. Las líneas rojas son los límites de las placas tectónicas y es donde se concentran las anomalías de calor y la mayoría de los volcanes.

La actividad volcánica en la superficie terrestre se manifiesta en diferentes formas, desde la actividad hidrotermal (por ejemplo, fuentes termales y fumarolas de baja/alta temperatura) hasta erupciones de gran intensidad que inyectan gases y ceniza en la atmósfera. En la historia geológica de la Tierra, los gases emitidos por los volcanes fueron los principales contribuidores al desarrollo de la atmósfera primitiva (hace 4500 millones de años), es decir, la protoatmósfera [4], además de tener implicaciones en el ciclo inorgánico del carbono y la evolución de la vida [5]. La protoatmósfera era una atmósfera muy distinta a la actual, formada, principalmente, por hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2) y monóxido de carbono (CO), además de otros gases arrojados por actividad volcánica, sobre todo nitrógeno (N_2) y vapor de agua ($H_2O_{(g)}$). Actualmente, el vulcanismo, juega un papel fundamental en el mantenimiento del equilibrio químico-físico de la Tierra.

El artículo tiene como objetivo resumir los descubrimientos de las reacciones químicas de los gases volcánicos y sus efectos en la atmósfera. La interacción entre gases volcánicos y los compuestos químicos volátiles ambientales, pueden facilitar reacciones químicas con especies que normalmente se consideran químicamente inertes, es decir, elementos o compuestos no reactivos.

Composición química de los gases volcánicos

Los volcanes pueden ser a conducto abierto o cerrado, aunque de igual manera en ambos casos pueden ser caracterizados por su desgasificación, la cual puede ocurrir en la parte somera del





cráter y/o en las partes periféricas, especialmente donde se presentan fracturas. El estudio de monitoreo de la concentración de los gases, como también sus relaciones composicionales, son de gran interés para los vulcanólogos.

El impacto atmosférico del vulcanismo moderno involucra el estudio de las emisiones de gases volcánicos durante las erupciones esporádicas, las emisiones persistentes y la desgasificación pasiva. Las columnas de estos tipos de actividades presentan entornos diferentes: i) columnas ricas en cenizas (erupciones y/o emisiones persistentes) que se elevan hasta la alta atmósfera y ii) columnas casi transparentes pobres en cenizas y ricas en $H_2O_{(g)}$, CO_2 (los más abundantes) y otros gases volcánicos (emisiones pasivas).

La *pluma volcánica*, es decir, la columna de gases que sale del volcán, es una mezcla de gases, líquidos y sólidos (Figura 2). La composición de la pluma es controlada por el equilibrio entre los gases y la parte fundida que se encuentran en la cámara magmática [6]. Además, la composición varía entre volcanes que tienen diferente origen y por lo tanto diferente tipo de magma. Un panorama más complicado se presenta si las emisiones volcánicas provienen de *fumarolas*, es decir, fracturas asociadas al edificio volcánico, donde podrían interactuar con aguas subterráneas o marinas, y así modificar la composición química y la concentración de los gases [7]. El $H_2O_{(g)}$, independientemente del origen, composición y concentración de los gases, contribuye entre el 50 y 90% del volumen total (% vol.) y es considerado el compuesto gaseoso más abundante en la pluma volcánica. Sin embargo, en comparación con la concentración de $H_2O_{(g)}$ atmosférico, la contribución global de $H_2O_{(g)}$ volcánico es despreciable. El segundo gas más abundante en la pluma volcánica es el CO_2 , que puede encontrarse entre el 1 y 40% en vol. El CO_2 es un gas de efecto invernadero, principal contribuyente al calentamiento global. Los compuestos sulfúricos, bióxido de azufre (SO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), compiten por el tercer lugar en abundancia

relativa entre el 1-25% y 1-10% vol., respectivamente. El compuesto dominante de sulfuro en la pluma volcánica es el SO_2 , esto porque el H_2S tiene un tiempo de vida en la atmósfera de algunos días y es removido mediante procesos de oxidación y mediante reacciones con otros compuestos atmosféricos (por ejemplo, SO_2 , oxígeno (O_2), hidróxido (OH) y ozono (O_3)). Otros gases volcánicos que contribuyen <1% vol. en la abundancia relativa de la pluma, son el sulfuro de carbonilo (COS) y el sulfuro de carbono (CS_2). El COS, que es el precursor del CS_2 , por su estabilidad química tiene un tiempo de residencia de años en la atmósfera. Pero, al mismo tiempo, las cantidades presentes en la atmósfera se consideran insignificantes. Finalmente, los gases volcánicos menos comunes que se emiten en cantidades muy pequeñas son: CO, H_2 , N_2 , O_2 , metano (CH_4), sulfuro (S_2) y amoníaco (NH_3).

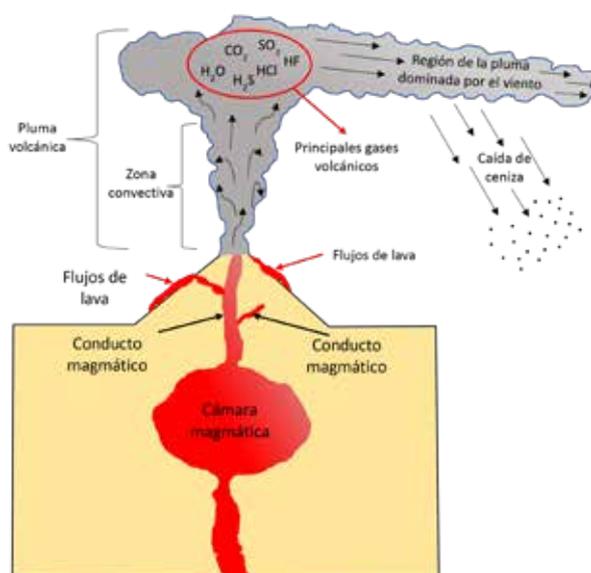


Figura 2: Simple descripción de la estructura interna (conducto y cámara magmática) y externa (pluma volcánica) de un volcán. La pluma volcánica es formada por 3 partes: i) una zona convectiva, donde la salida de los gases depende de la presión generada en la cámara magmática y en el conducto, ii) una zona de equilibrio de los gases volcánicos con la atmósfera y iii) una región donde gases y cenizas son transportados por el viento.

En la antigüedad los griegos, romanos y fenicios emplearon a los halógenos, como son flúor (F), cloro (Cl), bromo (Br) y yodo (I), principalmente en forma de sales para conservación de los alimentos. En la actualidad, especialmente por su comportamiento, características y reactividad química, los halógenos son elementos muy estudiados en las plumas volcánicas. Monitorear la variabilidad temporal de los halógenos en la pluma permite predecir cambios en la cámara magmática y eventuales erupciones volcánicas [8]. Generalmente, las cantidades de estos compuestos, presentes en forma de



ácidos, como ácido fluorhídrico (HF), ácido clorhídrico (HCl), ácido bromhídrico (HBr) y ácido yodhídrico (HI), son muy bajas, es decir $<1\%$ vol. La excepción es el HCl, que puede presentar cantidades entre 1 y 10% en vol. en la pluma volcánica.

Influencia de los gases volcánicos en el ambiente

En la historia de la Tierra los gases emitidos por los volcanes han influenciado el ambiente, empezando con la contribución en la formación de la atmósfera primordial hasta llegar a los efectos sobre el clima y la atmósfera actual. Los gases de la pluma volcánica, una vez emitidos y liberados, se mezclan y diluyen rápidamente en el ambiente atmosférico. En la Figura 3 se muestra el volcán Popocatepetl, que se encuentra en continua actividad desde el año 1994, en un evento de desgasificación pasiva (Figura 3a) y un evento de exhalación (Figura 3b) [9, 10].

La desgasificación pasiva se caracteriza por la continua liberación de gases por parte del volcán, incluso cuando no está produciendo ninguna erupción, por otra parte durante una exhalación el volcán emite gases y/o ceniza debido a un acumulo de gas en el conducto magmático y su rápida liberación. En esta condición, los principales gases emitidos incluyen H_2O , CO_2 y SO_2 .

El impacto de los gases volcánicos en la atmósfera cambia dependiendo el tipo de emisión, las emisiones de baja o media intensidad pueden afectar el clima local y troposférico (0-18 km, desde la superficie), en cambio las erupciones de alta intensidad (explosivas) afectan el clima global inyectando gases y cenizas hasta la estratósfera (10-50 km). La ceniza volcánica liberada en la estratósfera durante una fuerte erupción, principalmente aquella caracterizada por un tamaño muy pequeño (no depositada por gravedad), bloquea la luz solar y provoca un enfriamiento temporal, además de viajar por grandes distancias y en ocasiones atravesar el globo. Al mismo tiempo, las columnas eruptivas ricas en SO_2 o CO_2 impactan mayormente el clima teniendo la capacidad de enfriamiento o calentamiento global, respectivamente. El SO_2 que se convierte en aerosol de ácido sulfúrico (H_2SO_4) cuando es inyectado en la estratósfera, puede permanecer por varios años y puede ejercer un efecto de enfriamiento mucho después de que se haya producido en la erupción volcánica. Además, la contaminación del aire por H_2SO_4 puede generar *lluvia ácida*, es decir, forma de precipitación de componentes ácidos, afectar el medio ambiente y la salud humana [11]. Plantas, suelos y fuentes de aguas cerca de las plumas volcánicas pueden ser afectados por lluvia ácida.

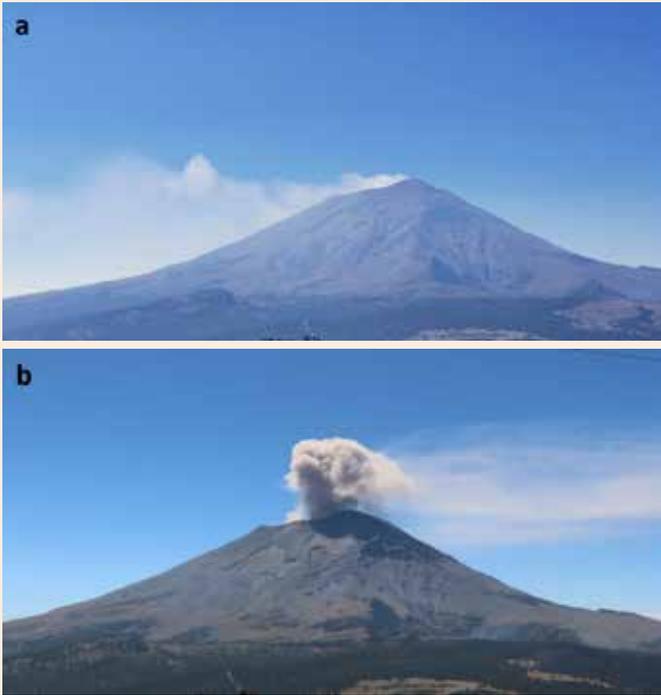


Figura 3: Pluma volcánica del Popocatepetl durante un episodio de desgasificación pasiva (a) y una exhalación (b). Foto tomada desde el Observatorio Atmosférico de Alzomoni, situado dentro del Parque Nacional Iztapalapa [12]

Las emisiones de grandes cantidades de ceniza y gases volcánicos en la atmósfera pueden llevar a lo que se

denomina *invierno volcánico*, es decir, un evento climático caracterizado por un enfriamiento global debido a la inyección de productos volcánicos en la atmósfera, que produce un impacto en la flora y fauna, y en la alteración del equilibrio de la química océano-atmósfera. Estos eventos pueden ser de tal entidad que algunas teorías proponen el *invierno volcánico* como causa desencadenante y/o coadyuvante al impacto del meteorito Chicxulub en México que llevó a la extinción de los dinosaurios. Según los historiadores, la derrota del emperador Napoleón Bonaparte en la batalla de Waterloo en junio de 1815, debida principalmente a una estrategia fallida de combate, fue causada en parte por una gran erupción volcánica del Monte Tambora, situado en Indonesia, en abril de ese mismo año [13]. Esta erupción, que causó la muerte de más de 100,000 personas, produjo un invierno volcánico por la enorme cantidad de ceniza y SO_2 emitidos en la estratosfera. Además, algunos científicos creen que las erupciones volcánicas, como la del Mount St. Helens en 1980 y el Mount Pinatubo en 1991, llevaron a un enfriamiento global a corto plazo, ya que el SO_2 , las cenizas y otras partículas reflejaron algo de energía solar en lugar de dejarla entrar a la atmósfera terrestre. La erupción del Monte Pinatubo, situado en las Filipinas, fue una de las más grandes del siglo XX, ya que causó la disminución de 0.5°C de la temperatura global, además de inyectar en la atmósfera alrededor de 20 millones de toneladas de SO_2 .

Otro gas atmosférico importante que interactúa con los gases emitidos por los volcanes es el O_3 , este último es considerado de vital importancia porque absorbe la radiación ultravioleta que es biológicamente dañina,



por otro lado, cuando se producen elevadas cantidades de O₃ a nivel de la superficie terrestre, este puede ser perjudicial para los seres humanos, plantas y animales, siendo un gas tóxico. Aunque los aerosoles volcánicos son catalizadores para la reducción de O₃ estratosférico [14], los verdaderos culpables de la destrucción del O₃ son los CFC (clorofluorocarburos) generados artificialmente.

Según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), los volcanes generan alrededor de 200 millones de toneladas de CO₂ al año, mientras que la actividad antropogénica (automóviles e industrias) impactan con 24 mil millones de toneladas de CO₂ por año. Los volcanes comprenden <1% de las emisiones de CO₂ y gases de efecto invernadero que impactan en todo el mundo cada año. Se estima que, durante la erupción del Monte St. Helens, situado en Estados Unidos, en las primeras horas de erupción se inyectaron a la atmósfera 10 millones de toneladas de CO₂ [15].

CONCLUSIÓN

Las emisiones volcánicas, altamente variables en el tiempo y en espacio, constituyen una fuente natural importante para muchas especies químicas. Mediciones a largo plazo de los principales gases volcánicos (SO₂ y CO₂), incluyendo el uso de simulaciones con modelos de dinámica interna, permiten determinar el impacto de las emisiones en el clima. Los volcanes y los gases volcánicos en particular, tienen un papel importante y complicado en la modificación del clima y la atmósfera. Las enormes y esporádicas inyecciones de gases y aerosoles en la troposfera y estratosfera influyen la química-física local y global. Actualmente el vulcanismo no está contribuyendo significativamente al calentamiento global ni a alterar el medio ambiente de la Tierra. Pero la historia de la Tierra ha demostrado claramente que tienen el poder de hacerlo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. K. Stovall, C. L. Driedger, E. G. Westby and L. M. Faust, "Living with volcano hazards", U.S. Geological Survey Fact Sheet 2019-3075. <https://doi.org/10.3133/fs20183075>
- [2] A. Aiuppa and F. Gaillard, "Volcanic Gases", In: White W. (eds) Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Science Series, Springer, Cham, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39193-9_239-1
- [3] J. W. Ewert, A. K. Diefenbach and D. W. Ramsey, "2018 Update to the U.S. Geological Survey National Volcanic Threat Assessment", Scientific Investigations Report 2018-5140. <https://doi.org/10.3133/sir20185140>
- [4] J. F. Kasting, "Earth's early atmosphere". Science, vol. 259, pp. 920-926, 1993. <https://doi.org/10.1126/science.11536547>
- [5] T. A. Mather, "Volcanism and the atmosphere: the potential role of the atmosphere in unlocking the reactivity of volcanic emissions", Philosophical Transactions of the Royal Society, vol. 366, pp. 4581-4595, 2008. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0152>
- [6] R. B. Symonds, W.I. Rose, G. J. S. Bluth and T. M. Gerlach, "Volcanic gas studies: methods, results and applications, in: Volatiles in Magma", Reviews in Mineralogy, vol. 30, pp. 1-66, 1994. <https://doi.org/10.1515/9781501509674-007>

- [7] C. Oppenheimer, T. P. Fischer and B. Scaillet, "Volcanic Degassing: Process and Impact", Treatise on Geochemistry (Second Edition), Vol. 4, Elsevier, pp. 111-179, 2014. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00304-1>
- [8] N. Taquet, W. Stremme, M. Grutter, J. Baylón, A. Bezanilla, B. Schiavo, C. Rivera, R. Campion, T. Boulesteix, A. Nieto-Torres, R. Espinasa-Pereña, T. Blumestock and F. Hase, "Variability in the Gas Composition of the Popocatepetl Volcanic Plume", Frontiers in Earth Science, 7, pp. 114, 2019. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00114>
- [9] R. Campion, H. Delgados-Granados, D. Legrand, N. Taquet, T. Boulesteix, S. Pedraza-Espitia and T. Lecocq, "Breathing and Coughing: The Extraordinary High Degassing of Popocatepetl Volcano Investigated with an SO₂ Camera", Frontiers in Earth Science, vol. 6, pp. 163, 2018. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00163>
- [10] B. Schiavo, W. Stremme, M. Grutter, R. Campion, C. A. Guarín, C. Rivera and S. Inguaggiato, "Characterization of a UV camera system for SO₂ measurements from Popocatepetl Volcano", Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 370, pp. 82-94, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.09.001>
- [11] A. Hansell and C. Oppenheimer, "Health Hazards from Volcanic Gases: A Systematic Literature Review", Archives of Environmental Health, vol. 59, pp. 628-639, 2004. <https://doi.org/10.1080/00039890409602947>
- [12] Dirección de Monitoreo Atmosférico, detalles sobre el Observatorio Atmosférico Altzomoni. Disponible en: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aaBhmU=%27>
- [13] M. J. Genge, "Electrostatic levitation of volcanic ash into the ionosphere and its abrupt effect on climate", Geology, vol. 46, pp. 835-838, 2018. <https://doi.org/10.1130/G45092.1>
- [14] L. Xu, K. Wei, X. Wu, S. P. Smyshlyayev, W. Chen and V. Ya. Galin, "The Effect of Super Volcanic Eruptions on Ozone Depletion in a Chemistry-Climate Model", Advances in Atmospheric Sciences, vol. 36, pp. 832-836, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00376-019-8241-8>
- [15] U.S. Geological Survey, volcanic hazard and climate change. Disponible en: <https://www.usgs.gov/natural-hazards/volcano-hazards/volcanoes-can-affect-climate>

Cómo citar este artículo:

Schiavo, B., Inguaggiato, C., Arredondo-Palacios, T. E., & Meza-Figueroa, D. (2021). EMISIONES VOLCÁNICAS: ORIGEN E IMPACTO EN LA ATMÓSFERA. EPISTEMUS, 15(30). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i30.160>

