



Xinia Alvarado Zeledón¹

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

Palabras clave: Contaminación atmosférica, gases volcánicos, salud ambiental, dióxido de azufre.

Resumen

Introducción: Las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) del volcán Arenal representan un riesgo para la salud ambiental en La Fortuna. Se realizó un análisis teórico de las diferentes variaciones en las concentraciones de SO₂ del volcán, con posible impacto a la salud de sus pobladores. Estudios teóricos sobre emisión y dispersión de gases volcánicos, así como su impacto potencial a la salud en el país, han sido realizados en 1999 por Morales & Liao (1).

Material y métodos: Basados en datos de máxima emisión de SO₂ del Arenal (1), se presumen escenarios de diferentes volúmenes de emisión de SO₂, a diferentes velocidades de salida, y aplicados a las diferentes clases de condiciones atmosféricas. Para determinar el mecanismo de dispersión del SO₂ y sus concentraciones en La Fortuna, se utilizó el modelo Gaussiano con cálculo de penacho y dispersión horizontal a nivel de piso.

Resultados: Emisiones de SO₂ con caudales inferiores a 190 ton/día no representan riesgo para la salud humana en La Fortuna. Emisiones superiores a 800 ton/día, con velocidades de salida superiores a 40 km/h provocan concentraciones de SO₂ cercanas a los 365 µg/m³, (máxima concentración para un período de 24 horas de exposición), para atmósferas tipo A y B. Emisiones de SO₂ mayores a 12.000 ton/día, en atmósferas tipos A y B, alcanzan concentraciones entre 1.417 µg/m³ y 4.869 µg/m³.

Discusión y conclusiones: Emisiones de SO₂ superiores a 800 ton/día, implican un riesgo a la salud de los pobladores de La Fortuna, incluyendo características fatales. Se recomienda implementar monitoreos constantes de las emisiones de SO₂,

para tomar medidas de protección en La Fortuna en caso de emisiones iguales o mayores a 800 ton/día.

Introducción

Costa Rica, por su historia geológica y su posición geotectónica, se ha desarrollado como un país prácticamente de origen volcánico, en el que a la fecha se le han reconocido más de 200 focos volcánicos, de los cuales 10 de ellos presentan alguna actividad que incluye desde aguas termales, solfataras y fumarolas, hasta erupciones de emisiones lávicas y piroclásticas de tipo peleano y estromboliano. Asociado a estas emisiones, muy comunes en este tipo de volcanes, también se reconocen las emisiones de varios tipos de gases directamente asociados con la actividad volcánica, tales como dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), entre otros, todos ellos definidos como poseedores de algún efecto nocivo y tóxico en el ambiente y la salud humana según las concentraciones, exposiciones y dosis particulares.

El volcán Arenal se encuentra ubicado al noroeste de Costa Rica, a unos 7 km al OSO de La Fortuna, provincia de Alajuela, cordillera volcánica de Tilarán (figura 1), siendo un estratovolcán de forma cónica, con una altura de aproximadamente 1633 m.s.n.m. Vulcanólogos nacionales y extranjeros (2) han determinado que este volcán inició su existencia y actividad hace unos 4000 años, reconociéndosele una muy violenta actividad alrededor del año 1500 A.C. y muy probablemente otra en 1525 (± 20) D.C. A partir de este evento no se

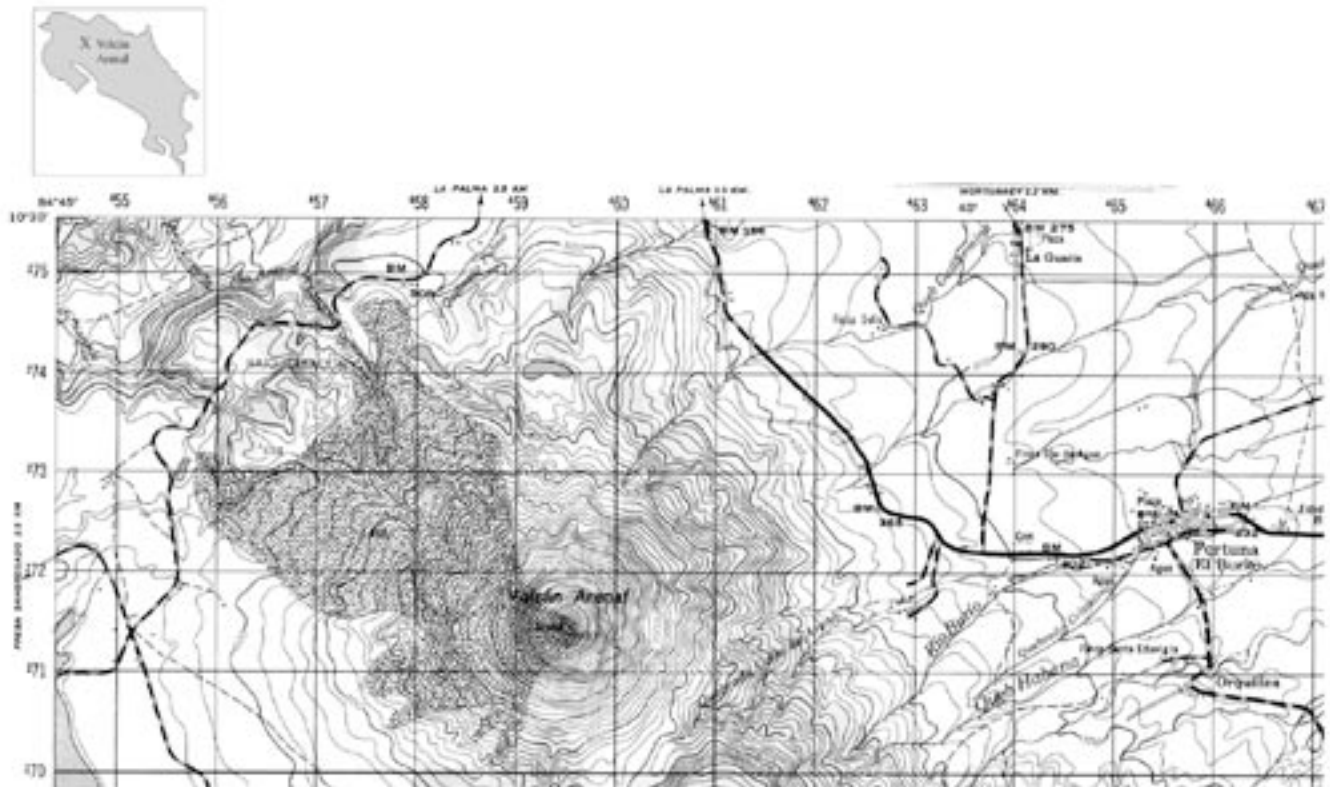
¹ Salud Ambiental, Tecnologías en Salud, Facultad de Medicina, Universidad de Costa Rica. xalvarad@cariari.ucr.ac.cr Tel. 383 - 3663.

identifica ni se reporta ningún otro tipo de actividad eruptiva, sino hasta 1968, cuando inicia una violenta erupción en su flanco oeste. Después de esta actividad han sucedido otros eventos en los años 1973, 1975, 1984, 1985, 1989, 1993, 1995, 1996, 1998, 1999, 2003, 2004, 2005, 2006.

Es indudable que en cada actividad eruptiva,

variables cantidades de gases volcánicos han sido emanadas a la atmósfera. Los efectos de estos gases, en especial los de SO_2 , pueden ser detectados en los alrededores inmediatos de las zonas de emisión del volcán, ya que su reacción con el agua de la atmósfera genera el efecto de lluvia ácida, que destruye la vida vegetal y afecta otros ecosistemas fácilmente observables a simple vista.

FIGURA 1



Hasta ahora, la mayoría de las investigaciones realizadas con respecto a las posibles amenazas naturales a las que esta parte del país y sus poblaciones están expuestas, se han concentrado en los eventos volcánicos de características físicas, tales como posible exposición a los flujos lávicos, caídas de cenizas y otros piroclastos (3), efectos de lluvias ácidas (4, 5), sismicidad, etc. Sin embargo muy poco se ha investigado sobre la emisión de gases tóxicos y sus posibles daños a la salud ambiental (5, 6). Hasta la fecha no existe ningún estudio sobre los efectos de este contaminante en los poblados vecinos del volcán Arenal, especialmente en el poblado de La Fortuna y sus habitantes.

El dióxido de azufre (SO_2) es un gas incoloro, no inflamable y de olor sofocante. Condensa (líquido

incoloro) a -10°C y solidifica a -72°C . Es soluble en agua (85% a 25°C) y en solventes orgánicos. Durante su proceso de oxidación en la atmósfera, este gas forma sulfatos, es decir, sales que pueden ser transportadas en el material particulado respirable (PM10) y que en presencia de humedad forman ácidos. Luego, estos ácidos son una parte importante del material particulado secundario o fino (PM2,5).

Tanto la exposición a sulfatos como a los ácidos derivados del SO_2 , es de extremo riesgo para la salud debido a que éstos ingresan directamente al sistema circulatorio humano a través de las vías respiratorias.

Se ha encontrado que los óxidos de azufre perjudican el sistema respiratorio, especialmente

de las personas que sufren de asma y bronquitis crónica. El SO_2 es un importante broncoconstrictor desde los primeros minutos de exposición y su efecto aumenta con la actividad física, con la hiperventilación, al respirar aire frío y seco y en personas con hiperreactividad bronquial.

Los efectos a la salud humana por exposición al dióxido de azufre dependen, en términos generales, de la concentración de dicho gas y al tiempo de exposición al mismo. Así, los efectos que la Organización Mundial de la Salud (OMS) han determinado sobre la exposición diaria (24 horas) a diferentes concentraciones (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$), se indican en la tabla 1. Los principales efectos suelen ser sobre el sistema respiratorio en general; sin embargo, también se indica la posibilidad de otros trastornos tales como: opacamiento de la córnea (queratitis), inflamación de las vías respiratorias, irritación ocular por formación de ácido sulfuroso sobre las mucosas húmedas, alteraciones psíquicas, edemas pulmonares, paros cardíacos y colapsos circulatorios, entre otros.

Algunos organismos internacionales que se ocupan del estudio y control de contaminantes en relación con la salud humana y ambiental, han señalado límites de exposición permisibles al SO_2 en función del tiempo, en los que se considera que no debería de haber riesgo o efectos a la salud. Así, por ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA), ha considerado un máximo promedio anual de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de exposición, y un promedio máximo diario (24 horas) de $365 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La American Industrial Hygiene Association (AIHA, EEUU), establece los siguientes límites:

- **$0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$** : Concentración a la que pueden exponerse casi todos los individuos por una hora y sóloamente experimentar efectos leves transitorios, o un olor molesto.
- **$8 \mu\text{g}/\text{m}^3$** : Concentración a la que pueden exponerse la mayoría de las personas por una hora, sin ningún daño o efecto irreversible en su salud, sin disminuir su capacidad de ponerse a salvo.
- **$340 \mu\text{g}/\text{m}^3$** : Concentración a la que puede exponerse casi toda la población por una hora sin ningún efecto o daño que amenace su salud.

En algunas poblaciones con alta sensibilidad al SO_2 , se han documentado otros efectos agudos y

crónicos. Así, por ejemplo, la exposición a $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por un período de 6-8 horas, trae como consecuencia una disminución reversible de la función pulmonar. La exposición a $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por un período de 10-30 minutos produce estrechez de los bronquios. La exposición a $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por 20 minutos produce enrojecimiento e irritación de la nariz y garganta. Al alcanzarse los $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la irritación se considera molesta al sistema respiratorio. Al alcanzarse los $1330 \mu\text{g}/\text{m}^3$ puede darse la asfixia por constricción pulmonar. En este nivel de concentración de dióxido de azufre, se presenta una seria obstrucción de las vías respiratorias, hipoxemia, edema pulmonar, y puede sobrevenir la muerte en pocos minutos. Los efectos en los ojos se empiezan a notar como irritación leve a los $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A los $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ la irritación de ojos es de moderada a severa, y entre los 24 - $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se inicia el lagrimeo con dolor irritante. Al alcanzarse los $133 \mu\text{g}/\text{m}^3$ puede ocurrir la quemadura temporal de la córnea.

En cuanto a los efectos crónicos, se conoce que la exposición a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ puede causar daño permanente al pulmón, debido a la repetida broncoconstricción, lo que conlleva a la disminución de la función pulmonar. De ocurrir edema, éste puede suscitarse hasta 48 horas después de la exposición.

Existen igualmente aspectos que no han sido estudiados a fondo, como es el caso de la sinergia entre el dióxido de azufre y partículas, cuyos efectos en el caso de ceniza volcánica y dióxido de azufre son prácticamente desconocidos, ya que estos estudios se han realizado únicamente para ambientes de contaminación urbana. La OPS/OMS han analizado diversos estudios que indican la existencia de efectos sinérgicos del SO_2 y partículas. Para exposiciones breves y combinadas, los niveles más bajos (promedio de 24 horas) en los que se observan cambios en la morbilidad es de $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0,07 \text{ ppm}$) de SO_2 y de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las partículas. Estos serían niveles a los que los grupos de población más sensibles (niños, ancianos, personas con problemas pulmonares o cardíacos preexistentes) presentarían afectación. Se informó igualmente de un aumento en la mortalidad al llegarse a $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0,18 \text{ ppm}$) de SO_2 y $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de partículas. Esta información debe utilizarse con cautela, pues la mayoría de los estudios se refieren a partículas provenientes de fuentes de combustión industriales y automotores, las que pueden diferir de las emitidas por los volcanes, que generalmente son silícicas, pero que también poseen dimensiones comparables a las partículas respirables (1).

Tabla 1
Efectos a la salud humana por exposición a concentraciones de SO₂

Concentración en 24 horas (µg/m³)	Efecto observado
400 – 900	Posible incremento de los trastornos respiratorios (tos, irritación de la garganta y silbidos en el pecho) en personas con asma.
500 – 1700	Incremento de los trastornos respiratorios en personas con asma y posible agravamiento de las personas con enfermedades pulmonares y cardíacas.
1700 – 2300	Incremento significativo de los trastornos respiratorios en personas con asma y agravamiento de las personas con enfermedades pulmonares y cardíacas.
2300 – 2900	Trastornos respiratorios severos en personas con asma y riesgo serio de agravamiento de las personas con enfermedades pulmonares y cardíacas.
> 2900	Cambios en la función pulmonar y trastornos respiratorios en individuos sanos.

Materiales y métodos

Para el análisis de la amenaza en la salud ambiental de la población de La Fortuna por efectos de la concentración de SO₂ del volcán Arenal, se presentan tres escenarios de erupción a diferentes caudales y velocidades de emisión de SO₂, los que, según los pocos registros que al respecto existen, se encuentran dentro de la realidad de su actividad volcánica.

El modelo de cálculo utilizado es el denominado Modelo Gaussiano, que calcula el comportamiento de los penachos de emisión y su concentración de contaminantes. Para su desarrollo se requiere conocer aspectos tales como la altura efectiva del aparato emisor, el caudal de emisión y velocidad de salida del gas a analizar, la velocidad del viento en el punto de emisión (cráter), el diámetro de la fuente de emisión, la temperatura de los gases a su salida, la temperatura ambiental, la presión atmosférica y la gradiente de temperatura en el sitio de estudio, la distancia entre el punto emisor y el sitio donde se quiere evaluar la concentración del gas, y muy especialmente, el tipo de atmósfera en la que el evento se efectúa.

La relación matemática del modelo Gaussiano a utilizar, cuando se requiere la máxima concentración del contaminante a una distancia específica, medida a nivel del suelo y emitida por un aparato

emisor de altura determinada con formación de penacho de salida, es:

$$C(x, \theta, \theta) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \exp \left[-1/2 \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right]$$

Donde:

- C = Concentración del contaminante a una distancia x del punto de emisión (µg/m₃)
- Q = Caudal de salida del gas (kg/s)
- U = Velocidad del viento a boca de emisión (m/s)
- H = Altura efectiva del aparato volcánico (Hs) más la altura del penacho (ΔH)
- σ_y; σ_z = Coeficientes de dispersión horizontal

La altura efectiva del penacho de emisión a partir del cráter se calcula con la relación:

$$\Delta H = 1,6 F^{1/3} x_f^{2/3} \div U$$

Donde:

- ΔH = Altura de penacho de emisión de contaminantes
- F = Parámetro del flujo por flotación
- X_f = 13,53 (constante)
- U = Velocidad del viento a boca de emisión

El parámetro del flujo por flotación (F), se obtiene por medio de la relación:



$$F = gV_s r^2 \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right)$$

Donde:

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$

V_s = Velocidad de salida de los gases (m/s)

r = radio del foco emisor (m)

T_s = Temperatura de salida de los gases ($^{\circ}\text{K}$)

T_a = Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{K}$)

Mediciones de la actividad volcánica entre 1975-1985 han estimado su emisión de gases en un rango de 50-200 ton/día, a una temperatura de aproximadamente 940°C . Los gases contaminantes representan un 6% de las emisiones gaseosas, siendo el restante 94% vapor de agua. Este 6% de material tóxico se compone de $\text{CO}_2 = 50\%$; $\text{SO}_2 = 37\%$; $\text{H}_2 = 8\%$; $\text{CO} = 0,27\%$; $\text{H}_2\text{S} = 900 \text{ ppm}$; $\text{CH}_4 = 120 \text{ ppm}$ (7).

Por analogía con otros volcanes de características muy similares, se puede colegir que las erupciones del volcán Arenal fácilmente podrían alcanzar una fase activa de hasta 12000 ton/día (1).

Los diferentes escenarios a ser utilizados en este trabajo para calcular las concentraciones de SO_2 a las que estarían sometidos los pobladores de La Fortuna son:

a) Parámetros fijos:

- Altura efectiva del volcán Arenal con respecto al poblado de La Fortuna = 1.383 m
- Temperatura de salida de los gases = 940°C (1.213°K)
- Temperatura ambiente = 23°C (296°K)
- Velocidad del viento a boca de emisión =

12 km/h (3,3 m/s)

- Diámetro de salida efectiva de gases = 250 m
- Presión atmosférica = 100 kPa
- Gradiente de temperatura ($\Delta T/\Delta Z$) = 0,005
- Distancia entre el foco emisor y el poblado de La Fortuna = 6 km (6.000 m)

b) Parámetros variables:

b.1) Caudales de emisión de SO_2

- $Q_1 = 190 \text{ ton/día}$ (2,2 kg/s)
- $Q_2 = 800 \text{ ton/día}$ (9,26 kg/día)
- $Q_3 = 12000 \text{ ton/día}$ (138,9 kg/día)

b.2) Velocidad de salida de los gases de SO_2

- $V_{s1} = 40 \text{ km/h}$ (11,11 m/s)
- $V_{s2} = 100 \text{ km/h}$ (27,7 m/s)
- $V_{s3} = 120 \text{ km/h}$ (33,33 m/s)

Los cálculos de concentraciones de SO_2 en el poblado de La Fortuna, a 6 km del foco emisor, a las diferentes condiciones de caudales de emisión y velocidad de salida del gas, depende también del tipo de atmósfera que exista en el momento del evento.

Los tipos de atmósfera o clases de estabildades atmosféricas han sido descritas y establecidas por Pasquill-Gifford, quienes definieron 6 clases de estabildades, denominadas popularmente como las "clases de Pasquill", y son: A = alta inestabilidad; B = inestable; C = ligeramente inestable; D = neutra; E = ligeramente estable; F = estable. Básicamente, su caracterización se basa en el tipo de radiación solar (o nubosidad por las noches) y en la velocidad del viento medida a una altura de 10 m. La tabla 2 muestra la clasificación de las clases de Pasquill, según lo indicado.

Tabla 2
Clasificación de la atmósfera, según las clases de Pasquill

Velocidad del viento U_{10} (m/s)	Radiación solar			Horas de noche	
	Fuerte	Moderado	Débil	Fracción cubierta de nubes	
				$\geq 1/2$	$\leq 1/2$
< 2	A	A - B	B	E	F
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Resultados

Así, los resultados obtenidos de concentración de SO₂ en el poblado de La Fortuna, luego de cada una de las condiciones de emisión indicadas y según las diferentes clases de atmósferas mencionadas, se indican a continuación:

1.- La tabla 3 muestra los resultados de concentración de SO₂ en el poblado de La Fortuna, a diferentes clases de estabilidad atmosférica, para una emisión de 190 ton/día (2,2 kg/s) de SO₂, con una velocidad de salida de 40 km/h (11,11 m/s).

Tabla 3
Concentración de SO₂, según estabilidad atmosférica

Clases de estabilidad atmosférica	A	B	C	D	E	F
Concentración (µg/m ³)	61,07	77,12	1,89 x 10 ⁻⁴	7,48 x 10 ⁻⁴⁸	0	0

2.- La tabla 4 muestra los resultados de concentración de SO₂ en el poblado de La Fortuna, a diferentes clases de estabilidad atmosférica, para una

emisión de 190 ton/día (2,2 kg/s) de SO₂, con una velocidad de salida de 100 km/h (27,7 m/s).

Tabla 4
Concentración de SO₂, según estabilidad atmosférica

Clases de estabilidad atmosférica	A	B	C	D	E	F
Concentración (µg/m ³)	59,83	75,94	1,89 x 10 ⁻⁴	7,48 x 10 ⁻⁴⁸	0	0

3.- La tabla 5 muestra los resultados de concentración de SO₂ en el poblado de La Fortuna, a diferentes clases de estabilidad atmosférica, para una

emisión de 190 ton/día (2,2 kg/s) de SO₂, con una velocidad de salida de 120 km/h (33,33 m/s).

Tabla 5
Concentración de SO₂, según estabilidad atmosférica

Clases de estabilidad atmosférica	A	B	C	D	E	F
Concentración (µg/m ³)	59,52	75,55	1,45 x 10 ⁻⁵	3,86 x 10 ⁻⁵⁶	0	0

4.- La tabla 6 muestra los resultados de concentración de SO₂ en el poblado de La Fortuna, a diferentes clases de estabilidad atmosférica, para una

emisión de 800 ton/día (9,26 kg/s) de SO₂, con una velocidad de salida de 40 km/h (11,11 m/s).

Tabla 6
Concentración de SO₂, según estabilidad atmosférica

Clases de estabilidad atmosférica	A	B	C	D	E	F
Concentración (µg/m ³)	255,76	324,62	7,96 x 10 ⁻⁴	3,36 x 10 ⁻⁴⁷	0	0

5.- La tabla 7 muestra los resultados de concentración de SO₂ en el poblado de La Fortuna, a diferentes clases de estabilidad atmosférica, para una

emisión de 800 ton/día (9,26 kg/s) de SO₂, con una velocidad de salida de 100 km/h (27,7 m/s).6.-

Tabla 7
Concentración de SO₂, según estabilidad atmosférica

Clases de estabilidad atmosférica	A	B	C	D	E	F
Concentración (µg/m ³)	251,85	319,65	9,75 x 10 ⁻⁴	7,69 x 10 ⁻⁵⁴	0	0

La tabla 8 muestra los resultados de concentración de SO₂ en el poblado de La Fortuna, a diferentes clases de estabilidad atmosférica, para una emi-

sión de 800 ton/día (9,26 kg/s) de SO₂, con una velocidad de salida de 120 km/h (33,33 m/s).

Tabla 8
Concentración de SO₂, según estabilidad atmosférica

Clases de estabilidad atmosférica	A	B	C	D	E	F
Concentración (µg/m ³)	250,55	318,0	5,96 x 10 ⁻⁵	1,62 x 10 ⁻⁵⁵	0	0

7.- La tabla 9 muestra los resultados de concentración de SO₂ en el poblado de La Fortuna, a diferentes clases de estabilidad atmosférica, para una

emisión de 12.000 ton/día (138,9 kg/s) de SO₂, con una velocidad de salida de 40 km/h (11,11 m/s).

Tabla 9
Concentración de SO₂, según estabilidad atmosférica

Clases de estabilidad atmosférica	A	B	C	D	E	F
Concentración (µg/m ³)	1417,2	4869,25	1,2 x 10 ⁻²	5,03 x 10 ⁻⁴⁶	0	0

8.- La tabla 10 muestra los resultados de concentración de SO₂ en el poblado de La Fortuna, a diferentes clases de estabilidad atmosférica, para una

emisión de 12.000 ton/día (138,9 kg/s) de SO₂, con una velocidad de salida de 100 km/h (27,7 m/s).

Tabla 10
Concentración de SO₂, según estabilidad atmosférica

Clases de estabilidad atmosférica	A	B	C	D	E	F
Concentración (µg/m ³)	3777,7	4794,77	1,46 x 10 ⁻³	1,15x 10 ⁻⁵²	0	0

9.- La tabla 11 muestra los resultados de concentración de SO₂ en el poblado de La Fortuna, a diferentes clases de estabilidad atmosférica, para una

emisión de 12.000 ton/día (138,9 kg/s) de SO₂, con una velocidad de salida de 120 km/h (33,33 m/s).

Tabla 11
Concentración de SO₂, según estabilidad atmosférica

Clases de estabilidad atmosférica	A	B	C	D	E	F
Concentración (µg/m ³)	3758,5	4770,14	8,93 x 10 ⁻⁴	244 x 10 ⁻⁵⁴	0	0

Discusión y conclusiones

Como se indica anteriormente, los efectos de toxicidad en sus diferentes impactos a la salud humana por parte del SO₂, depende básicamente de dos aspectos claves, a saber: la concentración del gas y el tiempo de exposición de las personas a este gas.

La norma de la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA) define los siguientes límites de concentración por unidad de tiempo de SO₂ en sus efectos en la salud humana:

- 80 µg/m³ como máxima concentración para un período anual de exposición
- 365 µg/m³ como máxima concentración para un período de 24 horas de exposición
- 1.600 µg/m³ como máxima concentración para un período de 3 horas de exposición

Considerando lo anterior, y analizando el primer evento supuesto de emisión de SO₂ a un caudal de 2,2 kg/s, a una velocidad de salida de 11,11 m/s (tabla 3), se obtiene que la concentración del contaminante en cualquiera de las clases de estabildades atmosféricas indicadas, en el poblado de La Fortuna, a unos 6.000 m de distancia del foco emisor, el volcán Arenal no llega a superar ninguna de las dosis indicadas, puesto que la máxima concentración de SO₂ a registrarse en La Fortuna sería de 77,12 µg/m³ bajo la influencia de una atmósfera tipo B. Aunque esta concentración de SO₂ bajo este tipo de atmósfera podría considerarse como una amenaza a la salud humana, hay que tomar en consideración que la dosis correspondiente se refiere a una exposición anual; bajo esa premisa, la amenaza en ciernes se podría descartar como tal, ya que es muy poco probable que el volcán mantenga una emisión continua de SO₂ a ese caudal, y además, que la clase de atmósfera sea invariablemente de tipo B, de tal manera que el poblado de La Fortuna se mantenga por un año bajo la influencia de una concentración de SO₂ a una concentración cercana a los 80 µg/m³.

La misma discusión es válida también para los casos en que se tenga igual caudal de emisión (2,2 kg/s), pero a velocidades de salida de 27,7 m/s y 33,33 m/s (tablas 4 y 5), según lo considerado.

Para una emisión de 9,26 kg/s de SO₂ y a una velocidad de salida de 11,11 m/s (tabla 6), la concentración del gas bajo clase atmosférica A y B superan la dosis anual (255,76 µg/m³ y 324,62 µg/m³, respectivamente) y se acercan a la dosis diaria. Ya se ha discutido la problemática o ventaja que se suscita con respecto a las dosis anuales, en relación con la clase atmosférica y la dudosa posibilidad de una continua emisión con concentración de al menos 80 µg/m³ de SO₂ sobre el poblado de La Fortuna. Sin embargo, si es importante el prestar atención, que para una atmósfera tipo B, la concentración del contaminante sería de 324,62 µg/m³, la cual es muy cercana a la dosis diaria (365 µg/m³). En este caso, la posibilidad de que una condición atmosférica tipo B, con una concentración de SO₂ como la indicada sea mantenida por 24 horas sobre el poblado de La Fortuna, es muy factible, por lo que la salud de la población y otros seres podría estar efectivamente en riesgo. Aún en este caso, se tiene el hecho de que en horas de la noche se pueden tener condiciones atmosféricas D, E ó F (tabla 2), en las que, en este caso, mantienen o permiten concentraciones de SO₂ muy pequeñas o de cero, de tal manera que la dosis de 24 horas, se reduciría a unas 12. Lo anterior no implica que en la población, bajo las condiciones dadas, no se puedan llegar a generar impactos a la salud, especialmente sobre aquellas personas que muestran una mayor sensibilidad a este contaminante.

El análisis para un evento con un caudal de 9,26 kg/s y una velocidad de salida de 27,7 m/s de SO₂ (tabla 7), resulta similar a lo último discutido.

De igual manera, los resultados obtenidos para una emisión de 9,26 kg/s y una velocidad de salida de 33,33 m/s (tabla 8), indican que las condiciones de concentración del contaminante, al igual que los dos últimos casos analizados, también representan una amenaza a la salud humana, especialmente bajo condiciones atmosféricas tipo B, es válido considerar los atenuantes indicados.

Al tener en cuenta los efectos de concentración de SO₂ en la población de La Fortuna ante un evento eruptivo con un caudal de emisión del contaminante de 138,9 kg/s y una velocidad de salida de 11,11 m/s (tabla 9), se obtiene que dicha población se encuentra ante un muy elevado riesgo a su sa-

lud; e incluso sobre la vida, siempre y cuando dicho evento se produzca en clases atmosféricas tipo A y B. Así, en el primer caso (clase atmosférica A), la concentración de SO₂ en La Fortuna es de 1.417,2 µg/m³; en el segundo caso (clase atmosférica B), la concentración será de 4.869,25 µg/m³. Ambas concentraciones son ahora consideradas como un verdadero riesgo a la salud ambiental de la zona, pues la primera (atmósfera A) está muy cercana a la dosis de 3 horas (1.600 µg/m³), y la segunda (atmósfera B) sobrepasa por casi tres veces la dosis de 3 horas. Así, es fácil considerar que en caso de una emisión de SO₂ con un caudal de 138,9 kg/s (12.000 ton/día), bajo atmósferas tipo A ó B, el impacto a la salud y a la vida es extremo, puesto que se iguala o sobrepasa la dosis de 3 horas indicada por la EPA. Bajo otras condiciones atmosféricas (clases C, D, E ó F), las concentraciones del contaminante, por efectos de dispersión y otros factores, se ven en extremo reducidas (en atmósferas E y F la concentración del SO₂ es de cero), de tal manera que el impacto a la salud ambiental no es significativo.

En casos de emisión de SO₂ con caudal también de 138,9 kg/s, pero a velocidades de salida de 27,7 m/s y 33,33 m/s (tablas 10 y 11, respectivamente), las concentraciones del gas alcanzan valores que hasta triplican la dosis para 3 horas de la EPA.

Así, al caudal indicado y a 27,7 m/s de velocidad de salida, la concentración del SO₂ en clase atmosférica tipo A es de 3.777,7 µg/m³, y para clase atmosférica tipo B es de 4.794,7 µg/m³ (tabla 10). En ambos casos, la concentración representa realmente un verdadero riesgo para la salud e incluso la vida en general.

El mismo razonamiento se aplica, entonces, a un evento con igual caudal de SO₂, pero ahora a velocidad de salida de 33,33 m/s. Elevadas concentraciones del gas alcanzan La Fortuna solamente bajo condiciones atmosféricas tipo A y B (tabla 11), siendo ellas de 3.758,5 µg/m³ y de 4.770,14 µg/m³, respectivamente. Ambas concentraciones, por supuesto, sobrepasan la dosis de 3 horas de la EPA, representando, por lo tanto, un verdadero riesgo a la salud y vida de personas y animales en el poblado de La Fortuna.

Bajo las mismas condiciones de caudal y velocidades de salida de SO₂, pero con clases de estabilidad atmosférica tipo C, D, E ó F, las concentraciones del contaminante que alcanzan el poblado de La Fortuna son tan bajas, e incluso de cero, que no representan ningún riesgo para la población y vida

animal de esa localidad.

Según la metodología utilizada para determinar los efectos a la salud ambiental, especialmente en lo concerniente a la salud humana, se establece que en caso de una emisión gaseosa de SO_2 por el volcán Arenal, y tomando en cuenta las dosis máximas de toxicidad emitidas por organismos internacionales especializados en temas de la salud, la población de La Fortuna de San Carlos estaría bajo riesgo si la emisión volcánica de SO_2 fuera de un caudal de 800 ton/día (9,26 kg/s), a velocidades de salida de 40, 100 y 120 km/h, y a condiciones atmosféricas tipo A y B, siempre y cuando todas las condiciones requeridas se mantengan por más de 24 horas. Por otra parte, si el caudal de emisión de SO_2 se incrementa a 12.000 ton/día, a velocidades de salida superiores a los 40 km/h y con condiciones atmosféricas de tipo A o B, las concentraciones de SO_2 que alcanzarían La Fortuna serían muy cercanas a la dosis de 3 horas (1.600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en atmósfera tipo A, pero hasta más del doble de esa concentración (hasta 4869,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) si el tipo de atmósfera se mantuviera del tipo B, con lo que el riesgo a la salud aumentaría reduciéndose el tiempo de exposición por menos de 3 horas. En condiciones atmosféricas tipo C, D, E o F, el riesgo sería prácticamente inexistente a cualquier emisión y velocidad de salida de las propuestas.

Con base en lo anteriormente expuesto, es muy recomendable la implementación por parte de algún organismo nacional o internacional, de un plan de monitoreo constante de las concentraciones de SO_2 en las emisiones gaseosas del volcán Arenal, con el fin de poder determinar cuándo se estaría generando un caudal de gas tóxico que podría poner en riesgo a la población de La Fortuna, y de esa manera activar una alerta que tienda a proteger a las personas y otros seres vivos.

Agradecimientos

La autora agradece al Dr. Jorge Laguna Morales, Catedrático de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, por su consejo, revisión y asesoría en la escritura de este artículo. Agradece además, a la Escuela de Tecnologías en Salud por la disposición para que dicho artículo se escribiera.

Bibliografía

1. Morales y Liao, Amenazas volcánicas en Costa Rica: una estrategia de prevención, Revista Costarricense de Salud

Pública, volumen 8; 1999.

2. Alvarado, G., Los Volcanes de Costa Rica, Costa Rica, EUNED; 1989.
3. Barquero, J. Volcán Arenal-Costa Rica, San José, Costa Rica, 1ra. Ed.; 1997
4. Alfaro, M. del R., Contaminación del Aire, San José Costa Rica, Ed. UNED; 1998.
5. Organización Panamericana de la Salud, Criterios de Salud Ambiental, Óxidos de azufre y partículas en suspensión. Publicación Científica No. 424, OPS/OMS, Washington, DC, EEUU; 1982.
6. American Journal of Public Health, "Health Effects of Volcanoes: An Approach to Evaluating the Health Effects of an Environmental Hazard," Suplemento Volumen 76; 1986
7. Smithsonian Institution, Global Volcanism 1975-1985.