

Mapas de dispersión de gases y de partículas: Un insumo que permite alertar a la población en caso de actividad de los volcanes Poás, Turrialba y Rincón de la Vieja

José Pablo Sibaja Brenes¹, Rosa Alfaro Solís², María Martínez Cruz³

¹ Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT-UNA), Escuela de Química, Universidad Nacional, Costa Rica – jose.sibaja.brenes@una.cr

² Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT-UNA), Escuela de Química, Universidad Nacional, Costa Rica

³ Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Costa Rica

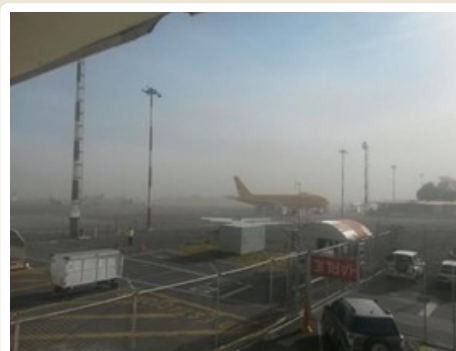
Palabras clave: Mapas de dispersión, dióxido de azufre, ceniza.

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, la actividad volcánica se distribuye en 3 conos principales: Poás, Turrialba y Rincón de la Vieja. Los volcanes Poás y Turrialba, los cuales están situados en Alajuela y Cartago, respectivamente, manifiestan su actividad a través de la emisión continua de gases y ceniza desde hace algunos años. Por su parte, el Rincón de la Vieja en el 2018 manifestó una actividad significativa a través de algunas erupciones y lahares notables (CNE, 2019; SINAC, 2019). Las emisiones gaseosas de los volcanes suelen tener una liberación de varias sustancias que pueden generar una afectación a la población (en función del tipo de sustancia, la concentración y el tiempo de exposición), donde se tienen: vapor de agua ($H_2O(g)$, 30 % a 90 %), dióxido de azufre ($SO_2(g)$, 5 % a 50 %), dióxido de carbono ($CO_2(g)$, 5 % a 40 %), sulfuro de hidrógeno ($H_2S(g)$, < 2 %), hidrógeno ($H_2(g)$, < 2 %), monóxido de carbono ($CO(g)$, < 2 %) y bajas concentraciones de otros gases como radón (Rn) y helio (He) (Baxter y Horwell, 2015). Además, se ha observado la emisión de especies fuertemente ácidas como el fluoruro de hidrógeno ($HF(g)$) y el cloruro de hidrógeno ($HCl(g)$), el ácido nítrico ($HNO_3(ac)$) y el ácido sulfúrico ($H_2SO_4(ac)$) (Williams-Jones y Rymer, 2015).

El volcán Turrialba inició su actividad en el 2010, con emanaciones de gases y ceniza aisladas. Para el 2015, se dio una serie de fuertes emanaciones por parte del nuevo cráter formado en la cima del volcán. El 18 de mayo del 2015 se dio una erupción fuerte, en donde se formó una columna de más de 3 km de gases y ceniza, la cual se dispersó hacia el Valle Central,

generando problemas de salud, de visibilidad y tránsito aéreo. En la Fig. 1 se muestra la reducción en la visibilidad presentada el 18 de mayo del 2015 en el aeropuerto Internacional Juan Santamaría (a 49 km del cráter del volcán Turrialba), en donde se dio el cierre repentino debido a la cantidad de ceniza que había suspendida en el aire y precipitada en la pista de aterrizaje. En consecuencia, se dio la movilización de aviones a otro aeropuerto del país. Dicha situación generó un movimiento de instituciones en pro de la salud y de la continuidad de los servicios en el país. Además, se realizó el desalojo de comunidades en Cartago y Heredia, debido a la caída de ceniza y a las complicaciones respiratorias que se presentaron.



► Fig. 1 – Vista de Aeropuerto Internacional Juan Santamaría el 18 de mayo del 2015 con la caída de ceniza sobre la pista y el cierre del lugar. (<https://www.diarioextra.com/Noticia/detalle/255152/aeropuerto-juan-santamar-a-estar-cerrado-hasta-ma-ana>)

Con lo sucedido, el país se mostró a nivel nacional e internacional sin un plan de manejo de emergencias volcánicas y sin una respuesta para alertar a la población y a las instituciones sobre la caída de ceniza

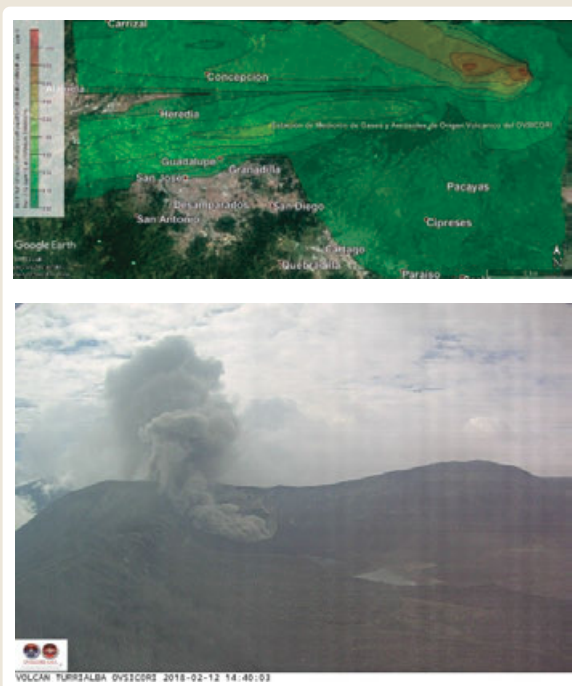
y la percepción de gases azufrados en el ambiente. A partir de esta situación, una serie de instituciones se unieron a nivel nacional para construir una estrategia de organización, tomando en consideración los actores que realizan mediciones, con el objetivo de contar con los parámetros necesarios para la toma de decisiones en el momento en que se dé una erupción volcánica por parte de alguno de los focos de emisión. En las reuniones participaron: La Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Dirección General de Aviación Civil (DGAC) y la Universidad Nacional (UNA). La UNA estuvo representada por el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI) y por el Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT-UNA), quienes presentaron la iniciativa de realizar el modelaje de las emisiones volcánicas por medio del programa computacional AERMOD, el cual ha sido aceptado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) para calcular el alcance de una emisión. Dicho software genera mapas de dispersión en la plataforma de Google Earth, para materiales sólidos y gases a 50 km a la redonda de la fuente de emisión, tomando en cuenta los parámetros de la erupción (flujo de gases y de partículas, temperatura de gases, diámetro y altura de la fuente emisora, velocidad de salida de los gases, entre otros), las características geográficas y los datos meteorológicos (temperatura, humedad relativa, lluvia, radiación solar, velocidad y dirección del viento, entre otros). Se utiliza una escala numérica y de colores (verde, amarillo y rojo) para explicar las zonas de menor o mayor afectación. La finalidad de utilizar este modelo matemático de pluma gaussiana es conocer el alcance de la dispersión y la magnitud de la concentración de los gases a nivel de la superficie, lo cual puede ser utilizado en la toma de decisiones. Los datos meteorológicos se extraen de las estaciones colocadas en los volcanes, por parte del IMN y de las estimaciones satelitales de vientos en las zonas donde no se dispone de información.

Con esto, se inició la elaboración de los modelos de dispersión con el programa AERMOD, para alertar a las instituciones tomadoras de decisiones sobre el área geográfica con posible caída de ceniza o afectación por

gases. Las instituciones que desde el inicio se vieron favorecidas con esta herramienta fueron: La Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), La Dirección General de Aviación Civil (DGAC), El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y La Oficina Nacional Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés). Además, se habilitó una página web del Observatorio Ambiental de la Universidad Nacional (<http://www.observatorioambiental.una.ac.cr/>) para la consulta pública de los mapas de dispersión de ceniza y de SO₂, además, se publican los mapas por Facebook para informar más rápidamente a la población. A raíz del uso de esta herramienta y mediante la implementación de la metodología propuesta, el país contó con un instrumento adicional para la toma de decisiones y la alerta temprana (al menos una hora antes que cayera ceniza en la zona de residencia o trabajo) a la población en caso de una erupción volcánica. Desde el 2015 hasta la fecha, se han realizado las estimaciones diarias de la dispersión de gases y de partículas en el aire entre las 5:00 am y las 6:00 am, y en el momento que se presente una erupción volcánica. Aunado a esto, se han realizado mapas de dispersión para los volcanes Turrialba, Poás y Rincón de la Vieja, y mapas de peligro y simulaciones de erupciones presentadas hace varios años en Costa Rica.

Volcán Turrialba

El volcán Turrialba ha sido el lugar con más mapas de estimaciones de gases y cenizas realizados por parte de la UNA. Es donde se ha tenido más comparaciones con respecto a las mediciones in situ para el ajuste del software. Es por lo anterior, que se localizaron zonas en donde las concentraciones de gases y de ceniza podían afectar a la población (Ortiz-Apuy et al., 2022). Tales lugares fueron: las fincas al norte y al noreste del volcán Irazú, Coronado, Ipis, Guadalupe en San José, y San Isidro, San Rafael, Santo Domingo en Heredia (Fig. 2). Con el modelo de dispersión de gases y de ceniza AERMOD, se logró visualizar los sitios que serían afectados, ocasionando problemas para la población y se colocó la Estación de Medición de Gases y Aerosoles de Origen Volcánico del OVSICORI, en donde se mide: dióxido de azufre y material particulado (PM₁, PM_{2.5} y PM₁₀) de forma continua desde el 2017.



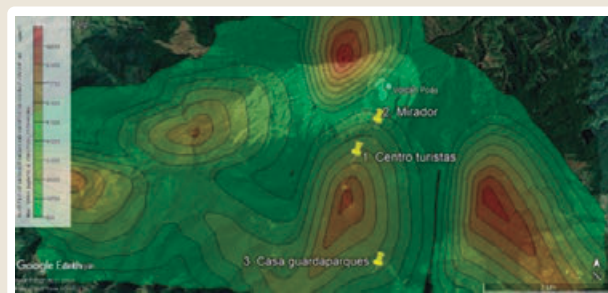
► Fig. 2 – Erupción del volcán Turrialba del 12 de febrero del 2018 a. Modelo de dispersión de cenizas calculado, b. fotografía del cráter del volcán Turrialba desde la cámara del OVSICORI.

Como parte de este proyecto, se han realizado estudios sobre el impacto que generan los gases y la ceniza respirada por las personas y la afluencia que tienen a los centros de salud. Según lo reportado por el sistema de salud de la zona, durante el 2017 se tuvo ingresos por Infecciones Respiratorias Agudas (IRAS) de hasta 7000 casos por mes (junio, 2017). Las IRAS incluye: infecciones agudas de las vías respiratorias superiores, enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores, influenza (gripe) y neumonía y enfermedades del pulmón debidas a agentes externos (Anchía, 2022).

Volcán Poás

Para el volcán Poás, en la Figura 3 se muestra un ejemplo de las emisiones de SO₂, donde se brinda la dispersión calculada de SO₂ con el software AERMOD, para el 11 de junio del 2017, con una emisión de SO₂ de 1017 toneladas por día (<https://SO2.gsfc.nasa.gov/>) y datos meteorológicos entre las 18 horas y las 24 horas. Para este día la afectación se estimó que fue en la totalidad del área del Parque Nacional Volcán Poás y los

alrededores. Este proceso de concentración de gases y de aerosoles se debió a una disminución de la altura de mezcla con una estabilidad atmosférica según Pasquill Gifford tipo E o F (ligeramente estable o estable), esto debido a que el evento ocurrió en horas de la noche. La disminución de la altura de mezcla hace una compresión de la atmósfera, concentrando los gases en un volumen menor de aire, cerca de la superficie y de paso, afectando a la población cercana. Durante este día, tal y como se muestra en la Fig. 3, alrededor del cráter principal, se generan zonas de alta concentración de SO₂ que no necesariamente es en el propio cráter. Esta situación hace referencia a que se generan domos o zonas con masas de aire ricas en gases volcánicos que no se desplazan a lo largo de un área, sino que se almacenan y se acumulan en la atmósfera, debido también a la baja velocidad del viento y a la variación en la dirección del viento.



► Fig. 3 – Erupción del volcán Turrialba del 12 de febrero del 2018 a. Modelo de dispersión de cenizas calculado, b. fotografía del cráter del volcán Turrialba desde la cámara del OVSICORI.

La dirección predominante del viento en la zona es hacia el oeste y hacia el suroeste del cráter, sin embargo, con condiciones específicas de humedad relativa, temperatura, radiación solar, velocidad y dirección del viento, hace que la pluma de emisión se dirija hacia otros lugares no habituales. Estas condiciones son presentadas con baja velocidad del viento y falta de radiación solar, por lo que las masas de aire se concentran en la zona y se acumulan por la inyección de emisiones de SO₂, y no se dispersan en la atmósfera; lo cual orientó a la Comisión Nacional de Emergencias (CNE) y el Ministerio de Salud a tomar las decisiones para mejorar la calidad de vida de los turistas, de los guardaparques y de la población que podría ser

afectada. Para este día, las personas que estaban en la Casa de Guardaparques presentaron vómito, dolor de cabeza y sangrado nasal. La Cruz Roja realizó la evacuación de la zona para evitar la pérdida de vidas. Según las mediciones realizadas por el LAQAT-UNA para ese día la concentración de SO₂ fue de 49360 µg/m³ para un periodo de 4 horas.

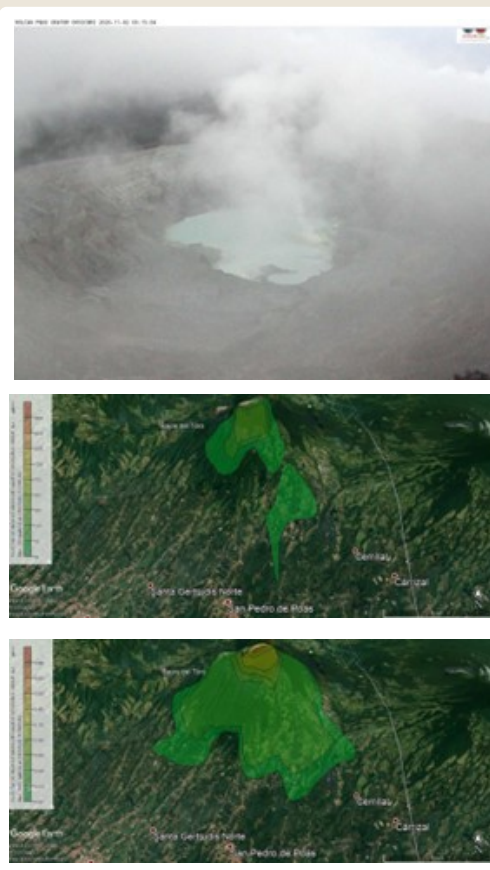
Por lo anterior, se realizaron charlas sobre los peligros volcánicos y el plan de manejo y evacuación del parque. Las presentaciones fueron dirigidas a los guardaparques, los guías turísticos y los pobladores de las zonas cercanas (Fig. 4). Con esta actividad que tomó alrededor de 5 días, con más de 300 participantes, se tuvo una retroalimentación de parte de las personas que están día a día en los alrededores del volcán. Además, se presentaron los mapas de dispersión de gases y ceniza, y a los guardaparques se les entrenó sobre el uso de equipos portátiles de medición de SO₂ y H₂S, para que fueran utilizados en los lugares de visitación del parque.



► Fig. 4 - Capacitación realizada a representantes de las comunidades cercanas al volcán Poás, agosto, 2018.

Para el 2 de octubre del 2020, se dio un evento de lluvia ácida extrema en el volcán Poás, con una emisión de SO₂ mostrada en la Fig. 5-a y 5-b. Este evento hizo que las prendas de los turistas se mancharan, al estar 20 min exponiéndose al aire libre. Además, se presentó una generación de espuma en las calles, debido a la reacción ácido-base entre la lluvia ácida y el asfalto. El nivel de acidez, según la escala de pH, medido para ese día fue de 0.8, lo cual refleja un nivel bastante ácido para un agua de lluvia, si se compara con el valor medido en otras ocasiones (entre 2.5 a 4.0). Con el modelo

AERMOD se efectuó un mapa de dispersión de SO₂ (Fig. 5-b) con base en las emisiones del gas azufrado y, en la Fig. 5-c, se presenta la precipitación húmeda (lluvia) debido al arrastre del SO₂. Se observa que la dispersión de la lluvia tuvo una afectación hacia el sur del parque, lo cual concuerda con los problemas y cambios presentados en los materiales y en la vegetación del lugar.



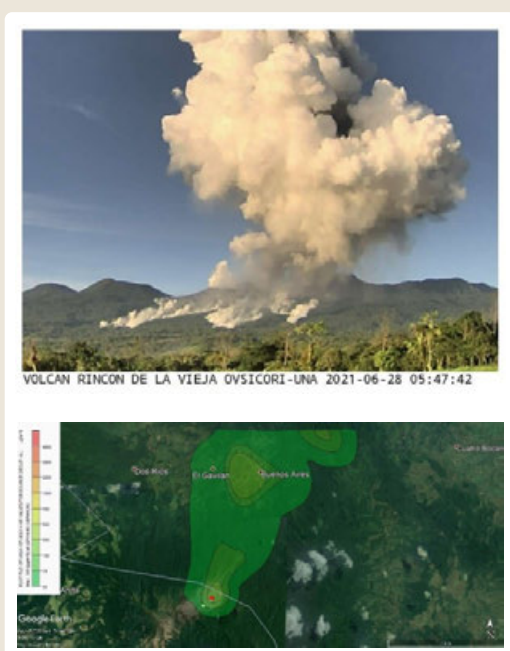
► Fig. 5 - Muestra de la emisión de gases y lluvia ácida en el volcán Poás, a. Fotografía del cráter por parte del OVSICORI, b. Mapa de dispersión de SO₂ en aire con el programa AERMOD, c. Mapa de precipitación húmeda (lluvia) de SO₂ con el programa AERMOD.

Volcán Rincón de la Vieja

El volcán Rincón de la Vieja inició la actividad volcánica en el siglo XXI, a partir del 2011. En el 2017 incrementó su actividad con emisiones de gases y cenizas, en donde los pobladores reportaron olor a azufre y caída de material particulado, aunado a los lahares que afectan a la zona norte del volcán, específicamente en Upala, Buenos Aires y El Gavilán. Debido a esto, se inició con los

mapas de dispersión con el programa AERMOD, en la zona.

El 28 de junio del 2021 (Fig. 6) se dio una erupción fuerte, en donde la pluma tuvo una altura superior a los 4 km de altura. Los gases se dispersaron hacia el norte y el noreste, hacia la zona de Upala y alrededores. A pesar de la erupción, las concentraciones de SO₂ fueron bajas y la percepción por parte de la población fue baja también. Si se dio una caída de ceniza en los alrededores del volcán.



► Fig. 6 – Erupción del volcán Rincón de la Vieja presentada el 28 de junio del 2021 a. Fotografía del volcán por parte del OVSICORI b. Mapa de dispersión de SO₂ para la erupción presentada.

Por lo anterior, en los alrededores de los volcanes Rincón de la Vieja, Poás e Irazú, se ha iniciado con el proyecto de

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a todos los guardaparques del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Dirección General de Aviación Civil (DGAC), El Observatorio Ambiental de la Universidad Nacional, Oficina Nacional Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), por el apoyo y la confianza para realizar las mediciones.

“Vigilantes Volcánicos”, el cual está conformado por personas de la comunidad, representantes de hoteles y de restaurantes, quienes pueden realizar mediciones de ceniza y de gases, con materiales sencillos de utilizar. En la Fig. 7 se muestra una de las capacitaciones que se efectuó durante el 2021, para personeros de la Cruz Roja y de la comunidad de Poás y alrededores. Las charlas toman temas relevantes para la población, como lo son los peligros volcánicos, además, de una sección



► Fig. 7 – Charla sobre la construcción de los cenizómetros con material reciclable, 2021.

práctica para la construcción de cenizómetros con material reciclable. Los cenizómetros son instrumentos contruidos para medir la cantidad de ceniza caída en un lugar y a la vez, recuperar la muestra para los análisis posteriores por parte del equipo científico.

A futuro se espera que los vigilantes volcánicos de cada región estén empoderados con la zona y con un historial de mediciones de ceniza y de SO₂. Además, de mediciones en ríos donde se podría dar una afectación por la actividad volcánica, con mediciones de pH y de concentración de sulfatos y cloruros.

Agradecer al equipo de muestreo y de análisis del Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT-UNA), a saber: Danilo Umaña Castro, Brenda Rodríguez Artavia, Mario Cambroner Luna, Liseth Sandoval Soto, además de todos los estudiantes tesistas que colaboraron para la generación de datos oportunos y útiles para la toma de decisiones, en pro de la salud humana y ambiental en los parques volcánicos de Costa Rica.

REFERENCIAS

- ▶ Anchía-Pastrán, D. (2022). Análisis de la calidad del aire en San Isidro de Coronado y los riesgos a la salud en relación con el material particulado y el dióxido de azufre emanado por el volcán Turrialba durante el período de 2016-2018. Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Gestión Ambiental, Universidad Nacional (en revisión).
- ▶ Baxter, P.; Horwell, C. (2015). Impacts of Eruptions on Human Health: The Encyclopedia of Volcanoes; Sigurdsson, H., Ed.; Academic Press: Amsterdam, 1035-1047. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00060-2>.
- ▶ Comisión Nacional de Emergencias (CNE). (2019). Se solicita a la población el no ingreso a zonas de restricción volcánica. Disponible en: <https://www.cne.go.cr/noticias/2019/04%2020190114%20CNE%20solicita%20a%20la%20poblacion%20el%20no%20ingreso%20a%20zonas%20de%20restriccion%20volcanica.aspx>
- ▶ Diario Extra (2015). Aeropuerto Juan Santamaría estará cerrado hasta mañana, Según Director de Aviación Civil. (<https://www.diarioextra.com/Noticia/detalle/255152/aeropuerto-juan-santamar-a-estar-cerrado-hasta-ma-ana>).
- ▶ Hansell, A.; Horwell, C. J.; Oppenheimer, C. (2006). The Health Hazards of Volcanoes and Geothermal Areas. *Occup Environ Med*, 63, 149-156. <https://doi.org/10.1136/oem.2005.022459>.
- ▶ Ortiz-Apuy, E.; Mora-Barrantes, J.C.; Sibaja-Brenes, J.P. (2022). Estudio preliminar con respecto a los efectos en la salud de trabajadores y su relación con la exposición a emisiones gaseosas volcánicas. Un caso de estudio en dos volcanes activos de Costa Rica. *Uniciencia* (en revisión).
- ▶ Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). (2019). Parque Nacional Volcán Turrialba. (<http://www.sinac.go.cr/ES/ac/accvc/pnvt/Paginas/default.aspx>).
- ▶ Williams-Jones, G.; Rymer, H. (2015). Hazards of Volcanic Gases: The Encyclopedia of Volcanoes; Sigurdsson, H., Ed.; Academic Press: Amsterdam, 985-992. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00057-2>.