

Número Especial:
Sociedad y Volcanología (SOVOL)

MEDICIONES Y EL MODELAJE DE LA CONCENTRACIÓN DEL DIÓXIDO DE AZUFRE Y DE LA COMPOSICIÓN DEL AGUA DE LLUVIA EN LOS ALREDEDORES DEL VOLCÁN POÁS DURANTE EL 2017 EN COSTA RICA

Karla Bolaños-Bolaños¹, Rosa Alfaro-Solís¹ y José Pablo Sibaja-Brenes^{1*}

1. Laboratorio de Química de la Atmósfera, Escuela de Química, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

*Autor de correspondencia:
jose.sibaja.brenes@una.ac.cr

DOI:
<https://doi.org/10.55467/reder.v8i1.136>

RECIBIDO
6 de septiembre de 2022

ACEPTADO
22 de agosto de 2023

PUBLICADO
1 de enero de 2024

Formato cita Recomendada (APA):
Bolaños-Bolaños, K., Alfaro-Solís, R. & Sibaja-Brenes, J.P. (2024). Mediciones y el modelaje de la concentración del dióxido de azufre y de la composición del agua de lluvia en los alrededores del volcán Poás durante el 2017 en Costa Rica. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 8(1), 1-11. <https://doi.org/10.55467/reder.v8i1.136>



Todos los artículos publicados en REDER siguen una política de Acceso Abierto y se respaldan en una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres (REDER)

RESUMEN

Debido al aumento de la actividad del Volcán Poás en 2017, en Costa Rica, se realizaron muestreos en los alrededores del cráter activo para cuantificar la concentración de dióxido de azufre (SO₂) y las características químicas del agua de lluvia, entre mayo y octubre del 2017. Las muestras de SO₂ se recolectaron con sistemas de burbujeo y las muestras de agua de lluvia con muestreadores de lluvia simples, donde se midió pH, conductividad eléctrica y concentración de aniones. En El Mirador para visitantes hubo valores de pH hasta de 2.50 y concentración de sulfatos de 239.3 mg/L. Para el SO₂, los valores más significativos fueron en el Centro de visitantes y la Casa de guardaparques (entre 1 km y 2 km del cráter), con concentraciones de 10171 µg/m³ y 49360 µg/m³, en 4 horas, lo cual las personas podrían tener problemas respiratorios y afectaciones inmediatas, como vómito y sangrado nasal. Además, se utilizó el programa Aermod para modelar la dispersión del SO₂ y observar las zonas más afectadas. Las mediciones dieron un punto de partida para la reapertura del Parque Nacional Volcán Poás, con capacitaciones y el monitoreo de la calidad del aire, para la seguridad para los visitantes.

PALABRAS CLAVES

Dióxido de azufre; Volcán Poás; Cromatografía de iones; agua de lluvia; Costa Rica

MEASUREMENTS AND MODELING OF THE CONCENTRATION OF SULFUR DIOXIDE AND THE COMPOSITION OF RAINWATER AROUND THE POÁS VOLCANO DURING 2017 IN COSTA RICA

ABSTRACT

Due to the increase in activity of the Poás Volcano during 2017, in Costa Rica, a sampling campaign was carried out in the surroundings of the active crater, to quantify the concentration of sulfur dioxide (SO₂) and the chemical characteristics of rainwater, between May and October 2017. The SO₂ samples were collected with bubbling systems and the rainwater with simple rain samplers, where pH, electrical conductivity and anion concentration were measured. In El Mirador for visitors there were pH values of 2.50 and sulfate concentration of 239.3 mg/L. For SO₂, the most significant values were in the Visitor Center and the Park Ranger House (between 1 km and 2 km from the crater), with concentrations of 10171 µg/m³ and 49360 µg/m³, in 4 hours, with these values, the people could have breathing problems and immediate effects, such as vomiting and nosebleeds. In addition, the Aermod program was used to model the dispersion of SO₂ and observe the most affected areas. The measurements provided a starting point for the reopening of the Poás Volcano National Park, with training and monitoring of air quality, for visitor's safety.

KEYWORDS

Sulfur dioxide; Poás volcano; Ions chromatography; Rainwater; Costa Rica

INTRODUCCIÓN

Los volcanes son una fuente biogénica de contaminación debido a la reacción química que se produce al combinar las emisiones volcánicas con los factores ambientales, en donde se producen sustancias tóxicas que ocasionan una contaminación atmosférica en la zona de impacto (Martínez Márquez, 2010). Durante las erupciones volcánicas se emiten a la atmósfera gases y ceniza que alcanzan largas distancias, al dispersarse en la troposfera, para luego ser removidos por acción del viento y la lluvia, entre otros (Narváez y Cano, 2004).

El conjunto de gases emitidos por un volcán se compone en su mayoría por el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el dióxido de azufre (SO_2), el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el cloruro de hidrógeno (HCl) y el fluoruro de hidrógeno (HF), entre otros. Algunos productos secundarios que se pueden encontrar en menor proporción son metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), nitrógeno (N_2), argón (Ar), helio (He), hidrógeno (H_2) y radón (Rn) (Enríquez Rodríguez, 2012).

Los gases emitidos pueden generar problemas para la salud, en función del tiempo de exposición y de la concentración de cada gas. Según los efectos a la salud, los gases volcánicos se clasifican como irritantes y no irritantes, siendo los gases irritantes aquellos que pueden ejercer sus efectos a una concentración baja, en términos de ppbv, y afectan una amplia área alrededor del volcán. Estas sustancias irritantes actúan en el sistema respiratorio y en los ojos, provocando así irritación ocular, lagrimeo, estornudos, entre otros efectos, siendo el dióxido de azufre, el sulfuro de hidrógeno, el cloruro de hidrógeno y el fluoruro de hidrógeno ejemplos de las sustancias que provocan problemas al ser humano (Baxter, 2000). Los gases no irritantes o gases asfixiantes son aquellos que actúan sin provocar lesiones a nivel local, ya que son absorbidos mediante la sangre y desplazan el oxígeno del aire aspirado. Los gases asfixiantes más representativos son el dióxido de carbono y el nitrógeno (Organización Panamericana de la Salud, 2005).

Para estimar la concentración de sustancias en el aire emitidas por una fuente emisora se utilizan los modelos matemáticos de simulación en la atmósfera sobre la dispersión de gases y partículas, los cuales son una herramienta útil para el estudio de la calidad del aire en zonas donde no se dispone de una red de vigilancia de contaminación atmosférica. El modelo de dispersión Aermód es un ejemplo de programa computacional aplicable para zonas rurales y urbanas, terreno llano o irregular, con estimaciones de hasta 50 km de distancia del foco emisor. Este programa es capaz de hacer estimaciones de la concentración de partículas y gases en el aire, en la lluvia (deposición húmeda) y deposición seca (Sibaja, 2014; Gallego *et al.*, 2012).

Según Acosta (2007), las masas de aire absorben a los contaminantes cuando se desplazan de un lugar a otro en la atmósfera, lo que afecta el contenido de gases solubles y el de partículas en el agua de lluvia; y a su vez, esos gases se estabilizan por medio de transformaciones físicas y químicas antes de ser depositadas sobre la superficie terrestre. La disolución del SO_2 en el agua tiene como resultado una mezcla de especies producto de su oxidación, y dependiendo del pH, se encuentran especies como el sulfito (SO_3^{2-}), bisulfito (HSO_3^-) y ácido sulfuroso no disociado (H_2SO_3). Posteriormente, mediante la oxidación del bisulfito, se da la formación del ácido sulfúrico (H_2SO_4) en fase acuosa (Alvarado, 2006; Vásquez *et al.*, 2012). Igualmente, los óxidos de nitrógeno en la atmósfera se encuentran principalmente como monóxido de nitrógeno (NO) que es oxidado a dióxido de nitrógeno (NO_2) y posteriormente el dióxido de nitrógeno, a través de su disolución en el agua, se transforma en ácido nítrico (Galán y Fernández, 2006). La acidez en el agua de lluvia dependerá del balance entre las sustancias ácidas y alcalinas en disolución. La lluvia de forma natural es ligeramente ácida (pH de aproximadamente 5.6) debido a la disolución del CO_2 atmosférico en el agua. La precipitación con un pH inferior a 5.00 es considerada como lluvia ácida, la cual se produce por la incorporación de sustancias ácidas como el ácido sulfúrico y el ácido nítrico, que se forman en la atmósfera por la oxidación del SO_2 y de los NO_x (Vásquez *et al.*, 2012). La lluvia ácida genera efectos nocivos en los ecosistemas, pues penetra en el suelo y provoca la pérdida de nutrientes a causa de un intercambio de cationes básicos del suelo y la liberación del aluminio, el cual es tóxico para las plantas (Torrellas Hidalgo, 2012). La acidificación de las aguas propicia la disolución de los metales pesados (Vásquez *et al.*, 2012). La lluvia ácida no solo afecta los ecosistemas, sino que además corroe las superficies metálicas y destruye las estructuras de los edificios (Campos Gómez, 2000).

El Parque Nacional Volcán Poás (PNVP) es uno de los lugares turísticos más visitados en Costa Rica, debido a su actividad volcánica, atractivo paisajístico y biodiversidad (Figura 1). El

volcán Poás es un estratovolcán que posee una altura de 2708 m s.n.m., donde presenta un cráter activo con un lago hiperácido usualmente con color verde turquesa y fumarolas típicamente de baja temperatura (SINAC, 2001). El edificio volcánico del Poás está constituido por tres conos volcánicos principales: el Botos, el von Frantzius y el cráter activo Poás. El macizo está construido por sucesiones de lavas, cenizas, lahares, tobas, ignimbritas y lapilli. El sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el dióxido de azufre (SO_2) reaccionan con el agua del sistema hidrotermal para dar origen a iones en disolución y una serie de depósitos de minerales de azufre, yeso y silicatos, entre otros. El color verde turquesa del lago proviene de coloides de azufre y sílica suspendidos en el agua, así como de iones de hierro III disueltos. La actividad más importante se genera en el cráter principal y en el lago hiperácido, en donde las erupciones de mayor importancia se han registrado en 1910, 1953-1955 y el 2017, y fueron tipo freatomagmáticas, terminando con erupciones magmáticas que afectaron a la zona central de Costa Rica, y generaron el cierre del PNVP por más de un año para los visitantes (Martínez et al., 2000; Rouwet et al., 2019; Sibaja et al., 2019). Por tanto, debido a las razones expuestas se destaca la importancia de evaluar las concentraciones de los aniones en el agua de lluvia y el dióxido de azufre en los alrededores del volcán Poás.



Figura 1. Vista del cráter activo del volcán Poás desde el Mirador del PNVP
Fuente: José Pablo Sibaja Brenes, 2017.

METODOLOGÍA

Los muestreos se llevaron a cabo de mayo a octubre del 2017 en el Parque Nacional Volcán Poás y en sus alrededores. Se recolectaron muestras de agua de lluvia en ocho puntos alrededor del volcán, cuatro de ellos ubicados dentro del Parque Nacional Volcán Poás (1. Centro de visitantes, 2. El Mirador, 3. La casa de guardaparques y 4. Llano verde (suroeste del volcán)) (Figura 2.a) y otros en Grecia (5. Tacaes y 6. La Arena), Poás (7. Sabana Redonda) y Naranjo (8. Cirrú) (Figura 2.b). La recolección del agua de lluvia fue cada mes y se llevó a cabo por medio de un sistema de muestreo simple compuesto por una botella y un embudo de polietileno de alta densidad, tratado previamente con HCl 6,0 mol/L y posteriormente agua desionizada, para eliminar residuos de metales y ácidos.

El dióxido de azufre fue recolectado en los cuatro puntos ubicados dentro del Parque Nacional Volcán Poás (1. Centro de visitantes, 2. El Mirador, 3. La casa de guardaparques y 4. Llano verde (suroeste del volcán)). Para la recolección del dióxido de azufre (SO_2) se utilizaron dos burbujeadores con filtro de partículas (para impedir la reacción de partículas con azufre), en donde se aspiró un volumen de aire medido a través de una disolución diluida de peróxido de hidrógeno en medio ácido, con el fin de transformar mediante oxidación el SO_2 a ácido sulfúrico, para posteriormente cuantificar el sulfato recolectado mediante cromatografía de iones. Los muestreos se desarrollaron durante 4 horas, al menos una vez al mes, seleccionando de forma aleatoria el día de muestreo.

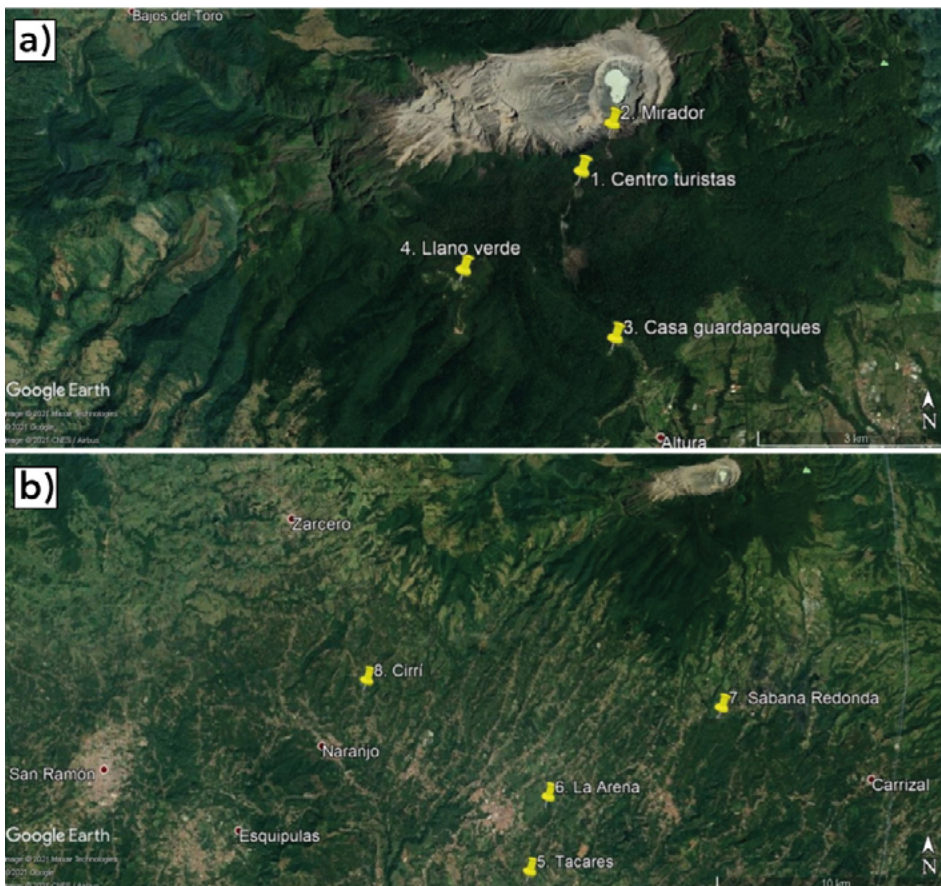


Figura 2. Puntos de muestreo a) dentro del Parque Nacional Volcán Poás y b) en los alrededores del Parque Nacional Volcán Poás

Fuente: Autores, 2024, basado en Google Earth.

En su totalidad se recolectaron 28 muestras de dióxido de azufre y 50 muestras de agua de lluvia., las cuales fueron filtradas, utilizando filtros de membrana de $0.25 \mu\text{m}$ de poro y almacenadas a 4°C hasta su respectivo análisis. Los parámetros determinados en las muestras de agua de lluvia fueron: el pH, la conductividad eléctrica y la concentración de especies químicas iónicas disueltas, tales como los aniones F^- , Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} . Mientras que en las muestras de dióxido de azufre únicamente se determinó la concentración del SO_4^{2-} . El pH y la conductividad eléctrica se determinaron utilizando un pH-metro Oakton y un conductímetro Oakton. La determinación de los aniones (F^- , Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-}), al igual que la determinación del dióxido de azufre, se llevó a cabo por cromatografía de iones, utilizando un cromatógrafo marca DIONEX®, modelo ICS-5000 DUAL, con una precolumna aniónica IonPac AG23 (4 mm x 50 mm), una columna analítica aniónica IonPac AS23 (4 mm x 50 mm), un detector de conductividad eléctrica y una fase móvil de $\text{NaHCO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$.

Se analizaron los valores encontrados en los muestreos con las estimaciones realizadas en el programa de dispersión de contaminantes en el aire, Aermol. Este programa toma en cuenta las condiciones meteorológicas de la zona de emisión (temperatura, humedad relativa, radiación solar, lluvia y velocidad y dirección del viento), la topografía de la zona (que fue descargada WebGIS¹) y las condiciones del foco emisor (temperatura de los gases, diámetro del cráter, tasa de emisión diaria de SO_2 , obtenida de la Global Sulfur Dioxide Monitoring Home Page de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) (NASA, 2017), para estimar la concentración de los contaminantes alrededor de la fuente de contaminación (50 km de distancia a la redonda). Los mapas se generaron para estimar la dispersión del SO_2 y comparar los valores reportados por las mediciones en cada lugar con los valores calculados por el programa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el aumento de la actividad volcánica en abril del 2017, se determinó la concentración del dióxido de azufre en el aire en los alrededores del cráter activo del Volcán Poás entre abril y noviembre del 2017, específicamente para los puntos de muestreo: El Mirador, Centro de visitantes, Casa de

1. <http://www.webgis.com>

guardaparques y Llano verde (Figura 2.a). La Tabla 1 incluye los rangos de concentraciones de dióxido de azufre observados en las muestras tomadas en los 4 puntos de muestreo, a una media de 4 horas. Las concentraciones mostradas tienen su variación en función de las condiciones meteorológicas del momento, ya que los valores con menor concentración de SO_2 , se refiere a viento hacia el norte, en donde los puntos de muestreo se encuentran hacia el sur y el suroeste del cráter principal. Por lo anterior, los gases emitidos por el volcán se dispersan hacia zonas donde no hay visitación al parque. La variabilidad de la desviación estándar junto con el promedio en el Tabla 1 muestra que las concentraciones de SO_2 en la zona pueden variar entre valores no perceptibles por el ser humano a valores que afectan al ser vivo.

Punto de muestreo	Concentración de SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en 4 h		
	Mínima	Máxima	Promedio
Centro de visitantes	22	10171	3314 \pm 3567
Mirador	13	5072	1351 \pm 1591
Casa guardaparques	175	49360	24768 \pm 34779
Llano verde	129	708	270 \pm 302

Tabla 1. Concentraciones del dióxido de azufre encontradas dentro del Parque Nacional Volcán Poás
Fuente: Autores, 2024.

De acuerdo con el Centro Nacional del Medio Ambiente de Chile (2018) hallazgos en estudios clínicos humanos indican que la exposición de 4 h durante 3 días por 3 semanas a concentraciones de dióxido de azufre de $2600 \mu\text{g}/\text{m}^3$, genera disminución de la función espirométrica, incremento en la resistencia específica en las vías respiratorias y disminución del flujo mucoso nasal. Además, la exposición a concentraciones más elevadas, tal como $13000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante 4 horas provoca un aumento en la depuración bronquial y un detrimento respiratorio, debido a la tos y la falta de aire para respirar. Conjuntamente, la concentración AEGL (Acute Exposure Guideline Levels) para el SO_2 a la cual se predice que en la población en general (incluyendo personas susceptibles) puedan experimentar efectos asintomáticos no sensoriales pasajeros y reversibles al cesar la exposición es de $520 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (4 h). La concentración a la cual se pueden experimentar efectos adversos en la salud que son de larga duración e irreversibles es de $1950 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (4 h) y aquella a la cual se pueden experimentar efectos que pueden causar la muerte es de $78000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (4 h). Las concentraciones de dióxido de azufre más significativas medidas en los días de muestreo se detectaron en los alrededores del Centro de visitantes: $(10171 \pm 120) \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el 12 de mayo del 2017 y la Casa de guardaparques $(49360 \pm 10) \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el 11 de junio del 2017. La presencia de mayor concentración del dióxido de azufre en dichos puntos, en comparación con El Mirador $(5072 \pm 60) \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el 12 de mayo del 2017 y $(3885 \pm 30) \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el 11 de junio del 2017), se debe a la dispersión y a la acumulación de parte de los gases expulsados en el sector que está a una distancia aproximada de 1 km y 2 km, respectivamente, hacia el oeste-suroeste del cráter activo. Además, la altura de la columna de gases emitida se encontraba por arriba de los 500 m de altura sobre el cráter activo, por lo que el sector del Mirador, aunque es el más cercano a la fuente de emisión, tendría menor afectación debido a la dispersión y la deposición seca que se da con el desplazamiento horizontal de la pluma de gases. De acuerdo con el modelo de dispersión de gases y partículas del código computacional Aermom (Figura 3), para el 11 de junio del 2017, se muestra que la principal afectación de estas emisiones se concentra dentro del Parque Nacional, en donde la Casa de guardaparques llegó a concentraciones de SO_2 entre $31000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $41200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos valores se encuentran cerca del valor reportado de $49360 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Al realizar un estudio de comparación entre el valor medido y el valor estimado por el modelo Aermom, el factor determinado se encuentra entre 0.7 y 1.0, lo que se refiere a un cálculo atinente y con buena exactitud (valores cercanos a 1.0), según las condiciones meteorológicas tabuladas para la estimación.

Para el 11 de junio del 2017 las concentraciones de dióxido de azufre fueron tan altas en la Casa de los Guardaparques, que las personas que estaban en esta zona sufrieron dolor de cabeza, vómito y sangrado nasal. Esta situación se dio debido a la acumulación de gases en la atmósfera y que, durante la noche, se da el descenso de la altura de mezcla en la troposfera, lo que hace que los gases se concentren cerca de la superficie. Los guardaparques fueron retirados de la zona por parte de representantes de la Cruz Roja del lugar.

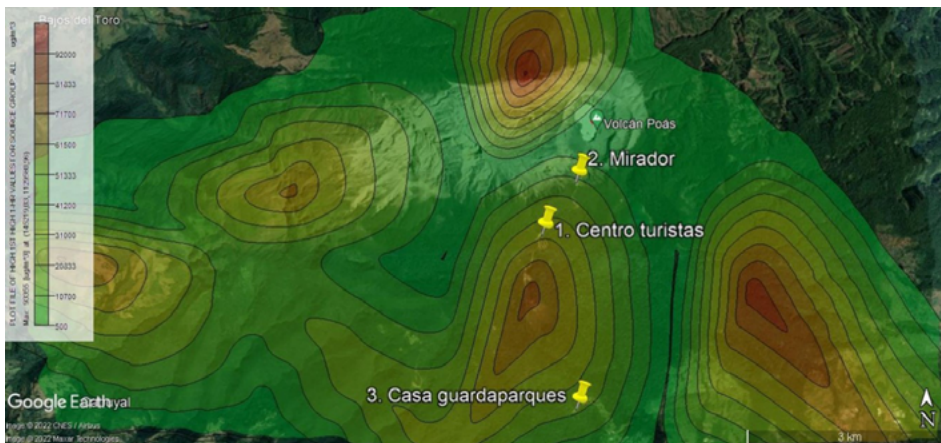


Figura 3. Modelo de dispersión de contaminantes Aermod para el II de junio del 2017. La escala muestra las concentraciones en el aire de SO_2 , según la magnitud en el área
Fuente: Autores, 2017, basado en Google Earth.

De igual forma, se determinó la composición del agua de lluvia en los alrededores del cráter activo entre abril y noviembre del 2017, específicamente para los puntos de muestreo: El Mirador, Casa de guardaparques, Centro de visitantes y Llano verde, encontrando una alta concentración de iones y valores de pH bajos (Tabla 2). Las muestras recolectadas en el punto de muestreo El Mirador obtuvieron valores más bajos de pH con valores entre 2.50 y 3.39, la conductividad eléctrica más alta, entre 176 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1120 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y las concentraciones de iones más altas (con excepción del ion nitrato), en comparación con los demás puntos de muestreo dentro del parque. Esto se debe a la generación de nubes dentro del cráter que, con las gotas de lluvia, solubilizan a los gases volcánicos, como el SO_2 , donde el azufre se oxida al ion sulfato. Estos iones se aglomeran en la gota de lluvia y cae como precipitación húmeda hacia la superficie. Si las emisiones por parte del volcán aumentan, debería aumentar los valores de iones en disolución en el agua de lluvia. Además, el proceso de oxidación de los gases volcánicos se puede dar a varios kilómetros de distancia del punto de emisión, por lo que se abarcaría zonas vientos abajo del volcán, como es el oeste y suroeste del Valle Central de Costa Rica. Los días con los valores más altos de concentración de aniones de la Tabla 2 fueron: 11 de junio, 20 de junio, 26 de junio. Otra causa podría ser que en el Mirador hay influencia de los aerosoles ácidos emitidos por el cráter principal, lo que generaría una mayor influencia de partículas ácidas sobre la zona de muestreo. Según Mora-Barrantes et al. (2021), la lluvia, la niebla y las nubes impactan la composición química del aire, ya que se pueden incorporar gases y aerosoles en las nubes, donde transforman especies en otras a través de la fase acuosa o por medio de reacciones heterogéneas. Estas nuevas especies formadas afectarían la producción agrícola, debido al cambio de las características del suelo, y propician la acidificación y la metalización, causando una reducción de sedimentos, así, la flora y la fauna en donde se encuentran.

Punto de muestreo	pH (± 0.01)	Conductividad eléctrica (± 1) $\mu\text{S}/\text{cm}$	F^- (mg/L)	Cl^- (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)
Casa de guardaparques	3.65 a 5.22	7 a 123	< 2.5	< 1.2 a 17.1	< 0.8 a 1.3	< 0.8 a 23.7
El Mirador	2.50 a 3.39	176 a 1120	< 2.5 a 15.5	< 1.2 a 205.1	< 0.8	20.0 a 239.3
Centro de visitantes	3.86	77	< 2.5	6.9	< 0.8	5.1
Llano verde	3.40 a 4.17	35 a 138	< 2.5	1.6 a 19.2	< 0.8 a 8.9	< 0.8 a 51.4

Tabla 2. Valores encontrados en el agua de lluvia para los puntos de muestreo dentro del Parque Nacional Volcán Poás
Fuente: Autores, 2024.

Con la finalidad de identificar si el agua de lluvia recolectada en los puntos muestreados pueda ser utilizada para el consumo humano y/o animal, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos con los parámetros establecidos en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (2005), el cual indica como valores alerta: pH = 6, conductividad 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 25 mg/L

para el Cl⁻, 25 mg/L para el NO₃⁻ y 25 mg/L para el SO₄²⁻ (no hay valor alerta para el F⁻). Y como valor máximo admisible: pH = 8, 0.7 mg/L para el F⁻, 250 mg/L para el Cl⁻, 50 mg/L para el NO₃⁻ y 250 mg/L para el SO₄²⁻. Con la comparación de los valores del Reglamento con los valores más significativos obtenidos para el punto de muestreo El Mirador, se determina que el pH es muy bajo y la conductividad sobrepasa el valor de alerta. El ion fluoruro solamente se pudo cuantificar en la zona de El Mirador, donde se llegó hasta a 15.5 mg/L. Este valor se debería a emisiones de cloruro de hidrógeno por parte del volcán, en donde luego, estas partículas se solubilizan en las gotas de nube y las gotas de lluvia para luego llegar a la superficie. Por otro lado, la concentración para el ion F⁻ supera en gran medida el valor máximo permisible, al igual que la concentración para el Cl⁻ y el SO₄²⁻ que sobrepasan el valor de alerta, con lo que se puede inferir que el agua de lluvia de la zona no sería apta para consumo animal y/o humano, ya que de acuerdo con Narváez y Cano (2004) la ingesta de agua contaminada con flúor y otros metales puede causar desde enfermedades gastrointestinales hasta complicaciones severas en enfermos crónicos. El ingerir el agua de lluvia por algún humano o animal podría generar problemas estomacales y digestivos; además, la alta acidez en agua de lluvia podría generar efectos adversos sobre la calidad de la vegetación y de la infraestructura, en especial en aquella construida con metal y concreto (Ortuño et al., 2002).

En los demás puntos de muestreo, el pH del agua de lluvia es bajo, pero con baja concentración de aniones, lo que podría representar una baja influencia de las emisiones volcánicas en cada zona y que la acidez se puede deber a otras fuentes, como los ácidos orgánicos, producto de la vegetación del parque y alrededores. Al comparar los valores fisicoquímicos del agua de lluvia del volcán Poás con los encontrados por Chaves-Solano et al. (2021) en el volcán Irazú, en Costa Rica, durante el 2019, hay diferencias marcadas relacionadas con la actividad volcánica en cada lugar. El volcán Irazú es un volcán activo con las últimas erupciones entre 1963 y 1965. Actualmente, en el edificio volcánico se observan emisiones fumarólicas menores dentro del cráter principal y se mantiene activo un campo fumarólico en la parte noroeste del volcán, en la pared externa del cráter principal. Chaves-Solano et al. (2021) reportaron pH para el agua de lluvia entre 3.55 y 5.33, lo que representa valores normales de acidez, con excepción del encontrado en el Mirador del volcán, con una cuantificación de 3.55. Con esto se observa que la actividad volcánica en los focos de emisión de gases afecta directamente el nivel de acidez del agua de lluvia en ambos volcanes, pero más significativamente en el volcán Poás, sección del Mirador (pH hasta de 2.50), debido a una actividad y una generación más fuerte y una emanación de gases que aportan acidez al agua de lluvia en una mayor cantidad (Chaves-Solano et al., 2021). Las concentraciones obtenidas de cloruros, nitratos y sulfatos pueden generar un impacto en la fertilidad de los suelos, ya que se generaría un incremento en la acidez de este. Los suelos neutros son los que se catalogan como los más fértiles; en donde a un pH neutro, el suelo tiene una fase saturada de iones básicos (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺). Estos cationes se unen a especies aniónicas como cloruro, nitrato y sulfato, formando pares iónicos los cuales, por un proceso de lixiviación, son arrastrados por el agua. La pérdida de estos iones en el suelo genera un aumento de la acidez (Espinosa y Molina, 1999).

Se determinó la composición del agua de lluvia en otras zonas aledañas al volcán Poás, entre agosto y noviembre del 2017 (Tabla 3), donde según los gráficos de dispersión de contaminantes del programa Aermod, hay una baja o media influencia de las emisiones volcánicas, específicamente para los puntos de muestreo: Cirrì de Naranjo, Sabana Redonda de Poás, Tacares y La Arena de Grecia (Figura 2.b).

Punto de muestreo	pH (± 0.01)	Conductividad eléctrica (± 1) µS/cm	F ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
Cirrì	3.74 a 5.31	16 a 90	< 2.5	0.9 a 9.4	< 0.8 a 3.7	3.3 a 10.3
La Arena	3.68 a 6.70	12 a 109	< 2.5	1.0 a 27.4	< 0.8 a 6.4	< 0.8 a 26.4
Tacares	3.02 a 7.65	19 a 460	< 2.5	1.3 a 39.8	< 0.8 a 1.4	< 0.8 a 3.4
Sabana Redonda	4.42 a 5.21	12 a 38	< 2.5	1.4 a 2.4	0.7 a 1.4	3.2 a 5.8

Tabla 3. Valores encontrados en el agua de lluvia para los puntos de muestreo en los alrededores del Parque Nacional Volcán Poás
Fuente: Autores, 2024.

Al realizar la comparación de los resultados del agua de lluvia en las zonas fuera del parque con los valores del Reglamento para la Calidad del Agua Potable (2005), se determina que el pH es bajo, la conductividad y las concentraciones para el Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} no sobrepasan el valor de alerta. Por tanto, en su mayoría las muestras de agua de lluvia de los diferentes puntos de muestreo en los alrededores del Parque Nacional Volcán Poás poseen concentraciones aceptables de aniones. El pH en su mayoría es más bajo del recomendable; sin embargo, éste no se puede atribuir directamente a las emisiones provenientes del volcán, ya que las concentraciones de los iones de origen magmático son bajas y se debe tomar en cuenta otras fuentes que pueden ser del tipo antropogénico, como las emisiones por los vehículos y la actividad industrial. Es por lo anterior que se debe continuar con la investigación de las características fisicoquímicas del agua de lluvia y evitar su consumo o uso inmediato sin antes conocer las características que posee. Estas características del agua de lluvia también podrían afectar a lagunas o aguas subterráneas de la zona que podrían ser de explotación y consumo de la población. La vigilancia de la calidad del agua de lluvia para luego darle un uso específico es necesaria para evitar problemas de salud de forma aguda (efectos inmediatos) o de forma crónica (efectos a largo plazo).

SITUACIÓN DEL PARQUE NACIONAL VOLCÁN POÁS DURANTE EL 2017

A nivel poblacional, los niveles de dióxido de azufre han sido perjudiciales para la población y para los guardaparques de la zona, ya que han sentido molestias respiratorias como tos, sangrado nasal y dificultad para respirar. Esta situación se ha dado a través del tiempo y fue reportada en el 2017, después de la erupción de abril de ese año. Debido a la actividad del volcán Poás en el 2017, se generaron una serie de precauciones como: rotulación de las zonas, información de los peligros volcánicos a los visitantes, reparación de las zonas y las carreteras dañadas, construcción de refugios de resguardo de los visitantes, tener un sistema de medición continuo de gases en al menos cuatro puntos del Parque, compra de cascos de seguridad, máscaras para gases, máscaras para partículas en el aire, entre otros. Con los datos generados por el Laboratorio de Química de la Atmósfera de la Universidad Nacional de Costa Rica (LAQAT-UNA), se dieron capacitaciones (Figura 4) a los guías turísticos, los guardaparques y a la población cercana al volcán, para que conozcan sobre los peligros y las precauciones que se deben tomar al convivir con una fuente constante de emisión de gases y material particulado al aire. En la capacitación se incluyó la Tabla 4 con los valores de exposición al dióxido de azufre, en tiempos de 15 minutos, el cual sería el tiempo que la visitación tendría en cada una de las zonas y así, con base en las mediciones realizadas anteriormente, tener un criterio técnico para los guardaparques, para una eventual respuesta ante las eventualidades de los gases en el volcán. La Tabla 4 está basado en las mediciones realizadas por el LAQAT-UNA en el volcán Poás y por el índice generado por el Parque Nacional de los Volcanes de Hawái y el Observatorio Vulcanológico Hawaiano para la seguridad de la población (Elias y Sutton, 2002).



Figura 4. Capacitación sobre peligros volcánicos realizada en agosto del 2018 sobre los peligros volcánicos en la comunidad de Poasito y Fraijanes, Alajuela, Costa Rica
Fuente: Redy Conejo Aguilar, 2018.

Condición	Respuesta del organismo
Verde (Bueno) (0.0 ppm – 0.3 ppm) – (15 min)	Actividad normal
Amarillo (Moderado) (0.3 ppm – 0.5 ppm) – (15 min)	Acciones de protección básicas: Alerta al personal Información a los visitantes de la concentración de alerta
Naranja (Insalubre personas sensibles) (0.5 ppm - 1 ppm) – (15 min)	Acciones de protección moderadas: Relocalización/cancelación de caminatas y trabajos al aire libre
Rojo (Insalubre) (mayor a 1 ppm) – (15 min)	Acciones protectoras amplias: Cierre del mirador al cráter y de ser necesario todo el parque

Tabla 4. Condición de la exposición a diferentes concentraciones del dióxido de azufre (SO₂) del Parque Nacional Volcán Poás
Fuente: Autores, 2024.

Con la experiencia generada desde el 2017 hasta el 2020, se ha tenido un sistema de medición, educación y prevención de peligros volcánicos para la población circundante al volcán y especialmente para los guardaparques. Ahora se cuenta con un procedimiento de trabajo y comunicación, en donde los cambios de actividad en el edificio volcánico del volcán Poás son medidos por las instituciones de vigilancia y también comunicadas por los guardaparques que están en el día a día, con la vigilancia visible y con los medidores de gases. Actualmente, los guardaparques poseen la capacidad técnica con respecto a la concentración de SO₂ en aire para tomar las decisiones de tiempo de estadía en las zonas de visitación, el uso de mascarillas de seguridad o el cierre de áreas de visita para asegurar el bienestar de las personas.

CONCLUSIONES

Las concentraciones de dióxido de azufre en el Parque Nacional Volcán Poás son variables en función de la actividad del volcán, las condiciones meteorológicas y el lugar de visitación en donde se está presentando la exposición. Concentraciones altas de SO₂ se pueden dar en zonas cercanas al cráter principal (menos de 3 km), en donde, con baja velocidad del viento o viento con dirección hacia el sur o el suroeste, puede afectar a los lugares donde se aglomeran las personas. Condiciones de baja radiación solar generan un impedimento del ascenso de las masas de aire y una concentración a nivel superficial que afectaría a las personas, como el caso presentado el 11 de junio del 2017, en la Casa de guardaparques, donde se llegó a una concentración de (49360 ± 10) µg/m³ en 4 horas de exposición, durante la noche.

El programa Aermod puede utilizarse como herramienta de estudios de impacto hacia el ambiente, ya que puede ayudar a profesionales de consultorías, agencias gubernamentales e institutos, interesados en la modelación de dispersión de contaminantes y calidad de aire, porque brinda oportunidades de mejora con la señalización de las zonas de mayor influencia por la contaminación emitida por un volcán, tomando en cuenta las características de la emisión de gases o partículas y los parámetros meteorológicos del momento de la erupción.

Para las muestras de agua de lluvia, el nivel de acidez es variable en cada uno de los puntos, así como las concentraciones de iones encontradas, donde en todos los puntos de muestreo hubo eventos de lluvia ácida, con un valor de pH menor a 4.50. Cerca del foco de emisión, se da la solubilización de sustancias que aumentan la concentración de iones en el agua de lluvia, como el caso de sulfato (producto de la oxidación del dióxido de azufre) en el Mirador, donde se llegó hasta concentraciones de 239.3 mg/L. Es por lo anterior que se debe continuar con la investigación de las características del agua de lluvia para evitar afectaciones a la población o a las fuentes de agua de explotación y/o consumo.

La generación de grupos de trabajo sobre los diferentes temas relacionados con los volcanes hizo que la capacitación sobre los peligros volcánicos, las mediciones de gases por parte de los guardaparques y la apertura de las áreas del Parque para la visitación, hayan tenido una serie de discusiones acertadas y meditadas para la mejora continua, la vigilancia volcánica y para que los trabajadores y la población cercana a la zona, y en general, aprendan sobre los cuidados de lo que es vivir con el vecino Volcán Poás a su lado. Pero, es necesaria la capacitación y la sensibilización

continúa para las personas visitantes a la zona, los guardaparques y los residentes del lugar, con charlas, señalización, simulacros de evacuación, donde se haga énfasis a las rutas de evacuación, qué hacer en caso de una erupción, cuidado de ganado y de los cultivos, seguridad y riesgo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al guardaparques Redy Conejo Aguilar y al Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) por el apoyo y la confianza para realizar las mediciones. Además, agradecen al equipo de muestreo y análisis del Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT-UNA), a saber: Danilo Umaña Castro, Brenda Rodríguez Artavia, Mario Cambronero Luna, Lisseth Sandoval Soto y Erick Ortíz Apuy.

REFERENCIAS

- Alvarado, X. (2006). Impacto en la salud ambiental por efecto de emisiones de dióxido de azufre del Volcán Arenal, en la Población de la Fortuna de San Carlos. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 15(29), 25-34.
- Baxter, P. (2000). Erupciones volcánicas. En E. Noji (Ed.), *Impacto de los Desastres en la Salud Pública*. OPS (Organización Panamericana de la Salud). Bogotá, Colombia, pp. 178-203.
- Campos Gómez, I. (2000). *Saneamiento Ambiental*. San José: Editorial Universidad Estatal a Distancia (UNED).
- Centro Nacional del Medio Ambiente de Chile. (2018). Estimación de los riesgos en la salud por SO₂. https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2015/proyectos/VI_Efectos_del_SO2_en_la_salud_de_las_personas.pdf
- Chaves-Solano, K.D., Sibaja-Brenes, J.P. & Pérez-López, E. (2021). Monitoreo de la concentración de SO₂ en el aire y características fisicoquímicas del agua de lluvia en el volcán Irazú. *Tecnología en Marcha*, 34(4), 145-161. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4>
- Elias, T., & Sutton, A.J. (2002). Volcanic air pollution in our backyard: gas advisory system helps alert people of Hawaii. *Geological Society of America Abstracts with Program*, 34(5), A-11.
- Enríquez Rodríguez, A. (2012). Impacto de las erupciones volcánicas sobre el sistema respiratorio. (Tesis de Maestría en Análisis y Gestión de Emergencias y Desastres). Universidad de Oviedo, España.
- Espinosa, J. (1994). Acidez y encalado de los suelos. En: F. Silva M. (ed.), *Fertilidad de Suelos: Diagnóstico y Control*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, Colombia.
- Galán, D., & Fernández, R. (2006). Implicación de los NOx en la Química Atmosférica. *M+A Revista Electrónica de Medioambiente*, 2, 90-103.
- Gallego, A., González, I., Sánchez, B., Fernández, P., Garcinuño, R., Bravo, J., Pradana, J., García, A., & Durand, J. (2012). *Contaminación atmosférica*. España: EUNED.
- Martínez Márquez, E. (2010). *Química II*. España: Cengage Learning. 2da. Ed. <https://bit.ly/2VwpCpP>
- Martínez, M., E. Fernández, J. Valdes, V. Barboza, R. van der Laat, E. Duarte, E. Malavassi, L. Sandoval, J. Barquero & T. Marino. (2000). Chemical evolution and volcanic activity of the Active Crater Lake of Poás volcano, Costa Rica, 1993-1997. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 97, 127-141.
- Mora-Barrantes, J.C., Sibaja-Brenes, J.P. & Borbón-Alpizar, H. (2021). Fuentes antropogénicas y naturales de contaminación atmosférica: estado del arte de su impacto en la calidad fisicoquímica del agua de lluvia y de niebla. *Tecnología en Marcha*, 34(1), 92-103. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4806>
- Narváez, O., & Cano, F. (2004). Cenizas Volcánicas: Contaminación Ambiental. *Rev. Inst. Nal. Enf. Resp. Mex*, 17(1), 232-238. <https://bit.ly/2o7y7dj>
- National Aeronautics and Space Administration, NASA. (2017). Global Sulfur Dioxide Monitoring Home Page. <https://so2.gsfc.nasa.gov/>
- Organización Panamericana de la Salud [OPS]. (2005). Guía de Preparativos de Salud Frente a Erupciones Volcánicas. Quito, Ecuador. <https://www.eird.org/isdr-biblio/PDF/Guia%20de%20preparativos%20de%20salud.pdf>
- Ortuño, C., Carmona, M., Granados, M., Jaimes, M., García, L., Argueta, L., Cruz, A., & Del Valle, E. (2002). *Informe anual de la calidad del aire y precipitación ácida*. México. <https://bit.ly/2uX2KEf>
- Poder Ejecutivo. (2005). *Reglamento para la Calidad del Agua Potable*. San José, Costa Rica. <https://bit.ly/2GdaFDK>

- Rouwet, D., Mora Amador, D., Sandri, L., Ramírez-Umaña, C., González, G., Pecoraino, G. & Capaccioni, B. (2019). 39 Years of Geochemical Monitoring of Laguna Caliente Crater Lake, Poás: Patterns from the Past as Keys for the Future. En Tassi, F., Vaselli, O., Mora Amador, R. (Eds), *Poás Volcano. Active Volcanoes of the World*. Springer, pp. 213–233. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02156-0_9
- Sibaja, J. (2014). Aplicación del modelo Aermod para determinar los niveles de calidad del aire para contaminantes atmosféricos. Tesis, Maestría en Gestión y Estudios Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. <https://library.co/document/y9gpxdq-aplicacion-modelo-aermod-determinar-niveles-calidad-contaminantes-atmosfericos.html>
- Sibaja Brenes, J.P., Bolaños Bolaños, K., Mora Barrantes, J.C., Umaña Castro, D., Cambroner Luna, M., Sandoval Soto, L., Ortiz Apuy, E. & Martínez Cruz, M. (2019). Medición y Modelaje de la concentración del Dióxido de Azufre en los alrededores del Volcán Poás durante el 2017, para la apertura del Parque Nacional. *Memorias del I CICEN 2019*, 1-8. <https://doi.org/10.15359/cicen.1.11>
- SINAC & ACCVC. (2001). *Plan de Manejo Parque Nacional Volcán Poás*. San José, Costa Rica: SINAC. <https://www.sinac.go.cr/ES/planmanejo/Plan%20Manejo%20ACC/Parque%20Nacional%20Volc%C3%A1n%20Po%C3%A1s.pdf>
- Torrellas Hidalgo, R. (2012). La exposición al aluminio y su relación con el ambiente y la salud. *Tecnogestión*, 9(1), 3-11. <https://bit.ly/2uYv7ly>
- Vásquez, T., Alfaro, R., Sibaja, J., Esquivel, G., & Valdés, J. (2012). Composición química del agua de lluvia y de niebla recolectada en la Reserva Biológica Monteverde. *Uniciencia*, 26(1), 51-63. <https://bit.ly/2G5YIiC>