



INTERNATIONAL VOLCANIC HEALTH HAZARD NETWORK

GUIA SOBRE GASES VOLCANICOS Y AEROSOLES

Las páginas que siguen contienen información sobre los peligros a la salud de gases y aerosoles emitidos durante erupciones volcánicas. Cada sección destaca las propiedades de la emisión, su impacto sobre la salud, direcciones internacionales sobre su concentración, y ejemplos de los efectos de concentraciones en contextos volcánicos, incluyendo víctimas.

Antes de ver los datos sobre las emisiones, recomendamos leer la introducción general sobre gases y aerosoles. Al final se incluye un glosario de algunos de los términos que se utilizan en las explicaciones e indicaciones de este documento.

Introducción

Se ofrece a continuación una introducción a los objetivos y propósitos de estas guías para gases y aerosoles, así como una información sobre las guías a nivel internacional y las unidades utilizadas en los sitios en red. Se incluye también una breve revisión de procedimientos de seguridad implementados comúnmente por vulcanólogos y observatorios vulcanológicos.

Introducción general.

Los peligros de los gases y aerosoles están asociados a la actividad volcánica, desde las emisiones difusas del suelo, hasta las erupciones plinianas. Las emisiones volcánicas más preocupantes son SO_2 , HF, sulfato (SO_4^{2-}), CO_2 , HCl y H_2S , aunque existen otras especies volátiles que pueden afectar la salud humana. Incluyendo mercurio y otros metales. Desde 1900 ha habido al menos 62 incidentes serios relacionados con gas volcánico. De ellos, la expulsión de gas en el Lago Nyos en 1986 fue la más desastrosa, causando 1,746 muertes, casi 845 heridos y una evacuación de 4430 personas. Otros incidentes relacionados con gases volcánicos fueron responsables de más de 280 muertes y 1,120 heridos, y contribuyeron a la evacuación o enfermedad de casi 53,700 personas (Withman, en revisión). La mayoría de estas víctimas (149 muertes y 1,000 heridos) fueron causados por escapes de CO_2 durante la erupción del Dieng, Indonesia, en 1979. Muchos otros incidentes de molestias respiratorias de corto tiempo asociadas con emisiones volcánicas permaneces no reportadas. Los trabajos realizados sobre la relación minuciosa entre contaminación volcánica del aire y salud son pocos. Una revisión de la literatura médica (Hansell y Oppenheimer, en preparación) revela solo 25 estudios epidemiológicos primarios, de diferente calidad, considerando los efectos de los gases volcánicos. Las personas que requieran información más detallada sobre estudios epidemiológicos de los efectos en humanos de las sustancias revisadas pueden consultar la base de datos TOXNET (<http://toxnet.nlm.nih.gov/>).

Objetivo

Varias organizaciones llevan a cabo investigación volcánica, entre las que se incluyen observatorios, institutos nacionales y universidades. La información sobre los peligros

volcánicos es relevantes para todos estos cuerpos, así como para los turistas y la gente que vive y trabaja cerca de volcanes activos. Hay una creciente demanda, entre ambos la comunidad vulcanológica y otros interesados que se ocupan de los impactos de la actividad volcánica, de una base de datos amplia conteniendo información sobre emisiones volcánicas. Nos dirigimos a esa necesidad, presentando detalles sobre las propiedades, impactos sobre la salud, guías internacionales para la exposición a concentraciones, y ejemplos de concentraciones y efectos en contextos volcánicos, incluyendo víctimas, para los más peligrosos gases y aerosoles típicamente emitidos durante la actividad volcánica.

Lineamientos

Los lineamientos que presentamos para cada sustancia se basan generalmente en estudios sobre contaminación industrial urbana, por lo que no son estrictamente aplicables a las emisiones volcánicas, que tienen una composición diferente. Por ejemplo, no dan cuenta de un efecto “cocktail” que puede ocurrir por la mezcla de contaminantes atmosféricos. Aún así, como un indicador de niveles de peligrosidad de primer orden, creemos que son de considerable valor para planificar una respuesta a la emergencia en áreas peligrosas. Se proveen lineamientos para aire ambiental y exposición ocupacional. El propósito de ofrecer lineamientos de aire ambiental es el de proporcionar una base para proteger la salud pública de los efectos adversos de la contaminación ambiental, y para eliminar o reducir a un mínimo los contaminantes atmosféricos ya conocidos, o pueden llegar a ser peligrosos para la salud humana y su bienestar (WHO, 1999). Es relevante el monitoreo de la calidad del aire en áreas pobladas cercanas a los volcanes y para la protección de turistas. (Aunque es necesario considerar que en muchas ciudades los niveles de contaminación antropogénica son ya mayores que los establecidos en los lineamientos, y que esta contaminación ambiental por si misma se considera como una causante mayor de muertes y enfermedades (e.g. WHO, 1999), el propósito de los niveles de exposición ocupacional es proteger a los trabajadores en ambientes donde pueden estar expuestos a niveles de contaminación mayores que los del medio ambiente, pero en exposiciones de corto tiempo. Estos niveles serán de mayor relevancia para aquellos que manejan gente que trabaja en áreas volcánicas, como los parques nacionales y observatorios volcánicos, que están fuera del área afectada durante sus tiempos no laborales.

No hay seguridad absoluta en que los niveles por debajo de los lineamientos no tendrán efectos dañinos. En particular, los grupos de alto riesgo como los niños y enfermos pueden reaccionar sensiblemente. Igualmente, si los lineamientos son excedidos, no significa que en todos los casos, o inmediatamente, ocurrirá el daño. De todos modos, habrá un incremento en el riesgo de efectos adversos sobre la salud. No pretendemos ofrecer una revisión exhaustiva de los lineamientos internacionales, y señalamos que todos los lineamientos están sujetos a cambio.

Unidades

La abundancia de gases atmosféricos puede reportarse como proporciones mezcladas por volumen (unidades de ppm y ppb por volumen son convenientes para las fumarolas volcánicas y ocasionalmente porcentajes para gran abundancia, por ejemplo, de CO₂), o como concentraciones (mg m⁻³ y µg m⁻³). La conversión entre las dos unidades es posible si se conocen la temperatura y presión al momento de la medición. Para asegurar la comparabilidad entre los datos, en algunos casos se han hecho conversiones aproximadas para mezclar proporciones usando presión estándar y una temperatura de 298 K. En esta instancia, las concentraciones originales se incluyen entre paréntesis. Todas las referencias a proporciones mezcladas son por volumen.

Procedimientos existentes

Es necesario un sistema seguro de trabajo que incluye monitoreo en todas los sitios donde puedan presentarse gases tóxicos.

IAVCEI recomienda que todos los vulcanólogos porten permanentemente máscaras durante el trabajo de campo, especialmente cuando se introducen en áreas de fumarolas espesas o en áreas de alta concentración de gas (Amaraki et al, 1994).

Se han contactado vulcanólogos y observatorios vulcanológicos para determinar que medidas, si alguna, son comúnmente tomadas para protegerse contra gases volcánicos y aerosoles. Los procedimientos usados por las personas, varían desde lo mínimo (esto puede ser fuertemente influido por restricciones presupuestales), hasta asistencia a cursos anuales de entrenamiento y el envío de planes detallados de seguridad y peligros). Se dispone de una amplia gama de respiradores, filtros de gas y mascarar, prefiriéndose las máscaras completas, pues protegen los ojos de gases ácidos y partículas. El rechazo a las máscaras se argumenta por ser molestos, calientes e incómodos para moverse en el terreno volcánico. También reducen la visibilidad, En consecuencia, su uso en el campo solo se puede iniciar cuando las personas sienten que el nivel de gas es suficientemente alto como para causar problemas. Este umbral puede ser diferente para diferentes individuos y puede estar por encima de las concentraciones en las que ocurre el daño a la salud.

La mayoría de los observatorios vulcanológicos no parecen tener lineamientos para protegerse de los gases volcánicos y concentraciones de aerosol, y por lo mismo no tienen planes de respuesta si los niveles se convierten en peligrosos. En muchas locaciones tampoco están bien establecidos los procedimientos para reportar las concentraciones a las autoridades. Las actitudes de las autoridades en muchos países parecen favorecer una reacción de rechazo más que de mitigación, aunque hay una cantidad de ejemplos de implementación de accesos restringidos basados en reportes científicos. Cualquier cambio significativo en el acceso, o en procedimientos basados en posibles riesgos, puede tener grandes implicaciones en el turismo en las áreas comprometidas, por lo que hay poca intención de cambio a menos que ocurra un incidente.

Referencias

- Amaraki, S., Barberi, F., Casadevall, T., and McNutt, S., 1994. Safety for volcanologists. *Bulletin of Volcanology*, 56(2): 151-154.
- Hansell, A. and Oppenheimer, C., in preparation. Health hazards from volcanic gases – a systematic literature review.
- WHO, 1999. Guidelines for Air Quality, world Health organization, Geneva.
- Witham, C., in review. Volcanic disasters and incidents. A new database. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.

Dióxido de azufre (SO₂)

El dióxido de azufre es uno de los gases mas comunmente liberados durante erupciones volcánicas (después de agua y dióxido carbónico), y es preocupante a escala global, debido a su potencial influencia en el clima. A escala global SO₂ es peligroso para los humanos en su forma gaseosa y también porque se oxida formando sulfato aerosol.

Propiedades

El dióxido de azufre (SO₂) es un gas incoloro con un olor irritante característico. Este olor es perceptible a diferentes niveles, dependiendo de la sensibilidad individual, pero generalmente se percibe entre 0.3-1.4 ppm y es fácilmente notable a 3 ppm (Baxter, 2000; Wellburn, 1994). SO₂ no es inflamable, no es explosivo y es relativamente estable. Su densidad es más del doble que la del aire ambiental (2.62 g L⁻¹ a 25°C y 1 atm (Lide, 2003), y es altamente soluble en agua [85 g L⁻¹ (Gangolli, 1999)]. En contacto con membranas húmedas SO₂ forma ácido sulfúrico (H₂SO₄), que es responsable de fuertes irritaciones en los ojos, membranas mucosas y piel (Komarnisky et al, 2003).

Típicamente, la concentración de SO₂ en fumarolas volcánicas diluidas es < 10 ppm, tan poco como 10 km con viento a favor desde su origen, comparado con el antecedente troposférico de 0.00001-0.07 ppm (Brimblecombe, 1996; Oppenheimer et al., 1998). Suponiendo que el gas tuviese media vida de 6 a 24 horas, entonces solo el 5% del gas emitido está presente en la atmósfera baja después de 1 a 4 días (Brimblecombe, 1996; Finlayson-Pitts and Pitts, 1986; Porter et al., 2002).

Efectos a la exposición

El dióxido de azufre es irritante a los ojos, garganta y vías respiratorias. La sobre exposición en el corto tiempo causa inflamación e irritación, provocando ardor en los ojos, tos, dificultades respiratorias y sensación de tensión en el pecho. Las personas asmáticas son especialmente sensibles al SO₂ (Baxter, 2000) y pueden reaccionar ante concentraciones tan bajas como 0.2 a 0.5 ppm. Los vulcanólogos que sufren de asma pueden advertir efectos adversos a concentraciones sustancialmente más bajas de las que afectan a los demás colegas. Una exposición prolongada o repetida a concentraciones bajas (1-5 ppm) puede ser peligrosa para personas con enfermedades cardíacas o pulmonares previas. Mientras los efectos sobre la salud de variadas concentraciones han sido documentados por diferentes investigadores y organizaciones, una muestra de los umbrales por efectos a la salud se describen en la tabla siguiente.

Efectos sobre la salud por exposición respiratoria al dióxido de azufre

(Baxter, 2000; Nemery, 2001; NIOSH 1981; Wellburn, 1994)

Límite de exposición (ppm)	Efectos sobre la salud
1 - 5	Umbral de respuesta respiratoria al ejercicio o respiración profunda en individuos sanos
3 - 5	El gas es fácilmente detectable . Caída de la función respiratoria en reposo y resistencia a la corriente de aire
5	Aumento de la resistencia en individuos sanos
6	Inmediata irritación en ojos nariz y garganta
10	Empeora la irritación en ojos, nariz y garganta
10 - 15	Umbral de toxicidad por exposición prolongada
20+	Parálisis o muerte después de exposición prolongada

150	Máxima concentración que puede ser resistida durante algunos minutos por individuos sanos
-----	---

Se ha demostrado que la presencia de altos niveles de SO₂ en el ambiente puede causar diversos problemas de salud en niños (Ware et al., 1986). Aún así, los estudios realizados en el Mt. Sakurajima no indican una correlación entre la prevalencia de asma en niños y la exposición prolongada a los gases volcánicos (Uda et al., 1999).

Lineamientos existentes

En 1971, el USA EPA fijó los niveles de SO₂ que pueden causar daños significativos a la salud de las personas, estableciendolos en 2620 µg m⁻³ (1ppm) (promedio de 24 horas). Cuando las partículas de material u otras huellas de componentes están también presentes, este nivel baja. Los lineamientos de SO₂ para el ambiente y las ocupaciones internacionales, que cambian significativamente en países diferentes, aparecen en la tabla que sigue.

Lineamientos de SO₂ para calidad de la atmósfera

Los valores entre paréntesis son conversiones aproximadas a lineamientos ya publicados

Pais/ Institución	Nivel (ppm)	Nivel (µg m-3)	Tiempo promedio	Tipo de linea- miento	Fecha de implemen- tación	Ley de soporte	Notas	Ref
Argentina	1	2620	1 hora		16/04/1973	Ley 20.284		a
	0.3 (0.027)	780 70	8 horas 1 mes		16/04/1973	Ley 20.284		a
	0.096	250	24 horas	Primario	6/03/2003	D.S.N° 113/02	1	b
Chile	0.031	80	Anual	Primario	6/03/2003	D.S.N° 113/02	1	b
China	(0.057)(0.191) (0.267)	150 (i) 500 (ii) 700 (iii)	1 hora		01/1996	GB 3095- 1996	2	a
	(0.019) (0.057) (0.095)	50 (i) 150 (ii) 250 (iii)	24 horas		01/1996	GB 3095- 1996	2	a
	(0.008) (0.023) (0.038)	20 (i) 60 (ii) 100 (iii)	Anual		01/1996	GB 3095- 1996	2	a
Colombia	(0.573)	1500	3 horas	No más de una vez al año	11/01/1982	Decreto N°2		a
	(0.153)	400	24 horas	No más de una vez al año	11/01/1982	Decreto N°2		a
	(0.038)	100	Anual		11/01/1982	Decreto N°2		a

Costa Rica	(0.573)	1500	3 horas	No más de una vez al año				
	(0.139)	365	24 horas	No más de una vez al año		Reglamento sobre inmisión de contaminantes atmosféricos		a
	(0.031)	80	Anual			Reglamento sobre inmisión de contaminantes atmosféricos		a
Ecuador	(0.573)	1500	3 horas	No más de una vez al año	15/07/1991	Registro Oficial N° 726		a
	(0.153)	400	24 horas	No más de una vez al año	15/07/1991	Registro Oficial N° 726		a
	(0.031)	80	Anual		15/07/1991	Registro Oficial N° 726		a
Unión Europea	(0.134)	350	1 hora	No exceder 24 veces en un año	1/01/2005	Consejo Directivo 1999/30/EC	3	c
	(0.048)	125	24 horas	No exceder 24 veces en un año	1/01/2005	Consejo Directivo 1999/30/EC	3	c
	(0.008)	20	Anual		19/07/2001	Consejo Directivo 1999/30/EC	3	c
Japón	0.1	260	1 hora		16/05/1973			d
	0.04	110	24 horas		16/05/1973			d
México	(0.130)	341	24 horas	No exceder más de una vez al año	23/12/1994	NOM-022-SSA1-1993		a
	(0.030)	79	Anual		23/12/1994			a
Nueva Zelandia	(0.134)	350	1 hora		05/2002		4	e
	(0.046)	120	24 horas		05/2002		4	e
						Regulaciones para la		

	(0.102)	166	15 min.	No pasar de 35 veces al año	31/12/2004	calidad del aire en Inglaterra 2000		f
Reino Unido	(0.134)	350	1 hora	No pasar de 24 veces al año	31/12/2004	Regulaciones para la calidad del aire en Inglaterra 2000		f
				No pasar de 3 veces al año	31/12/2004	Regulaciones para la calidad del aire en Inglaterra 2000		f
EEUU	0.14	365	24 horas	Primaria	1990	NAAQS		g
	0.50	1300	3 horas	Secundaria	1990	NAAQS		g
	0.030	80	Anual	Primaria	1990	NAAQS		g
WHO	0.175	500	10 min.		2000	WHO 2000	5	h
	(0.048)	125	24 horas		2000	WHO 2000		h
	(0.019)	50	Anual		2000	WHO 2000		h

1. La condición normal corresponde a la presión de una atmósfera (1 atm.) y temperatura de 25°
2. (i) áreas sensitivas de protección especial (ii) áreas típicamente urbanas o rurales (iii) áreas industriales especiales
3. Deben ser standarizadas a 293 K y 101.3 kPa
4. Medido a 0° y presión 1 atm. Esto no aplica a ácido de azufre
5. Basado en evidencias de estudios epidemiológicos.

- a. <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/normas.html>
- b. <http://www.conama.cl/portal/1255/propertyvalue-10316.html>
- c. European.Commission.Guidelines.Website
- d. <http://www.env.go.jp/en/lar/regulation/aq.html>
- e. <http://www.mfe.govt.nz/publications/air/ambient-air-quality-may02/index.html>
- f. <http://www.defra.gov.uk/environment/airquality/airqual/index.htm>
- g. <http://www.epa.gov/air/criteria.html>
- h. WHO, 2000. Guidelines for Air Quality, World Health Organisation, Geneva.

Sumario de lineamientos ambientales

La tabla de lineamientos ambientales para SO₂ anterior demuestra la amplísima variedad de lineamientos internacionales existentes. La diferencia de un país a otro

se puede explicar por la antigüedad de los lineamientos, el logro práctico de un standard basado en niveles de contaminación alcanzado, actuales y predecidos, o los datos sobre los que se estableció el Standard (por ejemplo, un estudio epidemiológico vs niveles de contaminación reales). El tiempo promedio en esos lineamientos va de 10 minutos (WHO) a anual. La tabla a continuación resume la amplitud de valores de los lineamientos por cada período promedio

Resumen de la amplitud de niveles de SO₂ ambiental

Tiempo promedio	Min (ppm)	Max (ppm)
10-15 min	0.102	0.175
1 hora	0.057	1
24 horas	0.019	0.153
Anual	0.008	0.038

Lineamientos ocupacionales para SO₂

Los valores entre paréntesis son conversiones aproximadas de lineamientos publicados

País/ Institución	Nivel (ppm)	Nivel ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Tiempo promedio	Tipo de lineamiento	Fecha	Ley de soporte	Notas	Ref.
Reino Unido	5	13000	15 min.	MEL				a
	2	5300	8 hs.TWA	MEL				a
USA	5	13000	15 min	STEL	1994	NIOSH/ ACGIH	2	c
	5	13000	8hs TWA	PEL		OSHA regula- tions	1	b
	2	5000	8 hs TWA		1994	NIOSH/ ACGIH	2	c
	0.3	(800)	1 hora	ERPG-1	1989	Linea mientos de planea ción de respues ta a la emergen cia		d
	3	(7900)	1 hora	ERPG-2	1989	Linea mientos de planea ción de respues ta a la emergen cia		d
	15	(39300)	1 hora	ERPG-3	1989	Linea mientos de planea ción de respues ta a la emergen cia		d

1. ppm por volumen a 25° y 760 torr.
2. <http://www.cdc.gov/niosh/nmam/>
 - a. HSE, 2002.occupational Exposure Limits 2002. HSE Books, Sudbury.
 - b. OSHA Guidelines Website
 - c. NIOSH Manual of Analytical Methodds (NMAM®), Cassinelli, M.E. and o'Connor, P.F. (Eds.). DHHS (NIOSH) Publication 94-113, 4th ed. And/or http://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_268500.html
 - d. AIHA Emergency Response Planning Guidelines Committee, 2002. Emergency Response Planning Guidelines 2002, Complete Set, American Industrial Hygiene Association, Fairfax.

Una cantidad de observatorios vulcanológicos han implementado sus propias guías. En el cráter del Monte Aso, Japón, por ejemplo, los visitantes son evacuados cuando los niveles de SO₂ exceden los 0.2 ppm continuamente durante un minuto, o simultáneos niveles que exceden 5.0 ppm. Estos niveles fueron reducidos de > 5ppm durante 5 minutos después de fatalidades vinculadas al gas en los 90's (Ng'Walali et al, 1999). En 2000 El Parque Nacional de los Volcanes en Hawai, en colaboración con USGS Observatorio Vulcanológico Hawaiano, introdujo un conjunto de advertencias sobre SO₂ para proteger al personal y visitantes del parque (ver abajo).

Tabla de advertencia sobre SO₂ del Parque Nacional de los Volcanes de Hawai y Observatorio Vulcanológico Hawaiano

USGS	Plan de Respuesta en los	Volcanes Hawaiianos
	Condición	Respuesta
	VERDE (bueno) SO ₂ <300ppb 15 min. promedio	Actividad normal
	AMARILLO (moderado) SO ₂ >300 ppb 30 min. promedio	Acciones protectoras básicas <ul style="list-style-type: none"> • Se alerta al personal • Se informa a los visitantes
	NARANJA Insalubre para grupos sensibles SO ₂ >500 ppb 15 min promedio	Acciones protectoras moderadas <ul style="list-style-type: none"> • Relocalizar/cancelar caminatas y trabajos al aire libre
	ROJO Insalubre SO ₂ >1000ppb 15 min promedio	Acciones protectoras amplias <ul style="list-style-type: none"> • Considerar el cierre de las entradas a la estación y centro de visitantes

Ejemplos volcánicos e incidentes

Las concentraciones del dióxido de sulfuro (SO₂) peligrosas para la salud humana han sido registradas con viento a favor en muchos volcanes. Las más altas concentraciones se ven con mas frecuencia en las inmediaciones de volcanes con degasificación persistente.

- *Kilahuea, Hawai*: concentraciones ambientales de SO₂ en un estacionamiento turístico durante un episodio de actividad creciente en 1996, alcanzó los 4.0 ppm (BGVN 21:01), casi 10 veces más alto que en las guías de concentración para 3 horas en los EEUU. Desde 1987 a 2001, la concentración del SO₂ ambiental excedió mas de 85 veces los standares para 24 horas de salud primaria de USA en los instalaciones del Parque Nacional de los Volcanes de Hawaii (Elias, 2002). Estas mediciones en un famoso lugar turístico provocaron la introducción de guías de SO₂ para el parque.
- *Masaya, Nicaragua*: Degasificación normal activa, y en los períodos de Marzo-Abril de 1998 y Febrero-Marzo de 1999 concentraciones medias de SO₂

medidas con viento a favor hasta 44 km de distancia dieron una dispersión de $<0.002 - 0.23 \text{ ppm}$ ($\sim 5\text{-}600 \mu\text{g m}^{-3}$) (Demelle et al., 2002). Cerca del 30% de estas mediciones estuvieron por encima de la guía de la Organización Mundial de la Salud (WHO) para 24 horas. Las máximas concentraciones se midieron en la cordillera de Llano Payaca, a 14 km de distancia, fueron de 0.6 ppm (Horrocks, 2001). En mayo 2001, la mayor cantidad de SO_2 fue registrada en la fumarola del Masaya, al borde del cráter Santiago y fue de 3.1 ppm ($7950 \mu\text{g m}^{-3}$). (Allen et al., 2002). Estas concentraciones indican el alto potencial de riesgos a la salud para la población local, quienes han manifestado sensibilidad e inflamación ocular, bronquitis, irritación de garganta y dolores de cabeza. Se estima que $\sim 50,000$ personas están en riesgo por el SO_2 , y contaminación de agua en la región Masaya.

- *Poas, Costa Rica*: Residentes y científicos de la región del volcán se han quejado de irritación en ojos y garganta. Mediciones con viento a favor de SO_2 a largo plazo en zonas pobladas muestran concentraciones medias de hasta $\sim 0.28 \text{ ppm}$ ($730 \mu\text{g m}^{-3}$), con mediciones a corto plazo de hasta 0.3-0.5 ppm (Nicholson et al., 1996) estos niveles, observados en 1991 y 1992, exceden los valores de los lineamientos de WHO para 24 horas y en algunas localidades exceden los niveles para 15 minutos. El más alto nivel de SO_2 tomado en el borde del cráter del Poas, con $\sim 35 \text{ ppm}$, sustancialmente por encima de los niveles de los lineamientos.
- *Villarrica, Chile*: Las mediciones de concentración de SO_2 realizadas a la orilla del cráter excedieron frecuentemente 13 ppm (equivalente al límite ocupacional de NIOSH 15 min) (Witter y Delmelle, 2004). En el pico de la temporada turística veraniega, diariamente subieron unos 100 turistas, de los cuales un gran número se expuso al gas nocivo.
- *White Island, New Zealand*: Un estudio de salud piloto reportó mediciones en tiempo promedio de exposición personal al SO_2 , durante 20 minutos de fumarolas con viento a favor de $\sim 6\text{-}75 \text{ ppm}$ (Durand et al., 2004). Estas concentraciones excedieron el límite de exposición ocupacional a corto plazo, en hasta 15 veces.

Las poblaciones y las ciudades pueden ser muy afectadas por las emisiones de SO_2 durante una actividad volcánica más explosiva:

- *Soufriere, Guadalupe*: Durante la erupción de 1976 la gente se quejó de dolores de cabeza asociado con fuerte olor a SO_2 (Le Guern et al., 1980).
- *Popocatepetl, México*: En la ciudad de México, con vientos bajando directamente desde el persistentemente activo volcán, las concentraciones de SO_2 excedieron los 0.08 ppm ($160 \mu\text{g m}^{-3}$) debido a las emisiones volcánicas (Raga et al., 1999). Esto es más de cuatro veces mayor que el promedio mensual típico de la ciudad, y por encima de lo reconocido en los lineamientos de exposición anual y para 24 horas.
- *Sakurajima, Japón*: Este volcán ha estado muy activo en los últimos tiempos, con emisiones que alcanzan una vasta región con viento a favor. Los niveles máximos de SO_2 por hora en la ciudad de de Sakurajima ($\sim 5 \text{ km}$ desde el volcán del mismo nombre) fueron de 0.84 ppm en 1980, excediendo los estándares de calidad del aire de Japón (Yano et al., 1986). Desde Septiembre de 1985 hasta Febrero de 1986 la concentración mensual de SO_2 , medidas en la base del Sakurajima, variaron de 0.015 ppm a 0.138 ppm con un promedio de 0.079 ppm en ese período (Kawaratani y Fujita, 1990). Investigaciones epidemiológicas en la región que rodea el volcán muestran asociación positiva entre concentraciones de SO_2 y mortalidad en adultos, causada por bronquitis y mortalidad neonatal (Shinkuro et al., 1999; wakisaka et al., 1988).

- *Miyakejima, Japon:* en otoño de 2000 vientos del sud y del sudeste trajeron gases emitidos por el volcán Mayakejima a la isla principal y causaron gran concentración de SO₂ en muchas estaciones de superficie con 100 a 400 km de viento a favor (por ejemplo Naoe et al., 2003). A 88 km de distancia, un máximo de ~0.114 ppm de SO₂ a nivel de superficie, comparado con 0.0028 en la misma época del año anterior (An et al., 2003). A 4.5 km, la concentración máxima por hora fue de 0.945 ppm. Esto es nueve veces mayor que el valor por hora de calidad del aire japonés. La erupción impactó la calidad del aire del área metropolitana de Tokio que tiene más de 30 millones de residentes, algunos de los cuales reportaron gases malolientes en la ciudad (Fujita et al., 2003). Desde Agosto a Noviembre de 2000, los niveles de SO₂ en 623 estaciones de monitoreo de aire a lo largo de Japón, reportaron excesos en los valores de calidad del aire por hora (Fujita et al., 2003).

Otros ejemplos de concentraciones de SO₂ y sus efectos a diversas distancias:

- *Concepción, Nicaragua:* Emisiones de SO₂ del cráter en 1986 y 1993 medidas con viento a favor fueron suficientes para causar un efecto de rocío en áreas pobladas (SEAN 11:05; BGVN 18:03).
- *Cerro Hudson, Chile:* Vapores sulfurosos el 11 de octubre de 1991 fueron tan intensas en el Valle de Huemules, en el costado occidental del volcán, que algunos habitantes se enfermaron, con vómitos y pérdida de conciencia (BGVN 16:09). (No está claro cuál fue la composición de dichas emanaciones; pudo haber sido aerosol de sulfato y/o sulfuro de hidrógeno).
- *St. Augustine, Alaska:* El vapor de la erupción del 1 de febrero de 1976 tuvo concentraciones de azufre gaseoso (los investigadores asumieron que se trataba de dióxido de azufre), hasta de 10 ppm en las cercanías del volcán, y 1 ppm con vientos a favor de 10 km, causando irritación en la garganta (Stith et al., 1978).
- *Yasur, Vanuatu:* Niveles peligrosos de SO₂ se encontraron en los vapores, en el borde del cráter. En Septiembre de 1988 se encontraron concentraciones entre 3 y 9 ppm (SEAN 13:12) en los vapores, excediendo muchos de los estándares de calidad del aire ocupacional.
- *Telica, Nicaragua:* En marzo de 1994, un vapor rico en azufre bajó del cráter del volcán y llenó el valle con altas concentraciones de SO₂. Se reportó también olor a azufre en la ladera del noreste (BGVN 19:07).
- *Taal, Filipinas:* Fuerte olor a SO₂ se registró durante la erupción de 1911, y se ha pensado (Baxter, 1990) que eso contribuyó a la alta mortalidad causada por esa erupción.

En otras regiones, la gente que vive o trabaja cerca de volcanes que emiten SO₂, puede estar desprevenida con relación al riesgo de los gases. Por ejemplo, niveles medios de SO₂ en el Lago Furnas, en Azores, en la caldera del volcán activo, dan mediciones de 0.115 ppm. Fue registrado en un área donde los turistas y los habitantes locales utilizan las fumarolas para cocinar, y es varias veces más alto que cualquier lineamiento anual conocido, y más alto que la mayoría de los lineamientos de nivel para 1 – 24 horas. Los niveles en el centro de la Villa Furnas (y también en la caldera) tienen un rango de 0.070 – 0.085 ppm (Baxter et al., 1999), también más alto que cualquier lineamiento de nivel anual.

La mayoría de los incidentes conocidos relacionados con SO₂ venenoso ocurrieron en el Volcán Aso, en Japon (ver tabla). Aquí, 7 personas murieron en los últimos 15 años, y 59 fueron hospitalizadas por inhalación de gas volcánico de SO₂, entre Enero de 1980 y Octubre de 1995. Más de la mitad de los muertos tuvieron antecedentes

asmáticos. Siguiendo sus autopsias, se redujeron los criterios de niveles de SO₂ para evacuación, y se dieron alarmas estrictas sobre los riesgos de exposición a los visitantes, para proteger a los asmáticos y con enfermedades respiratorias (Ng'Walali et al., 1999).

Incidentes de mortalidad y morbilidad asociados con las emisiones de SO₂ volcánico en el Siglo Veinte

(Siguiendo BGVN 16:09; Hayakawa, 1999; Ng'Walali et al., 1999)

Volcán	Fecha	Morbi-mortalidad	Datos adicionales
Aso, Japón	12/02/1989	1 muerto	Turista varón de 66 años
Aso, Japón	26/03/1990	1 muerto	Turista
Aso, Japón	18/04/1990	1 muerto	Turista varón de 78 años
Aso, Japón	19/10/1990	1 muerto	Turista mujer de 54 años
Hudson, Chile	11/10/1991	Algunos habitantes se enfermaron con vómitos y pérdida de conciencia	Vapores azufrados en el valle
Kilauea, Hawaii	1993	1 muerto	Turista con sensibilidad al azufre murió en el estacionamiento del cráter del Halemaumau
Aso, Japón	29/05/1994	1 muerto	Turista mujer de 69 años
Aso, Japón	23/11/1997	2 muertos	Turistas varones de 62 y 51 años. Antes de su muerte hubo nivel 5 ppm

Referencias

Allen, A.G., Oppenheimer, C., Ferm, M., Baxter, P.J., Horrocks, L.A., Galle, B., McGonigle, A.J.S. and Duffell, H.J., 2002. Primary sulfate aerosol and associated emissions from Masaya Volcano, Nicaragua. *Journal of Geophysical Research*, 107(D23).

An, J., Ueda, H., Matsuda, K., Hasome, H. and Iwata, M., 2003. Simulated impacts of SO₂ emissions from the Miyake volcano on concentration and deposition of sulfur oxides in September and October of 2000. *Atmospheric Environment*, 37(22): 3039-3046.

Baxter, P.J., 1990. Medical effects of volcanic eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 52(7): 532-544.

Baxter, P.J., 2000. Gases. In: P.J. Baxter, P.H. Adams, T.-C. Aw, A. Cockcroft and J.M.

Elias, T., Sutton, A.J., 2002, Volcanic air pollution in our backyard: gas advisory system helps alert people of Hawai'i, *Geological Society of America Abstracts with Program*, 34 (5): A-11.

Harrington (Editors), *Hunter's Diseases of Occupations*. Arnold, London, pp. 123-178.

Baxter, P.J., Baubron, J.-C. and Coutinho, R., 1999. Health hazards and disaster potential of ground gas emissions at Furnas volcano, Sao Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92(1-2): 95-106.

- Brimblecombe, P., 1996. *Air Composition and Chemistry*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Delmelle, P., Stix, J., Baxter, P.J., Garcia-Alvarez, J. and Barquero, J., 2002. Atmospheric dispersion, environmental effects and potential health hazard associated with the low-altitude gas plume of Masaya volcano, Nicaragua. *Bulletin of Volcanology*, 64(6): 423-434.
- Durand, M., Florkowski, C., George, P. and Walmsley, T., 2004. Elevated trace element output in urine following acute volcanic gas exposure. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 134: 139-148.
- Finlayson-Pitts, B.J. and Pitts, J.N., 1986. *Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques*. Wiley-Interscience Publication. New York.
- Fujita, S.-I., Sakurai, T. and Matsuda, K., 2003. Wet and dry deposition of sulfur associated with the eruption of Miyakejima volcano, Japan. *Journal of Geophysical Research*, 108(D15): DOI: 10.1029/2002JD003064.
- Gangolli, S. (Ed.), 1999. *The Dictionary of Substances and their Effects*, 2nd edn. The Royal Society of Chemistry. Cambridge.
- Goff, F., Janik, C.J., Delgado, H., Werner, C., Counce, D., Stimac, J.A., Siebe, C., Love, S.P., Williams, S.N., Fischer, T. and Johnson, L., 1998. Geochemical surveillance of magmatic volatiles at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 110(6): 695-710.
- Hayakawa, Y., 1999. Catalog of volcanic eruptions during the past 2000 years in Japan. *Journal of Geography*, 108(4): 472-488.
- Jacobson, M.Z., 2002. *Atmospheric pollution: history, science and regulation*. Cambridge University Press, Cambridge, 399 pp.
- Kawaratani, R.K. and Fujita, S.-I., 1990. Wet deposition of volcanic gases and ash in the vicinity of Mount Sakurajima. *Atmospheric Environment*, 24A(6): 1487-1492.
- Komarnisky, L.A., Christopherson, R.J. and Basu, T.K., 2003. Sulfur: its clinical and toxicological aspects. *Nutrition*, 19(1): 54-61.
- Le Guern, F., Bernard, A. and Chevrier, R.M., 1980. Soufriere of Guadeloupe 1976-1977 eruption - mass and energy transfer and volcanic health hazards. *Bulletin of Volcanology*, 43(3): 577-593.
- Lide, D.R. (Ed.), 2003. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 84th edn. CRC Press. Boca Raton, Florida.
- Naoe, H., Heintzenberg, J., Okada, K., Zaizen, Y., Hayashi, K., Tateishi, T., Igarashi, Y., Dokiya, Y. and Kinoshita, K., 2003. Composition and size distribution of submicrometer aerosol particles observed on Mt. Fuji in the volcanic plumes from Miyakejima. *Atmospheric Environment*, 37(22): 3047-3055.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1981. *Occupational Health Guidelines for Chemical Hazards*, DHHS (NIOSH) Publication No. 81-123. <http://www.cdc.gov/niosh/81-123.html>.

Nemery, B., Hoet, P.H.M. and Nemmar, A., 2001. The Meuse Valley fog of 1930: an air pollution disaster. *The Lancet* 357(9257), 704-708.

Ng'Walali, P.M., Koreeda, A., Kibayashi, K. and Tsunenari, S., 1999. Fatalities by inhalation of volcanic gas at Mt. Aso crater in Kumamoto, Japan. *Legal Medicine*, 1: 180-184.

Nicholson, R.A., Roberts, P.D. and Baxter, P.J., 1996. Preliminary studies of acid and gas contamination at Poas volcano, Costa Rica. In: J.D. Appleton, R. Fuge and G.J.H. McCall (Editors), *Environmental Geochemistry and Health*. The Geological Society, London, pp. 239-244.

Oppenheimer, C., Francis, P., Burton, M., Maciejewski, A.J.H. and Boardman, L., 1998. Remote measurement of volcanic gases by Fourier transform infrared spectroscopy. *Applied Physics B*, 67: 505-515.

Porter, J.N., Horton, K.A., Mouginiis-Mark, P.J., Lienert, B., Sharma, S.K., Lau, E., Sutton, A.J., Elias, T. and Oppenheimer, C., 2002. Sun photometer and lidar measurements of the plume from the Hawaii Kilauea volcano Pu'u O'o vent: aerosol flux and SO₂ lifetime. *Geophysical Research Letters* 29(16), DOI 10.1029/2002GL014744.

Raga, G.B., Kok, G.L., Baumgardner, D., Baez, A. and Rosas, I., 1999. Evidence for volcanic influence on Mexico City aerosols. *Geophysical Research Letters*, 26(8): 1149-1152.

Shinkuro, R., Fujiyama, C. and Akiba, S., 1999. Relationships between ambient sulfur dioxide levels and neonatal mortality near the Mt. Sakurajima volcano in Japan. *Journal of Epidemiology*, 9(5): 344-349.

Smithsonian Institution, 1986. Concepcion. *Scientific Event Alert Network (SEAN) Bulletin*, v. 11, no. 5.

Smithsonian Institution, 1988. Yasur. *Scientific Event Alert Network (SEAN) Bulletin*, v. 13, no. 12.

Smithsonian Institution, 1991. Hudson. *Bulletin of the Global Volcanism Network (BGVN)*, v. 16, no. 9.

Smithsonian Institution, 1993. Concepcion. *Bulletin of the Global Volcanism Network (BGVN)*, v. 18, no. 3.

Smithsonian Institution, 1994. Telica. *Bulletin of the Global Volcanism Network (BGVN)*, v. 19, no. 7.

Smithsonian Institution, 1996. Kilauea. *Bulletin of the Global Volcanism Network (BGVN)*, v. 21, no. 1.

Stith, J.L., Hobbs, P.V. and Radke, L.F., 1978. Airborne particle and gas measurements in the emissions from six volcanoes. *Journal of Geophysical Research*, 83(C8): 4009-4017.

Uda, H., Akiba, S., Hatano, H. and Shinkuro, R., 1999. Asthma-like disease in the children living in the neighbourhood of Mt. Sakurajima. *Journal of Epidemiology*, 9(1): 27-31.

Wakisaka, I., Yanagihashi, T., Tomari, T. and Ando, T., 1988. Effects of volcanic activity on the mortality figures of respiratory disease. *Japan Journal of Hygiene*, 42(6): 1101-1110.

Ware, J.H., Ferris, B.G.J.R. and Dockery, D.W., 1986. Effects of ambient sulfur oxides and suspended particles on respiratory health of preadolescent children. *American Review of Respiratory Disease*, 133: 834-842.

Wellburn, A., 1994. *Air Pollution and Climate Change: the biological impact*. Addison Wesley Longman Limited, Harlow, 268 pp.

Witter, J.B. and Delmelle, P., 2004. Acid gas hazards in the crater of Villarrica volcano (Chile). *Revista Geologica de Chile*, 31(2): 273-277.

Yano, E., Yokoyama, Y. and Nishii, S., 1986. Chronic pulmonary effects of volcanic ash: an epidemiological study. *Archives of Environmental Health*, 41(2): 94-99.

Hidrogeno de sulfuro (H₂S)

Propiedades

El hidrógeno de sulfuro (H₂S) es un gas incoloro con un olor distintivo a huevo podrido. La percepción del olor del H₂S varía dentro de la población humana, en un rango de 0.008 – 0.2 ppm (Amoore, 1983; Beauchamp, 1984). Este gas es inflamable en el aire cuando se encuentra en concentraciones entre 4–46% (Sax y Lewis, 1989) y enciende con una llama color azul pálido. Es moderadamente soluble en agua (4.1 g L⁻¹ a 20° C (GAngolli, 1999) y tiene una densidad de 1.39 g L⁻¹ a 25° C y 1 atm (Lide, 2003), 1.2 veces más que el aire ambiental. El rango de las concentraciones típicas de H₂S en fumarolas volcánicas diluidas es de 0.1-0.5 ppm, comparado con el antecedente troposférico de 0.00005-0.024 ppm, y el gas tiene un tiempo de residencia en la atmósfera baja de aproximadamente 24 horas (Brimblecombe, 1996; Oppenheimer et al., 1998).

Efectos por exposicion

El hidrógeno de sulfuro (H₂S) es un gas tóxico y el peligro para la salud depende tanto de la duración de la exposición como de la concentración. Este gas es irritante para los pulmones y en bajas concentraciones irrita los ojos y en tracto respiratorio. La exposición puede producir dolor de cabeza, fatiga, mareos, andar tambaleante y diarrea, seguido algunas veces por bronquitis y bronconeumonía (Sax y Lewis, 1989). Hay evidencias de síntomas adversos a la salud elevados en comunidades expuestas durante largo tiempo a niveles bajos de H₂S en el medio ambiente (Bates et al., 2002; Legator, 2001), tales como en áreas geotérmicas, y el desagradable olor de H₂S puede ser molesto. Los sujetos asmáticos no parecen responder tan prontamente a los niveles bajos de H₂S como lo hacen al SO₂. El olfato pierde el rastro del H₂S cuando las concentraciones son inferiores al nivel de peligrosidad, de manera que las personas pueden tener poca alerta de la presencia del gas en concentraciones dañinas. Grandes concentraciones pueden provocar parálisis del centro respiratorio, causando paro respiratorio, que puede conducir a la muerte. Si no ocurre el deceso durante el tiempo de exposición, la recuperación se produce sin complicaciones médicas posteriores, aunque los síntomas pueden continuar durante varios meses (Snyder et al., 1995). Los umbrales de concentración para efectos a la salud se describen en la tabla siguiente.

Efectos a la salud por exposición a hidrógeno de sulfuro

(Amoore, 1983; Baxter, 2000; Faivre-Pierret and Le Guern, 1983 y sus referencias; NIOSH, 1981; Sax y Lewis, 1989; Zinder et al, 1995).

Límite de exposición (ppm)	Efectos a la salud
0.008 – 0.2	Umbral respiratorio- se detecta olor a huevo podrido
20	Olor a fuga de gas Tolerancia durante algunas horas sin daño
20-50	Irritación ocular
50	Exposición prolongada puede causar faringitis o bronquitis
60	Exposición prolongada puede causar conjuntivitis y dolor de ojos
150+	Irritación del tracto respiratorio superior Sensación de pérdida del olfato
250	Edema pulmonar con riesgo de muerte
500	Muy peligroso, se debe evacuar mucho antes de llegar a este nivel

1000	Pérdida de conciencia
1000-2000	Intoxicación aguda: los síntomas incluyen respiración agitada, angustia, náusea y vómito. Puede ser rápidamente seguido de pérdida de conciencia, coma y paro respiratorio
2000+	Pérdida inmediata de conciencia y alta probabilidad de muerte

Guías existentes

Muchos países/organismos, no tienen niveles de calidad de aire para H₂S, ya que no es percibido como problema en la mayoría de las regiones. En la siguiente tabla se mencionan los que si las tienen.

Indicaciones de calidad de aire para H₂S

País/Institución	Nivel (ppm)	Nivel µg m ⁻³	Tiempo promedio	Tipo de guía	Fecha de implementación	Ley relevante	Notas	Ref.
Nueva Zelanda		7	1 hora		Mayo 2002		1	a
WHO		150	24 horas		1997	WHO 1997	2	b
Estado de Hawai, USA	0.025	35	1 hora	Standard del Estado				c
Estado de California	0.03		1 hora	Estatal	1969; conservada en 1984			d

- Medido a 0°C 1 atm de presión. Basado en molestias olfativas y tal vez inconveniente en un área geotérmica
 - Nivel por irritación ocular
- <http://mfe.govt.nz/publications/air/ambient-air-quality-may02/index.html>
 - WHO, 2000. Guidelines for Air Quality, World Health organization, Geneva.
 - State of Hawaii, 2002. 2001 Annual Summary Hawaii Air Quality Data, Department of health Clean Air Branch, Honolulu, Hawaii.
 - <http://www.arb.ca.gov/research/aaqs/caags/H2S/H2S.htm>

Guías ocupacionales para H₂S

País/Institución	Nivel (ppm)	Nivel µg m ⁻³	Tiempo promedio	Tipo de guía	Fecha de implementación	Ley relevante	Notas	Ref.
UK	10	14000	15 min.	MEL		Nueva		a
	5	7000	8 horas TWA	MEL		Nueva		a
USA	20		8 horas TWA	Techo aceptado por la exposición permitida		Regulaciones OSHA (Standards -29 CFR)	1	b
	10	1500	10 min.	REL	2003	NIOSH		c

	0	techo					
0.1		1 hora	ERPG-1	2003	Lineamientos para planes de respuesta a emergencias		d
30		1 hora	ERPG-2	2003	Lineamientos para planes de respuesta a emergencias		d
100		1 hora	ERPG-3	2003	Lineamientos para planes de respuesta a emergencias		d

1. ppm por volumen a 25°C y 750 torr. 50 ppm se acepta para 10 min., una vez en un período de 8 horas, si no ocurre otra exposición.
 - a. HSE, 2002. Occupational Exposure Limits 2002. HSE Books, Sudbury.
 - b. OSHA Standards Website
 - c. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards (NPG). <http://cdc.gov/niosh/npg/npg.html>
 - d. AHIA Emergency Response Planning Guidelines Committee, 2004, 2004 Emergency Response Planning Guidelines (ERPG) Update Set, American Industrial Hygiene Association, Fairfax.

Ejemplos volcánicos e incidentes

El dióxido de azufre (H₂S) se encontró en concentraciones peligrosas en las proximidades de fumarolas y de cráteres de volcanes, así como en áreas geotérmicas y de manantiales (Baxter, 2000). En los volcanes, los trabajadores pueden estar completamente desprevenidos de su existencia, ya que su olor puede ser desapercibido, aún en niveles bajos, en la mezcla de gases fumarólicos:

- Soufriere, Guadalupe: durante la erupción freática de 1976-1977, los vulcanólogos que trabajaban en la cima y los residentes de la localidad de St. Claude, a 3-4 km de distancia, sufrieron dolores de cabeza. Mediciones consecutivas de H₂S mostraron que las concentraciones fueron de ~ 0.2 a ~ 0.37 ppm (300 a 500 µg m⁻³) en St. Claude, muy por encima de las guías ocupacionales y ambientales respectivamente (Le Guern et al., 1980)
- Kilauea, Hawai: En el Parque Nacional de los Volcanes de Hawai, muestreos del aire cerca de la chimenea al banco de sulfuro, dieron concentraciones entre 0.3 y 4.2 ppm en 1994 (Sutton et al., 1994) y 0.2 a 0,7 ppm el 23 de Julio de 2003 (C. Witham, datos no publicados). En ambos casos, excedieron el standard ambiental del Estado. Se colocaron señales y barreras previniendo acerca de los peligros del área, para evitar el paso de turistas en la vecindad de las emisiones en tierra.

- Región volcánica de Alban Hills, Italia: Mediciones en el área residencial revelaron que el umbral ocupacional (10 – 15 ppm), fue superado frecuentemente y llegó a haber concentraciones de hasta 40 ppm, una concentración altamente dañina (Carapezza et al., 2003).
- Rotorua, Nueva Zelandia: Rotorua se asienta en un campo geotérmico que emite H₂S. Casi un cuarto de la población ha estado expuesta a concentraciones que exceden ~ 0.143 ppm (200 µg m⁻³), muy por encima de los lineamientos ambientales, y hubo concentraciones máximas que excedieron ~ 1 ppm (1500 µg m⁻³). La exposición crónica al gas se asocia con efectos adversos sobre la salud, incluyendo efectos neurológicos, cardiovasculares y respiratorios, y varias muertes se han asociado a exposición a altas concentraciones que se fueron acumulando en espacios encerrados (Bates et al., 2002). Las mediciones máximas medidas dentro de algunos edificios en Rotorua, alcanzan > 200 ppm en áreas ventiladas y cerradas, y se registraron niveles de 0.3 – 20 ppm en el ambiente interior (Durand and Scout, 2003).

En Rotorua y volcanes de Japón ocurrieron desgracias debido a envenenamiento por H₂S volcánico y geotérmico (ver tabla) y en los últimos 100 años se produjeron 46 muertes ocasionadas por el gas.

Incidentes de Mortalidad y morbilidad asociados a emisiones de H₂S en el siglo XX (Hatakawa, 1999; Durand basado en Collins, 2003).

Área volcánica o geotérmica	fecha	Morbi/mortalidad	Detalles
Nasu, Japón	6 jul. 1919	2 muertes	
Nasu, Japón	26 nov. 1921	1 muerte	
Rotorua, NZ.	1946	1 muerte	Alberca de un spa
Rotorua, NZ	1984	1 muerte, 1 persona salvada	Durante tareas de mantenimiento de drenaje
Hakone, Japón	5 Nov. 1951	2 muertos	Baño al aire libre
Hakone, Japón	27 Mar. 1952	1 muerto	Bañándose en espacio cerrado
Rotorua, NZ.	Feb. 1954	1 muerto 4 personas salvadas	Después de ingresar a un tanque séptico
Rotorua	Feb. 1954	1 muerto	Salvado de un pozo caliente y ahogado
Rotorua, NZ	Jun. 1954	1 muerto	Cavando el pozo de una letrina
Tateyama, Japón	21 Jul. 1954	2 muertos	Bañándose al aire libre
Daisetsu, Japón	21 de Jul. 1958	2 muertos	
Rotorua, NZ	Feb. 1962	2 muertos	De noche. Se quejaron de fugas en una tubería del sistema subterráneo de calefacción

Rotorua, NZ	Mayo, 1962	1 muerto	En habitación cerrada
Tateyama, Japón	23 Abr. 1967	1 muerto	
Tateyama, Japón	4 Nov. 1967	2 muertos	Acampantes
Narugo, Japón	26 Ago. 1969	1 muerto	Bañándose en espacio cerrado
Tateyama, Japón	30 Abr. 1970	1 muerto	En una cabaña
Kusatsu-Shirane, Japón	27 Dic. 1971	6 muertos	Esquiadores
Hakone, Japón	2 Oct. 1972	2 muertos	
Tateyama, Japón	25 Nov. 1972	1 muerto	Trabajador de un spa
Tateyama, Japón	12 Ago. 1975	1 muerto	
Kusatsu-Shirane, Japón	3 Ago. 1976	3 muertos	Excursionistas
Tateyama, Japón	22 Jul. 1985	1 muerto	
Akita Yakeyama, Japón	8 May. 1986	1 muerto	
Rotorua, NZ	Sep. 1987	2 muertos	De noche. Bañera defectuosa permite ingreso de gas a la habitación de un motel
Kirishima, Japón	26 Ago. 1989	2 muertos	Bañándose en espacio cerrado
Adatara, Japón	15 Sep. 1997	4 muertos	Excursionistas
Rotorua, NZ	19 Feb. 2000	1 muerto	Origen del H ₂ S no aclarado

Referencias

American Industrial Hygiene Association, 1962. Hydrogen Sulfide. Hygienic Guide Series. Detroit, Michigan.

Amoore, J.E. and Hautala, E., 1983. Odor as an aid to chemical safety: odor thresholds compared with threshold limit values and volatilities for 214 industrial chemicals in air and water dilution. Journal of Applied Toxicology 3, 272-290.

Bates, M.N., Garrett, N. and Shoemack, P., 2002. Investigation of health effects of hydrogen sulfide from a geothermal source. Archives of Environmental Health, 57(5): 405-411.

Baxter, P.J., 2000. Gases. In: P.J. Baxter, P.H. Adams, T.-C. Aw, A. Cockcroft and J.M. Harrington (Editors), Hunter's Diseases of Occupations. Arnold, London, pp. 123-178.

Beauchamp, R.O.J., Bus, J.S., Popp, J.A., Boreiko, C.J. and Andjelkovich, D.A., 1984. A critical review of the literature on hydrogen sulfide toxicity. *Critical Reviews in Toxicology* 13: 25-97.

Brimblecombe, P., 1996. *Air Composition and Chemistry*. Cambridge University Press, Cambridge.

Carapezza, M.L., Badalamenti, B., Cavarra, L. and Scalzo, A., 2003. Gas hazard assessment in a densely inhabited area of Colli Albani Volcano (Cava dei Selci, Roma). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123: 81-94.

Collins, S., 2003, Sulphur City goes under scrutiny, *The New Zealand Herald*, 9 July 2003, Clickfor article.

Durand, M. and Scott, B.J., 2003. An investigation of geothermal soil gas emissions and indoor air pollution in selected Rotorua buildings, Institute of Geological & Nuclear Sciences Science Report 2003/28.

Faive-Pierret, R. and Le Guern, F., 1983. Health risks linked with inhalation of volcanic gases and aerosols. In: H. Tazieff and J.C. Sabroux (Editors), *Forecasting Volcanic Events*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 69-81.

Gangolli, S. (Ed.), 1999. *The Dictionary of Substances and their Effects*, 2nd edn. The Royal Society of Chemistry. Cambridge.

Hayakawa, Y., 1999. Catalog of volcanic eruptions during the past 2000 years in Japan. *Journal of Geography*, 108(4): 472-488.

Legator, M.S., 2001. Health effects from chronic low-level exposure to hydrogen sulfide. *Archives of Environmental Health*, 56: 123-131.

Le Guern, F., Bernard, A. and Chevrier, R.M., 1980. Soufriere of Guadeloupe 1976-1977 eruption - mass and energy transfer and volcanic health hazards. *Bulletin of Volcanology*, 43(3): 577-593.

Lide, D.R. (Ed.), 2003. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 84th edn. CRC Press. Boca Raton, Florida.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1981. *Occupational Health Guidelines for Chemical Hazards*, DHHS (NIOSH) Publication No. 81-123. <http://www.cdc.gov/niosh/81-123.html>.

Oppenheimer, C., Francis, P., Burton, M., Maciejewski, A.J.H. and Boardman, L., 1998. Remote measurement of volcanic gases by Fourier transform infrared spectroscopy. *Applied Physics B*, 67: 505-515.

Sax, N.I. and Lewis, R.J., Sr., 1989. *Dangerous Properties of Industrial Materials*, 7th edn. Van Nostrand Reinhold. New York.

Snyder, J.W., Safir, E.F., Summerville, G.P. and Middleberg, R.A., 1995. Occupational fatality and persistent neurological sequelae after mass exposure to hydrogen sulfide. *American Journal of Emergency Medicine*, 13(2): 199-203.

Sutton, A.J., Elias, T., Navarrete, R., 1994, Volcanic gas emissions and their impact on ambient air character at Kilauea Volcano, Hawaii, U.S. Geological Survey Open-File Report 94-569, 34 p.

Bióxido de carbono (CO₂)

Propiedades

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro. Es no inflamable y químicamente no reactivo (Sax y Lewis, 1989). El CO₂ es 1.5 veces más pesado que el aire (su densidad es de 1.80 g L⁻¹ a 25°C y 1 atm (Lide, 2003) y si se emite despaciosamente, corre hacia abajo y puede acumularse en elevaciones bajas. Las concentraciones de CO₂ en penachos volcánicos diluidos pueden variar desde 1 ppm hasta cientos de ppm por encima del antecedente troposférico de ~ 350ppm (T.Elías, pers. comm.; Oppenheimer et al., 1998), y el gas tiene una persistencia en la atmósfera baja de aproximadamente 4 años (Brimblecombe, 1996).

Debido a los altos niveles de CO₂ requeridos para causar daño, las concentraciones de CO₂ se expresan frecuentemente, en contraste con otros gases, como un porcentaje del gas en el aire por volumen (1% = 10,000 ppmv).

Efectos de la exposición

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas tóxico en altas concentraciones, así como también asfixiante (debido a la reducción de oxígeno). Solamente en altas concentraciones produce irritación en los ojos, nariz y garganta. Los umbrales de concentración para efectos a la salud se detallan en la tabla siguiente.

Efectos a la exposición respiratoria de dióxido de carbono (Baxter, 2000; Faivre-Pierret y Le Guern, 1983 y refs. ; NIOSH, 1981)

Límites de exposición (% en aire)	Efectos sobre la salud
2 - 3	Imperceptible en reposo, pero en actividad marcada falta de aliento
3	Respiración se hace notoriamente más profunda y más frecuente durante el reposo
3 - 5	Aceleramiento del ritmo respiratorio. Repetida exposición provoca dolor de cabeza
5	Respiración se hace extremadamente dificultosa dolores de cabeza, transpiración y pulso irregular
7.5	Respiración acelerada, promedio cardíaco aumentado, dolor de cabeza, transpiración, mareos, falta de aliento, debilidad muscular, pérdida de habilidades mentales, somnolencia y zumbido auricular
8 - 15	Dolor de cabeza, vértigo, vómitos, pérdida de conciencia y posible muerte si el paciente no recibe oxígeno inmediatamente
10	Agotamiento respiratorio avanza rápidamente con pérdida de conciencia en 10 – 15 minutos
15	Concentración letal, la exposición por encima de este nivel es intolerable
25 +	Convulsiones y rápida pérdida de conciencia luego de unas pocas aspiraciones. Si se mantiene el nivel, deviene la muerte.

Lineamientos existentes

Las máscaras de gas pueden no resultar efectivas para protegerse de concentraciones altas de CO₂, debido a la falta de oxígeno. Por lo tanto, se recomienda la evacuación inmediata de las zonas de trabajo o habitacionales cuando las concentraciones exceden 1.5% por volumen (el límite del valor de la exposición ocupacional por tiempo corto). No existen guías ambientales para CO₂. Se ofrece una guía ocupacional de concentraciones de CO₂.

Guía ocupacional para CO₂.
(Concentraciones de 1%= 10000 ppm)

País/ Institución	Nivel %	Nivel mg ³ - ³	Tiempo promedio	Tipo de guía	Fecha de implemen- tación	Ley rele- vante	Notas	Ref.
EU	0.5	9000	8horas TWA	OEL		Comisión Directiva 91/322		a
UK	1.5	274000	15 min.	MEL		ILV		b
	0.5	9150	8 horas TWA	MEL		ILV		b
USA	3	540000	15 min.	STEL	2003	NIOSH		c
	>0.5	9000	8 horas TWA	PEL		Regulación OSHA (Standard -29 CFR)	1	d
	0.5	9000	10 horas TWA	PEL	2003	NIOSH		c

1. ppm por volumen a 25° y 760 torr.

- a. http://europa.eu.int/comm/employment_social/health_safety/docs/oels_en.pdf
- b. HSE, 2002. Occupational Exposure Limits 2002, HSE Books, Sudbury.
- c. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards (NPG).
<http://www.cdc.gov/niosh/npg/npg.html>
- d. OSHA Standards Website

Ejemplos volcánicos e incidentes

Las descargas de dióxido de carbono (CO₂) durante erupciones y por las chimeneas, por el suelo y por los flujos de lava pueden resultar peligrosas cuando las concentraciones son muy altas y el gas es atrapado cerca de la superficie. Las emisiones son más peligrosas cuando se acumulan en espacios confinados tales como depresiones topográficas naturales, excavaciones y pozos, o sótanos y alacenas; Le Guern et al., (1982) sugieren que sitios localizados debajo de antiguas fisuras son particularmente de alto riesgo. Se han reportado muertes debido a un aumento de concentración de CO₂ en Vestmannaeyjar en Heimaey (durante la erupción del Eldfell en 1973); Vulcano, Italia; Monte Mammoth, USA y Nyragongo, DR Congo, entre otros (ver tabla). Los tres eventos que resaltan en la lista de muertes CO₂ son las explosiones de gas en *Lago Nyo* y *Lago Manoun, Cameroon*, y la nube de gas en Dieng. Aunque las dos explosiones de gas en los lagos se citan con frecuencia en la literatura sobre volcanes, se piensa que su inicio no está relacionado con la actividad volcánica en ese momento. La erupción freática en la *Planicie Dieng, Indonesia* en 1979, fue la peor tragedia relacionada con el CO₂, no asociada con los cambios en el lago. Esta erupción liberó una nube de CO₂ que cubrió a ~142 aldeanos que trataban de escapar del área y cobró más vidas cuando trataron de rescatar sus cuerpos. Los gases muestreados en la fisura activa poco después, mostraron concentraciones de CO₂ de 98-99% (Le Guern et al., 1982). La erupción del *Vesubio, Italia*, del 18 de Abril de 1906, también relaciona los decesos con la emanación de CO₂: Perret (1924) registró que CO₂ debido a la erupción produjo un aire "casi irrespirable" y, junto con las cenizas finas, le adjudica la causa de muerte de una persona de 19 años que había padecido bronquitis poco antes. El gas caído en las grandes hondonadas en el lado oeste de *Concepción, Costa Rica* durante su actividad eruptiva de 1986 produjo irritación en la garganta y mareos cuya causa se adjudicó

tentativamente al CO₂ (Smithsonian Institution, 1986). En Indonesia, se informó acerca de nubes de CO₂ flotando colina abajo del volcán Tangkubanparahu, produciendo algunas muertes en niños (Le Guern et al., 1982).

Las emisiones de CO₂ en el suelo son particularmente peligrosas, ya que a menudo hay poca alerta sobre sus concentraciones:

- *Nyragongo, DR Congo:* Durante la erupción de 2002, las mediciones de concentración de CO₂ en algunos lugares varió desde 20-30% hasta 99%, mucho más arriba de las concentraciones letales. Estas emanaciones desde el suelo fueron llamadas mazuku o “vientos endiablados” por la población local y bolsas de gas alcanzaron alturas de hasta 40 metros. Durante el año anterior a la erupción, emanaciones de CO₂ del suelo en Goma y región del Lago Kivu fueron probablemente la causa de una cantidad de muertes (Baxter y Ancia, 2002).
- *Vulcano, Italia:* Durante los 80's las emisiones de CO₂ fueron causantes de muertes ocasionales de animales (conejos, cabras) y de dos niños (Baubron et al., 1990). En 1988 mediciones de CO₂ en Vulcano – un área densamente poblada durante el verano -, revelaron que las concentraciones en el suelo y en los manantiales de agua cercanos al volcán fueron suficientemente altas como para producir la muerte, y en algunas localidades las emisiones fueron de casi el 100%. Las máximas concentraciones fueron encontradas en un campamento y después de la información de estos datos a las autoridades locales, se prohibió acampar cerca del cono.

Las emisiones de gas CO₂ de la tierra ponen en riesgo a trabajadores y habitantes de las áreas volcánicas y geotérmicas, debido a su difusión en lugares cerrados:

- *Monte Mammoth, USA:* una cantidad de casos de semi asfixia fueron reportados por gente que ingresaba a pequeñas cabinas cubiertas de nieve en el área del Monte Mammoth (Farrar et al., 1995; Sorey et al., 1998) y la muerte de un esquiador a campo traviesa en un pozo de nieve en 1998 pudo haber sido causado por asfixia (Hill, 2000). Las mediciones de la concentración de CO₂ tomadas en el pozo dos días después de descubierto el cuerpo fueron de 70%. Concentraciones letales también se encontraron en una cabaña y una cueva cerca del Lago Horseshoe en la montaña, y como consecuencia en un campamento en el área se canceló su uso nocturno (Farrar et al., 1995).
- *Volcán Kilauea, Hawai:* Mediciones en los canales de lava de la cumbre muestran concentraciones de hasta 1%, muy por encima del Standard ocupacional TWA, y los espeleólogos informaron sobre confusión mental y agotamiento mientras mapeaban dichos canales. Las mediciones de CO₂ realizadas a la entrada de una cueva sísmica ubicada justo debajo de la superficie fueron tan altas como de 0.5% (USGS; Hawaiian Observatory, dato no publicado).
- *Furnas, Azores:* En la Caldera de Furnas, los niveles de CO₂ medidos a nivel del suelo variaron entre el fondo (<1.5%) hasta el 100%. Cerca de un tercio de las casas en el poblado de Furnas, localizado en la caldera, se situaban en áreas con suelos de elevada degasificación de CO₂ en 1993. Espacios cerrados, sin ventilación y algunas casas contenían niveles de CO₂ que podían causar asfixia y las observaciones realizadas sugerían que podían ocurrir fugas grandes y potencialmente letales de CO₂, repentinamente (Baxter et al., 1999).
- *Rotorua, Nueva Zelanda:* Se encontraron altos niveles de CO₂ en edificios de Rotorua, que está localizada en una área geotérmica activa. Aquí, la concentración a puertas cerradas puede alcanzar el 2%, y cerca de las áreas de expulsión, 15% (Durand & Scott, 2003).

- Distrito Volcánico de Alban Hills, Italia: Se han asociado las elevadas concentraciones de CO₂ con la muerte de por lo menos 10 personas en la región italiana central del Lacio durante los últimos 20 años (Beaubien et al., 2003). La asfixia de 29 vacas por CO₂, en un área altamente poblada cerca de Roma, en septiembre de 1999 motivó la realización de estudios de gas proveniente del suelo, para examinar la distribución de los riesgos a la salud locales. (Beaubien et al., 2003; Carapezza et al., 2003). Los estudios demostraron que las concentraciones de CO₂ a 1.5 metro de altura por encima del suelo en un área habitacional en el lado noroeste de Alban Hills excedía episódicamente el umbral ocupacional de 0.5%. A 0.75 metro de altura, sobrepasaba frecuentemente era de 0.3 – 0.5% (Carapezza et al., 2003), sugiriendo un aumento de peligro para los niños.

Incidentes de mortalidad y morbilidad asociados a emisiones volcánicas de CO₂

Volcán	Fecha	Morbi/mortalidad	Mas detalles	Ref.
Vesubio	18/04/1906	1 muerte	Jóven con historial de bronquitis reciente. Efecto probablemente combinado con el de cenizas	Perret, 1924
Nyamuragira (Kituro)	1948?	1 herido	Los vulcanólogos lo extrajeron inconsciente de un cráter de 2 metros de profundidad	Le Guern et al., (1982)
Heimaey, Vestmannaeyjar, Islandia	23/01/1973	1 muerto	5,200-5,300 personas evacuadas debido riesgo por lava y CO ₂	Thorarinsson, 1979
Dieng, Indonesia	20/02/1979	~149 muertos, 1000 heridos	Gente alcanzada por una nube de gas en el camino	Cronin et al., 2002; SEAN 04:02
Lago Monoun, Cameroon	16/08/1984	37 muertos 1 herido	Fuga en el lago. Habitantes de la zona fueron evacuados	Sigurdsson et al., 1987
Lago Nyos, Cameroon	21/08/1986	1,746 muertos >845 heridos	Fuga en el lago. 4,430 personas escaparon	Othman-Chande, 1987
Vulcano, Italia	1980's	2 muertos	Ambos fueron niños	Baubron et al., 1990
Montaña Mammoth, USA	Marzo 1990	1 herido	Un guardabosque experimento severos síntomas de asfixia por altas concentraciones de CO ₂ por degasificación del suelo	Sorey et al., 1998
Rabaul, Papúa, Nueva Guinea	24/06/1990	6 muertos	(no erupción)	Itikarai y Stewart, 1993
Akkoda, Japon	12/07/1997	3 muertos Algunas hospitalizaciones	Las bajas fueron miembros del ejército japonés (no	Hayakawa, 1999

			hubo erupción)	
Montaña Mammoth, USA	24/05/1998	1 muerto	Esquiador a campo abierto, en un pozo de nieve	Hill, 2000
Distrito volcánico de Alban Hills, Italia	Diciembre de 2000	1 muerto	Anciano asfixiado por CO ₂ por haber caído en un pozo abandonado	Beaubien et al., 2003, Carapezza et al., 2003
Nyiragongo, DR Congo	Enero 2002	2 heridos	Dos mujeres limpiando una iglesia, se desmayaron debido a la acumulación de CO ₂ después de una erupción	BGVN 27:04

Referencias

Baubron, J.C., Allard, P. and Toutain, J.P., 1990. Diffuse volcanic emissions of carbon dioxide from Vulcano Island, Italy. *Nature*, 344: 51-53.

Baxter, P.J., 2000. Gases. In: P.J. Baxter, P.H. Adams, T.-C. Aw, A. Cockcroft and J.M. Harrington (Editors), *Hunter's Diseases of Occupations*. Arnold, London, pp. 123-178.

Baxter, P.J. and Ancia, A., 2002. Human health and vulnerability in the Nyiragongo volcano crisis Democratic Republic of Congo 2002: Final Report to the World Health Organisation, World Health Organisation.

Baxter, P.J., Baubron, J.-C. and Coutinho, R., 1999. Health hazards and disaster potential of ground gas emissions at Furnas volcano, Sao Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92(1-2): 95-106.

Beaubien, S.E., Ciotoli, G. and Lombardi, S., 2003. Carbon dioxide and radon gas hazard in the Alban Hills area (central Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123(1-2): 63-80.

Brimblecombe, P., 1996. *Air Composition and Chemistry*. Cambridge University Press, Cambridge.

Carapezza, M.L., Badalamenti, B., Cavarra, L. and Scalzo, A., 2003. Gas hazard assessment in a densely inhabited area of Colli Albani Volcano (Cava dei Selci, Roma). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123(1-2): 81-94.

Cronin, S.J. and Sharp, D.S., 2002. Environmental impacts on health from continuous volcanic activity at Yasur (Tanna) and Ambrym, Vanuatu. *International Journal of Environmental Health Research*, 12: 109-123.

Durand, M. and Scott, B.J., 2003. An investigation of geothermal soil gas emissions and indoor air pollution in selected Rotorua buildings, Institute of Geological & Nuclear Sciences Science Report 2003/28.

Faive-Pierret, R. and Le Guern, F., 1983. Health risks linked with inhalation of volcanic gases and aerosols. In: H. Tazieff and J.C. Sabroux (Editors), *Forecasting Volcanic Events*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 69-81.

Farrar, C.D., Sorey, M.L., Evans, W.C., Howle, J.F., Kerr, B.D., Kennedy, B.M., King, C.-Y. and Southon, J.R., 1995. Forest-killing diffuse CO₂ emission at Mammoth Mountain as a sign of magmatic unrest. *Nature*, 376: 675-678.

Hayakawa, Y., 1999. Catalog of volcanic eruptions during the past 2000 years in Japan. *Journal of Geography*, 108(4): 472-488.

Hill, P.M., 2000. Possible asphyxiation from carbon dioxide of a cross-country skier in eastern California: a deadly volcanic hazard. *Wilderness and Environmental Medicine*, 11: 192-195.

Itikarai, I. and Stewart, R., 1993, Rabual: in Annual report of the world volcanic eruptions, in 1990, *Bulletin of Volcanic Eruptions (BVE)*. 30: 103-104.

Le Guern, F., Tazieff, H. and Faivre-Pierret, R., 1982. An example of health hazard: people killed by gas during a phreatic eruption: Dieng Plateau (Java, Indonesia), February 20th 1979. *Bulletin Volcanologique*, 45(2): 153-156.

Lide, D.R. (Ed.), 2003. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 84th edn. CRC Press. Boca Raton, Florida.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1981. *Occupational Health Guidelines for Chemical Hazards*, DHHS (NIOSH) Publication No. 81-123. <http://www.cdc.gov/niosh/81-123.html>.

Oppenheimer, C., Francis, P., Burton, M., Maciejewski, A.J.H. and Boardman, L., 1998. Remote measurement of volcanic gases by Fourier transform infrared spectroscopy. *Applied Physics B*, 67: 505-515.

Othman-Chande, M., 1987. The Cameroon volcanic gas disaster: An analysis of a makeshift response. *Disasters*, 11(2): 96-101.

Perret, F.A., 1924. The Vesuvius eruption of 1906: study of a volcanic cycle. The Carnegie Institution of Washington, 151 pp.

Sax, N.I. and Lewis, R.J., Sr., 1989. *Dangerous Properties of Industrial Materials*, 7th edn. Van Nostrand Reinhold. New York.

Sigurdsson, H., Devine, J.D., Tchoua, F.M., Presser, T.S., Pringle, M.K.W. and Evans, W.C., 1987. Origin of the lethal gas burst from Lake Monoun, Cameroun. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31(1-2): 1-16.

Smithsonian Institution, 1979. Dieng Volcanic Complex. *Scientific Event Alert Network (SEAN) Bulletin*, vol. 4, no. 2. Smithsonian Institution, 1986. Concepcion. *Scientific Event Alert Network (SEAN) Bulletin* v. 11, no. 5.

Smithsonian Institution, 2002. Nyiragongo. *Bulletin of the Global Volcanism Network (BGVN)*, v. 27, no. 4.

Sorey, M.L., Evans, W.C., Kennedy, B.M., Farrar, C.D., Hainsworth, L.J. and Hausback, B., 1998. Carbon dioxide and helium emissions from a reservoir of magmatic gas beneath Mammoth Mountain, California. *Journal of Geophysical Research*, 103(B7): 15,303-15,323.

Thorarinsson, S., 1979. On the damage caused by volcanic eruptions with special reference to tephra and gases. In: P.D. Sheets and D.K. Grayson (Editors), *Volcanic Activity and Human Ecology*. Academic Press Inc., New York and London, pp. 125-159.

Hidrocloruro (HCl)

Propiedades

El hidrocloreuro (HCl) es un gas incoloro con un irritante olor acre detectable a ~0.8 ppm. Es muy soluble en agua (673 g L⁻¹ a 30°C) (Gangolli, 1999) y reacciona a la humedad ambiental formando una niebla. No es inflamable en el aire y tiene una densidad de 1.49 g L⁻¹ a 25°C y 1 atm (Lide, 2003), 1.2 veces mas que el aire ambiental. Las concentraciones típicas de HCl en penachos volcánicos diluidos, varían entre 0.1-3 ppm, comparado con el básico troposférico de 0.000001-0.001 ppm, y el gas tiene un tiempo de permanencia en la atmósfera baja de aproximadamente 4 días (Brimblecombe, 1996; Oppenheimer et al., 1998).

Efectos a la exposición

La alta solubilidad de HCl significa que la exposición frecuentemente será de una mezcla de gas y aerosol. HCl es altamente irritante a los ojos y membranas mucosas. En contacto con la piel puede causar inflamaciones o quemaduras (NIOSH, 1981). Exposiciones prolongadas, elevadas, a niebla con HCl puede dar paso a la erosión de los dientes y puede causar ulceraciones en el interior de la nariz. Su inhalación puede causar ahogo, tos e hinchazón en el sistema respiratorio, dependiendo de la severidad de la exposición. Los umbrales de concentración para efectos a la salud se muestran en la siguiente tabla.

Efectos a la salud por exposición respiratoria a hidrocloreuro

(Baxter, 2000; Faivre-Pierret and Le Guern, 1983 y sus referencias; NIOSH, 1981; Saxo y Lewis, 1989).

Límites de exposición (ppm)	Efectos a la salud
5<	Tos
35	Irritación de garganta solo después de corto tiempo
35<	Severas dificultades respiratorias y inflamación de la piel o quemaduras
10-50	Máximo nivel que puede ser ininterrumpido durante horas
100<	Hinchazón de los pulmones y a menudo espasmo en la garganta
50-1,000	Exposición máxima posible de una hora
1,000-2,000	Muy peligroso aún en una corta exposición

Lineamientos existentes

Solamente existen guías ocupacionales para HCl gaseoso, las cuales se dan a continuación en la tabla.

Lineamientos ocupacionales para HCl

EU	5	8,000	8 horas TWA	OEL		Comisión Directiva 96/94		a
	10	15,000	STEL	OEL		Comisión Directiva 96/94		b
UK	5	8,000	15 min.	MEL		ILV		b
	1	2,000	8 horas TWA	MEL		ILV		c
USA	5	7,000	8 horas TWA	PEL		Regulación OSHA (Standards - 29 CFR)	1	d

	5	7,000	techo	REL	2003	NIOSH		d
	3		1 hora	ERPG-1	1998	Guía para Plan de respuesta a Emergencias		e
	20		1 hora	ERPG-2	1998	Guía para Plan de respuesta a Emergencias		e
	150		1 hora	ERPG-3	1998	Guía para Plan de respuesta a Emergencias		e

1. ppm por volumen a 25°C y 760 torr.
 - a. http://europa.eu.int/comm/employment_social/health_safety/docs/oels_en.pdf
 - b. HSE, 2002. Occupational Exposure limits 2002. HSE Books, Sudbury
 - c. OSHA Standards Website
 - d. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards (NPG) <http://www.cdc.gov/niosh/npg/npg.html>
 - e. AIHA Emergency Response Planning Guidelines Copmmittee, 2002. Emergency Response Planning Guidelines 2002. Complete set, American Industrial Hygiene Association, Fairfax.

Ejemplos volcánicos e incidentes

Es mucho más común que se hagan mediciones de flujos de HCl en lugar de las de concentraciones, y no hay incidentes involucrando altas concentraciones de HCl. De todos modos, las concentraciones de HCl cerca de respiraderos pueden exceder los estándares ocupacionales:

- Yasur, Vanuatu. Las muestras de gas colectadas en el borde del cráter en septiembre de 1988 contenían concentraciones de HCl entre 3 y 9 ppm (SEAN, 13:12).
- Kilauea, Hawai: Las concentraciones de gas en los respiraderos del Pu'u O'o fueron desde 0.10 ppm a 19.15 ppm en Julio de 2003 (C. Witham, datos no publicados). Los niveles de HCl en fumarolas de LAZE densas formadas donde la lava del Kilauea llegó al mar en marzo de 1990 promediaron 7.1 ppm (Kullman et al., 1994), excediendo los niveles ocupacionales. Estas concentraciones bajaron rápidamente a mayor distancia de la fuente. (Nota: la principal fuente de cloro para LAZE es el agua de mar, no los gases volcánicos). Las mediciones de 2004 dieron concentraciones de HCl en el rango de 3-20 ppm, justo sobre el Pu'O'o en el borde oriental de la zona, y 1.5-4.5 ppm cerca de la fuente de entrada de la fumarola al mar. Esto parecería representar valores mínimos. (HVO, datos no publicados).
- Popocatepetl, México: Concentraciones de HCl cercanas al respiradero en febrero de 1997 fueron de ~1 ppm (2,000 $\mu\text{g m}^{-3}$) (Goff et al., 1998), lo que es igual al límite ocupacional promedio a 8 horas, para el reino Unido.
- Villarrica, Chile: Las concentraciones de HCl en el lago de lava de Villarrica ocasionalmente excede los lineamientos ocupacionales de 5 ppm de los EEUU (Witter y Delmelle, 2004).
- Masaya, Nicaragua: En marzo de 1999, las concentraciones máximas en la fumarola sobre del Masaya, fueron de un promedio de >23 ppm (Horrocks et al., 1999) excediendo en mucho casi todos los lineamientos. Mediciones hechas a 14 km con viento a favor desde el respiradero, en marzo de 1998, dieron 0.3 ppm (Horrocks, 2001). Las máximas concentraciones de HCl al

borde del cráter en mayo de 2001 con 0.902 ppm (1,300 $\mu\text{g m}^{-3}$) (Allen et al., 2002) lo cual esta justo bajo los lineamientos ocupacionales para 8 horas, en el Reino Unido.

Referencias

Allen, A.G., Oppenheimer, C., Ferm, M., Baxter, P.J., Horrocks, L.A., Galle, B., McGonigle, A.J.S. and Duffell, H.J., 2002. Primary sulfate aerosol and associated emissions from Masaya Volcano, Nicaragua. *Journal of Geophysical Research*, 107(D23).

Baxter, P.J., 2000. Gases. In: P.J. Baxter, P.H. Adams, T.-C. Aw, A. Cockcroft and J.M. Harrington (Editors), *Hunter's Diseases of Occupations*. Arnold, London, pp. 123-178.

Brimblecombe, P., 1996. *Air Composition and Chemistry*. Cambridge University Press, Cambridge.

Faive-Pierret, R. and Le Guern, F., 1983. Health risks linked with inhalation of volcanic gases and aerosols. In: H. Tazieff and J.C. Sabroux (Editors), *Forecasting Volcanic Events*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 69-81.

Gangolli, S. (Ed.), 1999. *The Dictionary of Substances and their Effects*, 2nd edn. The Royal Society of Chemistry. Cambridge.

Goff, F., Janik, C.J., Delgado, H., Werner, C., Counce, D., Stimac, J.A., Siebe, C., Love, S.P., Williams, S.N., Fischer, T. and Johnson, L., 1998. Geochemical surveillance of magmatic volatiles at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 110(6): 695-710.

Kullman, G.J., Jones, W.G., Cornwell, R.J. and Parker, J.E., 1994. Characterization of air contaminants formed by the interaction of lava and sea water. *Environmental Health Perspectives*, 102(5): <http://ehpnet1.niehs.nih.gov/docs/1994/102-5/kullman.html>.

Lide, D.R. (Ed.), 2003. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 84th edn. CRC Press. Boca Raton, Florida.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1981. *Occupational Health Guidelines for Chemical Hazards*, DHHS (NIOSH) Publication No. 81-123. <http://www.cdc.gov/niosh/81-123.html>.

Oppenheimer, C., Francis, P., Burton, M., Maciejewski, A.J.H. and Boardman, L., 1998. Remote measurement of volcanic gases by Fourier transform infrared spectroscopy. *Applied Physics B*, 67: 505-515.

Sax, N.I. and Lewis, R.J., Sr., 1989. *Dangerous Properties of Industrial Materials*, 7th edn. Van Nostrand Reinhold. New York.

Smithsonian Institution, 1988. Yasur. *Scientific Event Alert Network (SEAN) Bulletin*, v. 13, no. 12.

Witter, J.B. and Delmelle, P., 2004. Acid gas hazards in the crater of Villarrica volcano (Chile). *Revista Geologica de Chile*, 31(2): 273-277.

Fluoruro de Hidrógeno (HF)

No existen ejemplos documentados de HF volcánico gasificado en concentraciones altas en locaciones donde pudiera producir un efecto adverso sobre la salud humana. Aún así, durante una explosión eruptiva HF y fluoruro pueden condensarse en partículas de cenizas y tefra en la fumarola, formando una capa exterior de fluorine absorbida en partículas. Partículas más pequeñas tienen una superficie más amplia de manera que pueden absorber más fluoruro por unidad de masa que las partículas grandes (Okarsson, 1980). Estas pequeñas partículas transportadas más lejos de la fuente volcánica, de manera que su mayor capacidad generadora de venenos se extiende considerablemente más allá de la fuente volcánica. Ya que el fluoruro es altamente soluble en agua, rápidamente se introduce en las corrientes de agua si la ceniza encuentra suelo húmedo o lluvia (Gregory, 1996). Para referirnos a este peligro adicional particular, los lineamientos de niveles de fluoruro para el agua potable se presentan aquí, así como los de HF atmosférico.

Propiedades

El hidrógeno de fluoruro (HF) es un gas incoloro con un olor fuertemente irritante. Es soluble al agua en todas las proporciones (Gangolli, 1999) y no es inflamable. Tiene un sabor ácido y reacciona a la humedad del aire formando una neblina. El gas es 30% menos denso que el aire [0.82 g L^{-1} a 25°C y 1 atm (Lide, 2003)]. Las concentraciones típicas de HF en fumarolas volcánicas diluidas son de $<1 \text{ ppm}$, y en nivel de la base troposférica es muy bajo (Bribblecombe, 1996; Oppenheimer et al., 1998).

Efectos a la exposición

La absorción de fluoruro por exposición es principalmente a través del tracto respiratorio. Su alta solubilidad en agua hace que la absorción por la nariz y tracto respiratorio superior sea rápido. Los vapores del hidrógeno de fluoruro son irritantes severos para los ojos, membranas mucosas y sistema respiratorio superior y la inhalación puede producir úlceras en el tracto respiratorio superior. Las exposiciones de corta duración causan irritación extrema y quemaduras en la piel y membranas mucosas. Exposiciones frecuentes o prolongadas a bajas concentraciones, pueden causar cambios en los huesos así como irritación crónica en la nariz, garganta y pulmones (NIOSH, 1981). En la siguiente tabla se describen los umbrales de concentración que afectan la salud:

Efectos a la salud por exposición respiratoria de gas hidrógeno de fluoruro (Baxter, 2000; NIOSH, 1981; Sax y Lewis, 1989)

Límites de exposición (ppm)	Efectos sobre la Salud
<3	Irritación de nariz y ojos
$3<$	Síntomas respiratorios y oculares pronunciados, incluyendo ardor de garganta y tos después de 1 hora
30	Los síntomas respiratorios empeoran. Pueden ser tolerados durante varios minutos
50-250	Peligroso aún durante una breve exposición
120	Máxima concentración en el aire puede ser tolerada por un minuto. Comezón sobre la piel, conjuntivitis e irritación del tracto respiratorio.

Depósitos de HF volcánico en el agua potable constituyen una seria amenaza de fluorosis. Los umbrales de concentración de fluoruro en agua se describen en la tabla que sigue:

Efectos sobre la salud por ingestión de fluoruro en agua potable
(siguiendo a Kaminsky et al., 1990)

Concentración (mg L ⁻¹)	Efectos sobre la salud	Población afectada (%)
1	Fluorosis dental	1 – 2
2	Fluorosis dental	10
2.4 - 4.1	Fluorosis dental	33
8	Osteosclerosis (en rayos X)	-
>10	Fluorosis en esqueleto	-

Lineamientos existentes

Solamente existen lineamientos ocupacionales para exposición al gas HF. Los depósitos de cenizas y tefra y la subsecuente introducción de fluoruro en la provisión de agua constituyen un gran peligro (ver siguiente tabla). La aplicación de los valores indicados en el agua potable fluorada deben tomar en cuenta las condiciones climáticas locales y cualquier incremento consecuente de los niveles en el agua de consumo.

Lineamientos ocupacionales para gas HF

País/Institución	Nivel (ppm)	Nivel µg m ⁻³	Tiempo promedio	Tipo de Lineamiento	Fecha de implementación	Ley relevante	No-tas	Ref
UE	-	2,500	8 horas TWA	Límite de exposición ocupacional (OEL)		Recomendaciones adoptadas		a
	1	830	STEL	OEL		Recomendaciones adoptadas		a
UK	3	2,500	15 min	MEL		New, IOELV		b
	1.8	1,500	8 horas TWA	MEL		New, IOELV		b
USA	6	5,000	15 min techo	REL	2003	NIOSH		c
	3	2,500	8 horas TWA	PEL		regulación OSHA (Standards -29 CFR)	1	d
	3	2,500	10 horas TWA	REL	2003	NIOSH		c
	2		10 min	ERPG-1	1999	Guía para Plan de respuesta a Emergencias		e
	50		10 min	ERPG-2	1999	Guía para Plan de respuesta a Emergencias		e

	170		10 min	ERPG-3	1999	Guía para Plan de respuesta a Emergencias		e
	2		1 hora	ERPG-1	1997	Guía para Plan de respuesta a Emergencias		e
	20		1 hora	ERPG-2	1997	Guía para Plan de respuesta a Emergencias		E
	50		1 hora	ERPG-3	1997	Guía para Plan de respuesta a Emergencias		e

1. ppm por volumen a 25° y 760 torr.

- http://europa.eu.int/comm/employment_social/health_safety/docs/oels_en.pdf
- HSE, 2002. Occupational Exposure Limits 2002. HSE Books, Sudbury.
- NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards (NPG). <http://www.cdc.gov/niosh/npg/npg.html>
- OSHA Standards Website
- AIHA Emergency Response Planning Guidelines Committee, 2002. Emergency response Planning Guidelines 2002 Complete Set, American Industrial Hygiene Association, Fairfax.

Niveles de tolerancia de fluoruro en el agua potable

País/Institución	Nivel (mg L ⁻¹)	Fecha de implementación	Ley relevante	Notas	Ref.
UK	1.5	2000	Regulaciones para suministro de agua (calidad del agua) SI N° 3184		a
WHO	1.5	1984		1	b
USA	4	2004	EPA 822-R-04-005	2	c

- Basado en el consumo de 2 litros de agua por día. Mayores concentraciones pueden elevar la fluorosis dental en algunos niños
- Este es el nivel máximo de contaminación y esta actualmente en revisión. La regulación secundaria no obligatoria de agua potable para la prevención de efectos cosméticos o estéticos es de 2 mg L⁻¹.

- <http://www.dwi.gov.uk/regs/si3184.html>

- b. WHO, 2004. Guidelines for drinking-water quality, 3rd edn. World Health Organisation, Geneva, and http://www.who.int/water_sanitation_health/dwg/gdwq3/en/
- c. EPA 2004 Edition of the drinking water standards and health advisories, <http://www.epa.gov/waterscience/drinking/>

Efectos sobre animales de pastoreo

Es frecuente que ocurra envenenamiento en ovejas donde el contenido de fluoruro en pastos secos excede 250 ppm. La situación más peligrosa para los animales de pastoreo está generalmente a una distancia del volcán en erupción donde la capa de cenizas y tefra es tan delgada que no se puede diferenciar del pasto. El envenenamiento puede ocurrir en regiones donde se ha depositado sólo 0.5 mm de cenizas o tefra. El envenenamiento agudo puede venir acompañado de depresión, salivación, pérdida de apetito y de coordinación, respiración anormal, secreciones nasales, ataques convulsivos, edema pulmonar, daño renal o hepático, ceguera, coma y muerte (O'Hara et al., 1982).

Ejemplos volcánicos e incidentes

Las mediciones de flujos de HF son mucho más comunes que las de concentraciones y no hemos podido encontrar reportes confirmando los impactos directos de altas concentraciones de HF gaseoso en personas. En general, parece que niveles primarios de HF volcánico en volcanes con fugas de gases son raramente peligrosos, aunque la contaminación del agua potable y de los suelos por fluoruro como efecto secundario, ha sido documentada.

Popocatepetl, México: Concentraciones de HF cerca de los respiraderos, en febrero de 1997 fueron de ~0.3 ppm (250 $\mu\text{g m}^{-3}$) (Goff et al., 1998), muy por debajo de los lineamientos ocupacionales.

Masaya, Nicaragua: Las máximas concentraciones en la fumarola en el borde del cráter en mayo de 2001 fueron de 0.567 ppm (448 $\mu\text{g m}^{-3}$) (Allen et al., 2002), nuevamente, muy por debajo de los lineamientos ocupacionales, aunque en marzo de 1999, las concentraciones máximas en la fumarola promediados sobre el cráter del Masaya fueron de > 4 ppm (Horrocks et al., 1999) excediendo muchas de los lineamientos para exposiciones de corto y largo tiempo.

Kilawea, Hawaii: Las mediciones de HF en fumarolas formadas por la intracción de lava y agua de mar en marzo de 1990 estuvieron por debajo de los lineamientos a <1 ppm (Kullman et al., 1994), perolas mediciones en el Pu'uO'o en 2004 dieron concentraciones de HF variando de ~3-15 ppm, muy por encima de la mayoría de los límites de exposición (USGS, Hawaiian Volcano Observatory, datos no publicados).

Se han reportado frecuentemente impactos sobre animales de pastoreo en vegetación y suelos mezclados con cenizas, así como de humanos afectados por consumir agua potable contaminada.

Nyiragongo, DR Congo: En 2003 en los tanques colectores de agua de lluvia en varias localidades dominadas por vientos bajando del Nyiragongo se encontró concentraciones de fluoruro hasta de 23 mg L^{-1} , 15 veces mayor que los lineamientos de WHO

Lonquimay, Chile: Durante la actividad de 1988, 100,000 animales de granja fueron afectados por cenizas contaminadas de fluoruro y miles de personas sufrieron efectos sobre la salud asociados con altas concentraciones de cenizas finas (ver Particulate Matter) que pudieron haber sido cubiertas por fluoruro (SEAN 14:6-7). La mayoría de estas personas fueron por consecuencia, evacuadas.

Etna, Italia; Kilauea, Hawai; La Soufriere, Guadalupe: Altos niveles de fluoruro se encontraron en la vegetación cercana a estos volcanes (Garrec et al., 1977; Notcutt and Davis, 1989; Notcutt and Davies, 1993).

Caldera Furnas, Azores: Altos niveles de fluoruro en líquenes sugieren que las emisiones volcánicas pudieron haber sido la causa de altos niveles de F en agua, causantes de fluorosis dental en la población local (Notcutt y Davies, 1999).

Hekla, Islandia: Después de la erupción de 1970, una combinación de una pobre cosecha de heno con fluorosis causada por absorción de fluoruro en las cenizas, causó la muerte de 3% de las ovejas adultas y 8-9% de los corderos en áreas donde hubo tan poco como 1 mm de espesor de tefra (Thorarinsson y Siigvaldason, 1972, O'Hara et al., 1982).

Ruapehu, Nueva zelandia: Las muertes de varios miles de ovejas después de la erupción de 1995 se piensa que se debieron a la fluorosis y casos aislados de fluorosis en ganado también se reportaron después de ambas erupciones de 1995 y 1996 (Cronin et al., 2003).

Cráteres Laki, Islandia: Después de las erupciones de 1783 y 1784, se adjudica la muerte de una alta proporción de ganado a la fluorosis en la isla (11,500 vacunos, 28,000caballos y 190,000ovejas) (Gregory, 1996).

Referencias

Allen, A.G., Oppenheimer, C., Ferm, M., Baxter, P.J., Horrocks, L.A., Galle, B., McGonigle, A.J.S. and Duffell, H.J., 2002. Primary sulfate aerosol and associated emissions from Masaya Volcano, Nicaragua. *Journal of Geophysical Research*, 107(D23).

Brimblecombe, P., 1996. *Air Composition and Chemistry*. Cambridge University Press, Cambridge.

Cronin, S.J., Neall, V.E., Lecointre, J.A., Hedley, M.J. and Loganathan, P., 2003. Environmental hazards of fluoride in volcanic ash: a case study from Ruapehu volcano, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(3-4): 271-291.

Gangolli, S. (Ed.), 1999. *The Dictionary of Substances and their Effects*, 2nd edn. The Royal Society of Chemistry. Cambridge.

Garrec, J.P., Lounowski, A. and Plebin, R., 1977. The influence of volcanic fluoride emissions on the surrounding vegetation. *Fluoride*, 10(4): 152-156.

Goff, F., Janik, C.J., Delgado, H., Werner, C., Counce, D., Stimac, J.A., Siebe, C., Love, S.P., Williams, S.N., Fischer, T. and Johnson, L., 1998. Geochemical surveillance of magmatic volatiles at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 110(6): 695-710.

Gregory, N., 1996. Toxicity hazards arising from volcanic activity. *Surveillance*, 23(2): 14-15.

Kaminsky, L.S., Mahoney, M.C., Leach, J.F., Melius, J.M. and Miller, M.J., 1990. Fluoride: benefits and risks of exposure. *Critical Reviews in Oral Biology and Medicine*, 1: 261-281.

Kullman, G.J., Jones, W.G., Cornwell, R.J. and Parker, J.E., 1994. Characterization of air contaminants formed by the interaction of lava and sea water. *Environmental Health Perspectives*, 102(5): <http://ehpnet1.niehs.nih.gov/docs/1994/102-5/kullman.html>.

Lide, D.R. (Ed.), 2003. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84th edn. CRC Press. Boca Raton, Florida.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1981. Occupational Health Guidelines for Chemical Hazards, DHHS (NIOSH) Publication No. 81-123. <http://www.cdc.gov/niosh/81-123.html>.

Notcutt, G. and Davies, F., 1989. Accumulation of volcanogenic fluoride by vegetation: Mt. Etna, Sicily. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 39(4): 329-333.

Notcutt, G. and Davies, F., 1993. Dispersion of gaseous volcanogenic fluoride, island of Hawaii. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 56: 125-131.

Notcutt, G. and Davies, F., 1999. Biomonitoring of volcanogenic fluoride, Furnas Caldera, Sao Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92(1-2): 209-214.

O'Hara, P.J., Fraser A.J., James M.P., 1982. Superphosphate poisoning in sheep: the role of fluoride. *New Zealand Veterinary Journal*, 30: 191-201.

Oppenheimer, C., Francis, P., Burton, M., Maciejewski, A.J.H. and Boardman, L., 1998. Remote measurement of volcanic gases by Fourier transform infrared spectroscopy. *Applied Physics B*, 67: 505-515.

Oskarsson, N., 1980. The interaction between volcanic gases and tephra: fluorine adhering to tephra of the 1970 Hekla eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 8, 251-266.

Sax, N.I. and Lewis, R.J., Sr., 1989. *Dangerous Properties of Industrial Materials*, 7th edn. Van Nostrand Reinhold. New York.

Smithsonian Institution, 1989. Lonquimay. *Scientific Event Alert Network (SEAN) Bulletin*, v. 14, nos. 6-7.

Thorarinsson, S. and Sigvaldason, G.E., 1972. The Hekla eruption of 1970. *Bulletin Volcanologique*, 36(2): 269-288.

Material particularizado (PM) y Aerosol

Propiedades

Un aerosol es una suspensión de partículas sólidas o líquidas en el aire. Para propósitos de salud, el aerosol o material particularizado (PM) se define típicamente por su tamaño, donde las partículas más pequeñas tienen mayor impacto sobre la salud. Los valores más comúnmente citados para PM son material totalmente particularizado (TPM) o partículas totalmente suspendidas (TSP); partículas con un diámetro $< 10 \mu\text{m}$ (PM₁₀); y partículas con un diámetro de $< 2.5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}). Los efectos y lineamientos dados aquí aplican solamente al tamaño del aerosol, pero las propiedades de superficie, composición química e interacciones multi-especies pueden también ser importantes en el control de los impactos y esto requiere de un estudio posterior. El halógeno y algunos aerosoles de sulfato son ácidos, y se piensa que el PM ácido puede ser de mayor riesgo para la salud que los no ácidos. Los metales contenidos en una fumarola volcánica, tales como el mercurio, iridio, arsénico y otros pueden catalizar reacciones, y particularmente en combinación con gases ácidos y aerosoles, incrementan los efectos sobre la salud. Adicionalmente, los aerosoles volcánicos son típicamente PM 2.5 (por ejemplo, Allen et al., 2000), un tamaño de fracción capaz de penetrar en la parte más profunda del pulmón. La ceniza fina es un aerosol y también puede ser ácida si ha absorbido gases ácidos en la fumarola. Ciertos tipos de ceniza pueden ser asociados con el riesgo de silicosis (por ejemplo, Baxter et al., 1999). Estos impactos amplios no se consideran aquí.

Efectos a la exposición

PRECAUCIÓN : La mayoría de los estudios sobre efectos a la exposición están basados en la contaminación urbana y no son representativos de la contaminación volcánica. Una alta proporción de aerosoles volcánicos es ácida y hay preocupación por que el aerosol ácido puede ser más severo para el sistema respiratorio que el aerosol no ácido. Los efectos y lineamientos provistos aquí deben ser tomados, por lo tanto, sólo como indicativos.

Puesto que la profundidad a la que puede penetrar un material particularizado en el sistema respiratorio depende de su tamaño, las partículas finas (PM_{2.5}) tienen una alta probabilidad de depositarse en el alveolo de los pulmones y se asocian con un mayor riesgo a la salud que las partículas grandes. Partículas de este tamaño también tienen un tiempo de permanencia en la troposfera de días a semanas, y pueden desplazarse a distancias de miles de kilómetros, siendo así ampliamente dispersadas. Los efectos de una partícula aún más pequeña que "ultrafina" ($< 0.1 \mu\text{m}$ de diámetro), no ha sido bien entendida, pero es de preocupación actual. Estudios recientes sugieren que aún a bajos niveles ($< 100 \mu\text{g m}^{-3}$) en exposición corta a PM de cualquier tamaño, se asocia con efectos a la salud (WHO, 1999), y esa fuerte acidez del aerosol o contenido alto en sulfato, puede contribuir a efectos asociados con PM_{2.5}. Los estudios epidemiológicos muestran que ambos, mortalidad diaria y admisiones hospitalarias aumentan con mayor PM en la capa superior de la superficie y que los efectos por PM_{2.5} se amplían por encima de los de PM₁₀ (por ejemplo, Braga et al., 2001). La escala de incrementos son sólo en el orden de la mitad a un bajo porcentaje y estas asociaciones son válidas solamente por un período de pocos días. Una vez que la exposición al aire contaminado ha terminado, no hay un efecto a largo plazo, a menos que la dosis inicial haya sido muy alta (esto es más común en un accidente industrial que en un contexto volcánico). Los impactos de PM a corto plazo son en el sistema respiratorio y pulmonía. Los asmáticos y gente con problemas

respiratorios pre-existentes pueden experimentar reacciones a más bajas concentraciones, que otros.

Lineamientos existentes

Existen lineamientos ambientales y ocupacionales para material particularizado. Algunos lineamientos son para material totalmente particularizado (TPM), mientras que otros son para específicos tamaños de fracciones – usualmente PM10 o PM2.5. No existen lineamientos para aerosol ácido. En 1971, la Agencia Norteamericana para la Protección Ambiental (EPA) estableció el nivel de material particularizado que puede significar peligro para la salud de las personas a $1,000 \mu\text{g}^{-3}$ (promedio 24 horas). Hay que destacar que este nivel se reduce cuando el dióxido de azufre se presenta en elevadas concentraciones. Las tablas que siguen muestran que los valores de EPA son considerablemente más bajos que los de los lineamientos ocupacionales actualizados en USA. La inhalación de aerosoles puede ser prevenida utilizando respiradores adecuadamente standarizados.

Lineamientos de calidad del aire para material particularizado/aerosol

País/institución	Aerosol	Nivel ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Tiempo promedio	Tipo de lineamiento	Fecha de implementación	Ley relevante	Ref.
Argentina	TPM	150	1 mes		16/04/1973	Ley 20.284	a
Chile	TPM	260	24 horas	No exceder más de una vez al año	22/06/1978	Resolución N° 12 15	a
		75	Anual		22/06/1978	Resolución N° 12 15	a
	PM10	150	24 horas	24 hs Standard no exceder el percentil 98th anual	25/05/1998	Decreto Supremo N° 59/98	a
China ¹	TPM	120(i) 300(ii) 500(iii)	24 horas		Enero 1996	GB3095-1996	a
		80 (j) 200(ii) 300(iii)	Anual		Enero 1996	GB3095-1996	a
	PM10	50(i) 150(ii) 250(iii)	24 horas		11/01/1982	GB3095-1996	a
		40(i) 100(ii) 150(iii)	Anual		11/01/1982	GB3095-1996	a
Colombia	TPM	400	24 horas	No exceder más de una vez al año		Decreto N°2	a
		100	Anual			Decreto N°2	a
Costa Rica		240	24 horas	No exceder más de		reglamento sobre inmisión de	a

	TPM			una vez al año		contaminantes atmosféricos	
		90	Anual			reglamento sobre inmisión de contaminantes atmosféricos	a
	PM10	150	24 horas			reglamento sobre inmisión de contaminantes atmosféricos	a
		50	Anual			reglamento sobre inmisión de contaminantes atmosféricos	a
Ecuador	TPM	250	24 horas	No exceder más de una vez al año	15/07/1991	Registro Oficial N° 726	a
		80	Anual		15/07/1991	Registro Oficial N° 726	a
Unión Europea	PM10	50	24 horas	No exceder más de 35 veces al año	1/01/2005	COUNCIL DIRECTIVE 1999/30/EC	b
		40	Anual		01/01/2005	COUNCIL DIRECTIVE 1999/30/EC	b
Japón	PM10	200	1 hora		8/05/1973		c
		100	24 horas		8/05/1973		c
México	TPM	260	24 horas	No exceder-se	23/12/1994	NOM-024-SSA1-1993	a
		75	Anual		23/12/1994	NOM-024-SSA1-1993	a
	PM10	150	24 horas	No exceder más de una vez al año	23/12/1994	NOM-025-SSA1-1993	a
		50	Anual		23/12/2004	NOM-025-SSA1-1993	a
Nueva Zelandia	PM10	50	24 horas		Mayo 2002		d
		20	Anual		Mayo 2002		d
Reino Unido	PM10	50	24 horas	No exceder más de una 35 veces al año	31/12/2004	The air quality (England) regulations 2000	e
		40	Anual		31/12/2004	The air quality (England) regulations 2000	e
EEUU		150	24 horas	Primaria y secundaria	1990	NAAQS	f

	PM10	50	Anual	Primaria y secundaria	1990	NAAQS	f
	PM2.5	65	24 horas	Primaria y secundaria	1990	NAAQS	f
		15	Anual	Primaria y secundaria	1990	NAAQS	f

1. (i) áreas sensibles de protección especial (ii) típicas áreas urbana y rural (iii) áreas especiales industriales

- <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/e/fulltex/normas/normas.html>
- European commission Guidelines Website
- <http://www.env.go.jp/en/lar/regulation/aq.html>
- <http://www.mfe.govt.nz/publications/air/ambient-guide-may02.pdf>
- <http://www.defra.gov.uk/environment/airquality/airqual/index.htm>
- <http://www.epa.gov/air/criteria.html>

Sumario de lineamientos ambientales

Las tablas anteriores muestran la tremenda variación que existe entre los lineamientos internacionales. La diferencia entre los países puede explicarse por la antigüedad de la guía, los logros prácticos de los niveles de contaminación predichos o corrientes basados en estándares, o la información sobre la cual se basó el Standard (por ejemplo, estudios epidemiológicos vs. Niveles de contaminación real). La tabla que sigue resume la variación de rangos de los principales valores de lineamientos para cada tamaño de partícula:

Resumen de la variación de los niveles de materia ambiental particularizada

Período promediado	TPM		PM10		PM2.5	
	Min ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Max ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Min ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Max ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Min ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Max ($\mu\text{g m}^{-3}$)
24 horas	120	500	50	250	65	65
anual	40	150	20	150	15	15

Lineamientos ocupacionales para material particularizado/aerosol

País / Institución	Aerosol	Nivel ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Período promedio	Tipo de lineamiento	Ley relevante	Ref.
USA	TPM	15,000	8 horas TWA	Límite de exposición permisible (PEL)	Regulaciones OSHA (Standard-29 CFR)	a
	PM10	5,000	8 horas TWA	Límite de exposición permisible (PEL)	Regulaciones OSHA (Standard-29 CFR)	a

- [OSHA Standards Website](#)

Ejemplos volcánicos e incidentes

Las emisiones volcánicas particularizadas pueden causar problemas sobre una amplitud de distancias desde la chimenea y los altos niveles de material particularizado puede ser encontrado en áreas a decenas de kilómetros del volcán (por ejemplo Yano et al., 1990). Adicionalmente, en la degasificación de los volcanes, los niveles de sulfato aerosol (SO_4^{2-}) cercanos a la chimenea pueden ser peligrosamente altos:

- *Masaya, Nicaragua*: Las máximas concentraciones de sulfato se registraron al borde del cráter en diciembre de 2001, con $\sim 165 \mu\text{g m}^{-3}$ (promedio de 6 horas) (Mather et al., 2003). El valor medio fue de $\sim 125 \mu\text{g m}^{-3}$, que es el doble del lineamiento ambiental para 24 horas en los EEUU, para $\text{PM}_{2.5}$, aunque ni cercanamente tan alto como el lineamiento ocupacional de PM_{10} . Puesto que el sulfato aerosol está consistentemente en el término de $\text{PM}_{2.5}$, y es más bien fuertemente ácido, estas mediciones implican un posible peligro para la salud de los vulcanólogos que trabajan en el cráter y turistas que visitan el parque vehicular al borde del cráter. El impacto adverso de los depósitos llevados por el viento también se reconoce aquí (Delmelle et al., 2002).

En algunos casos, en las concentraciones de aerosol en las fumarolas las concentraciones pueden ser muy bajas. Por ejemplo, las concentraciones de SO_4^{2-} 10-300 kilómetros viento abajo del Etna, Italia, en septiembre de 1983 fueron en el orden de magnitud $0.1-10 \mu\text{g m}^{-3}$ (Bergametti et al., 1984; Martin et al., 1986) y en 1989-90 niveles medios de PM_{10} decenas de kilómetros viento debajo de la chimenea del activo Kilauea en la Isla de Hawai fueron de $11.1 \mu\text{g m}^{-3}$. Ambos ejemplos están dentro de los niveles ambientales. Aún así, promedios de una hora de $\text{PM}_{2.5} > 80 \mu\text{g m}^{-3}$ fueron encontrados en el popular Centro de Visitantes del Parque en la cima del Kilauea, durante condiciones de vientos específicos (Nacional Park Service, 2003, datos no publicados). Entre 1987-1991, durante la fase continua de la erupción del Kilauea, las salas de emergencia y las admisiones hospitalarias por obstrucción pulmonar crónica y asma aumentaron en la isla de Hawai (Mannino et al., 1996), comparado con los rangos de 1981-1986, pero no pudo ser establecido un enlace directo entre este incremento y PM volcánico o emisiones de gas. La presencia de metales y aerosoles ácidos en la fumarola del Kilauea también aumenta la preocupación con relación a los efectos en la salud por contaminación volcánica. La mezcla ácida de gas volcánico y aerosol producida por el Kilauea ha sido denominada "vog".

Posteriores desplazamientos viento debajo de particularizados volcánicos pueden aumentar los niveles intermitentemente, dependiendo de la actividad del volcán y las condiciones climáticas.

- *Popocatepetl, México*: Los niveles de sulfato particularizado en la ciudad de México pueden ser duplicados por emisiones del Popocatepetl (Moya et al., 2003; Raga et al., 1999). Niveles de PM_{10} en la ciudad ya superaron el Standard mexicano para 24 horas en la mayoría de los días del año, debido a emisiones vehiculares y de fuentes fijas (Mota et al., 2003). De manera que la contribución del aerosol volcánico sustancialmente incrementa el peligro a la salud. Desde diciembre de 1994 hasta abril de 1995, la más alta concentración de partículas suspendidas totalmente provenientes de emisiones del Popocatepetl alcanzaron ~ 15 kilómetros de distancia desde el volcán y fueron de $1440 \mu\text{g m}^{-3}$ (Rojas-Ramos et al., 2001), más de cinco veces mayor que el standard mexicano TPM para 24 horas.
- *Volcán de Colima, México*: Hay alguna evidencia de que aerosoles finos ($\text{PM}_{1.5} - \text{PM}_{2.5}$) S, Cl, Cu y Zn ha aumentado en la ciudad de Colima, México,

por emisiones del volcán durante condiciones de viento favorables (Miranda et al., 2004).

- *Sakurajima, Japón*: Las concentraciones medias por hora de TSP que se registraron a ~35 km del volcán en erupción fueron de $>200 \mu\text{g m}^{-3}$ en 53 ocasiones en 1980, con un valor máximo de $345 \mu\text{g m}^{-3}$ excediendo los standards ambientales de calidad del aire japoneses (Yano et al., 1986). En enero 1986 las máximas concentraciones a PM10 con 25km de vientos a favor fueron similarmente $>340 \mu\text{g m}^{-3}$ (Yano et al., 1990).
- *Soufriere Hills, Montserrat*: Concentraciones ambientales de PM10 y polvo aspirable en la región, con viento a favor inmediato del volcán, fueron frecuentemente del rango de $100\text{-}500 \mu\text{g m}^{-3}$ durante la actividad volcánica en 1997 y 1998 (Searl et al., 2002), excediendo los standards de calidad de aire del Reino Unido. Mucho de ello fue cenizas re-suspendidas, esto es que los niveles de exposición personal fueron considerablemente más altos para ciertas actividades, tales como barrido, donde la exposición ocupacional fue frecuentemente excedida.

Erupciones mayores causan problemas debido a la cantidad de cenizas finas que arrojan; estos impactos a la salud han sido revisados por Horwell y Baxter (en revisión):

- *Mt. St Helens, USA*: Después de la erupción del 18 de mayo de 1980, los niveles de material particulado suspendido con viento a favor promediaron $33,402 \mu\text{g m}^{-3}$, y permanecieron sobre $1,000 \mu\text{g m}^{-3}$ durante una semana (comparado con el nivel medio de $80 \mu\text{g m}^{-3}$) (Baxter et al., 1983), excediendo el nivel ambiental y EPA significativamente peligroso. La mayor parte de los depósitos de tefra fue de PM10 y se encontró como causante más morbilidad respiratoria (Bernstein et al., 1986). Los grupos más fuertemente expuestos a cenizas re-suspendidas después de una erupción fueron trabajadores de emergencias y oficiales de policía (Baxter et al., 1981).
- *Pitánubo, Filipinas*: Se sospecha que la causa del incremento de mortalidad debido a infecciones respiratorias fueron las cenizas en el área de Pitánubo, en los meses siguientes a la erupción de 1991 (Mason, 2002).

Evidencias anecdóticas de muchos volcanes muestran que las cenizas y los aerosoles ácidos en la vecindad de las chimeneas volcánicas pueden ser irritantes para los ojos, piel y sistema respiratorio, pero relativamente pocos estudios han examinado los impactos de la materia particulada en seres humanos. Estos estudios incluyen investigaciones de efectos a la salud relacionados con las erupciones del Kilauea, Hawai (Mannino et al., 1996); Mount St. Helens, USA (Baxter et al., 1981; Baxter et al., 1983; Bernstein et al., 1986); Mt. St. Helens (Choudhury et al., 1997; Gordian et al., 1996); Popocatepetl, México (Rojas-Ramos et al., 2001); Ruapehu, Nueva Zelanda (Hickling et al., 1999); Sakurajima, Japón (Wakisaka et al., 1988, Yano et al., 1986); Soufriere Hills, Montserrat (Forbes et al., 2003) and Soufriere, St. Vincent (Leus et al., 1981). En algunos de estos estudios, asociaciones positivas entre el aumento de particularizadas volcánicas y ciertas manifestaciones de efectos sobre la salud se encontraron en ambas, exposición aguda y crónica. De todas maneras, es difícil separar los efectos de las cenizas, gases y aerosoles de varias composiciones químicas. Adicionalmente, las medidas de salud examinadas en los estudios fueron variables, con algunas mejor que en otras. Se recomienda continuar trabajando en este campo para determinar la directa contribución de los aerosoles volcánicos en la enfermedad.

Referencias

Allen, A.G., Oppenheimer, C., Ferm, M., Baxter, P.J., Horrocks, L.A., Galle, B., McGonigle, A.J.S. and Duffell, H.J., 2002. Primary sulfate aerosol and associated emissions from Masaya Volcano, Nicaragua. *Journal of Geophysical Research* 107(D23).

Baxter, P.J., Ing, R., Falk, H. and Plikaytis, B., 1983. Mount St. Helens eruptions: the acute respiratory effects of volcanic ash in a North American community. *Archives of Environmental Health*, 38(3): 138-143.

Baxter, P.J., Ing, R., Falk, H., French, J., Stein, G.F., Bernstein, R.S., Merchant, J.A. and Allard, A., 1981. Mount St Helens eruptions, May 18 to June 12, 1980. *Journal of the American Medical Association*, 246(22): 2585-2589.

Baxter, P.J., Bonadonna, C., Dupree, R., Hards, V.L., Kohn, S.C., Murphy, M.D., Nichols, A., Nicholson, R.A., Norton, G., Searl, A., Sparks, R.S.J. and Vickers, B.P., 1999. Cristobalite in volcanic ash of the Soufrière Hills volcano, Montserrat, British West Indies. *Science*, 283: 1142-1145.

Bergametti, G., Martin, D., Carbonnelle, J., Faivre-Pierret, R. and Vie Le Sage, R., 1984. A mesoscale study of the elemental composition of aerosols emitted from Mt. Etna Volcano. *Bulletin of Volcanology*, 47(4(2)): 1107-1114.

Bernstein, R.S., Baxter, P.J., Falk, H., Ing, R., Foster, L. and Frost, F., 1986. Immediate public health concerns and actions in volcanic eruptions: lessons from the Mount St. Helens eruptions, May 18 - October 18, 1980. *American Journal of Public Health*, 76(Supplement): 25-37.

Braga, A.L.F., Zanobetti, A. and Schwartz, J., 2001. The lag structure between particulate air pollution and respiratory and cardiovascular deaths in 10 US cities. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 43(11): 927-933.

Choudhury, A.H., Gordian, M.E. and Morris, S.S., 1997. Associations between respiratory illness and PM10 air pollution. *Archives of Environmental Health*, 52(2): 113-117.

Delmelle, P., Stix, J., Baxter, P.J., Garcia-Alvarez, J. and Barquero, J., 2002. Atmospheric dispersion, environmental effects and potential health hazard associated with the low-altitude gas plume of Masaya volcano, Nicaragua. *Bulletin of Volcanology* 64(6), 423-434.

Forbes, L., Jarvis, D., Potts, J. and Baxter, P.J., 2003. Volcanic ash and respiratory symptoms in children on the island of Montserrat, British West Indies. *Occupational and Environmental Medicine*, 60(3): 207-211.

Gordian, M.E., Özkaynak, H., Xue, J., Morris, S.S. and Spengler, J.D., 1996. Particulate air pollution and respiratory disease in Anchorage, Alaska. *Environmental Health Perspectives*, 104(3): 290-297.

Hickling, J., Clements, M., Weinstein, P. and Woodward, A., 1999. Acute health effects of the Mount Ruapehu (New Zealand) volcanic eruption of June 1996. *International Journal of Environmental Health Research*, 9(2): 97-107.

Horwell, C.J. and Baxter, P.J., 2006. A critical review of the studies on the respiratory health hazards of volcanic ash. *Bulletin of Volcanology*, 69, 1-24..

Leus, X., Kintanar, C. and Bowman, V., 1981. Asthmatic bronchitis associated with a volcanic eruption in St. Vincent, West Indies. *Disasters*, 5: 67-69.

Mannino, D.M., Ruben, S., Holschuh, F.C., Holschuh, T.C., Wilson, M.D. and Holschuh, T., 1996. Emergency department visits and hospitalizations for respiratory disease on the island of Hawaii, 1981 to 1991. *Hawaii Medical Journal*, 55: 48-54.

Martin, D., Ardouin, B., Bergametti, G., Carbonnelle, J., Faivre-Pierret, R., Lambert, G., Le Cloarec, M.F. and Sennequier, G., 1986. Geochemistry of sulfur in Mount Etna plume. *Journal of Geophysical Research*, 91(B12): 12,249-12,254.

Mason, B., 2002. Pinatubo dust is still a killer. *New Scientist*, 175(2351): 7.

Mather, T.M., Allen, A.G., Oppenheimer, C., Pyle, D.M. and McGonigle, A.J.S., 2003. Size-resolved characterisation of soluble ions in the particles in the tropospheric plume of Masaya volcano, Nicaragua: origins and plume processing. *Journal of Atmospheric Chemistry* 46(3), 207-237.

Miranda, J., Zepeda, F. and Galindo, I., 2004. The possible influence of volcanic emissions on atmospheric aerosols in the city of Colima, Mexico. *Environmental Pollution*, 127: 271-279.

Moya, M., Castro, T., Zepeda, M. and Baez, A., 2003. Characterization of size-differentiated inorganic composition of aerosols in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 37(25): 3581-3591.

Raga, G.B., Kok, G.L., Baumgardner, D., Baez, A. and Rosas, I., 1999. Evidence for volcanic influence on Mexico City aerosols. *Geophysical Research Letters*, 26(8): 1149-1152.

Rojas-Ramos, M., Catalan-Vazquez, M., Martin - Del Pozzo, A.L., Garcia-Ojeda, E., Villalba-Caloca, J. and Perez-Neria, J., 2001. A seven months prospective study of the respiratory effects of exposure to ash from Popocatepetl volcano, Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 23: 383-396.

Searl, A., Nicholl, A. and Baxter, P.J., 2002. Assessment of the exposure of islanders to ash from the Soufrière Hills volcano, Montserrat, British West Indies. *Occupational and Environmental Medicine*, 59(8): 523-531.

Wakisaka, I., Yanagihashi, T., Tomari, T. and Ando, T., 1988. Effects of volcanic activity on the mortality figures of respiratory disease. *Japan Journal of Hygiene*, 42(6): 1101-1110.

WHO, 1999. *Guidelines for Air Quality*, World Health Organisation, Geneva. Yano, E., Yokoyama, Y. and Nishii, S., 1986. Chronic pulmonary effects of volcanic ash: an epidemiological study. *Archives of Environmental Health*, 41(2): 94-99.

Yano, E., Yokoyama, Y., Higashi, H., Nishii, S., Maeda, K. and Koizumi, A., 1990. Health effects of volcanic ash: a repeat study. *Archives of Environmental Health*, 45(6): 367-373.

Glosario

AIHA	Asociación Americana de Higiene Industrial
ACGIH	Conferencia Americana de Higienistas Industriales
Techo	Límite de concentración para sustancias aéreas que no deben excederse jamás
EPA	Agencia de protección del Medio Ambiente (USA)
ERPG	Lineamientos para planes de respuesta a emergencias (AIHA)
ERPG-1	La máxima concentración aérea debajo de la cual se considera que todos los individuos pueden ser expuestos hasta por una hora sin experimentar más que efectos adversos transitorios y leves, o percibir claramente definido olor desagradable (AIHA)
ERPG-2	La máxima concentración aérea debajo de la cual se considera que todos los individuos pueden ser expuestos hasta por una hora sin experimentar o desarrollar daños irreversibles u otros serios efectos o síntomas que pudieran incapacitar las capacidades individuales para tomar una acción protectora (AIHA)
ERPG-3	La máxima concentración aérea debajo de la cual se considera que todos los individuos pueden ser expuestos hasta por una hora sin experimentar o desarrollar efectos a la salud que amenacen su vida (AIHA)
MEL	Límite de exposición máximo
NAASQS	Standards nacionales de calidad del aire
NIOSH	Instituto Nacional para la Seguridad ocupacional y Salud en los centros para el Control de Enfermedades y prevención (USA)
OEL	Límites de exposición ocupacional
OSHA	Departamento de Seguridad ocupacional en el Trabajo y Administración de salud
Primario	Standares primarios para asegurar la salud pública, incluyendo la población sensible tal como asmáticos, niños y ancianos.
PM	Materia particularizada. Generalmente se designan por tamaño, con partículas con una media de diámetro aerodinámico de 2.5-10 micrones referido a partículas gruesas, y las de > 2.5 (PM2.5) micrones, referidas como partículas finas.
PEL	Tiempo de exposición límite
REL	Tiempo de exposición recomendado
Secundario	Conjunto de límites estandares secundarios para proteger el bienestar público, incluyendo protección contra visibilidad disminuida, daño a animales, cosechas, vegetación y edificios.
STEL	Límite de tiempo de exposición límite, generalmente 15 minutos, tiempo que no debiera ser excedido en ningún momento durante una jornada laboral.
TWA	Tiempo promediado

IVHHN agradece al Dr Mabel Padlog, Universidad de Guadalajara, para la traducción de estas guías al español.