

Riesgo químico por exposición laboral a SO₂ y H₂S en el Parque Nacional Volcán Poás

Chemical risk by occupational exposure to SO₂ and H₂S in the Poás Volcano National Park

José David Morales-Alpizar¹, jose.morales.alpizar@una.cr, Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0003-5439-3452>

José Pablo Sibaja-Brenes¹, jose.sibaja.brenes@una.cr, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-7056-2717>

José Carlos Mora-Barrantes¹, jose.mora.barrantes@una.cr, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-0409-5276>

María Martínez-Cruz², maria.martinez.cruz@una.cr, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-7656-2750>

Henry Borbón-Alpizar¹, henry.borbon.alpizar@una.cr, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0003-0869-4126>

Alexa Retana-Díaz¹, aretanad341@ulacit.ed.cr, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Rosa Alfaro-Solís¹, *rosa.alfaro.solis@una.cr, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0001-7413-4210>

Resumen

[Objetivo] Verificar el cumplimiento de los niveles de exposición a SO₂ y H₂S, de los guardaparques del parque, tomando como referencia la norma internacional OSHA. **[Metodología]** Se estudió la concentración del SO₂ desde setiembre 2018 hasta diciembre 2019 y para el H₂S de febrero 2019 hasta diciembre 2019, haciendo uso de equipos de detección portátiles MultiRae. Los puntos de muestreo se colocaron en la casa de guardaparques, la caseta de entrada, el centro de visitantes y el mirador. El nivel de riesgo químico se determinó considerando: la salud de los trabajadores, el tiempo de exposición, el equipo de seguridad, las capacitaciones y los valores de TWA y STEL obtenidos.

[Resultados] El valor más alto de la concentración de SO₂, 16,0 ppm, se registró en el centro de visitantes, y el de H₂S, 45 ppm, se presentó en la casa de guardaparques. La concentración promedio de los gases estuvo cercana al límite de detección para ambos gases, sugiriendo que, los gases en general no se dirigen hacia las zonas de visitación. Ningún puesto de medición superó los 2 ppm para el SO₂ en 8 horas (TWA). Sin embargo, en el centro de visitantes y en el mirador para visitantes, se superó los 5 ppm de SO₂ en 15 minutos (STEL), con concentraciones de 10,1 ppm y 7,4 ppm, respectivamente. **[Conclusiones]** Se obtuvieron niveles bajos de riesgo químico, para ambos gases, en los puntos muestreados, a excepción del punto del centro de visitantes, donde el nivel de riesgo fue medio.

Palabras claves: Sulfuro de hidrógeno, dióxido de azufre, cromatografía de gases, riesgo químico, exposición laboral.

Abstract

[Objective] Verify the levels of exposure to SO₂ and H₂S, of the employees of the park, according to the international OSHA standard reference. **[Methodology]** The SO₂ concentration was studied from September 2018 to December 2019 and for H₂S from February 2019 to December 2019, using

* Autor para correspondencia

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

² Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

MultiRae portable detection equipment. The data were collected in the park ranger house, the main entrance to the park, the visitor center and the viewpoint. The level of chemical risk was determined considering: worker's health, the exposure time, the safety equipment, the training, and the TWA and STEL data. **[Results]** The highest value of the SO₂ concentration was 16.0 ppm, recorded in the visitor center. In the case of H₂S, 45 ppm was obtained in the park ranger house. The average concentration of the gases was close to the detection limit for both gases, suggesting that the gases in general are not directed towards the visitor areas. No measurement station exceeded 2 ppm for SO₂ at 8 hours (TWA). However, in the visitor center and the visitor viewpoint, SO₂ exceeded 5 ppm in 15 minutes (STEL) with concentrations of 10.1 ppm and 7.4 ppm, respectively. **[Conclusions]** Low levels of chemical risk were obtained for both gases with the exception of the point of the visitor center, where the level of risk was medium.

Keywords: Sulfur dioxide, hydrogen sulfide, gas chromatography, chemical risk, occupational exposure.

Introducción

Los compuestos azufrados se encuentran presentes alrededor del planeta siendo parte importante de los ciclos biogeoquímicos. De estos compuestos los principales que muestran un riesgo importante a la salud humana son el ácido sulfúrico (H₂SO₄), el dióxido de azufre (SO₂) y el sulfuro de hidrógeno (H₂S) (Oppenheimer *et al.*, 2011). El SO₂ se encuentra presente en diferentes procesos industriales, principalmente en la obtención de H₂SO₄ y en la combustión de derivados del petróleo y del carbón (Yoshihiko y Tsutomu, 1966). La principal fuente de exposición es a través de la inhalación, aunque, también puede ser por contacto con la piel, causando irritación y problemas pulmonares en personas asmáticas (Williams-Jones y Rymer, 2015). El SO₂ es relativamente soluble en agua, por lo cual se da una mayor absorción del dióxido de azufre por respiración vía nasal que por la inhalación bucal. Al entrar al tracto respiratorio ocurre la formación de ácido sulfúrico, que posteriormente es eliminado por vía la urinaria como sulfato (Loomis, 1972; Chou *et al.*, 2016).

El H₂S, se encuentra en áreas con actividad geotérmica, volcánica y en procesos industriales. Las plantas de tratamiento de aguas residuales también son una fuente importante de compuestos azufrados, ya que se generan como subproductos de las condiciones anaeróbicas. La degradación del H₂S se da por medio del hígado, los riñones y el páncreas, es oxidado y eliminado como sulfato por vía urinaria. Los principales impactos a nivel de salud son en el sistema respiratorio, nervioso y cardiaco (Loomis, 1972; Giggenbach, 1987; CDC NIOSH, 2017).

La exposición al SO₂ aumenta el riesgo de paro y arritmia cardiaca; entre sus efectos crónicos se encuentran: las enfermedades cardíacas, la tos, el asma, una menor función de los pulmones, un mayor riesgo de infecciones y enfermedades respiratorias (Wang, 2012; Heaney *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2019). Por otro lado, la exposición laboral al H₂S ocasiona una afectación en el sistema nervioso, el cardiovascular y el respiratorio. En el caso de altas concentraciones origina neurotoxicidad, convulsiones, broncoespasmos y fallos respiratorios. Una exposición aguda, alta concentración de H₂S, deja de inmediato una secuela tóxica o letal, sin embargo, una exposición baja y a largo plazo deja dolencias (Malone *et al.*, 2017; U.S. Department of Health and Human Services, 2010; New Jersey Department of Health, 2001).

Estudios han evidenciado los efectos en la salud producto de la exposición laboral a los compuestos azufrados. En China se han realizado estudios de exposición al SO₂ en varias ciudades, concluyéndose que los niveles de este compuesto aumentan el riesgo cardiovascular y respiratorio principalmente en la población adulta mayor. Igualmente, existe una correlación con las enfermedades en los pies, las manos y la boca en niños durante la época de invierno (Chen *et al.*, 2012; Wei *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2018). En el parque hidrotermal en Santa Lucía, en el Mar Caribe, se detectaron concentraciones de SO₂ entre 650 µg/m³ y 1300 µg/m³ producto de la actividad geotérmica, esto puede generar una afectación a personas sensibles con problemas respiratorios. Se han evidenciado exposiciones al SO₂ por quema de carbón para obtención de energía, y por la quema de una mina de azufre, donde el riesgo químico ha generado problemas pulmonares en la población cercana a las fuentes de emisión (Björnham *et al.*, 2017; Joseph *et al.*, 2015; Amster *et al.*, 2014; Buonanno *et al.*, 2014).

En el Reino Unido se evaluó la exposición laboral al H₂S por medio de análisis de tiosulfato en sangre y en orina, obteniendo resultados positivos en personas inconscientes encontradas en sus zonas de trabajo (Jones, 2014). Otra investigación realizada en Nueva Zelanda, donde la actividad geotérmica es la principal fuente de energía, se estudiaron los problemas de salud pulmonares, alteraciones cognitivas y neuropatía periférica a la exposición crónica a los compuestos azufrados. El estudio evidenció niveles superiores al permitido de H₂S en el ambiente laboral, sin embargo, no se pudo demostrar alguna relación concluyente sobre efectos de la salud y H₂S (Pope *et al.*, 2017; Reed *et al.*, 2014; Bates *et al.*, 2015). Un estudio desarrollado en Brasil detectó un riesgo para la salud en lugares cercanos a una planta de tratamiento de aguas residuales en Curitiba, producto de las concentraciones de H₂S emitidos hacia los alrededores del sistema de tratamiento (Godoi *et al.*, 2018). Uno de los principales casos de intoxicación por inhalación del H₂S con efectos nocivos a la salud en zonas volcánicas se dio en Japón en 1988, específicamente en el monte Sakurajima, donde se presentaron concentraciones de hasta 209 ppb, afectando a la población cercana al volcán. Otro incidente sucedió en 1997 cuando cuatro turistas murieron en el volcán de Adatara en Japón, por inhalación de H₂S (Delmelle *et al.*, 2000).

Varias investigaciones se han enfocado en estudiar los efectos en la población por la exposición a las emisiones volcánicas. Una investigación en Portugal relaciona un aumento de cáncer, principalmente en la faringe, en la boca y en los genitales, debido a una exposición crónica a la actividad volcánica en el volcán Azores. De la misma forma, en varios parques nacionales volcánicos de Hawaii se han encontrado concentraciones mayores a los 500 ppb de SO₂ en el aire ambiente, ocasionando daños a la salud humana (Michaud *et al.*, 2005; Amaral y Rodrigues, 2007; Heggie, 2009). Estudios en el volcán Monte Etna (Italia), Mt St Helens (USA), Soufrière Hills (Isla Monserrat) sobre el riesgo a la salud a corto y largo plazo por la exposición a ceniza, han concluido que este contaminante causa la generación de problemas respiratorios, molestias dérmicas y oculares (Horwell y Baxter, 2006; Lombardo *et al.*, 2013; Hansell *et al.*, 2006; Cullen *et al.*, 2002).

En el caso particular de Costa Rica, se han ejecutado gestiones preliminares por parte de instituciones estatales y autónomas, las cuales han realizado esfuerzos para estudiar los posibles efectos en la salud de las personas como producto de la exposición a las erupciones de ceniza en los volcanes Turrialba y Poás (Alvarado *et al.*, 2020; Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, 2016; Alvarado y Martínez, 2017; Red Sismológica Nacional, 2014). Un ejemplo de afectación de personas por exposición a emisiones volcánicas es la reducción de

la cantidad de guardaparques en el Parque Nacional Volcán Poás; se pasó de 14 a 3 guardaparques, a causa de un evento eruptivo ocurrido en junio del 2017, debido a una concentración de hasta $47,0 \text{ mg/m}^3$ de SO_2 en la caseta de entrada al parque nacional. Durante la noche del mismo día del evento, tres guardaparques fueron retirados de sus puestos de trabajo, debido a la exposición de gases en el ambiente laboral que les produjo sangrado nasal, dolor de cabeza, irritación en el tracto respiratorio y síntomas de vómito. Como resultado de este incidente se prohibió la permanencia de personal en el parque durante la noche, hasta disponer de mediciones y conocimiento sobre los gases y la exposición laboral (Ortiz *et al.*, 2022; Sibaja Brenes *et al.*, 2019).

Hay que tomar en cuenta que Costa Rica es un país con alta actividad volcánica al estar en el cinturón de fuego del Pacífico, por lo que hay alta actividad volcánica (Red Sismológica Nacional, 2019; Korhonen *et al.*, 2004; Lynch *et al.*, 2018). Debido a la reciente actividad magmática en el Volcán Poás, el Laboratorio de Química de la Atmósfera de la Universidad Nacional (LAQAT-UNA), con el objetivo de diagnosticar cambios en la desgasificación fumarólica, ha realizado muestreos desde el 2017 de los compuestos: $\text{HF}_{(\text{ac})}$, $\text{HCl}_{(\text{ac})}$, $\text{SO}_{2(\text{g})}$, $\text{H}_2\text{S}_{(\text{g})}$ y $\text{HNO}_{3(\text{ac})}$. La iniciativa del LAQAT-UNA se realiza en conjunto con el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), institución que en sus políticas de gestión de capital humano destaca el compromiso de mantener un ambiente físico y mental adecuado para los funcionarios. La salud de las personas en el ambiente laboral en un parque volcánico puede verse afectada por situaciones internas del lugar de trabajo, como descuido o desconocimiento de las normas de trabajo y seguridad, o por situaciones externas como temblores o emisión de gases y aerosoles por la actividad volcánica. La salud puede afectarse mental o físicamente según la situación o la exposición que tenga el personal (Myers *et al.*, 2000).

Al estar expuestos a ciertas sustancias que pueden afectar su salud, se toman valores de concentración en aire recomendados, los cuales no deben ser sobrepasados en un lapso o un valor de concentración específica. Con respecto a lo anterior, se hace necesario una constante medición y evaluación de la exposición de gases azufrados en los guardaparques, mediante la medición continua de SO_2 y el H_2S , para determinar el riesgo químico y establecer el posible efecto de salud agudo o crónico causado por la exposición a sustancias químicas en ese tipo de ambiente laboral, para así, tomar acciones que permitan disminuir las potenciales afectaciones a la salud de las personas.

Las metodologías más utilizadas para determinar el riesgo químico son de las instituciones, tales como: del Ejecutivo de Salud y Seguridad (HSE) de Gran Bretaña y del Instituto Nacional de Investigación en Seguridad (INRS) de Francia. Las metodologías toman en cuenta diferentes en aspectos como la naturaleza de la sustancia, la toxicidad o la afectación a la salud, así como el tiempo de exposición, el equipo de protección personal u otros. El modelo británico proporciona un diagnóstico inicial, que comprende la etapa de estimación del riesgo (potencial) y desarrolla una metodología para determinar la medida de control adecuada a la operación que se está evaluando, y no propiamente para determinar el nivel de riesgo existente.

El método del INRS es el más utilizado debido a que realiza una estimación más real del riesgo, al tomar en cuenta más cantidad de variables. Este método es adaptado por el Instituto Nacional Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) (Aguilar *et al.*, 2015; INSHT, 2019).

Una regulación muy utilizada para evaluar y comparar los valores ambientales para trabajadores es de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) de Estados Unidos, entidad que ha definido los Límites de Exposición Permisible (PEL) dependiendo del tipo de sustancia, la toxicidad del compuesto y el tiempo de exposición. El TWA es el valor máximo permitido en una jornada laboral de 8 horas. También, un límite PEL es el STEL, siendo el valor máximo permitido en un tiempo corto de 15 minutos, este valor no se puede superar en ningún momento de la jornada laboral. Igualmente, existe el valor CEILING el cual no debe ser superado en ningún momento durante la jornada laboral (Giggenbach, 1987; Chou *et al.*, 2016; Huici-Montagud y Ferrer-Panzano, 1999).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la exposición laboral de compuestos azufrados en los trabajadores en el Parque Nacional Volcán Poás (PNVP), mediante la medición continua de $\text{SO}_{2(g)}$ y el $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ para la determinación del nivel de riesgo químico en las condiciones de trabajo del personal del parque.

Metodología

Puestos de muestreo

En el Parque Nacional Volcán Poás los puestos de muestreo se evaluaron según la cantidad de equipos disponibles y en relación con los lugares más frecuentados por las personas, sean guardaparques o visitantes. Las coordenadas geográficas de los puestos de recolección de datos fueron: puesto 1: Caseta de entrada $10^{\circ}10'52,88''\text{N}$ y $84^{\circ}14'16,27''\text{O}$, puesto 2: Centro para Visitantes $10^{\circ}11'8,25''\text{N}$ y $84^{\circ}14'10,96''\text{O}$, puesto 3: Mirador para Visitantes borde sur del cráter principal $10^{\circ}11'26,13''\text{N}$ y $84^{\circ}13'57,69''\text{O}$ y puesto 4: Casa guardaparques $10^{\circ}10'4,02''\text{N}$ y $84^{\circ}13'57,35''\text{O}$. Los puestos se detallan a continuación en la Figura 1.

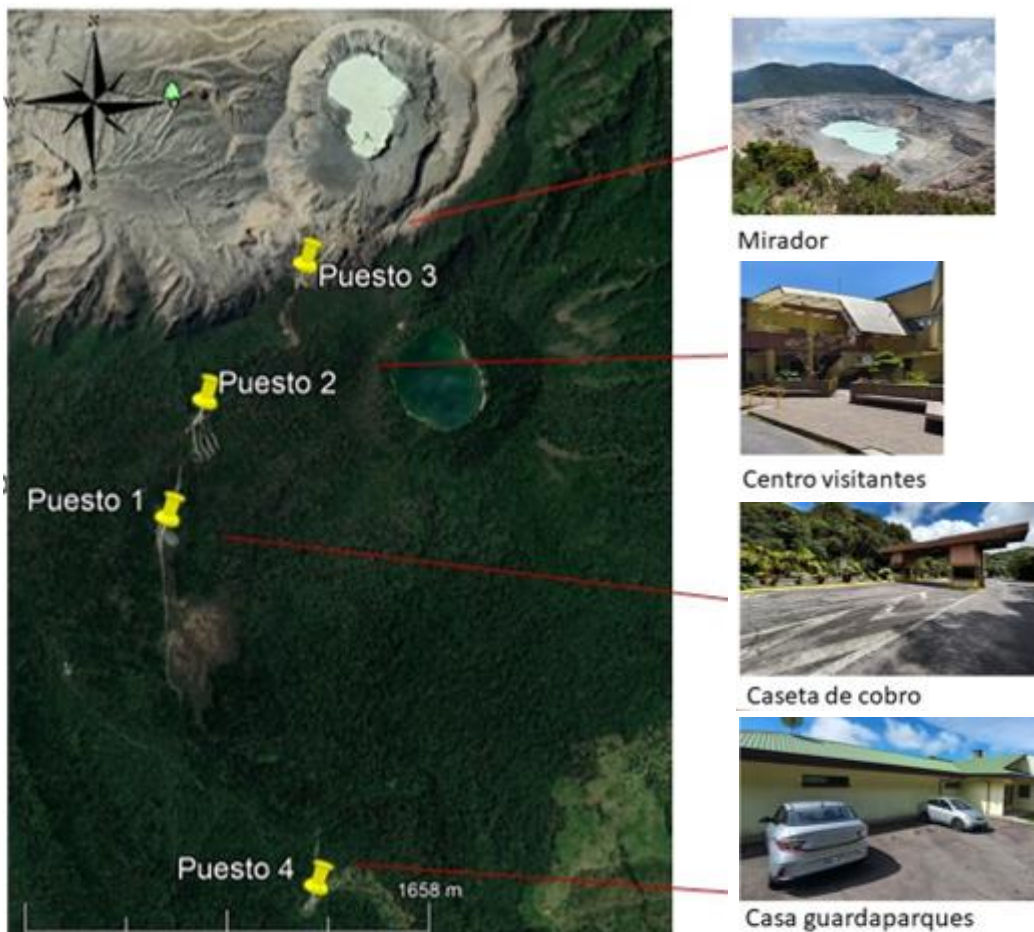


Figura 1. Puestos de medición de SO_2 y H_2S en el Parque Nacional Volcán Poás, Costa Rica.

Nota: Fuente propia de la investigación.

Recolección de datos

El registro de los valores de concentración de SO_2 y H_2S se hizo por medio de 4 detectores portátiles MultiRae lite de Honeywell (New Jersey, Estados Unidos) pertenecientes al PNVP, que utilizan sensores específicos calibrados para cada gas de interés. Los equipos toman muestras cada minuto las 24 horas del día en cada puesto de medición. Los datos se recolectaron a partir de setiembre del 2018 para el SO_2 , finalizando en diciembre del 2019, y para el H_2S se recogieron a partir de febrero del 2019 hasta finales de diciembre del 2019.

Igualmente se recolectaron los datos de concentración de SO_2 de la estación ExpoGAS marca Campbell, sistema de detección de gases que mide en tiempo real, tomando lecturas cada 3 segundos y reporta promedios de 5 minutos. Los datos son transferidos teleméricamente hasta el OVSICORI-UNA en Heredia. Los datos recogidos son entre el 17 de mayo del 2019 hasta 31 diciembre del 2019 en un periodo de tiempo de las 7:30 am hasta las 2:30 pm. La ubicación de la estación se encuentra en el puesto 3, midiendo solamente SO_2 .

Evaluación de riesgo químico asociado con la exposición laboral

Se elaboró una metodología para determinar el riesgo químico para SO₂ y H₂S utilizando las siguientes variables:

- Estado de salud de trabajadores
- Tiempo de exposición
- Equipos de seguridad
- Capacitación y formación de trabajadores
- Los TWA y STEL experimentales y teóricos

La generación de información para las variables de evaluación del riesgo químico (encuestas, entrevistas y visitas guiadas) se fundamentó principalmente en insumos disponibles y desarrollados por INSST, OSHA, EPA, NIOSH, COSHH e INRS. Los valores ambientales TWA y STEL experimentales se determinaron mediante los criterios de la organización de la OSHA, utilizando los valores criterio (STEL, TWA y valor “ceiling”) para el SO₂ y para el H₂S. El cálculo de los valores experimentales se realiza mediante un valor promedio de los datos en el tiempo determinado según el valor límite ambiental.

Se validó la metodología mediante un grupo focal compuesto por tres expertos en temas relacionados con contaminación atmosférica, exposición laboral y salud ocupacional. Se elaboró y se aplicó un cuestionario para obtener información relativa a:

- Condiciones, medidas y equipos de seguridad y protección personal.
- Condiciones infraestructurales de los trabajadores en los puestos.
- Procesos de formación y capacitación de trabajadores en temas relacionados con exposición a sustancias químicas.
- Gestión administrativa y operativa de la exposición laboral por parte de la gerencia del PNVP.

El Nivel de Riesgo de exposición a la Sustancia Química (NRSQ) para cada sustancia se determinó a partir de las siguientes variables.

Variable I: Peligro de la sustancia química (PSQ); El peligro de la sustancia se determinó con los valores STEL en mg/m³.

Variable II: Toxicidad de la Sustancia Química (TSQ); se tomó en consideración para su cálculo la dosis letal media de la sustancia en ppm.

Variable III: Frecuencia de Exposición a la Sustancia Química (FESQ); se determinó por medio del tiempo de exposición.

Variable IV: STEL Experimental de la Sustancia Química (SESQ); se calcula con base en el valor porcentual del STEL experimental con respecto al STEL teórico.

Variable V: TWA Experimental de una Sustancia Química (TESQ); El valor asignado corresponde a la relación porcentual del TWA experimental con respecto al TWA teórico.

Variable VI: Uso de Equipo de Protección Personal (EPP); para su cálculo se consideró el uso y la frecuencia de uso de los dispositivos de seguridad.

Variable VII: Efecto potencial sobre la salud de la sustancia química (EFSQ); para ello se tomó en consideración los efectos de la sustancia a corto y largo plazo.

Variable VIII: Capacitación en Gestión de Productos Químicos (CGPQ); se determinó tomando como base la frecuencia en la capacitación recibida por el personal en temas de peligros y riesgos químicos, efecto de las sustancias químicas sobre la salud y ambiente, límites de exposición laboral, primeros auxilios, entre otros.

La puntuación que se le asigna a cada una de las variables que influyen en la determinación del riesgo de exposición de una sustancia química se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.

Desglose del valor de cada una de las variables que influyen en el nivel de riesgo de exposición a sustancias químicas.

Variable	PSQ	TSQ	FESQ	SESQ	TESQ	EPP	EFSQ	CGPQ
Parámetro evaluado	STEL mg/m ³	CL50 ppm	Tiempo de exposición	% STEL experimental en relación con el valor teórico de STEL	% TWA experimental en relación con el valor teórico de TWA	Uso	Efectos en la salud	Frecuencia de capacitación
Valor de la variable	-	-	-	-	-	-	-	-
1	> 100	> 2000 0	< 15 min/día	< 20	< 20	Siempre *EC	No se conocen	1/mes
2	> 10 ≤ 100	> 2500 ≤ 2000 0	> 15 min/día ≤ 1 h/día	> 20 ≤ 50	> 20 ≤ 50	Regularmente *EC	Efectos reversibles	1/3meses
3	> 1 ≤ 10	> 500 ≤ 2500	> 1 h/día ≤ 4 h/día	> 50 ≤ 80	> 50 ≤ 80	Ocasionalmente *EC	Corrosivo	1/6meses
4	> 0.1 ≤ 1	> 100 ≤ 500	> 4 h/día ≤ 8 h/día	> 80 ≤ 100	> 80 ≤ 100	Ocasionalmente **EI	Tóxico	1/12 meses
5	≤ 0.1	> 50 ≤ 100	> 8 h/día	< 100	< 100	Nunca **EI	Muy Tóxico	Nunca

* EC, uso de equipo completo

** EI, uso de equipo incompleto

Nota: Fuente propia de la investigación.

El nivel de riesgo debido a la exposición a sustancias químicas se determinó mediante el uso de la siguiente fórmula: (Huici-Montagud y Ferrer-Panzano, 1999; 3M, 2018; Tarin *et al.*, 2006; Tuggle, 2000; NASA, 2022; Solans y Regidor, 2010; Beheshti *et al.*, 2015; UNA observatorio ambiental, 2022)

$$NRSQ = \sqrt{SESQ \times TESQ \times PSQ \times TSQ \times EFSQ \times EPP \times FESQ \times CGPQ} \text{ (Ecuación 1)}$$

El resultado de la sumatoria de las ocho variables permite determinar el tipo de riesgo a la exposición de la sustancia química; donde, la puntuación para un nivel de riesgo bajo de

entre 1 a 150, un nivel de riesgo medio de entre 151 a 300 y un nivel de riesgo alto mayor a 301

Análisis y resultados

Concentración de los gases en los puestos de muestreo

En la tabla 3 se observa un resumen de los datos generales para cada punto muestreado de las concentraciones de SO₂ y H₂S. El mayor porcentaje de datos positivos (mayor a 0,5 ppm) para SO₂ es de 1,7 % y se presentó en el puesto 3. El dato de mayor concentración para el SO₂ fue de 16,0 ppm, que se determinó en el puesto 2. Con respecto al H₂S, el dato más alto de concentración fue de 45 ppm y se dio en el puesto 4. La presencia de valores mayores al límite de detección del equipo hace que sea relevante el seguimiento del aumento de la concentración de los gases.

Tabla 3.

Resumen de los datos en los cuatro puntos de estudio de las concentraciones los gases SO₂ y H₂S en el volcán Poás.

	Concentración SO ₂ (ppm)				Concentración H ₂ S (ppm)			
	Puesto 1 Caseta cobro	Puesto 2 Centro visitantes	Puesto 3 Mirador para visitantes	Puesto 4 Casa guardaparques	Puesto 1 Caseta cobro	Puesto 2 Centro visitantes	Puesto 3 Mirador para visitantes	Puesto 4 Casa guardaparques
Cantidad total de datos recolectados	301171	637431	434953	535775	149467	435426	218962	535808
Mayor a 0,5 ppm	1380	2820	7162	1127	429	0	1	2
Mayor a 1 ppm	454	1179	3460	438	34	0	1	2
Mayor a 2 ppm	78	423	1195	111	0	0	1	2
Mayor a 3 ppm	14	259	540	42	0	0	1	2
Mayor a 4 ppm	2	157	262	25	0	0	1	2
Mayor a 5 ppm	0	99	122	17	0	0	1	2
Mayor a 10 ppm	0	27	8	0	0	0	0	1
Valor mayor	4,5	16,0	12,1	7,4	1,4	0,0	9,0	45,0
Promedio ppm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
% mayor a 0,5 ppm	0,5	0,4	1,7	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0
% mayor a 1 ppm	0,2	0,2	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
% mayor a 5 ppm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Nota: Fuente propia de la investigación.

Exposición laboral TWA y STEL

Para la exposición laboral se tomó en cuenta el TWA y el STEL para cada lugar de medición. En el puesto 1 (Figura 2), para el SO₂ se determinó que los datos de TWA no son mayores al límite superior establecido (2,0 ppm), por lo que no hay evidencia de exposición laboral tóxica para este gas en un tiempo de 8 horas. Para el caso del STEL, los datos no exceden el límite máximo (5,0 ppm), por lo que no hay evidencia de exposición laboral tóxica para el SO₂ en esta zona de trabajo para un periodo de 15 min durante el periodo de mediciones realizado (Oppenheimer *et al.*, 2011; Joseph *et al.*, 2015; Hancock, 2019). Para el caso del H₂S no se encuentra ningún dato mayor al límite de detección (0,1 ppm) para el TWA y el STEL.

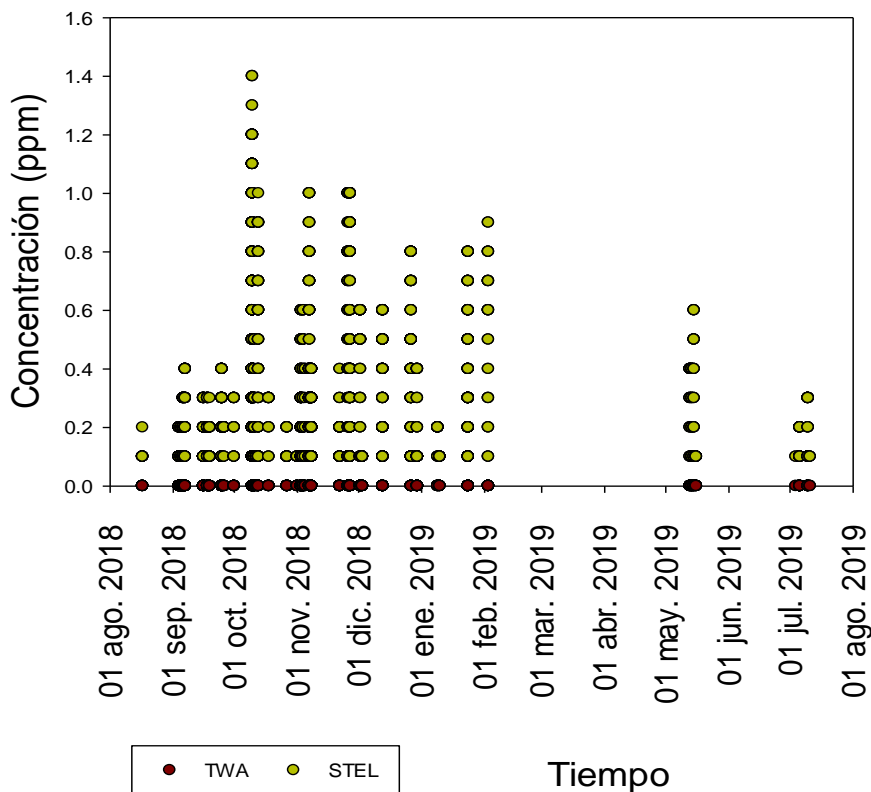


Figura 2. Resultados de TWA y STEL para el SO₂ del puesto 1 ubicado en la caseta de cobro de la entrada del Parque Nacional Volcán Poás.

Nota: Fuente propia de la investigación.

Para el puesto 2 (Figura 3) se observa para el SO₂ que el TWA presentó valores que no sobrepasaron el límite de 2,0 ppm. Sin embargo, para el STEL se obtuvieron 54 datos mayores al límite de 5 ppm. Estos valores implican que hay un posible peligro por exposición laboral debido a las altas concentraciones de SO₂ en el corto plazo, más no a largo plazo en esta zona de trabajo (Oppenheimer *et al.*, 2011; Yoshihiko y Tsutomu, 1966). Las

concentraciones de H₂S en el puesto 2 no superaron los valores de exposición laboral para el TWA o el STEL.

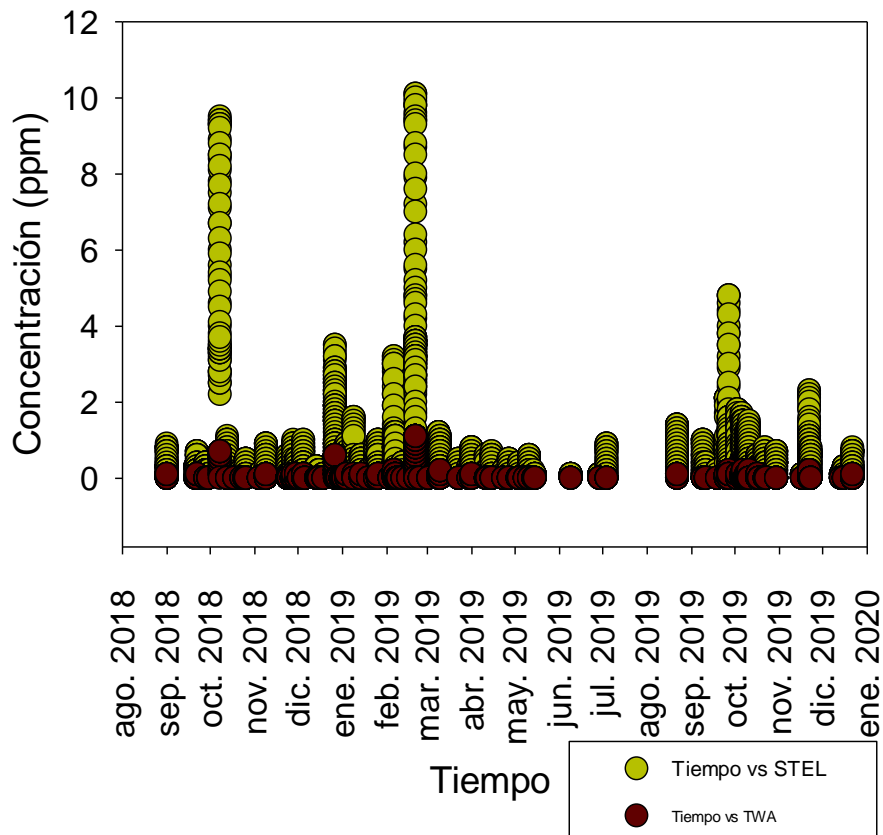


Figura 3. Resultados de TWA y STEL para el SO₂ del puesto 2 ubicado en el centro de visitantes del Parque Nacional Volcán Poás.

Nota: Fuente propia de la investigación.

En el puesto 3 (Figura 4) se determinó para TWA que las exposiciones al SO₂ son menores a 2,0 ppm durante un periodo de 8 horas. Para el STEL se determinó que 13 datos superaron los límites permitidos, eventos que se presentaron en diciembre del 2018 y octubre del 2019. Estos valores confirman que hay un posible riesgo químico y se pueden dar afectaciones a la salud si no se tienen las condiciones de seguridad para el personal y los visitantes, además, de las mediciones constantes del SO₂ para alertar a los visitantes y tomar las medidas de seguridad correspondientes. Para el H₂S no se reportaron concentraciones de TWA o STEL mayores a los valores límites.

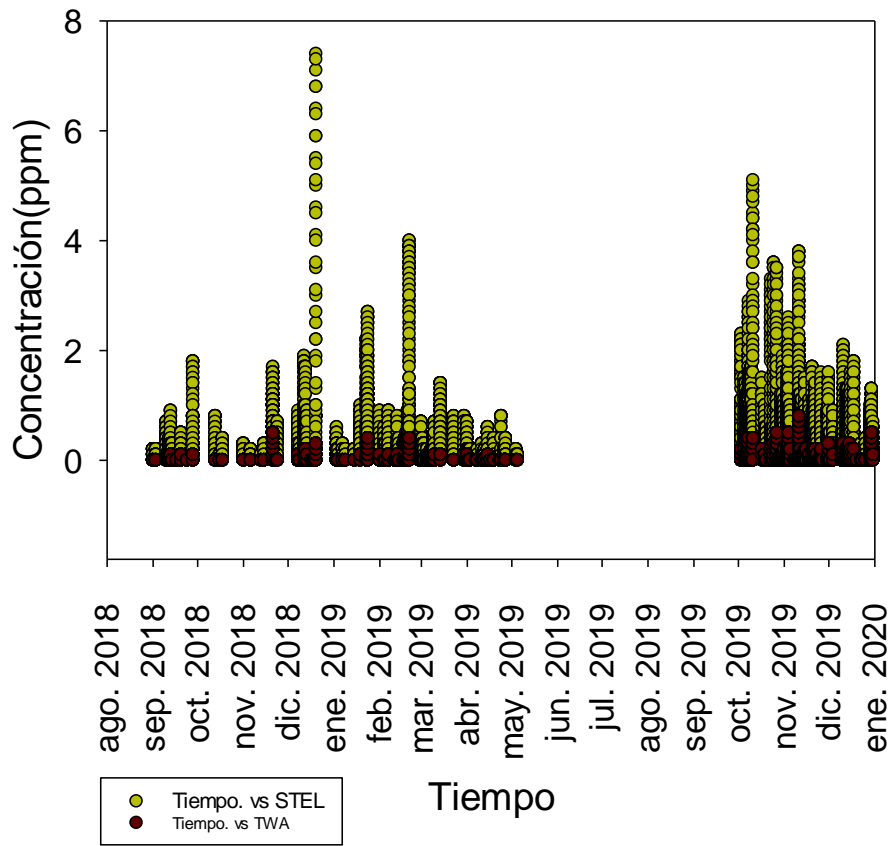


Figura 4. Resultados de TWA y STEL para el SO_2 en el puesto 3 ubicado en el mirador para visitantes del Parque Nacional Volcán Poás.

Nota: Fuente propia de la investigación.

La Figura 5 muestra los datos a nivel de exposición laboral en el puesto 4. Se observa que los datos de TWA calculados no son mayores al límite superior recomendado. En el caso de la exposición máxima permitida durante 15 minutos (STEL), los valores no superan los 5,0 ppm. Para el H_2S tampoco se reportaron concentraciones de TWA o STEL mayores a los valores límites ambientales (Yoshihiko y Tsutomu, 1966; Hancock, 2019).

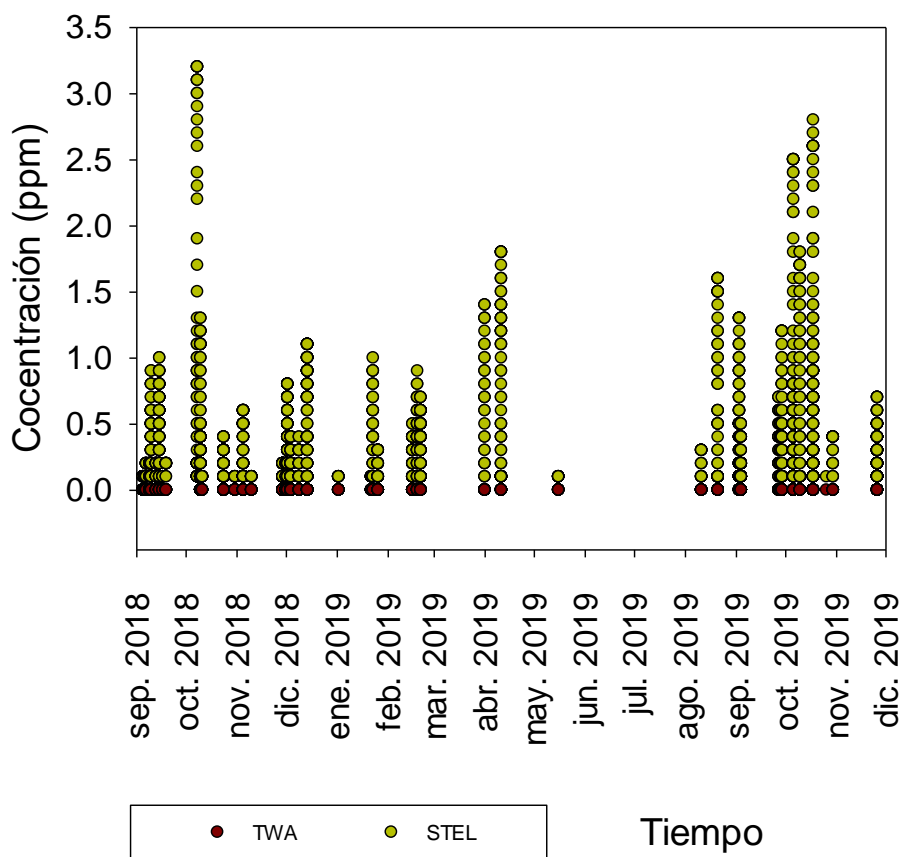


Figura 5. Resultados de TWA y STEL para el SO_2 en el puesto 4 ubicado en la casa de los guardaparques Parque Nacional Volcán Poás.

Nota: Fuente propia de la investigación.

Resultados del riesgo químico

El nivel de riesgo químico se determina mediante la ecuación 1, para el caso de las variables de peligrosidad, toxicidad y efectos de la salud de los compuestos, los valores son determinados según la sustancia química. Para el TWA experimental y el STEL experimental el valor se obtiene al comparar el dato de mayor concentración obtenido en cada puesto y el valor del TWA y STEL teórico. Para los variables de frecuencia, equipo de protección personal y capacitaciones los datos provienen de un cuestionario realizado por cada trabajador en el Parque Nacional Volcán Poás. Para el caso de la frecuencia, se tomó como referencia una jornada de 40 horas semanales (Solans y Regidor, 2010; Beheshti *et al.*, 2015).

Tabla 2.

Resultados riesgo químico según metodología para el SO_2 y H_2S en el Parque Nacional Volcán Poás.

	SO_2	H_2S
--	--------	--------

Puesto	Resultado	Nivel de riesgo	Resultado	Nivel de riesgo
Caseta de cobro	38	Bajo	49	Bajo
Centro de visitantes	164	Medio	55	Bajo
Mirador para visitantes	120	Bajo	49	Bajo
Caseta Guarda parques	134	Bajo	55	Bajo

Nota: Fuente propia de la investigación.

La evaluación del riesgo químico en el PNVP muestra como resultado para el SO₂ un riesgo bajo para todas las áreas exceptuando el puesto de centro de visitantes, siendo el resultado de un riesgo medio para este punto (Tabla 2), mientras que el riesgo químico para el H₂S es bajo en todos los puntos de muestreo para esta sustancia. A pesar de ello, no se descarta que se puedan presentar afectaciones de corto plazo para las personas que se encuentren en las zonas de estudio, ya que se han presentaron periodos donde se sobrepasa el STEL por varios minutos; las personas sensibles, podrían tener repercusiones agudas o graves por la exposición continua a sustancias en este ambiente.

Los estudios sobre riesgo en volcanes se encuentran enfocados en el riesgo físico debido a las posibles erupciones de los volcanes y sobre los efectos en la salud por cenizas y gases volcánicos (Michaud *et al.*, 2005; Amaral y Rodrigues, 2007; Heggie, 2009; Lombardo *et al.*, 2013). Sin embargo, no se observan estudios de riesgo químico específicos para estos los componentes. Desde un punto de vista de la salud ocupacional, es recomendable la vigilancia de las concentraciones a las que se encuentran expuestos los guardaparques, debido a que, el tener un nivel de riesgo bajo, no implica no tomar acciones para disminuir las potenciales afectaciones a la salud del personal expuesto.

La disminución del riesgo químico se puede llevar a cabo analizando los valores más altos en el puntaje obtenido, según la metodología propuesta, las correcciones que se puedan realizar para reducir el puntaje y así disminuir el riesgo químico asociado en el punto de muestreo son altamente recomendables.

Conclusiones

El valor de TWA experimental no fue sobrepasado en ningún punto, se considera un valor ambiental máximo permitido en un periodo de 8 horas o en una semana de 40 horas. Al ser el volcán Poás un volcán activo, la desgasificación es discontinua o continua o magnitud indefinida, además, las condiciones meteorológicas como el viento, la precipitación, la humedad relativa, la radiación solar y la temperatura influyen en la dispersión y por ende en la concentración de los gases en los puntos estudiados.

En cuanto al STEL, se observaron datos mayores al límite permitido de 5 ppm. Al ser el STEL un valor máximo permitido en un periodo de 15 minutos, un factor importante en el periodo de medición fue la intensidad de desgasificación del volcán, la cual está relacionada con la actividad volcánica. Al sobrepasar los valores máximos recomendados se observa un riesgo la salud de las personas expuestas a estas concentraciones. Para el STEL, los efectos

a la salud son agudos, inmediatos o de corto plazo, pero, si la exposición es constante en el tiempo, los efectos futuros podrían ser crónicos. Sin embargo, por la naturaleza del lugar los empleados van a estar expuestos a los gases SO₂ y H₂S.

De los cuatro puntos de análisis solo el centro de visitantes tiene un riesgo medio para el SO₂. Según la encuesta realizada a los empleados del PNVP, se registró que la mayoría de las personas no ha recibido capacitaciones y el uso de equipo de protección personal es deficiente, ya que no se utiliza completo, por lo que se recomienda elaborar un plan de acción que permita disminuir el riesgo químico, enfocado en capacitaciones a los empleados sobre salud, seguridad ocupacional y uso adecuado de equipo de protección personal.

Agradecimiento

Al personal del Parque Nacional Volcán Poás por permitir desarrollar este proyecto en sus instalaciones y por el acompañamiento en labores de muestreo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

Declaración de la contribución de los autores

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

El porcentaje total de contribución para la conceptualización, preparación y corrección de este artículo fue el siguiente: J.D.M.A. 20 %, J.P.S.B. 20 %, J.C.M.B. 20 %, M.M.C. 20 %, H.B.A. 5 %, A.R.D. 5 % y R.A.S. 10 %.

Declaración de disponibilidad de los datos

Los datos que respaldan los resultados de este estudio serán puestos a disposición por el autor correspondiente [J.P.S.B.], previa solicitud razonable.

Referencias

- 3M. *3M Personal Protective Equipment*. https://www.3m.com/3M/en_US/p/c/ppe/ (accessed May 18th, 2021).
- Aguilar, F., Bernaola, M., Gálvez, V., Rams, P., Sánchez, T., Sousa, M. E., Tanarro, C. y Tejedor, J. N. *Riesgo químico sistemática para la evaluación higiénica*, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT): Madrid, 2015.
- Alvarado, G., Esquivel, L., Sánchez, B., Alfaro, J. *Actualización del peligro volcánico del Poás, Costa Rica*. Unidad de Investigación y Análisis del Riesgo, Costa Rica, 2020.
- Alvarado, D. y Martínez, M. Gases y aerosoles volcánicos emitidos por el volcán Turrialba detectados en el aire atmosférico en Coronado, San José. Reporte No. 5 y 6: 2017. <http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/informes-de-gases-y-particulas/category/56-2017>

- Amaral, A. F. S. y Rodrigues, A. S. (2007). Chronic exposure to volcanic environments and chronic bronchitis incidence in the Azores, Portugal. *Environment Research*, 103(3), 419-423. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2006.06.016>.
- Amster, E. D., Haim, M., Dubnov, J. y Broday, D. M. (2014). Contribution of nitrogen oxide and sulfur dioxide exposure from power plant emissions on respiratory symptom and disease prevalence. *Environmental Pollution*, 186, 20–28. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.032>.
- Bates, M. N., Crane, J., Balmes, J. R. y Garrett, N. (2015). Investigation of hydrogen sulfide exposure and lung function, asthma and chronic obstructive pulmonary disease in a geothermal area of New Zealand. *PLoS One*, 10(3), 1–16. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122062>.
- Beheshti, M., Firoozi chahak, A., Alinaghi Langari, A. y Rostami, S. (2015). Semi-quantitative risk assessment of health exposure to hazardous chemical agents in a petrochemical plant. *Journal of Occupational Health and Epidemiology*, 4(1), 1–8. Doi: <https://doi.org/10.18869/acadpub.johe.4.1.1>.
- Björnham, O., Grahn, H., von Schoenberg, P., Liljedahl, B., Waleij, A. y Brännström, N. (2017). The 2016 Al-Mishraq sulphur plant fire: source and health risk area estimation. *Atmospheric Environment*, 169, 287-296. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.025>.
- Buonanno, G., Stabile, L. y Morawska, L. (2014). Personal exposure to ultrafine particles: The influence of time-activity patterns. *Science of the Total Environment*, 468-469, 903-907. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.016>.
- CDC. *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards*. <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0337.html> (accessed April 17th, 2019).
- Chen, R., Huang, W., Wong, C. M., Wang, Z., Quoc Thach, T., Chen, B. y Kan, H. (2012). Short-term exposure to sulfur dioxide and daily mortality in 17 Chinese cities: The China air pollution and health effects study (CAPES). *Environment Research*, 118, 101-106. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.07.003>.
- Chou, S., Ogden, J. M., Phol, H. R., Scinicariello, F., Ingerman, L., Barber, L. y Citra, M. *Toxicological profile for hydrogen sulfide and carbonyl sulfide*; 2016. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp114.pdf>.
- Cullen, R. T., Jones, A. D., Miller, B. G., Tran, L., Davis, J. M. G., Donaldson, K., Wilson, M., Stone, V. y Morgan, A. Toxicity of volcanic ash from Montserrat. *Research Report*, April: 2002. https://www.researchgate.net/publication/242635099_Toxicity_of_volcanic_ash_from_Montserrat
- Delmelle, P., Bernard, A., Kusakabe, M., Fischer, T. P. y Takano, B. (2000). Geochemistry of the magmatic-hydrothermal system of Kawah Ijen volcano, East Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97(1–4), 31-53. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00158-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00158-4).
- Giggenbach, W. F. (1987). Redox processes governing the chemistry of fumarolic gas discharges from White Island, New Zealand. *Applied Geochemistry*, 2(2), 143-161. Doi: [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(87\)90030-8](https://doi.org/10.1016/0883-2927(87)90030-8).
- Godoi, A. F. L., Grasel, A. M., Polezer, G., Brown, A., Potgieter-Vermaak, S., Scremim, D. C., Yamamoto, C. I. y Godoi, R. H. M. (2018). Human exposure to hydrogen sulphide

- concentrations near wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment*, 610-611, 583-590. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.209>.
- Hancock, J. T. (2019). Hydrogen sulfide and environmental stresses. *Environmental and Experimental Botany*, 161, 50-56. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.08.034>.
- Hansell, A. L., Horwell, C. J. y Oppenheimer, C. (2006). The health hazards of volcanoes and geothermal areas. *Occupational and Environmental Medicine*, 63(2), 149-156. Doi: <https://doi.org/10.1136/oem.2005.022459>.
- Heaney, C. D., Wing, S., Campbell, R. L., Caldwell, D., Hopkins, B., Richardson, D. y Yeatts, K. (2011). Relation between malodor, ambient hydrogen sulfide, and health in a community bordering a landfill. *Environmental Research*, 111(6), 847-852. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2011.05.021>.
- Heggie, T. W. (2009). Geotourism and volcanoes: Health hazards facing tourists at volcanic and geothermal destinations. *Travel Medicine and Infectious Disease*, 7(5), 257-261. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2009.06.002>.
- Horwell, C. J. y Baxter, P. J. (2006). The respiratory health hazards of volcanic ash: A review for volcanic risk mitigation. *Bulletin of Volcanology*, 69(1), 1-24. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0052-y>.
- Huici Montagud, A y Ferrer Panzano, R. NTP 525: *Criterios de establecimiento de valores límite de exposición profesional en la Unión Europea*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT): Madrid, 1999.
- INSHT. *Riesgos químicos*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. <https://www.insst.es/materias/riesgos/riesgos-quimicos> (accessed May 25th, 2019).
- Jones, K. (2014). Case studies of hydrogen sulphide occupational exposure incidents in the UK. *Toxicology Letters*, 231(3), 374-377. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2014.08.005>.
- Joseph, E. P., Beckles, D. M., Cox, L., Jackson, V. B. y Alexander, D. (2015). An evaluation of ambient sulphur dioxide concentrations from passive degassing of the sulphur springs, Saint Lucia geothermal system: Implications for human health. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 304, 38-48. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.07.036>.
- Korhonen, K., Liukkonen, T., Ahrens, W., Astrakianakis, G., Boffetta, P., Burdorf, A., Heederik, D., Kauppinen, T., Kogevinas, M., Osvoll, P., Rix, B. A., Saalo, A., Sunyer, J., Szadkowska-Stanczyk, I., Teschke, K., Westberg, H. y Widerkiewicz, K. (2019). Occupational exposure to chemical agents in the paper industry. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 77(7), 451-460. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00420-004-0530-5>.
- Li, S., Xu, Z., Xia, J., Qin, G. y Sang, N. (2019). Sulfur dioxide induces apoptosis via reactive oxygen species generation in rat cardiomyocytes. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(9), 8758-8767. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04319-7>.
- Lombardo, D., Ciancio, N., Campisi, R., Di Maria, A., Bivona, L., Poletti, V., Mistretta, A., Biggeri, A. y Di Maria, G. (2013). A retrospective study on acute health effects due to volcanic ash exposure during the eruption of Mount Etna (Sicily) in 2002. *Multidisciplinary Respiratory Medicine*, 8, 51. Doi: <https://doi.org/10.1186/2049-6958-8-51>.

- Loomis, T. P. (1972). Volcanic landforms and surface features: A photographic atlas and glossary [book review]. *American Journal of Science*, 272(8), 801. <https://doi.org/10.2475/ajs.272.8.801>.
- Lynch, H. N., Prueitt, R. L. y Goodman, J. E. (2018). Critique of the ACGIH 2016 derivation of toluene diisocyanate threshold limit values. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 97, 189-196. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2018.06.017>.
- Malone Rubright, S. L., Pearce, L. L. y Peterson, J. (2017). Environmental toxicology of hydrogen sulfide. *Nitric Oxide*, 71, 1-13. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.niox.2017.09.011>.
- Michaud, J. P., Krupitsky, D., Grove, J. S. y Anderson, B. S. (2005). Volcano related atmospheric toxicants in Hilo and Hawaii Volcanoes National Park: Implications for human health. *Neurotoxicology*, 26(4), 555-563. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2004.12.004>.
- Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. *Guía sobre ceniza volcánica: Posibles efectos a la salud y seguridad de las personas trabajadoras, medidas de prevención y protección*. Ministerio de Salud Costa Rica: San José, 2016.
- Myers, B., Brantley, S. R., Stauffer, P. y Ii, W. H. *USGS Fact Sheet 144-00*; Virginia, 2000.
- NASA. *Ozone Monitoring Instrument*. <https://so2.gsfc.nasa.gov/> (accessed April 06th, 2022).
- New Jersey Department of Health. *Right to Know PRO*. New Jersey, 2001. [https://doi.org/10.1016/s1074-9098\(01\)00269-6](https://doi.org/10.1016/s1074-9098(01)00269-6).
- OVSICORI. *Nivel de actividad volcánica*. <http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/vulcanologia/nivel-de-actividad-volcanica> (accessed November 1st, 2021).
- Oppenheimer, C., Scaillet, B. y Martin, R. S. (2011). Sulfur degassing from volcanoes: Source conditions, surveillance, plume chemistry and earth system impacts. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 73(1), 363-421. Doi: <https://doi.org/10.2138/rmg.2011.73.13>.
- Ortiz Apuy, E., Mora Barrantes, J., & Sibaja Brenes, J. (2022). Preliminary study on health effects and their relation to volcanic gas emissions exposure. A case study of two active volcanoes in Costa Rica. *Uniciencia*, 36(1), 1-20. <https://doi.org/10.15359/ru.36-1.49>.
- Pope, K., So, Y. T., Crane, J. y Bates, M. N. (2017). Ambient geothermal hydrogen sulfide exposure and peripheral neuropathy. *Neurotoxicology*, 60, 10-15. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2017.02.006>.
- Red Sismológica Nacional. *Boletín Sobre El Estado Actual de Los Volcanes - 16 de Abril, 2019*. San José, 2019. <https://rsn.ucr.ac.cr/actividad-volcanica/reportes-volcanicos/12384-boletin-sobre-el-estado-actual-de-los-volcanes-16-de-abril-2019> (accessed April 21st, 2019).
- Red Sismológica Nacional. *El Riesgo Derivado de La Amenaza Volcánica En Costa Rica*. 2014.
- Reed, B. R., Crane, J., Garrett, N., Woods, D. L. y Bates, M. N. (2014). Chronic ambient hydrogen sulfide exposure and cognitive function. *Neurotoxicology and Teratology*, 42, 68-76. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ntt.2014.02.002>.
- Sibaja Brenes, J. P., Bolaños Bolaños, K., Mora Barrantes, J. C., Umaña Castro, D., Cambronero Luna, M., Sandoval Soto, L., Ortiz Apuy, E. y 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*, 1–8. Doi: <https://doi.org/10.15359/cicen.1.11>.
- Solans, X. y Regidor, L. *Sustancias carcinogénicas: Criterios para su clasificación*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT): Madrid, 2010.
- Tarin, S., Huici, A. y Guardino, X. NTP 726: Clasificación y etiquetado de productos químicos: Sistema mundialmente armonizado (GHS). Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT): Madrid, 2006.
- Tuggle, R. M. (2000). The relationship between TLV-TWA compliance and TLV-STEL compliance. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 15(4), 380–386. Doi: <https://doi.org/10.1080/104732200301502>.
- U.S. Department of Health and Human Services. *Toxicological Profile for Sulfur Dioxide*; 2010. https://doi.org/10.1201/9781420061888_ch144.
- Universidad Nacional Costa Rica. *Observatorio ambiental*. <https://www.observatorioambiental.una.ac.cr/index.php/documentos> (accessed April 06th, 2022).
- Wang, L., Liu, C., Meng, X., Niu, Y., Lin, Z., Liu, Y., Liu, J., Qi, J., You, J., Tse, L. A., Chen, J., Zhou, M., Chen, R., Yin, P. y Kan, H. (2018). Associations between short-term exposure to ambient sulfur dioxide and increased cause-specific mortality in 272 Chinese cities. *Environment International*, 117, 33–39. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.019>.
- Wang, R. (2012). Physiological implications of hydrogen sulfide: A whiff exploration that blossomed. *Physiological Reviews*, 92(2), 791–896. Doi: <https://doi.org/10.1152/physrev.00017.2011>.
- Wei, Q., Wu, J., Zhang, Y., Cheng, Q., Bai, L., Duan, J., Gao, J., Xu, Z., Yi, W., Pan, R. y Su, H. (2019). Short-term exposure to sulfur dioxide and the risk of childhood hand, foot, and mouth disease during different seasons in Hefei, China. *Science of the Total Environment*, 658, 116–121. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.481>.
- Williams Jones, G. y Rymer, H. Hazards of volcanic gases. *The Encyclopedia of Volcanoes*, 2nd ed; 2015; pp. 985–992. Doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385938-9.00057-2>.
- Yoshihiko, M. y Tsutomu, S. (1966). The chemical equilibrium of the $2 \text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2 = 3 \text{S} + 2 \text{H}_2\text{O}$ reaction in Solfataras of the Nasudake Volcano. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 39(11), 2411–2414. Doi: <https://doi.org/10.1246/bcsj.39.2411>