

IMPACTO DE LAS ERUPCIONES VOLCÁNICAS SOBRE EL SISTEMA RESPIRATORIO

Revisión de la literatura



Ana Isabel Enríquez Rodríguez

Universidad de Oviedo

Máster en Análisis y Gestión de Emergencias y Desastres

**Trabajo de fin de Máster en Análisis y Gestión de Emergencias y Desastres.
Universidad de Oviedo.**

Título: Impacto de las erupciones volcánicas sobre el sistema respiratorio. Revisión de la literatura

Autor: Ana Isabel Enríquez Rodríguez

Fecha: 24 de julio de 2012

Resumen: Los efectos sobre la salud de las erupciones volcánicas en las poblaciones circundantes no han sido bien estudiados hasta el momento. El objetivo de este estudio es analizar el impacto directo descrito en la literatura que éstas tienen sobre el sistema respiratorio. Para ello se realizó una revisión sistemática incluyendo 22 artículos escritos en lengua inglesa entre 1998 y la fecha actual. Entre los artículos, 7 eran revisiones, 1 prospectivo, 8 ecológicos y 6 epidemiológicos transversales basados en encuestas de salud. Aunque parece que existe una relación entre las erupciones volcánicas y la presencia de algunos síntomas como tos, irritación de garganta, disnea, rinorrea o sibilancias, no está claro que agraven la patología respiratoria previa, como por ejemplo, el asma. Además, no encontramos estudios de suficiente calidad sobre el efecto de los volcanes sobre el pulmón a medio y largo plazo. Los estudios muestran diferencias significativas en los resultados, lo que podría justificarse por la diferencia entre las partículas emitidas en los distintas áreas del planeta, pero también por el diseño subóptimo de muchos estudios. Son necesarios estudios a largo plazo para evaluar de forma adecuada el potencial carcinógeno de la exposición a la ceniza volcánica o su capacidad para provocar neumoconiosis u otras alteraciones de vías respiratorias bajas, como pueden ser exacerbaciones de enfermedades respiratorias previas o infecciones pulmonares parenquimatosas.

The health effects of volcanic eruptions in the surrounding towns have not been well studied so far. The objective of this study is to analyze the direct impact described in the literature that they have on the respiratory system. This was a systematic review including 22 articles written in English from 1998 to the current date. Among the items, 7 were reviews, 1 prospective, 8 were ecological and 6 were cross-sectional epidemiological based on health surveys. Although it seems that there is a relationship between volcanic eruptions and the presence of some symptoms such as cough, sore throat, shortness of breath, runny nose or wheezing, it is not clear that they aggravated the previous respiratory pathology, such as for example, asthma. In addition, we do not find sufficient quality studies on the effect of volcanoes on the lung in the medium and long term. Studies show significant differences in results that could be justified by the difference between the particles emitted in the different areas of the planet, but also by the suboptimal design of many studies. Studies are needed in the long term to assess adequately the carcinogenic potential of exposure to volcanic ash or their ability to cause pneumoconiosis or other alterations of the lower respiratory tract, such as exacerbations of previous respiratory disease or parenchymatous lung infections.

Palabras clave: “volcanic gases”, “volcanic ash” “natural disasters” “health effects”, “volcanic eruptions” “respiratory disease”, “pulmonary pathology”

IMPACTO DE LAS ERUPCIONES VOLCÁNICAS SOBRE EL SISTEMA RESPIRATORIO. REVISIÓN DE LA LITERATURA

ÍNDICE

1. Introducción

- 1.1 Aspectos generales
- 1.2 Concepto y formación de los volcanes
- 1.3 Tipos de volcanes
- 1.4 Tipos de actividad volcánica y sus efectos en la salud
 - 1.4.1 Efectos directos de la actividad volcánica
 - 1.4.2 Efectos en diversos organismos
 - 1.4.3 Efectos secundarios de las erupciones volcánicas

2. Objetivo

3. Material y métodos

4. Resultados

5. Discusión

6. Conclusiones

7. Bibliografía

1.1 ASPECTOS GENERALES

Los desastres naturales tienen, evidentemente, un impacto directo en la salud. Al alto coste personal y económico que suponen en vidas humanas y destrucción de los recursos naturales, hay que añadir el daño diferido que conllevan determinados fenómenos geológicos para la salud de las poblaciones implicadas.

Así, además del daño implícito derivado de la erupción, la emisión de partículas gaseosas derivadas del volcán provoca, como veremos más adelante, diferentes alteraciones, tanto climáticas como por el aumento de la tasa de morbilidad derivada de la inhalación de las mismas. De este modo, se estima que hasta el 4% de las muertes causadas por una erupción volcánica son consecuencia directa de esta emisión de gases tóxicos. Otras alteraciones derivadas de la actividad volcánica pueden ser menos evidentes en el momento de la erupción, pero sus consecuencias son claramente perceptibles a corto plazo. Así por ejemplo, en 1815 se produjo una explosión volcánica en Indonesia con una cantidad de ceniza liberada enorme que, debido a las corrientes atmosféricas, dio la vuelta a todo el planeta, provocando el llamado año sin verano. Otras erupciones explosivas como las del Monte Santa Elena en 1981 o el Pinatubo, en Filipinas en 1991, dieron lugar también a consecuencias planetarias. De hecho, el Pinatubo arrojó una cantidad ingente de ceniza a la estratosfera dando lugar a una caída en la temperatura mundial que se prolongó dos años^{1,2}.

Además, el daño pulmonar subsiguiente a la inhalación puede ser agudo, durante la fase eruptiva, procedente de las partículas en suspensión o de los gases emanados de las fumarolas volcánicas. Como en muchos otros desastres naturales, existen también factores de riesgo añadidos para el desarrollo de lesión pulmonar a medio plazo, tales como la inhalación del humo procedente de los incendios o las infecciones respiratorias causadas posteriormente por el hacinamiento y las condiciones insalubres de vida de los supervivientes. A largo plazo, la emisión continua de gases y partículas provocan diferentes alteraciones de las que se hablará más adelante.

Existen actualmente unos 500 volcanes en el mundo, de los cuales, casi 50 de promedio hacen erupción cada año. Además, se calcula que cerca de 500 millones de personas viven en áreas cercanas a una actividad volcánica. Todo ello nos permite hacernos una idea de las repercusiones que puede tener de forma global la exposición continua a la actividad volcánica.

De esta forma, en la presente revisión abordaremos fundamentalmente dos aspectos:

1) Una exposición general de los tipos de actividad volcánica y sus efectos en la salud.

2) Una revisión crítica de los artículos publicados en los últimos 14 años sobre los efectos de la actividad volcánica sobre el sistema respiratorio en las poblaciones circundantes.

1.2 CONCEPTO Y FORMACIÓN DE LOS VOLCÁNES

Un volcán (expresión procedente del dios mitológico Vulcano), es una estructura geológica por la cual emergen el magma (roca fundida) en forma de lava, ceniza volcánica y gases, del interior del planeta. El ascenso ocurre generalmente en episodios de actividad violenta denominados “erupciones”. La salida al exterior del magma se produce a causa de la expansión de los gases como respuesta a la presión a la que se encuentran los gases y el vapor en la cámara magmática del volcán que, de repente, cuando hay una erupción, pasan a estar en condiciones atmosféricas con una temperatura ambiente y una presión de 1 atmósfera o menor. Cuando el magma del interior de la tierra se acumula en las cámaras magmáticas, la presión va aumentando progresivamente hasta que se abre paso por la chimenea hasta la superficie y es cuando tiene lugar la erupción volcánica.

Los volcanes están relacionados con los márgenes de las placas tectónicas. Las erupciones volcánicas más destructivas de la historia han ocurrido en los márgenes continentales o en arcos de islas, como resultado de la subducción de una placa tectónica bajo otra placa tectónica; la materia de la parte superior de la placa subducida es arrastrada en una trayectoria oblicua hacia el interior de la Tierra, hasta que alcanza una profundidad en la que se funde. Entonces asciende por fisuras verticales y es expulsada hacia la superficie por una chimenea volcánica. Ejemplos de esto son el Monte Sta. Elena (USA), Monte Fuji (Japón), y Monte Pinatubo (Filipinas), todos pertenecientes al cinturón de fuego del pacífico. La zona Europea de subducción de placas tectónicas incluye el volcán Vesubio (Italia) y Santorini (Grecia).

Los volcanes se encuentran también donde las placas tectónicas divergen, por ejemplo aquellos del gran valle del Rift en África.

Algunos volcanes no están relacionados con las placas tectónicas si no con procesos convectivos que ocurren en el manto de la tierra. Estos son llamados “puntos calientes”, y se encuentran tanto en regiones continentales como oceánicas, e incluyen los volcanes de Hawai y Yellowstone (USA)

1.3 TIPOS DE VOLCANES

La temperatura, viscosidad y elementos disueltos de los magmas, son los factores fundamentales de los cuales depende el tipo de explosividad y la cantidad de productos volátiles que acompañan a la erupción volcánica. Así, en función de estas variables podemos dividir a los volcanes en los siguientes tipos:

1. *Hawaiano*: lavas fluidas, sin que tengan lugar desprendimientos gaseosos explosivos. Estas lavas se desbordan al rebasar el cráter y se deslizan con facilidad por la ladera del volcán formando verdaderas corrientes que recorren grandes distancias.

2. *Estromboliano ó mixto*: recibe el nombre del Stromboli, en las islas Lípári (mar Tirreno), al norte de Sicilia. Se originan cuando hay alternancia de los materiales en erupción, formándose un cono estratificado en capas de lavas fluidas y materiales sólidos. La lava es fluida, desprendiendo gases abundantes y violentos, con proyecciones de escorias, bombas y lapilli. Debido a que los gases pueden desprenderse con facilidad, no se producen pulverizaciones o cenizas. Cuando la lava rebosa por los bordes del cráter,

desciende por sus laderas y barrancos, pero no alcanza tanta extensión como en las erupciones de tipo hawaiano.

3. *Vulcaniano*: del nombre del volcán Vulcano en las islas Lípari. Se desprenden grandes cantidades de gases de un magma poco fluido que se consolida con rapidez, por ello las explosiones son muy fuertes y pulverizan la lava, produciendo mucha ceniza, lanzada al aire acompañada de otros materiales fragmentarios. Cuando la lava sale al exterior se solidifica rápidamente, pero los gases que se desprenden rompen y resquebrajan su superficie, que por ello resulta áspera y muy irregular, formándose lavas de tipo Aa (tipo de lava basáltica fluida que tiene una superficie de bloques ásperos y desiguales, y rugosidades y que avanza lentamente). Los conos de estos volcanes son de pendiente muy inclinada.

4. *Pliniano o vesubiano*: en honor a Plinio el Joven, difiere del vulcaniano en que la presión de los gases es muy fuerte y produce explosiones muy violentas. Forma nubes ardientes que, al enfriarse, producen precipitaciones de cenizas que pueden sepultar ciudades (como ocurrió con Pompeya y Herculano y el volcán Vesubio). Se caracteriza por alternar erupciones de piroclastos con erupciones de coladas lávicas, dando lugar a una superposición en estratos que hace que este tipo de volcanes alcance grandes dimensiones.

5. *Freato-magmático o surtseyano*: se encuentran en áreas someras o presentan un lago en el interior u ocasionalmente atolones. Sus explosiones son extraordinariamente violentas ya que a la energía propia del volcán se le suma la expansión del vapor de agua súbitamente calentado. Normalmente no presentan emisiones lávicas ni extrusiones de rocas. Algunas de las mayores explosiones freáticas son las del Krakatoa, el Kilauea y la Isla de Surtsey.

6. *Peleano*: de los volcanes de las Antillas es célebre la Montaña Pelada ubicada en la isla Martinica, por su erupción de 1.902 que destruyó su capital, Saint-Pierre con la formación de una nube ardiente que ocasionó 28.000 víctimas. Se caracteriza por una lava extremadamente viscosa que se consolida con gran rapidez, llegando a tapar por completo el cráter formando un pitón o aguja; la enorme presión de los gases, sin salida, provoca una enorme explosión que levanta el pitón o destroza la parte superior de la ladera.

1.4 TIPOS DE ACTIVIDAD VOLCÁNICA Y SUS EFECTOS EN LA SALUD

Los volcanes pueden afectar la salud de las poblaciones de dos maneras: de forma directa a causa de las explosiones, las corrientes de lava, cenizas, y otros efectos, y de forma indirecta al causar tsunamis, desplazamientos poblacionales, efectos adversos en la agricultura y en el clima.

1.4.1 Efectos directos de la actividad volcánica

Dos variables determinan las características de una erupción volcánica: la fluidez o viscosidad de la lava, y la magnitud de la presión de los gases. En resumen, cuanto más viscosa es la lava y más grande la presión de gas que se acumula antes de la erupción, mayores serán los peligros potenciales. La actividad volcánica varía desde la salida lenta de lava, hasta explosiones violentas que arrojan voluminosas masas de rocas a grandes alturas

de la atmósfera. Dicha actividad anterior puede clasificarse en 6 categorías que cualquier volcán puede ocasionar:

- 1) Corrientes de lava
- 2) Domos.
- 3) Material piroclástico (también llamado Tefra).
- 4) Avalanchas de material incandescente.
- 5) Lahares.
- 6) Gases volcánicos.

1. Corrientes de lava

La extensión, espesor y velocidad con que avanza una corriente de lava varía con su volumen, su fluidez y la topografía del terreno. La velocidad con que avanza la corriente varía de unos cuantos metros al día hasta 40 km/hora o más en laderas muy inclinadas. Sin embargo, dado que la rapidez de avance es pequeña, las corrientes mencionadas conllevan poco riesgo para la vida. No obstante, dado que pueden dañar extensamente las propiedades, se han intentado diversos métodos para controlar la dirección del flujo y la velocidad, incluidos el empleo de explosivos detonados desde el aire, el levantamiento de barreras de desviación y el enfriamiento del frente de lava con chorros de agua.

2. Domos

Es un montículo aproximadamente circular que se origina en una erupción lenta de lava viscosa de un volcán. La viscosidad, o adherencia, de la lava no permite que ésta fluya demasiado lejos de su chimenea antes de solidificarse. Los domos pueden alcanzar alturas de varios cientos de metros, y pueden crecer lentamente y en forma continua durante meses o años. Los lados de estas estructuras están formados de trozos inestables de roca. Debido a la posibilidad de acumulación de presión de gas, el domo puede a lo largo de su historia sufrir erupciones explosivas. Si una parte de un domo de lava colapsa cuando aún contiene roca fundida y gases, puede producir un flujo piroclástico.

3. Material piroclástico

Es cualquier material expulsado durante las erupciones volcánicas, cuyo tamaño varía desde polvo hasta rocas de varios metros de espesor. En términos generales, diferenciamos tefra de la ceniza volcánica por el tamaño, refiriéndonos a esta última como las partículas < de 2 mm. Los tefra mayores tienden a depositarse cerca del orificio de salida, en tanto que el polvo y las cenizas expulsados a los planos altos de la atmósfera,

pueden ser llevados a miles de kilómetros de distancia. La lluvia que atraviesa nubes de cenizas puede formar bolas de lodo así como también puede hacerlo la expulsión de agua de un volcán revuelta con cenizas y otro material.

Con fines descriptivos, se han dividido los efectos de los tefra en dos partes: los efectos físicos directos y los efectos ejercidos por el polvo y las cenizas en las vías respiratorias y los ojos.

* *Efectos directos de los tefras:* Las grandes piedras que caen pueden desencadenar incendios o lesionar personas o animales. Por ejemplo, durante la erupción del Arenal de 1968 en Costa Rica, los grandes bloques aplastaron casas situadas a una distancia de 3 km del cráter en erupción. Una vez depositada la ceniza, rara vez es lo suficientemente caliente como para causar incendios. Sin embargo, el peso puede hacer que se desplomen los techos de las casas. En la erupción del Volcán de Fuego, en 1971, en Guatemala, se depositó una capa de 30 cm de cenizas a una distancia de 8 km al oeste del cono, que produjo la caída de la quinta parte de todos los techos en la población de Yepocapa. En la erupción del Vesubio en el año 79 de nuestra era, muchas personas murieron cuando los edificios se derrumbaron bajo el peso de las cenizas.

Las erupciones que generan cenizas de forma continua y por largo tiempo, pueden obligar a evacuar a la población de la zona de peligro, aunque son pocos los ejemplos. Otros dos tipos de erupción de cenizas serían el levantamiento de la base y el flujo de cenizas. El primero se forma en la base de algunas columnas volcánicas y consiste en una nube anular de cenizas suspendidas que se expanden con gran rapidez, y erosionan la superficie cerca del cráter. En la zona más cercana, pueden derrumbar árboles y edificios, y en las más lejanas, es factible que haya objetos aplastados a causa de la severa tempestad de arena. En algunas erupciones, gran parte de las cenizas quedan suspendidas en una nube y se desplazan cerca del suelo, efecto conocido como flujo de cenizas. La fricción se elimina al expandirse el gas dentro de la nube, lo cual hace que se conserven separadas las partículas de ceniza. El flujo es impulsado por gravedad, y sigue las anfractuosidades del terreno; el flujo de cenizas a veces excede los 200 km/hora.

* *Efectos de las cenizas en las vías respiratorias y ojos.* Para valorar los riesgos que tiene la lluvia de cenizas en la salud de personas son importantes cinco factores: la concentración del total de las partículas suspendidas que viajan por el aire; el tamaño de la partículas; la frecuencia y duración de la exposición; factores adicionales como enfermedades preexistentes de las vías respiratorias, y la presencia de sílice cristalino (SiO₂) en las cenizas.

Los humanos pueden sufrir asfixia a causa de las cenizas volcánicas. En Pompeya, sepultada por la erupción del Vesubio el 79 de nuestra era, se observó que algunas víctimas encontradas en las excavaciones, se cubrían la cara con las manos o con ropas, quizá asfixiadas por las cenizas. Más recientemente, durante la erupción del volcán Sta. Elena, en el estado de Washington, EEUU, algunas muertes fueron causadas de esta manera.

Entre las partículas de tamaño “respirable”, es decir, menores de 10 µm, que viajan por el aire y pueden penetrar en el parénquima pulmonar, podemos encontrar:

a) Cristales de silicio: pueden irritar las vías respiratorias y ocasionar síntomas de obstrucción. Si la exposición se hace a una concentración suficientemente grande durante bastante tiempo, puede dar lugar a silicosis, que es una fibrosis pulmonar incapacitante y a veces mortal. La génesis de la alteración se encuentra en la captación de las mismas por los macrófagos alveolares y la

liberación de toxinas para intentar destruir las partículas. Sin embargo, la liberación de IL-1, IL-6, factor de necrosis tumoral (TNF), factor de crecimiento fibroblástico y otros factores implicados, como la afluencia de leucocitos polimorfonucleares, acaban provocando una lesión inflamatoria y un daño pulmonar irreversible. No obstante, aunque conocemos bien los efectos de la inhalación de polvo de sílice como factor de riesgo de enfermedad profesional, desconocemos aún, dados los escasos estudios relevantes en este sentido, los problemas de las poblaciones expuestas a este material.

b) Hierro en forma iónica: el hierro puede reaccionar con la sílice cristalina (en el llamado ciclo de Haber-Weiss) en una reacción en la que el hierro trivalente se convierte en divalente dando lugar a una reacción catalítica en la que pueden formarse radicales HO desde radicales superóxido (O₂⁻) y peróxido de hidrógeno (H₂O₂). Los radicales HO tienden a restaurar el electrón perdido desde un átomo de hidrógeno procedente de las uniones C-H encontradas en moléculas endógenas como DNA y lípidos dando lugar a daño y peroxidación de los lípidos, lo que se conoce como estrés oxidativo. Estas reacciones están implicadas en inflamación pulmonar y carcinogénesis.

c) Asbesto y fibras asbestiformes como crisotilo: estos componentes pueden proceder de las emisiones volcánicas afectando a poblaciones adyacentes. El efecto carcinógeno del asbesto es bien conocido, provocando sobre todo mesotelioma pleural y cáncer de pulmón.

Las partículas de ceniza pueden penetrar en los ojos como "cuerpos extraños" y causar abrasiones de la córnea o conjuntivitis.

4. Avalanchas de material incandescentes (nubes ardientes o corrientes piroclásticas)

Se reconocen tres tipos de avalanchas identificadas por el nombre de los volcanes en el que cada uno se observó por primera vez, éstos son los efectos (Sofrière, Merapi y Pelee). A pesar de que los mecanismos por los que se forman son diferentes, sus efectos son semejantes: una masa turbulenta de gases supercalentados en la que hay polvo, cenizas calientes y fragmentos de lava que viajan incluso a 160 km/hora destruyendo todo a su paso. La avalancha de material incandescente que devastó la población de St. Pierre, Martinica, en 1902, causó la muerte de prácticamente toda la población.

5. Lahares

Este término se aplica a muchos tipos de lodo volcánico que fluye y cuya temperatura varía desde muy baja hasta la ebullición. El lodo impulsado por la gravedad puede avanzar incluso a 100 km/hora, recorrer distancias considerables y cubrir áreas de varios cientos de km². Los lahares son comunes y son la causa principal de destrucción y muertes derivadas de los volcanes. Pueden producirse a partir de la expulsión de agua de un lago en el cráter, por nieve fundida, por el desplazamiento de ceniza o tierras saturadas de agua en las faldas de un volcán, y por otras formas en las que la actividad volcánica interactúe con agua. Dado que son capaces de viajar con rapidez extraordinaria pueden

causar innumerables muertes. Por ejemplo, en Kelud, Java en 1919, un lahar mató a 5.000 personas y se perdieron cientos de Km² de tierra.

En raras ocasiones, un lahar puede contener ácido sulfúrico o clorhídrico en concentraciones suficientes como para causar quemaduras químicas en la piel al descubierto; se sabe de un caso de este tipo que fue consecuencia de la explosión de un lago en el cráter de Kawah Idjen, en Java, en 1917.

6. Gases volcánicos

Los gases expulsados por acción volcánica contienen diversas proporciones de vapor de agua, dióxido y monóxido de carbono, dióxido y trióxido de azufre, ácidos sulfhídrico, clorhídrico, fluorhídrico, metano e hidrocarburos más complejos, así como nitrógeno, argón, radón etc... que afectan a la población de diversas formas. El dióxido de carbono (CO₂) y el dióxido de azufre (SO₂) pueden causar asfixia; el primero, al acumularse en "masa" en zonas muy bajas, y el segundo por los efectos directos que causa sobre el tracto respiratorio. El CO₂ procedente de las erupciones volcánicas del Hekla, en Islandia en 1947, asfixió a ovejas, animales y aves silvestres, aunque no se objetivaron muertes de seres humanos. Durante la erupción del Eldaffel, en 1973, también en Islandia, el único muerto fue un hombre que buscó abrigo en un sótano lleno de CO₂ y que pereció por asfixia. Antes de la destrucción de St. Pierre en la Martinica en 1902, fue descrito que diversas concentraciones de SO₂ en el pueblo causaron la muerte de caballos³.

a) SO₂ (dióxido de sulfuro): es un gas respirable e irritante de la piel. Constituye uno de los gases más frecuentes en las emisiones volcánicas. La organización mundial de la salud (OMS) en sus guías sobre la calidad del aire, ha fijado una exposición máxima de SO₂ de 175 ppb durante 10 minutos o 44 ppb en un día. La mayor parte se absorbe en el tracto respiratorio superior. Los individuos que padecen asma pueden reaccionar a la exposición de SO₂ dando lugar a broncoconstricción e incremento de la resistencia de las vías aéreas. También puede dar lugar a irritación ocular, de garganta, tos y disnea.

b) CO₂ (dióxido de carbono): es un gas abundante en las erupciones volcánicas. Es especialmente peligroso porque es inodoro y más denso que el aire. Concentraciones elevadas a CO₂ (>100.000 ppb) pueden producir rápidamente inconsciencia y, en el plazo de 1-10 minutos, pueden producir convulsiones y muerte. Otros síntomas incluyen los vómitos, mareos, alteraciones visuales, cefalea, taquicardia o temblores.

c) H₂S (sulfuro de hidrógeno): es un gas incoloro con olor intenso (a huevos podridos) y que se encuentra fundamentalmente en áreas con elevada actividad geotérmica. A bajas concentraciones es depresor y puede provocar irritación ocular. A altas concentraciones puede dar lugar a edema pulmonar. Se estima que la exposición a concentraciones por encima de 500 ppm durante 30 minutos ocasiona cefalea, mareos, diarrea, que puede ser seguido de bronquitis o bronconeumonía. Exposiciones agudas a más de 700 ppm pueden dar lugar a pérdida de conciencia en minutos y en ocasiones producir la muerte.

d) Cloruro de hidrógeno (HCl) y ácido clorhídrico: el gas cloruro es emitido por los volcanes como cloruro de hidrógeno y ácido clorhídrico. La exposición al mismo puede dar lugar a irritación de ojos, piel y mucosas, y clínica a nivel respiratorio.

Concentraciones mayores a 35 ppm pueden dar lugar a irritación de nariz, garganta y laringe en poco tiempo. Sin embargo, concentraciones por encima de 100 ppm pueden provocar espasmo laríngeo o edema pulmonar. Se sabe que en regiones costeras, cuando la lava entra en contacto con el agua del mar, se puede producir un vapor denso con una salinidad 2-3 veces mayor que la del agua y un pH de 1,5-2 que ha sido responsable de la muerte de turistas en Hawai.

1.4.2 Efectos en diversos organismos

La evaluación realizada posteriormente a la erupción del volcán Irazu en Costa Rica (1963-1965) mostró que la ceniza altera significativamente las condiciones ecológicas de diversas poblaciones de insectos⁴, mientras que en Alaska se contabilizaron pérdidas económicas por los cambios adversos sufridos por comunidades de salmón debido a las condiciones ambientales derivadas de la actividad volcánica⁵. Por su parte, Vandergast et al.⁶. (2004) plantean que la actividad volcánica influye en la estructura genética de poblaciones de invertebrados en Hawai, lo que condiciona la fragmentación, el crecimiento masivo y el potencial para una evolución acelerada.

Los efectos causados por la contaminación han permitido detectar manifestaciones y alteraciones, tanto en el hombre como animales, que aún no han sido bien definidas⁷. Por ejemplo, la exposición de un grupo de ratas a cenizas, no favoreció la susceptibilidad a la infección por citomegalovirus; sin embargo, la infección por estreptococos provocó la muerte de los animales a las 24 horas⁸. Antonini et al. (2002)⁹ demostraron una mayor susceptibilidad a la infección por *Listeria monocytogenes* tras la exposición a ceniza, produciéndose daños en el tejido pulmonar.

Trabajos relacionados con la exposición a la inhalación de ceniza volcánica en modelos animales indican un aumento de los niveles de fibrinógeno en plasma y un incremento en el porcentaje de leucocitos polimorfonucleares, principalmente eosinófilos, así como una disminución del porcentaje de macrófagos a nivel alveolar. Por su parte, los estudios citogenéticos en animales que han sido expuestos a diferentes concentraciones y tipos de contaminantes ambientales, muestran una elevada frecuencia de células alteradas^{8,10,11}.

El estudio de exposición a la inhalación de la ceniza volcánica procedente del Monte Sta. Elena, a un grupo de hámsters (dos horas diarias durante un año), permitió detectar cambios en la función pulmonar y en la arquitectura del tejido de los animales, caracterizado por alveolitis y áreas con fibrosis, y a nivel traqueal, reducción en la actividad ciliar y cambios citomorfológicos. Así mismo, se observó la llegada de neutrófilos que regulan la adhesión local de moléculas, induciendo quimiotaxis de células inflamatorias en las vías aéreas¹²⁻¹⁴. La exposición a la inhalación de ceniza en hámsters, proveniente de la actividad del volcán Popocatepetl provocó una reacción inflamatoria aguda y crónica, foco neumónico con detritus celulares e infiltración de linfocitos en el tejido pulmonar.

1.4.3 Efectos secundarios de las erupciones volcánicas

Las consecuencias más graves de la erupción volcánica pueden surgir de los efectos secundarios, principalmente del tsunami, de los movimientos demográficos y de los efectos indirectos en la agricultura.

Tsunami

En 1883 explotó la isla deshabitada de Krakatoa situada en el Océano Índico, y produjo un tsunami que mató a más de 30 000 personas a lo largo de las costas de Java y Sumatra. En épocas más remotas, se sabe de otros casos, como el tsunami destructor, causado por la erupción que culminó con la formación de la isla de Santorín, localizada en la porción oriental del Mediterráneo, 1500 años a. C.

Desplazamientos poblacionales

La erupción volcánica, o el peligro de que ésta ocurra, puede causar el desplazamiento de la población o su evacuación por parte de las autoridades. Tal como ocurre con cualquier población de refugiados, esto puede ocasionar problemas de abastecimiento de agua y alimentos, de instalaciones y prácticas sanitarias, y el agravamiento de los riesgos de transmisión de enfermedades contagiosas.

Efectos en la agricultura, la ganadería y la producción de alimentos

La actividad volcánica puede acarrear efectos adversos a la ganadería y a la agricultura, tanto próximas al cono volcánico, como situadas a grandes distancias. En casos raros, esto ha llevado a la existencia de hambrunas.

Las cenizas pueden afectar al ganado de varias formas; por acción física directa que produce la destrucción de los pastos; por la ingestión de grandes cantidades de ceniza, que puede provocar el fallecimiento de los animales en pastaje, como ocurrió en Kodiak, Alaska 1912, o ser envenenados por los constituyentes tóxicos de las cenizas. Durante las erupciones del Hekla, Islandia, en 1947 y en 1970, la intoxicación por flúor causó la muerte de miles de ovejas. Los experimentos demostraron que el pasto con una concentración de flúor, incluso de 250 ppm, era suficiente para matar a las ovejas. Existe un caso de intoxicación de ovejas por cobalto en Nueva Zelanda producido por una capa de cenizas prehistóricas.

Los grandes volúmenes de ceniza que resquebrajan los árboles pueden ocasionar daño directo en las cosechas, así como los depósitos de ácidos pueden dañar las hojas. Después de la erupción del Laki, en Islandia, en 1783, cientos de Km² de los campos fueron cubiertos por humos sulfurosos que afectaron al ganado y a las cosechas; esto causó la llamada "hambruna por calina" en la que, según se dice, murió el 20% de la población³. En 1815, la erupción del volcán Tambora, Java, destruyó ampliamente las cosechas y está escrito que mató a más de 80 000 personas. El mismo volcán ocasionó cambios climáticos que causaron hambruna, incluso en lugares lejanos, como Nueva Inglaterra, un año después¹⁵.

Cabría esperar que las emanaciones químicas de los volcanes posean efectos biológicos complejos. En la US National Library of Medicine¹⁶ se cuenta con una bibliografía de referencias importantes. Uno de los efectos recién descubiertos es la relación entre los suelos volcánicos y la elefantiasis endémica no filariásica en África Oriental; dicha afección se origina por la obstrucción de los linfáticos a consecuencia de la absorción directa de cristales de sílice amorfo a través de la piel al descubierto¹⁷.

Problemas ocasionados por la lluvia de cenizas

A este respecto se observaron 3 efectos:

- a) Incremento en el número de enfermedades respiratorias agudas y crónicas incluyendo un aumento del posible riesgo de neumoconiosis, y que será el eje central de nuestra revisión.
- b) Problemas de los ojos causados por las cenizas.
- c) Incremento en el número de accidentes.

Enfermedades respiratorias agudas

Poco después de la erupción del 18 de mayo el Monte de Sta Elena, se estableció un sistema de vigilancia en las áreas devastadas del estado de Washington, el cual tenía como base un hospital. En términos generales, dentro de las áreas en las que hubo una fuerte lluvia de cenizas, se produjo un aumento tanto de visitas a Urgencias como de hospitalizaciones debido a enfermedades respiratorias durante las 2 semanas siguientes a la lluvia. Para la tercera o cuarta semana, los índices de visitas habían retornado a los números existentes antes de la erupción. Las áreas con lluvia moderada mostraron un incremento mínimo o nulo en el número de consultas por enfermedades pulmonares. El mayor incremento en las visitas médicas se observó en zonas con mayor lluvia de cenizas.

En 10 estaciones de medición de contaminación ambiental situadas dentro del área de la lluvia de cenizas, se hicieron mediciones del total de partículas suspendidas en el aire (TSP) después de la primera erupción del 18 de mayo; los niveles máximos de TSP registrados en 3 estaciones estuvieron entre 13.860 y 35.809 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En Addy, estado de Washington, los niveles promedio para períodos de 24 horas de TSP fueron 4.059 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ después de la primera erupción, que produjo una lluvia de ceniza de 1/8 de pulgada y 13.212 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ posteriormente a la erupción del 22 de julio, en la cual, la precipitación de ceniza llegó a 1/4 de pulgada. Los estándares de calidad del aire ambiente de la Agencia de Protección Ambiental para exposiciones promedio para períodos de 24 horas, variaron de un nivel "primario" de 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta las fases de "alerta", con 375 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; de "precaución", 625 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; de "emergencia", 875 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; "daño significativo", con 1.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, tales estándares fueron fijados para emisiones de partículas en la industria, usualmente asociados con SO_2 y otros contaminantes. Para valorar los posibles efectos de las cenizas volcánicas en el aparato respiratorio, se necesita considerar la composición química y el diámetro de la partícula de ceniza. Las variaciones observadas en las visitas a sitios con cantidades semejantes de cenizas se pueden explicar por los cambios en la composición de éstas y por la cantidad de lluvia caída en las diferentes áreas después de la erupción.

Para el 3 de junio de 1980, se calculaba que la emisión de SO_2 del volcán había sido de 100 a 200 ton/día. El 6 de junio habla aumentado a 1.000 ton/día. Sin embargo, la inspección indicó que no hubo un incremento en el nivel de SO_2 por encima de los niveles "basales" en el aire ambiente.

En la revisión de las historias clínicas de 200 personas que acudieron a dos hospitales en Yakima¹⁸, situados a unos 136 km de la montaña y que habían recibido más de 1 pulgada de cenizas después de la erupción del 18 de mayo, se observó que, si bien parte del incremento en las visitas de consulta se debió a angustia y aprehensión, casi todos los pacientes mostraban signos clínicos objetivos. Los asmáticos, que comprendieron la categoría más abundante en el aumento de las visitas, presentaron síntomas de tos, disnea y sibilancias, aunque sólo un pequeño número de los pacientes necesitó hospitalización. Se observó una mayor incidencia de bronquitis, predominantemente en niños y grupos jóvenes, y el signo clínico principal fueron las sibilancias. Al atender a personas con enfermedades respiratorias preexistentes se advirtió sólo un pequeño incremento en la frecuencia, pero en términos de tasas de hospitalización, los afectados más severamente fueron los pacientes con neumopatía obstructiva crónica y enfisema.

De forma global, sólo hubo un aumento moderado en las visitas de consulta. En Yakima, dentro de las visitas hospitalarias totales de todos los tipos, el diagnóstico de patología respiratoria casi se duplicó en las 2 semanas posteriores a la erupción, en comparación con las 2 semanas anteriores a tal catástrofe (232 contra 122). En el lago Moses, donde cayó una abundante lluvia de cenizas (2 a 3 pulgadas), las visitas a urgencias aumentaron más o menos un 35% en la semana después de la erupción, y las hospitalizaciones aproximadamente un 5%¹⁹.

Los resultados preliminares de una encuesta realizada al 4% de todos los residentes en el lago de Moses, indicaron un incremento en la tos e irritación leve de los ojos, vías respiratorias y faringe, dentro de las 2 semanas siguientes a la erupción. Dos personas señalaron haber tenido hemoptisis y ambas estuvieron fuertemente expuestas a las cenizas.

La exposición a cenizas y sus efectos en la salud tienen como antecedentes la presencia de broncoespasmo de la vía aérea en niños tras la erupción del volcán Soufrière²⁰. También se ha registrado la aparición de síntomas respiratorios como disminución en el flujo espiratorio forzado (FEV) y aumento en la sintomatología respiratoria en poblaciones que se localizaron a 24 y 50 kilómetros del foco volcánico, como sucedió durante la actividad del volcán Sakurajima en Japón y el Monte Sta. Elena en Washington²¹⁻²³.

Estudios epidemiológicos referentes a la actividad del volcán Masaya en Nicaragua, revelaron casos de irritación de la piel y de las vías aéreas²⁴. Las implicaciones en la salud de poblaciones cercanas al volcán Yasur en Tanna, Nueva Zelanda, se caracterizaron por alteraciones respiratorias, estrés y por la aparición de fluorosis a nivel óseo y dental²⁵.

La evaluación de la exposición ocupacional a ceniza volcánica de los guardabosques en Washington, mostró una disminución en los niveles de C3 y C4 (factores de complemento; proteínas involucradas en el proceso de inflamación) con respecto al grupo de referencia, además de un marcado descenso de los niveles de inmunoglobulina G (IgG) en el suero después de un año de exposición a la ceniza volcánica. Los datos plantean que la exposición a la inhalación de ceniza afecta las funciones inmunológicas²⁶, lo que podría dar lugar a un aumento de las infecciones respiratorias o a cambios en la arquitectura del pulmón.

Estudios epidemiológicos realizados en Biancavilla, una población al oeste de Sicilia localizada en un área volcánica, han revelado el incremento en la incidencia de mesotelioma pleural maligno, carcinoma, fibrosis pulmonar y daños en el ADN.

Estos efectos se relacionan con la exposición que presenta la población a rocas de origen volcánico y que contienen fibras anfíbolos. El tipo de reactividad biológica de las

fibras anfíbolas es parecido al de las fibras de asbesto, las cuales se sabe que inducen fibrosis inflamatoria a nivel pulmonar y daños en el ADN a largo plazo, ocasionando carcinoma y mesotelioma pulmonar²⁷.

El diagnóstico referente a los efectos sobre la función pulmonar en personas expuestas a cenizas del volcán Popocatepetl, durante el periodo de diciembre de 1994 a enero de 1995, indujo la presencia de alteraciones en la función pulmonar en una proporción mayor a la que se esperaría en una población con baja prevalencia de tabaquismo²⁸.

Es importante mencionar que la capacidad para inducir daño por parte de las muestras de ceniza difiere, ya que no presenta la misma capacidad hemolítica una muestra de ceniza de un evento explosivo reciente con respecto a una muestra de ceniza sedimentada con óxido de titanio o con el compuesto tóxico conocido como polvo de cuarzo DQ12²⁹.

Como es evidente, los síntomas son difíciles de atribuir a una enfermedad específica. Los factores ambientales son diversos y los más comunes incluyen infecciones por virus, bacterias y parásitos, los cuales se pueden asociar a PM10 y PM2.5³⁰⁻³², además de la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos, partículas de mercurio y radón en el ambiente³³⁻³⁵.

Se sabe que los macrófagos pulmonares participan en la eliminación de partículas inhaladas, demostrándose que los asbestos inhalados activan factores quimiotácticos dependientes del complemento en la superficie alveolar, que facilitan el reclutamiento de macrófagos a sitios de depósitos fibrosos. No obstante, se ha visto que la exposición de ceniza volcánica no siempre induce la acumulación de macrófagos. Esto sugiere que, debido a las características fisicoquímicas de las cenizas, en ciertas ocasiones se puede activar el complemento y, consecuentemente, atraer macrófagos³⁶.

También se ha demostrado que, durante la exposición continua a la inhalación de polvo fino, la afección se puede complicar con algún tipo de infección; por tanto, la importancia de investigar los contaminantes en la atmósfera radica en conocer los riesgos que suponen para la salud y el tiempo que pueden permanecer en el ambiente sin que se desarrollen lesiones definitivas³⁷⁻³⁹.

Cuando la presencia de la causa irritadora, o de sus consecuencias inmediatas, se prolongan, el proceso de defensa tisular puede dar lugar a la fibrosis, iniciándose en cualquier punto de la estructura broncopulmonar. La fibrosis puede ser localizada y considerada como cicatricial o terminal, pero si persiste, la fibrosis será evolutiva y aumentará en intensidad y en extensión llegando a ser total. En ocasiones, la fibrosis puede iniciarse de forma simultánea en varios puntos y, si es progresiva, llegar a confluir. Por su parte, los mecanismos inmunológicos pueden ser los responsables de las alteraciones en la arquitectura del pulmón como consecuencia de la exposición a partículas contaminantes^{40,41}

Los estudios de campo y laboratorio indican que la exposición moderada a la ceniza volcánica puede dar paso a enfermedades respiratorias e incluso a la fibrosis pulmonar⁴²⁻⁴⁷

Otros efectos de la inhalación de la ceniza volcánica a largo plazo se revisarán en profundidad más adelante.

Problemas de los ojos

También se advirtió que se registró un mayor número de visitas al hospital por complicaciones oftalmológicas. En Yakima hubo precipitación de 2 tipos de cenizas: grandes gránulos gruesos que se asemejaban a una arena gris y un polvo gris fino. Las visitas a urgencias aumentaron a causa de abrasión corneal, cuerpos extraños en el ojo, irritación ocular y conjuntivitis, u "ojos rojos". Tal como ocurrió con las complicaciones del aparato respiratorio, las molestias de los ojos fueron más intensas durante las 2 semanas siguientes a la erupción. Sin embargo, de 129 personas que se quejaron de problemas oftalmológicos, se consideró que sólo 42 (el 33%), habían sido causados por exposición a las cenizas¹⁵.

Riesgo de neumoconiosis

Entre el 3 y el 13 de junio de 1980, se obtuvieron muestras del aire ambiental y laboral en cinco comunidades del estado de Washington. Estos lugares estuvieron expuestos a las cenizas de las erupciones del 18 a 25 de mayo. El propósito de la encuesta era el de valorar la exposición ocupacional y las concentraciones comunitarias de polvos respirables (con menos de 10 μm del tamaño de la partícula). Se midió la concentración promedio de polvo respirable en 11 categorías de trabajadores expuestos, en las que se incluía personas que trabajaban en tareas de limpieza, actividades silvícolas y agrícolas, así como policías. Ésta fue de 0.4 mg/m^3 (0.05-0.67 mg/m^3)⁴⁸. En 4 muestras obtenidas en hogares, escuelas, establecimientos comerciales y automóviles, se encontró un promedio de 0.07 mg/m^3 (0.03-0.1 mg/m^3)⁴⁹. Durante el periodo de obtención de muestras, trabajadores de la limpieza, trabajadores de pulimento y silvícolas estuvieron expuestos a concentraciones de polvo respirable que excedieron de 0.8 mg/m^3 entre el 15 y el 31% de las veces. El análisis de 3 muestras de las cenizas con polvo respirable demostró que contenían un 6% de cristales de sílice libre.

El gobierno estadounidense fijó el límite recomendado para exposición ocupacional al sílice libre en 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se calculó un "límite de exposición permitido" aproximado debido a que el límite mencionado se había fijado para exposición ocupacional y no estaba destinado a los casos de exposición a cenizas volcánicas. Las concentraciones de polvo respirable de 0.8 a 1.0 mg/m^3 que contenía del 5 al 6% de sílice libre, generarían unos 50 μg de sílice libre/ m^3 de aire. Se concluyó que, con base en los datos epidemiológicos disponibles, casi todos los trabajadores expuestos a la ceniza en sus labores, podían estarlo a una alta concentración durante 8 horas al día y 5 días a la semana, sin que posteriormente sufrieran silicosis. Se hicieron recomendaciones a trabajadores fuertemente expuestos, a efecto de que emplearan medidas de protección.

Se concluyó que, si hubiera una gran lluvia de cenizas o la necesidad de trabajo constante bajo una lluvia intensa, que ocasionara exposición duradera durante varios años, las personas expuestas se enfrentarían a un riesgo más elevado de contraer silicosis. Los niveles bajísimos de polvo respirable medidos en las comunidades, sugirieron que la población general no estaba en peligro de sufrir neumoconiosis o silicosis.

El estudio de Green y col⁵⁰ en el que se inyectaron cenizas del volcán Sta. Elena por vía intratraqueal a ratas, ocasionó una respuesta inflamatoria pulmonar aguda en éstas, seguida de una reacción granulomatosis fibrótica que persistió hasta finales del sexto mes de estudio. La mayor parte de las cenizas (99% por recuento y 81% por peso) tuvieron un diámetro de partícula respirable. Las cenizas contuvieron muy diversos minerales. Los cristales de sílice constituyeron el 7.2% de las cenizas, en peso.

El examen post mortem de los pulmones de 2 leñadores que habían trabajado en el área del Monte Sta. Elena el día de la erupción, en uno de ellos mostró focos intraalveolares semejantes a las lesiones observadas en estudios de animales, y en el otro, una reacción intersticial aguda con acúmulos de células gigantes que contenían ceniza en el alveolo. Los hombres fallecieron 10 y 16 días después de la erupción, respectivamente. Los autores recomiendan tener cautela en la interpretación de estos datos, porque los experimentos en ratas se basaron en exposiciones mucho mayores de las que posiblemente se adviertan en la población general; en el caso de los humanos, también hubo otras complicaciones como quemaduras extensas. Sin embargo, los autores concluyeron que las cenizas volcánicas son moderadamente fibrógenas, y habrá de considerarse el riesgo de neumoconiosis entre sujetos fuertemente expuestos. Sugieren tomar precauciones en la vigilancia de las concentraciones de partículas en el aire, a efecto de minimizar la exposición a cenizas en aquellas personas expuestas severamente.

Morbilidad psiquiátrica

El día de la erupción, los habitantes de Yakima⁵¹, población situada a 136 km de la montaña, advirtieron una lluvia de cenizas acompañada de relámpagos, truenos y un olor a huevos podridos, junto con una niebla densa que dejó al pueblo en tinieblas. Pocas personas habían sido advertidas respecto a lo que se aproximaba y ninguna de ellas tenía experiencia previa acerca de la lluvia de cenizas, por lo que se produjo gran ansiedad acerca de los efectos posibles en la salud. Sin embargo, en los registros conservados por el Programa Global de Salud Mental Central de Washington, con base en un teléfono de "línea abierta" no hubo incremento en las llamadas por problemas psiquiátricos en mayo, si se compara esta información con la correspondiente a la de los 4 meses previos a la erupción. Tampoco hubo aumento de los problemas conductuales y emocionales, número de personas que necesitaron apoyo emocional, ni en el de admisiones voluntarias e involuntarias al pabellón psiquiátrico del hospital Yakima Valley Memorial.

Accidentes

En el lago Moses se observaron otros daños originados por las cenizas, que incluían accidentes de vehículos de motor y caídas de escaleras, causadas cuando los residentes intentaron quitar la ceniza depositada en los techos de sus hogares.

2

OBJETIVO

El objetivo del presente estudio ha sido realizar una revisión sistemática de la literatura para analizar el impacto directo de los gases emitidos en las erupciones volcánicas sobre el sistema respiratorio.

Se realizó una búsqueda sistemática utilizando la base de datos Medline con las siguientes palabras clave: “volcanic gases”, “volcanic ash”, “natural disasters”, “health effects”, “volcanic eruptions”, “respiratory disease”, “pulmonary pathology”. Se seleccionaron los artículos escritos en lengua inglesa entre enero de 1998 y la fecha actual relacionados con los efectos de las erupciones volcánicas sobre el sistema respiratorio.

Se excluyeron los artículos sobre estudios realizados en laboratorios o con animales y aquellos basados en informes de casos clínicos. Se excluyeron también todos los estudios que valoraban el efecto sobre la salud de una erupción volcánica no relacionados directamente con la inhalación de partículas en suspensión así como aquellos que evaluaban de forma conjunta con otros desastres naturales las alteraciones respiratorias secundarias de forma genérica a una catástrofe. De esta forma se revisaron únicamente aquellos artículos que valoraban el impacto directo sobre la salud de las emisiones volcánicas, bien de forma retrospectiva o prospectiva, haciendo hincapié especialmente en la inhalación de partículas en suspensión y las consecuencias para la salud de las poblaciones circundantes a las áreas volcánicas conocidas a lo largo del tiempo.

Otra serie de artículos relacionados con las erupciones volcánicas, efectos genéricos sobre la salud de la emisión de gases y material piroclástico se utilizó como material de apoyo.

Se incluyeron un total de 22 artículos. De ellos 7 artículos eran revisiones. 1 era un estudio prospectivo, 8 eran estudios ecológicos y 6 estudios eran estudios epidemiológicos transversales basados en encuestas de salud.

Como he dicho con anterioridad, todos ellos se basaban en el estudio de la sintomatología respiratoria en poblaciones circundantes a un área volcánica, bien tras una erupción o bien tras exposición crónica a tóxicos ambientales atribuidos directamente a las emanaciones de gases del cono volcánico.

Dentro de los estudios **ecológicos**, sólo en tres de ellos se relacionaron los niveles de exposición a tóxicos ambientales, fundamentalmente SO₂ y partículas de polvo en suspensión (SPM) con la sintomatología. En el artículo de R. Shinkura et al⁵², se obtuvo un registro de los citados tóxicos realizados por estaciones de medición de contaminantes atmosféricos. Los datos obtenidos se correlacionaron con las erupciones volcánicas del monte Sakurajima y con la mortalidad infantil a lo largo de 10 años (entre 1978 y 1988). Se intentó relacionar el exceso de mortalidad con la existencia de patología respiratoria responsable de la misma tal como neumonía, asma etc... Sin embargo, se objetivó por registros históricos, que la proporción de muerte por tales causas era similar en el distrito estudiado (Yamashita) y el resto de Japón (4,6% vs 4,4%). Se relacionó el aumento de SO₂ y SPM atmosférico con la actividad volcánica del Monte Sakurajima, aunque sorprendentemente los niveles no diferían significativamente de los observados en otras poblaciones de Japón. Aunque el estudio concluye que había un exceso significativo de mortalidad infantil atribuible fundamentalmente a la exposición de SO₂ (p=0,002), no se consiguen clarificar las causas de la misma.

Otro estudio llevado a cabo en el monte Sakurajima, Japón, fue el realizado por Kenta Higuchi et al en 2011⁵³, sin embargo éste no mide la concentración de los diferentes contaminantes ambientales. Su objetivo era analizar el efecto de la ceniza volcánica sobre la mortalidad por patología respiratoria en el entorno del volcán. Se sabe que la ceniza del volcán de Sakurojima presenta hasta un 7% de cristobalita, una forma de sílice cristalina, y baja concentración de SPM. En este trabajo midieron el índice de mortalidad estandarizada (IME) entre 1968 y 2002 en las ciudades de Sakurajima y Tarumizu, donde la cantidad de ceniza volcánica en el ambiente era de 10000g/m²/año de media en 1980, y lo compararon con la ciudad de Kanoya, más alejada del volcán y por lo tanto con menor concentración de ceniza volcánica ambiental. El IME por cáncer de pulmón en dichas ciudades era de 1.61 (1.44-1.78) para hombres y 1.67 (1.39-1.95) para mujeres, mientras que era cercano a 1 en la ciudad de Kanoya. En Sakurajima-Tarumizu se observó un aumento del IME por EPOC (1.81) y patología respiratoria aguda (1.12), mientras que esto no sucedió en Kanoya. El IME por patología respiratoria aguda es menor que el observado en EPOC y cáncer de pulmón. El aumento de IME en este estudio por cáncer de pulmón sugiere que existen efectos a largo plazo producidos por las cenizas volcánicas de este volcán, y concluyen que la cristobalita es probablemente la causa principal del aumento de muertes por patología respiratoria, dado que el tabaquismo no es capaz de explicar dicho aumento (la diferencia entre ambas zonas es insignificante) y la cantidad de SPM en la zona expuesta es pequeña.

Varios estudios en el entorno del volcán Kilauea midieron la relación entre los niveles de partículas en suspensión y SO_2 con la patología respiratoria. Uno de ellos es el realizado por Jon-Pierre Michaud en 2004³¹. En este caso, se correlacionaron con registros de visitas a Urgencias en el entorno del volcán Kilauea entre enero 1.997 y mayo del 2.001. Se valoraron 4 grupos de patología, 1) asma/EPOC, 2) patología cardiológica, 3) infecciones respiratorias, 4) gastroenteritis. Se recogieron mediciones de contaminantes ambientales 1, 2, 3 días antes y en la misma mañana de la visita a urgencias. Se encontró una correlación significativa entre los niveles de SO_2 3 días antes y las agudizaciones de asma/EPOC ($p=0,001$). Sin embargo se encontró una asociación más fuerte entre el mes del año y la agudización que entre ésta y los niveles de SO_2 , de forma que, por ejemplo, en febrero existía un 56% más de visitas a urgencias en el grupo de asma/EPOC que en julio, sin embargo las diferencias entre los días con más nivel de SO_2 ambiental (33,7 ppb) respecto al que menos (0 ppb) justificó un exceso de visitas a Urgencias en este grupo de patología de solo el 25%.

Bernadette M. Longo⁵⁴ et al realizaron otro estudio en 2008 sobre el volcán Kilauea pero en este caso no midieron la concentración de los contaminantes ambientales provenientes de la erupción volcánica. Lo que hicieron fue un estudio retrospectivo de cohorte en el que revisaron las visitas a Urgencias entre enero de 2004 y diciembre de 2006 con el diagnóstico de bronquitis aguda y divididas en 5 rangos de edad, en una comunidad con exposición a gases volcánicos y otra sin dicha exposición. La concentración de SO_2 era 25 veces mayor en la comunidad expuesta frente a la no expuesta (17.8 ppbv vs 0.7 ppbv). La tasa de incidencia en la comunidad de expuestos fue de 185.7/1000 frente a 117.2/1000 en la no expuesta. Midieron además la incidencia acumulada (IA) encontrando que en la comunidad expuesta era de 1.57 (1.36-1.81). Los niños entre 0-14 años presentaban un mayor riesgo de presentar bronquitis aguda en la comunidad expuesta que en la no expuesta (IA de 6.56) al igual que los individuos ente 45-64 años (IA 1.77). Además se encontró un aumento del riesgo en no fumadores expuestos de más de 15 años (IA 1.41) respecto a no expuestos, mientras que este riesgo en fumadores expuestos no fue significativo.

En otro estudio realizado también por Bernadette M. Longo et al en 2010⁵⁵ relacionaron las visitas a urgencias por patología aguda 14 semanas antes y después del incremento de la actividad volcánica del Kilauea que se inició en marzo del 2008. Se objetivó una asociación significativa ($\text{OR}=6$) entre los niveles de partículas en suspensión y SO_2 , y la existencia de patología respiratoria aguda, sin embargo no se encontró una asociación significativamente mayor con bronquitis aguda, agudización asmática y/o neumonía

De forma similar a este último, en julio 2.007 Naumova N E et al⁵⁶ evaluaron las visitas a Urgencias de niños realizadas una semana antes, y una, dos y tres semanas después de la erupción del volcán Pichincha. Se dividieron las patologías estudiadas en dos grupos: 1) infecciones de vías respiratorias altas y 2) infecciones de vías respiratorias bajas. Observaron que las visitas a Urgencias por patología respiratoria se incrementaron significativamente en las tres semanas posteriores a la erupción ($\text{RR} = 2.22, [1.95, 2.52]$ and $\text{RR} = 1.72 [1.49, 1.97]$ el grupo 2 y 1 respectivamente. El mayor impacto fue para niños menores de 5 años y en la época previa a la erupción (periodo de mayor actividad fumarólica) en el que se duplicaron los casos de asma.

En otro estudio realizado por Santos Amaral et al en 2.006⁵⁷ se valoraron de forma retrospectiva dos poblaciones de las azores, una de ellas residente en un área de actividad volcánica y otra en la que no se había documentado actividad volcánica en los últimos tres millones de años. Para ello se recogieron datos de historias clínicas de los centros de salud

y se evaluó el riesgo de bronquitis crónica. Se objetivó que éste era mucho mayor (RR 3,99 para hombres y 10,74 para mujeres) en el área de mayor actividad volcánica.

Otro estudio, también realizado en el entorno de las Azores⁵⁸, valora la incidencia de cáncer comparando de forma retrospectiva las tasas de dos poblaciones, una no expuesta a la actividad volcánica (Santa María) y otra expuesta (Furnas), los datos se obtuvieron de los registros médicos de los centros de salud locales. Se evaluó la incidencia de cáncer de labios, cavidad oral, faringe, aparato digestivo, respiratorio y de órganos intratorácicos, piel, mesoteliomas y tejidos blandos, mama, órganos genitales de ambos sexos y hematológicos. Otros tipos de cáncer tales como del sistema nervioso central (SNC), tiroides y otros órganos endocrinos, ojo y de huesos o cartílagos no constaban en los registros. Se ajustaron las tasas de incidencia por edad y sexo y se utilizaron tasas medias anuales de cáncer estandarizadas por edad. Se calculó el riesgo relativo estandarizado por edad entre ambas poblaciones. Se objetivó que los tres tipos de tumor más frecuentes encontrados en varones en Furnas (población expuesta) fueron los de órganos genitales (30,6%), labio, cavidad oral y faringe (26,1%) y piel (15,9%), mientras que en Santa María (población no expuesta) los más frecuentes fueron los tumores de pulmón y otros órganos intratorácicos (42,8%), órganos genitales (33,8%), digestivos (26,8%). Entre las mujeres en Furnas, los más frecuentes fueron el de mama (55,6%), órganos genitales (26,7%) y labios, cavidad oral y faringe junto con los del aparato digestivo (13,9% en ambos casos), mientras que en Santa María predominaron los de localización inespecífica (19,9%), órganos genitales (17,9%) y mama (14,7%). Globalmente el riesgo de cáncer en varones fue un 24% menor en Furnas comparado con Santa María aunque el riesgo fue mayor para cáncer de labios, cavidad oral, faringe, piel y tejidos blandos y mesotelial, mientras que las mujeres presentaban un 63% de incremento del riesgo de cáncer en la misma población, sobre todo por la mayor incidencia de cáncer de mama (273% más comparado con Santa María). Globalmente el riesgo de cáncer cuando se utilizaron tasas anuales medias estandarizadas por edad fue mayor en Furnas. El estudio justifica las mayores tasas de incidencia de cáncer intratorácico y digestivo en Santa María por la mayor prevalencia de tabaquismo (25% en Furnas vs 44% en Santa María) y el mayor consumo de alcohol en esta última población. Sin embargo, relaciona el claro aumento de incidencia de cáncer de mama con una posible exposición a Radón que se ha demostrado que es carcinógeno para las células epiteliales de las mamas y que procede fundamentalmente de la actividad volcánica.

Hubo un único **estudio prospectivo** en nuestra revisión⁵⁹. El objetivo del mismo fue medir la concentración de SO₂ en el ambiente fue realizado por Satoko Iwasaea et al. en 2009. El objetivo fue medir el efecto del SO₂ en el sistema respiratorio en 823 habitantes de la isla de Miyakejima (Tokio) dos años después de que regresasen a la isla tras la evacuación que sufrieron tras la erupción del volcán Mt. Oyama en 2000. El estudio se llevó a cabo a través de un cuestionario de síntomas (tos, expectoración, picor/dolor de garganta, disnea, obstrucción/congestión nasal, irritación/dolor en los ojos, picor/irritación de la piel, sibilancias y disnea) y de la medición de la función pulmonar a través de una espirometría, realizados en el 2004 (antes de volver a la isla) y en 2006 (dos años después del regreso). Se midió la concentración de SO₂ a través de 7 puntos de medición a lo largo de la isla, dividiendo ésta en 4 zonas, de menos a más concentración de SO₂ (0.019 ppm, 0.026 ppm, 0.032 ppm, 0.045 ppm, respectivamente). La concentración de sulfuro de hidrógeno fue muy baja y la de cloruro de hidrógeno y SPM fueron despreciables por lo que los efectos encontrados era muy improbable que fueran producidos por estos gases diferentes al SO₂. No se observó un deterioro en la función pulmonar al comparar ambas fechas. La prevalencia de la tos y la expectoración fue significativamente mayor en el 2006 que en 2004 con una OR de 1.75 (1.33-2.30) y 1.44 (1.12-1.87) respectivamente. La prevalencia de los síntomas relacionados con bronquitis (sibilancias, disnea) en 2006 fue de 4.1% mientras que el en 2004 fue de 2,1% (p=0.035). Comparando las zonas, la frecuencia de

expectoración e irritación/congestión nasal fue significativamente más alta en aquellas zonas con mayor exposición a SO₂.

Dentro de los estudios **epidemiológicos transversales**, encontramos el escrito por A. Ishigami et al en 2008⁶⁰. Este estudio fue realizado en Miyakejima (Tokio), cinco años después de que el volcán Mt Oyama entrase en erupción, evaluando la asociación entre los niveles de SO₂ y los síntomas agudos subjetivos en un grupo de voluntarios sanos que trabajaron en la isla durante periodos cortos (1-15 días) ente el 1 de febrero y 31 de julio de 2005. Pare ello un grupo de 611 participantes registraron hora a hora en un diario los síntomas que notaban (tos, expectoración, picor/dolor de garganta, disnea, obstrucción/congestión nasal, irritación/dolor en los ojos, picor/irritación de la piel). Los niveles de SO₂ fueron medidos minuto a minuto utilizando 14 estaciones de medición de contaminación ambiental. El efecto de otros gases emitidos por el volcán fue considerado despreciable debido a la baja concentración de estos en el ambiente. Se objetivó una fuerte evidencia de la relación entre los niveles de SO₂ en el ambiente con la tos, picor/dolor de garganta y disnea, observándose un mayor riesgo de padecer estos síntomas ente las mujeres y entre los no fumadores, y por lo tanto, considerándose más susceptibles.

En otro estudio epidemiológico llevado a cabo por Bernadette M. Longo en 2009 sobre el Volcán Kilauea⁶¹, realizaron dos grupos, uno con exposición a los gases emanados por el volcán, en el que midieron las concentraciones de SO₂ y partículas en aerosol de pequeño tamaño (<0.3 µm) durante 3 semanas, tanto a nivel ambiental como en interiores de edificios, y otro sin exposición a estos gases. Se eligieron de forma aleatoria residentes de más de 7 años y a todos ellos se les realizó una entrevista sobre síntomas cardio-respiratorios, estilos de vida, y dos preguntas abiertas de cómo el volcán había afectado sus vidas, así como signos vitales (tensión arterial, frecuencia cardiaca y respiratoria). En los resultados del estudio se objetivaron altas concentraciones de ambos tóxicos en la zona expuesta respecto al resto de la isla (SO₂ 17.8 ppbv vs 0.7 ppbv), tanto en los exteriores como en los interiores (16.8 ppbv). Además se observó una relación estadísticamente significativa entre la exposición y los síntomas que referían los participantes tales como tos, expectoración, rinorrea, dolor de garganta, congestión nasal, sibilancias e irritación ocular. Por otra parte, el 35% de los individuos percibían que su salud había empeorado a raíz de la erupción volcánica, sobre todo fumadores y aquellos con alguna patología respiratoria de base.

Hidenori Uda et al publicaron un estudio en 1998⁶² basado en un cuestionario sobre síntomas "asma like" (disnea, sibilancias...) realizado entre 1991 y 1993 a 1371 niños que vivían en una zona expuesta a la contaminación ambiental del volcán Sakurajima comparándolo con el realizado a 733 niños que vivían en una zona no expuesta. No se observó diferencia significativa en los síntomas "asma like" entre ambos grupos, (OR 1.1 (0.7-1.8), P=0.583).

En este otro estudio llevado a cabo por Hanne Krage et al. en 2012⁶³ tenían como objetivo medir los efectos sobre la salud física y mental del volcán Eyjafjallajökull, Islandia, el cual entró en erupción en abril de 2010 y duró alrededor de 6 semanas, emanando cerca de 8 millones de toneladas de partículas finas (< 28 µm de diámetro) a la atmósfera. En el análisis ambiental se observó que la presencia de cuarzo era pequeña, que la cantidad de cristobalita y SO₂ era ínfima y que más del 25% del material expulsado por el volcán eran partículas finas.

El estudio tuvo lugar entre el 31 de mayo y el 11 de junio de 2010. Se realizó una espirometría a 207 residentes de la zona antes y después de administrar un broncodilatador, todos ellos fueron examinados por un médico y además se les pidió que contestasen a un

cuestionario sobre síntomas físicos y mentales (síntomas respiratorios, irritación ocular, dolor de cabeza, náuseas, mialgias...) y medidas de protección adoptadas (uso de mascarillas y gafas, permanecer en el interior de las casas...) Se observó que la exposición a las cenizas volcánicas a corto plazo está relacionada con aumento de irritación ocular, de síntomas de la vía aérea superior y de exacerbaciones de patologías respiratorias obstructivas en los pacientes diagnosticados previamente. Pero por otra parte también se vio que las medidas de protección adoptadas por los participantes ayudaron a mitigar los síntomas.

El trabajo de L. Forbes et al. del 2003⁶⁴ fue realizado en el entorno del volcán Soufrière Hills (1995), Montserrat, en 1998, se realizó un cuestionario a los padres de los niños menores de 12 años y a los niños mayores de 13 años (383 participantes en total), que acudían al colegio en Montserrat, el cual incluía preguntas pertenecientes al Estudio Internacional de Asma y Alergias en niños (ISAAC) sobre síntomas respiratorios, broncoconstricción inducida por el ejercicio (BIE) así como de exposición actual o previa a la contaminación ambiental proveniente del volcán, en la actualidad y en los 12 meses anteriores. Además dividieron las zonas donde habitaban en zonas de alta exposición, media y baja en base al grosor de la capa de ceniza medida entre 1995 y 1998. Los niños menores de 12 años que vivían (OR 3.45, 1.69-7.04) o habían vivido alguna vez en zonas con media-alta exposición (OR 4.30, 1.70-10.86) padecían con más frecuencia sibilancias al compararlos con aquellos que vivían en la zona de baja exposición. La misma tendencia fue observada respecto a la tos y a las visitas a servicios médicos por síntomas respiratorios en los niños de este grupo de edad. Sin embargo estos resultados no fueron significativos en el grupo de más de 13 años. La prevalencia de BIE en niños entre 8-12 años que vivían en zonas con alta exposición fue cuatro veces superior que en aquellos con baja exposición (OR 3.85). Para objetivarla, se realizaron pruebas de función respiratoria antes y después del esfuerzo, definiendo como positiva aquella prueba en la que se observa una disminución del 10% en el pico-flujo tras la misma.

En 2008 se publicó un estudio epidemiológico escrito por Bernadette M. Longo⁶⁵ sobre los efectos cardiorrespiratorios del SO₂ y partículas finas de sulfato (<3 µm) (SPM) emitido en el volcán Kialuea, Hawai. Para ello midieron la concentración de dichos contaminantes diferenciando entre zona expuesta a SO₂ (24.5 ppbv), a SPM (9.6 µm/m³) y no expuesta (SO₂ 0.7 ppbv y SPM 0,31 µm/m³). Se realizó un cuestionario a 335 adultos mayores de 20 años quienes habían residido durante más de 7 años en las áreas de estudio. Se recogieron parámetros cardiorrespiratorios, síntomas tales como irritación ocular, tos, expectoración, disnea, rinorrea, dolor de garganta, sibilancias y bronquitis. En la zona expuesta a SO₂ se vio que la presencia de tos era cuatro veces más frecuente (OR 4.69, p<0.001). La expectoración también era más frecuente, sobre todo en aquellos que eran fumadores respecto a los que no lo eran (OR 5.5 vs 2.2). Otros síntomas como rinorrea, dolor de garganta, o irritación ocular también eran significativamente más frecuentes entre los expuestos a SO₂, no siendo así en el caso del asma, que no mostró diferencia entre ambos grupos. La patología cardiovascular no se vio influida por la exposición a este contaminante, aunque si que se observó un aumento de la tensión arterial en este grupo.

En el área con alta exposición a SPM se vio un aumento importante de los síntomas respiratorios incluso mayor que el grupo expuesto a SO₂. La OR para la tos era de 6.5 y para la expectoración era de 1,2 en no fumadores y 5.6 en fumadores (p< 0.002). La presencia de rinorrea, dolor de garganta, o irritación ocular también era más acusada entre los expuestos. La prevalencia de asma no mostró diferencias con el grupo no expuesto. Al igual que en el área con exposición a SO₂, la patología cardiovascular no se vio influida por esta exposición, pero si se objetivó un aumento de tensión arterial. Los autores concluyen

que la exposición a largo plazo al SO₂ y a las SPM provenientes de los volcanes podría tener efectos cardiorrespiratorios adversos en adultos.

5

DISCUSIÓN

Como hemos visto, los componentes de las emisiones volcánicas y los efectos de la contaminación ambiental de la misma han sido bien estudiados en varios estudios a corto, medio y largo plazo. Conocemos también los efectos nocivos sobre la salud de las partículas procedentes de las emisiones volcánicas y las consecuencias del depósito pulmonar de las mismas. Sin embargo, los efectos directos e indirectos sobre la salud de las poblaciones expuestas a los contaminantes ambientales y a las partículas en suspensión procedentes de la ceniza volcánica han sido mucho menos validados.

De hecho, aunque existen diversos estudios sobre los efectos para la salud de los compuestos volátiles de la ceniza volcánica que relacionan directamente los niveles de los mismos con los cuadros clínicos derivados de la inhalación de dichas partículas, la inmensa mayoría de ellos son estudios “ecológicos”, con las debilidades inherentes a este tipo de estudio, es decir; en general son estudios transversales, lo que no permite categorizar adecuadamente la secuencia temporal de los hechos estudiados (ambigüedad temporal), suelen presentar sesgos propios, tales como el “sesgo de agregación”, es decir, el que ocurre porque una asociación observada entre variables en un nivel agregado, no necesariamente representa la asociación que existe en el ámbito individual.

Existe además cierta discordancia en los estudios que nos ocupa. De modo que p. ej., en el estudio de Shinkura et al⁵³, no se consiguió explicar de forma adecuada el exceso de mortalidad infantil en función de los niveles de SO₂ ni logró relacionarse el mismo con la patología respiratoria. A pesar de que sabemos que dicho contaminante procede de las cenizas volcánicas, tampoco se demostró una mayor concentración en el entorno de la isla de Miyakejima cuando se compararon los niveles del mismo con otras poblaciones alejadas del cono volcánico.

En el caso que nos ocupa, parte de los estudios se refieren a poblaciones de países con condiciones socio-sanitarias subóptimas con parámetros de calidad de recogida de datos en muchas ocasiones por debajo de lo deseable, lo que puede afectar a los resultados del estudio. Además, la percepción de una posible alarma social dependiente de los hallazgos encontrados y de la posible repercusión para el turismo de la misma dificulta aún más el adecuado diseño de los estudios poblacionales.

Existen además muy pocos estudios sobre los efectos en el aparato respiratorio de la inhalación de partículas procedentes de la ceniza volcánica. A pesar de que se utilizaron términos de búsqueda deliberadamente ambiguos y poco restrictivos sólo encontramos 22 artículos. Es evidente que para conocer adecuadamente los efectos a largo plazo de la exposición a la inhalación de los contaminantes volcánicos de las poblaciones circundantes a las áreas volcánicas se precisan de más estudios prospectivos en los que se cumplan los siguientes requisitos:

1. Adecuada medición de contaminantes ambientales, de forma que se pueda realizar una adecuada extrapolación de los efectos de los mismos en función de la exposición (dosis-respuesta).

2. Estudios a largo plazo de forma que se pueda realizar una correcta asociación entre las emisiones volcánicas y los efectos sobre la salud de la exposición a lo largo de los años sobre las mismas (ej. probabilidad de desarrollar carcinoma broncogénico).

3. Ampliación de estudios sobre otros tóxicos, tales como el radón o gases halógenos como HF, HCL- ó LAZE (ácido hidroclicórico que forma una especie de niebla "densa" al contacto de la lava con el agua del mar p. ej. en el entorno del volcán kilauea).

4. Estudios prospectivos y caso-control con poblaciones de similares características geográficas y socio-culturales pero con exposiciones claramente diferenciadas.

Existen, como hemos dicho muy pocos estudios a largo plazo con resultados además no directamente concluyentes o en algunos casos cuestionables. Así el artículo de Amaral et al. sobre la incidencia de cáncer en dos poblaciones de las Azores⁵⁸ presenta resultados difícilmente extrapolables. Las diferencias en el hábito tabáquico dan lugar a diferencias significativas en la incidencia de cáncer de pulmón, de modo que el efecto intrínseco de la exposición a los contaminantes ambientales queda sin validar. Más plausible es la explicación del Rn como fuente carcinógena para el ca. de mama, habida cuenta de que a nivel de las células del ductus intraepitelial se conoce experimentalmente su capacidad para inducir aberraciones cromosómicas. Sin embargo, existen probables pérdidas de información en los datos obtenidos, como reconoce el citado artículo, ya que el sistema de recogida de datos del Centro oncológico de las Azores no fue operativo realmente hasta el año 2.005, por lo que existen dudas razonables sobre la fiabilidad del registro de tumores anterior a esta fecha.

Otros carcinógenos ambientales tales como los derivados del amianto (anfíboles y crocidolita fundamentalmente), no han sido adecuadamente estudiados a lo largo del tiempo.

En algunos casos, los artículos recogen conclusiones dispares. Así por ejemplo en el estudio transversal realizado por Hidenori Uda⁶² sobre la incidencia de asma en poblaciones en la vecindad del monte Sakurajima no se encuentra una proporción de niños asmáticos más elevada que en una población no expuesta. Sin embargo, en otro estudio transversal realizado en los niños de 12 años de la isla de Monserrat⁶⁴ en las indias orientales, se evidenció que los niños de las áreas expuestas a la inhalación de componentes de la ceniza volcánica presentaban mayor niveles de sibilancias (OR=4,3 si se evaluaban los últimos 12 meses o 3,45 si se valoraban a largo plazo). No obstante, las emisiones del área del volcán de Monserrat presentan un alto contenido de cristobalita cuya exposición a largo plazo se ha relacionado con una reducción del volumen pulmonar más que con la presencia de sibilancias. Sin embargo, no se han realizado estudios de seguimiento suficientes como para confirmar esto.

Si valoráramos estrictamente los parámetros de función pulmonar, existen pocos artículos de seguimiento de las mismas. Únicamente en el estudio prospectivo se valora la función pulmonar de los residentes justo antes de volver a la isla y dos años después del regreso⁵⁹. Aunque se objetiva una mayor prevalencia de bronquitis crónica, no se evidencia deterioro en los parámetros espirométricos objetivándose incluso mejoría de los mismos en mujeres, si bien los niveles de concentración de SO₂ medios eran bajos, no existe una explicación convincente para los hallazgos encontrados.

En el artículo de Forbes sobre los síntomas respiratorios en la isla de Monserrat, se investiga también la presencia de sibilancias en niños menores de 12 años y la existencia de caída en los flujos tras el esfuerzo. Se utiliza para ello un aparato de pico-flujo, que si bien no invalida los resultados, aporta menos información de la que daría un espirómetro de mano portátil⁶⁴.

Si parece existir cierta uniformidad en los diferentes estudios respecto a los síntomas más frecuentemente asociados con la exposición. Así, predominan los síntomas de vías respiratorias altas, con tos, aumento de la frecuencia de sinusitis, sequedad de garganta y ocular. La uniformidad de los hallazgos en este sentido en los diferentes trabajos publicados hace que Bernardette longo en su artículo en el Nursing Research de 2.009⁶¹, llegue a hablar de un Síndrome hipotético caracterizado por los citados síntomas. En este artículo afirman además que, cuando el individuo es fumador, suelen empeorar los síntomas de bronquitis crónica, si es asmático, suelen empeorar las sibilancias y si padece otra enfermedad respiratoria existe un aumento de disnea. Concluyen también que cuando la exposición es predominantemente a SO₂ existe mayor probabilidad de presentar tos seca o síntomas menores. En cambio, la exposición a partículas de sulfuro o a “niebla” volcánica provoca sinusitis y síntomas análogos a la bronquitis. En cualquier caso este extremo no ha sido aún confirmado por estudios posteriores.

Hemos de tener en cuenta que las emisiones volcánicas y el porcentaje de partículas pequeñas respirables y con toxicidad conocida, varía también según el tipo de volcán y la zona geográfica, lo que dificulta en gran medida la reproducibilidad de los resultados. Es más, dentro del mismo volcán, en función del periodo de actividad y de las emisiones gaseosas, pueden existir diferencias en los compuestos gaseosos y de la ceniza volcánica. Así, en la zona de Monserrat, la mayor parte de la ceniza volcánica “respirable” se originó con flujos piroclásticos que contienen hasta un 20,1% de cristobalita. Sin embargo, el porcentaje de cristobalita derivado de explosiones freáticas es del 8,6% que aun así es un valor más alto que el encontrado en la ceniza volcánica de otros lugares geográficos como puede ser el Monte Sta. Elena que entró en erupción en 1980. Sin embargo, las emisiones de SO₂ han sido relativamente bajas, lo que contrasta con las de otros volcanes como Sakurajima o Kilauea donde las emisiones son predominantemente de SO₂. Todo ello no invalida los resultados de los estudios, sin embargo, sí se ha de tener en cuenta a la hora de valorar adecuadamente los efectos sobre la salud de los distintos volcanes en el mundo.

1. Existe un escaso número de artículos en la literatura científica basados en los efectos de la actividad volcánica a medio y largo plazo sobre la población circundante, por lo que el riesgo sobre la salud que supone esta exposición no ha sido lo suficientemente validado.

2. Aunque parece que existe una relación entre las erupciones volcánicas y la presencia de algunos síntomas, como tos, irritación de garganta, disnea, rinorrea o sibilancias, no está claro que produzcan una agudización de la patología respiratoria previa, como por ejemplo, el asma.

3. Los estudios sobre volcanes muestran diferencias significativas sobre el riesgo de las poblaciones adyacentes a los mismos. Esto se justifica en parte por la diferencia entre las partículas emitidas en los distintas áreas del planeta, pero también por el diseño subóptimo de muchos estudios.

4. Son necesarios estudios prospectivos a largo plazo para evaluar de forma adecuada el potencial carcinógeno de la exposición a la ceniza volcánica o su capacidad para provocar neumoconiosis u otras alteraciones de vías respiratorias bajas, como pueden ser exacerbaciones de enfermedades respiratorias previas o infecciones pulmonares parenquimatosas

1. Krees, V. Magma mixing as a source for Pinatubo sulphur. *Nature* 1997; 389: 591-593.
2. Brasseur, G. Mount Pinatubo aerosols, chlorofluorocarbons and ozone depletion. *Science* 1992; 257: 1239-1242.
3. Whittow, J.: *Disasters* (Lane, London 1980).
4. Willie, A. y Fuentes, G. Effects of the Irazu volcano (Costa Rica) on various insects. *Rev. Biol. Trop.* 1975; 23: 165-175.
5. Dorova, J.M. y Milner, A.M. Research: effects of recent volcanic eruptions on aquatic habitat in the drift river, Alaska. *Environ Manage.* 1999 Feb; 23(2):217-230.
6. Vandergast, A.G., Gillespie, R.G. y Roderick, G.K. Influence of volcanic activity on the population genetic structure of Hawaiian tetragnatha spider: fragmentation, rapid population growth and the potential for accelerated evolution. *Mol. Ecol.* 2004; 13:1729-1743.
7. Venkatesh, I.G. Human health and trace elements including effects on high-altitude populations. *Ambio* 1998; 17: 31-35.
8. Grose, E.C., Grady, M.A., Illing, J.W., Daniels, M.J., Selgrade, M.K. y Hatch, G.E. Inhalation studies of Mt. St. Helens volcanic ash in animals III. Host defense mechanisms. *Environ. Res.* 1985; 37: 84-92.
9. Antonini, J.M., Roberts, J.R., Jernigan, M.R., Yang, H.M., Jane, Y.C. y Clarke, R.M. Residual oil fly ash increases the susceptibility to infection and severely damages the lungs after pulmonary challenge with a bacterial pathogen. *Toxicol. Sci.* 2002; 70:110-119.
10. Rubes, J., Borkovec, L., Horinova, Z., Urbanova, J., Prokova, I. y Kulikova, L. Cytogenetic monitoring of farm animals under conditions of environmental pollution. *Mutation Res.* 1992; 283: 199-210.
11. Gardner, S.Y., Lehmann, J.R. y Costa, D.L. Oil fly ash-induced elevation of plasma fibrinogen levels in rats. *Toxicol. Sci.* 2000; 56: 175-180.
12. Schiff, L.J., Byrne, M.M., Elliot, S.F., Moore, S.J., Ketels, K.V. y Graham, J.A. Response of hamsters trachea in organ culture to Mount St. Helen volcano ash. *Scan. Electron. Microsc.* 1981; 2: 169-178.
13. Raub, J.A., Hatc, G.E., Mercer, R.R., Grady, M. y Hu, P.C. Inhalation studies of Mt. St. Helens volcanic ash in animals II. Lung function, biochemistry, and histology. *Environ. Res.* 1985; 37: 72-83.

14. Graham, J.A., Miller, F.J., Davies, D.W., Hiteshew, M.E. y Walsh, L.C. Inhalation studies of Mt. St. Helens volcanic ash in animals I. Introduction and exposure system. *Environ. Res.* 1985; 37: 61-71.
15. Stommel, H.: Stommel, E.: "The year without a summer". *Scient, Am.* 1979; 240: 134-140
16. National Library of Medicine: Biomedical effects of volcanoes. Specialized Bibliography Series, SBS Num. 1980-1 (National Library of Medicine, US Department of Health and Human Services, 1980).
17. Price, E.W.; Henderson, W.J.: "The elemental content of lymphatic tissues of barefooted people of Ethiopia, with reference to endemic elephantiasis of the lower legs". *Trans, R. Soc. trop. Med. Hyg.* 1978; 72: 132-136.
18. Falk, H.; Baxter, P.J.; Ing, R.; French, J.; Health, C. W.; Bernstein, R.; Merchant, J.A.: Mount St. Helens volcano health report Num. 17 (Department of Health and Human Services, Center for Disease Control, Atlanta, 1980).
19. Center for Disease Control: Mount St. Helens volcano health report Num. 2 (Department of Health and Human Services, Center for Disease Control, Atlanta, 1980).
20. Horwell, C.J., Fenoglio, I., Vala, R.K., Sparks, R.S. y Fubini, B. Surface reactivity of volcanic ash from eruption of Soufriere Hills volcano, Montserrat, West Indies with implications for health hazards. *Environ. Res.* 2003; 93: 202-215.
21. Johnson, K.G., Loftsgaarden, D.O. y Gideon, R.A. The effects of Mount St. Helen volcanic ash on the pulmonary. *Am Rev Respir Dis.* 1982 Dec; 126(6):1066-9.
22. Baxter, P.J., Ing, R., Falk, H., French, J., Stein, G.F., Bernstein, R.S., Merchant, J.A. y Allard, J. 1981. Mount St. Helens eruption, May 18 to June 12, 1980. An overview of the acute health impact. *JAMA* 246: 2585-2589.
23. Yano, E., Yokoyama, Y. y Nishii, S. Chronic pulmonary effects of volcanic ash: and epidemiological study. *Arch. Environ. Health* 1986; 41: 94-99.
24. Baxter, P.J., Stoiber, R.E. y Williams, S.N. Volcanic gases and health. Masaya volcano, Nicaragua. *Lancet* 1993; 2: 150-151.
25. Cronin, S.J. y Sharp, D.S. Environmental on health from continuous volcanic activity at Yasur (Tanna) and Ambrym, Vanuatu. *Int. J. Environ Health Res.* 2002; 12: 109-123.
26. Olenchock, S.A., Mull, J.C., Mentnech, M.S., Lewis, D.M. y Bernstein, R.S. Changes in humoral immunologic parameters after exposure to volcanic ash. *J. Toxicol. Environ. Health* 1983; 11: 395-404.
27. Rapisarda, V., Amati, M., Coloccini, S., Bolognini, L., Gobbi, L. y Duscio, D. The in vitro release of hydroxyl radicals from dust containing fluoro-edenite fibers identified in the volcanic rocks of Biancavilla (eastern Sicily). *Med. Lav.* 2003; 94: 200-206.
28. Rojas, R.M., Noa, O.H., Pérez, N.J. y Villalba, C.J. Efectos sobre la función pulmonar en personas expuestas a cenizas del volcán Popocatépetl, Diciembre de 1994-Enero de 1995. *Rev. Inst. Nal. Enf. Resp. Mex.* 1995; 8: 112-118.

29. Wilson, M.R., Stone, V., Cullen, R.T., Searl, A., Maynard, R.L. y Donaldson, K. In vitro toxicology of respirable Montserrat volcanic ash. *Occup. Environ. Med.* 2000; 57: 727-733.
30. Seaton, A., MacNee, W., Donaldson, K. y Godden, D. Particulate air and acute health effects. *Lancet* 1995; 345: 176-178.
31. Michaud, J.P., Grove, J.S. y Krupitsky, D. Emergency department visits and 'vog' related air quality in Hilo, Hawaii. *Environ. Res.* 2004; 95: 11-19.
32. Agopyan, N., Head, J., Yu, S. y Simon, S.A. TRPV1 receptors mediate particulate matter-induced apoptosis. *Am. J. Physiol. Lung Cell Mol. Physiol.* 2004; 286: 563-572.70: 110-119.
33. Stracquadanio, M., Dinelli, E. y Trombini, C. Role of volcanic dust in the atmospheric transport and deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons and mercury. *J. Environ. Monit.* 2003; 5: 984-988.
34. Nriagu, J. y Becker, C. Volcanic emission of mercury to the atmosphere: global and regional inventories. *Sci. Total Environ.* 2003; 304: 3-12.
35. D' Alessandro, W. y Vita, F. Groundwater radon measurements in the Mt. Etna area. *J. Environ. Radiact.* 2003; 65: 187-201.
36. Warheit DB, Overby LH, George G, Brody AR. Pulmonary macrophages are attracted to inhaled particles through complement activation. *Exp Lung Res* 1988; 14: 51-66.
37. Yano, E., Yokoyama, Y., Higashi, H., Nishii, S., Maeda, K. y Koizumi, A. Health effects of volcanic ash: a repeat study. *Arch Environ Health* 1990; 45: 367-373.
38. Mentasi, E., Ramel C., Spread of toxic substance and environmental pollution. *Ambio* 1995 jun 24: 250-251.
39. Bonner, J.C., Rice, A.B., Lindroos, P.M., O'Brien, P.O., Dreher, K.L., Rosas, I., Alfaro-Moreno, E. y Osornio-Vargas, A.R. Induction of the myofibroblast PDGF receptor system by urban ambient particles from Mexico city. *Am. J. Respir. Cell Mol. Biol.* 1998; 19: 672-680.
40. George, J., Levy, Y. y Shoenfeld, Y. Smoking and immunity: an additional player in the mosaic of autoimmunity. *Scand.J. Immunol.* 1997; 45: 1-6.
41. Hansell, A.L. Respiratory effects of volcanic emissions. *Occup. Environ. Med.* 2003; 60: 529-530.
42. Beck, B.D., Brain, J.D. y Bohannon, D.E. The pulmonary toxicity of an ash sample from the St. Helens volcano. *Exp. Lung Res.* 1981; 2: 289-301.
43. Bernstein, R.S., Baxter, P.J., Falk, H., Ing, R., Foster, L. y Frost, F. Immediate public health concerns and actions in volcanic eruptions: lessons from the Mount St. Helens eruptions, May 18-October, 1980. *Am. J. Public Health* 1986; 76: 25-37.
44. Malilay, J., Real, M.G., Ramirez, V.A., Noji, E. y Sinks, T. Public health surveillance after a volcanic eruption: lessons from Cerro Negro, Nicaragua, 1992. *Bull Pan. Am. Health Organ.* 1996; 30: 218-226.

45. Martin, T.R., Ayars, G., Butler, J. y Altman, L.C. The comparative toxicity of volcanic ash and quartz. Effects on cells derived from the human lung. *Am Rev Respir Dis.* 1984 Nov; 130(5):778-82.
46. Vallyathan, V., Mentnech, M.S., Tucker, J.H. y Green, F.H. Pulmonary response to Mount St. Helens volcanic ash. *Environ. Res.* 1983; 30: 361-371.
47. Housley, D.G., Bérubé, K.A., Jones, T.P., Anderson, S., Pooley, F.D. y Richards, R.J. Pulmonary epithelial response in the rat lung to instilled Montserrat respirable dust and their major mineral components. *Occup. Environ. Med.* 2002; 59: 466-472.
48. Falk, H.; Baxter, P.J.; Ing. R.; French, J.; Stein, G.F.; Health, C.W.; Merchant, J.A.: Mount St. Helens volcano health report Num. 11 (Department of Health and Human Services, Center for Disease Control, Atlanta, 1980).
49. Falk, H.; Baxter, P.J.; Ing. R.; French, J.; Stein, G.F.; Health, C.W.; Merchant, J.A.: Mount St. Helens volcano health report Num. 12 (Department of Health and Human Services, Center for Disease Control, Atlanta, 1980).
50. Green, F.W.W; Vallythan, V.; Mentnech, M.S.; Tucker, J.H.; Merchant, J.A.: Is volcanic ash a pneumoconiosis risk? *Nature, Lond.* 1981; 293: 216-217.
51. Falk, H.; Baxter, P.J.; Ing. R.; French, J.; Gary, F.; Stein, G.F.; Health, C.W.; Merchant, J.A.: Mount St. Helens volcano health report Num. 14 (Department of Health and Human Services, Center for Disease Control, Atlanta, 1980).
52. Shinkura R, Fujiyama C, Akiba S. Relationship between ambient sulfur dioxide levels and neonatal mortality near the Mt. Sakurajima volcano in Japan. *J Epidemiol.* 1999 Nov; 9(5):344-9.
53. Higuchi K, Koriyama C, Akiba S. Increased mortality of respiratory diseases, including lung cancer, in the area with large amount of ashfall from Mount Sakurajima volcano. *J Environ Public Health.* 2012; 2012:257831.
54. Bernadette M. Longo and Wei Yang. Acute Bronchitis and Volcanic Air Pollution: A Community-Based Cohort Study at Kilauea Volcano, Hawai'i, USA. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 71: 1565–1571, 2008.
55. Longo BM, Yang W, Green JB, Crosby FL, Crosby VL. Acute health effects associated with exposure to volcanic air pollution (vog) from increased activity at Kilauea Volcano in 2008. *J Toxicol Environ Health A.* 2010; 73(20):1370-81.
56. Naumova EN, Yepes H, Griffiths JK, Sempértegui F, Khurana G, Jagai JS, Játiva E, Estrella B. Emergency room visits for respiratory conditions in children increased after Guagua Pichincha volcanic eruptions in April 2000 in Quito, Ecuador observational study: time series analysis. *Environ Health.* 2007 Jul 24; 6:21.
57. Amaral A, Rodrigues A. Chronic exposure to volcanic environments and chronic bronchitis incidence in the Azores, Portugal. *Sci Total Environ.* 103 (2007); 419-423.

58. Amaral A, Rodrigues V, Oliveira J, Pinto C, Carneiro V, Sanbento R, Cunha R, Rodrigues A. Chronic exposure to volcanic environments and cancer incidence in the Azores, Portugal. *Sci Total Environ*. 2006 Aug 15; 367(1):123-8.
59. Iwasawa S, Kikuchi Y, Nishiwaki Y, Nakano M, Michikawa T, Tsuboi T, Tanaka S, Uemura T, Ishigami A, Nakashima H, Takebayashi T, Adachi M, Morikawa A, Maruyama K, Kudo S, Uchiyama I, Omae K. Effects of SO₂ on respiratory system of adult Miyakejima resident 2 years after returning to the island. *J Occup Health*. 2009; 51(1):38-47.
60. Ishigami A, Kikuchi Y, Iwasawa S, Nishiwaki Y, Takebayashi T, Tanaka S, Omae K. Volcanic sulfur dioxide and acute respiratory symptoms on Miyakejima island. *Occup Environ Med*. 2008 Oct; 65(10):701-7.
61. Longo BM. The Kilauea Volcano adult health study. *Nurs Res*. 2009 Jan-Feb; 58(1):23-31.
62. Uda H, Akiba S, Hatano H, Shinkura R. Asthma-like disease in the children living in the neighborhood of Mt. Sakurajima. *J Epidemiol*. 1999 Feb; 9(1):27-31.
63. Carlsen HK, Gislason T, Benediktsdottir B, Kolbeinsson TB, Hauksdottir A, Thorsteinsson T, Briem H. A survey of early health effects of the Eyjafjallajokull 2010 eruption in Iceland: a population-based study. *BMJ Open*. 2012 Mar 8;2(2):e000343.
64. Forbes L, Jarvis D, Potts J, Baxter PJ. Volcanic ash and respiratory symptoms in children on the island of Montserrat, British West Indies. *Occup Environ Med*. 2003 Mar;60(3):207-11.
65. Longo BM, Rossignol A, Green JB. Cardiorespiratory health effects associated with sulphurous volcanic air pollution. *Public Health*. 2008 Aug;122(8):809-20.