

# REVISIÓN SISTEMÁTICA RÁPIDA SOBRE LOS EFECTOS DE LAS CENIZAS, GASES Y AEROSOLES VOLCÁNICOS, EN LA SALUD DE LA POBLACIÓN EXPUESTA

## INFORME RAPIDO

---

Informe rápido de evaluación de tecnologías sanitarias elaborado por el Servicio de Evaluación de la Dirección del Servicio Canario de la Salud (SESCS) a petición de la Jefatura de Servicio de Atención Especializada de la Dirección General de Programas Asistenciales del Servicio Canario de la Salud

---

En este informe rápido se ha identificado, evaluado críticamente y sintetizado, la información disponible sobre los problemas sanitarios más frecuentes y relevantes que podrían aparecer tras la exposición de la población a erupciones volcánicas y cuáles serían las posibles actuaciones preventivas y asistenciales para hacerles frente. Estas recomendaciones son responsabilidad de los autores del informe, están fundamentadas en la revisión de las pruebas científicas recuperadas y han sido formuladas a partir del conocimiento de mayor validez científica disponible en la actualidad. No se ha llevado a cabo revisión externa por parte de expertos, debido a la premura con la que se ha solicitado y efectuado el informe.

---

**Fecha de solicitud del informe:** 30 de octubre de 2021

**Fecha de informe definitivo:** 5 de noviembre de 2021

**Responsable y persona de contacto:** Pedro Serrano Aguilar (Jefe de Servicio).

**Autor del informe:** Pedro Serrano Aguilar.

**Documentalista:** Leticia Rodríguez Rodríguez

## INDICE

Resumen	3
1.- Antecedentes	5
2.- Descripción de los agentes potencialmente tóxicos liberados volcánicamente, y sus efectos sobre la salud humana	6
2.1.- Cenizas volcánicas	6
2.2.- Gases y aerosoles volcánicos	7
3.- Objetivos del informe	9
4.- Métodos	10
5.- Resultados	11
5.1.- Problemas de salud más frecuentes y relevantes	11
5.2.- Posibles actuaciones preventivas y asistenciales para afrontar los riesgos y problemas de salud asociados a exposiciones volcánicas	13
6.- Deficiencias en el conocimiento detectadas en esta revisión	17
7.- Conclusiones y recomendaciones	18
Referencias	20

## Resumen

En entornos volcánicos activos, las emisiones aéreas respirables de partículas de ceniza, aerosoles y gases, pueden afectar a la salud de los seres vivos (personas y animales), si bien la evidencia epidemiológica es limitada cuantitativa y cualitativamente [1-3]. Además, las mediciones de exposición detalladas de tales eventos están muy raramente documentadas y accesibles.

La revisión de la literatura internacional, centrada en la evaluación sistemática del impacto inmediato y a corto-medio plazo en la salud, asociados a las erupciones volcánicas, confirma que los territorios corporales más común y gravemente afectados, tanto por las cenizas como por los gases volcánicos, son el sistema respiratorio, oftálmico y cutáneo. Los efectos sobre la salud mental, provocado por los estresores directos e indirectos (temor, pérdidas de propiedades o daños a personas allegadas, etc.), han sido poco estudiados.

### **Conclusiones y recomendaciones**

Se requiere un abordaje (análisis y diseños de intervenciones) multidisciplinar en la investigación y gestión de los peligros para la salud asociados a las emisiones volcánicas

Los programas de información, sensibilización y empoderamiento de la población (con énfasis en grupos de riesgo), son parte integrante de las intervenciones de gestión y prevención del riesgo volcánico.

Los resultados procedentes de la literatura sugieren un incremento de riesgos de problemas respiratorios a corto y medio plazo; especialmente en las personas con enfermedades respiratorias preexistentes. Los efectos a largo plazo no están claros. Las pruebas científicas no son suficientes ni en cantidad ni en calidad, debido a las frecuentes limitaciones científicas observadas.

La afectaciones oftalmológicas y cutáneas son comunes pero limitadas al corto plazo y de carácter autolimitado; especialmente si se cumplen las medidas de protección recomendadas.

Analizar, mineralógica y toxicológicamente, las cenizas sedimentadas y en suspensión, a lo largo del tiempo, es un requisito indispensable para evaluar y establecer relaciones (agudas y crónicas) con los posibles problemas de salud que puedan acontecer en la región afectada y sus intermediaciones.

Se requiere activar y mantener en el tiempo, investigación multidisciplinar que incluya la caracterización toxicológica de las cenizas y gases relacionadas con el tipo de erupción; recabar información para mejorar la cuantificación de las exposiciones individuales (dependiendo del tipo de actividad efectuada al aire libre a diferentes distancias y localizaciones); llevar a cabo análisis epidemiológicos a nivel individual; y evaluar formalmente, los riesgos para la salud a medio-largo plazo.

Se deberían medir y monitorizar las concentraciones aéreas de SO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>, SH<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, aerosoles ácidos, sílice cristalino libre, y Mercurio; tanto en proximidad (aire, depósitos de agua, acuíferos y cosechas); como en otros territorios más alejados de La Palma; y en otros territorios insulares a los que los gases pudieran llegar transportados por los vientos.

Tanto en el área volcánica como en las áreas residenciales y acuíferos próximos a los cráteres volcánicos es conveniente medir y monitorizar tanto los niveles de CO<sub>2</sub> y radón, como los de Selenio, Flúor, Mercurio, Hierro, Manganeseo, Calcio, Cloro, y CO<sub>3</sub>H; para asegurar que se mantienen por debajo de los niveles recomendados; y, en caso contrario, activar las intervenciones precisas.

Es conveniente llevar a cabo estudios epidemiológicos para examinar la relación entre exposición a tóxicos (cenizas, gases, aerosoles) y el desarrollo, a corto y largo plazo, de problemas respiratorios, cutáneos u oftálmicos.

La escasez y limitaciones científicas del conocimiento disponible obliga a que las agencias de protección civil y salud pública deban basarse en extrapolaciones de otras evidencias, a la hora de estimar y prevenir los riesgos para la salud, asociados, especialmente, a la determinación de niveles de contaminantes aéreos.

Las personas con exposiciones repetidas y/o prolongadas a los entornos volcánicos, especialmente aquellas que llevan a cabo actividades relacionadas con la vulcanología, estaciones de energía geotérmica o instalaciones geotermales; o los involucrados en turismo volcánico; incrementan el riesgo de desarrollar problemas de salud. De forma semejante, habría que actuar con los trabajadores de la construcción, la explotación de canteras, la agricultura y afines, en zonas próximas a volcanes.

La literatura científica sobre la organización de los servicios sanitarios para hacer frente a la gestión / tratamiento, a medio-largo plazo, de los problemas de salud derivados de las crisis volcánicas, son prácticamente inexistentes. La literatura disponible se centra sobre tareas preventivas; quedando los aspectos organizativos/terapéuticos de los servicios sanitarios, limitados a la creación de redes de vigilancia y sistemas de información para identificar precozmente los casos, recabar información clínica y epidemiológica, y monitorizar su evolución.

El Servicio Canario de la Salud debería desarrollar, precozmente, un programa de vigilancia clínico-epidemiológico, basado en un registro específico, anidado en la historia clínica electrónica, para identificar todos los casos y monitorizar los efectos a medio-largo plazo de la población/trabajadores expuestos a cenizas, gases o aerosoles en el entorno del volcán Montaña vieja, sus áreas circundantes e islas más próximas.

Es preciso analizar, comparativamente, las causas de la utilización de recursos sanitarios (visitas a Atención Primaria, urgencias, consultas hospitalarias, hospitalizaciones), y muertes, entre las poblaciones afectadas y no afectadas, para poder estimar indicadores válidos.

## 1.- Antecedentes

En entornos volcánicos activos, las emisiones aéreas respirables de partículas de ceniza, aerosoles y gases, pueden afectar a la salud de los seres vivos (personas y animales), si bien la evidencia epidemiológica es limitada cuantitativa y cualitativamente [1-3]. Además, las mediciones de exposición detalladas de tales eventos están muy raramente documentadas y accesibles.

La ausencia de funciones de concentración-respuesta específicas para la exposición humana a las cenizas volcánicas, debido a la falta de una evaluación detallada de la exposición y a la escasez de estudios epidemiológicos específicos, se ve agravada por la singularidad de las características de las cenizas, que pueden variar entre volcanes e incluso entre las erupciones de un mismo volcán. Es preciso, en cualquier caso, diferenciar las medidas a adoptar en el caso de la exposición aguda y limitada en el tiempo, de los efectos provocados por exposiciones menos intensas pero prolongadas y las medidas a adoptar en estas fases posteriores [4].

Los estudios sobre los efectos de la exposición a gases, aerosoles y cenizas volcánicas sobre la salud cobraron relevancia y validez a partir de 1980, tras la erupción del monte St. Helens (EE. UU.) [5]. Los estudios disponibles a partir de estas fechas, han identificado, mayoritariamente, efectos respiratorios reversibles a corto plazo, con resultados poco claros a más largo plazo, debido a la gran escasez de seguimientos largos. Continúan siendo escasos, no obstante, los estudios válidos, debido al escaso poder estadístico y otras limitaciones metodológicas. Son estos estudios los que, con sus limitaciones, proporcionan información sobre el impacto en la morbi-mortalidad [6].

El análisis de la composición de las cenizas colectadas en diferentes lugares permitirá mejorar los planes de prevención y seguimiento de las personas expuestas. Los volcanes de carácter explosivo, como es el caso del volcán de Montaña Vieja en la Palma, suelen contener mayor contenidos en minerales con sílice cristalino; incrementando el riesgo de desarrollo de silicosis pulmonar en trabajadores al aire libre (granjeros, agricultores) [7].

La erupción del volcán Montaña Vieja (La Palma, 2021), de carácter explosivo, iniciada el 19 de septiembre de 2021 y mantenida hasta la actualidad, durante 48 días, logró preverse y evitar daños directos inmediatos sobre las personas. El carácter contenido y mantenido de sus emisiones, ha permitido implantar medidas progresivas de protección y mitigación de daño.

## 2.- Descripción de los agentes potencialmente tóxicos liberados volcánicamente, y sus efectos sobre la salud humana

### 2.1.- Cenizas volcánicas

La ceniza volcánica es un riesgo para la salud ocular y respiratoria, a través de los efectos irritantes químicos y mecánicos de las partículas de ceniza; con una toxicidad inmediata y a corto-medio plazo, asociada a la consistencia y el tamaño de las partículas, así como a la meteorológica del lugar [8]. Mientras que la lluvia acelera la eliminación de las cenizas del aire, los vientos fuertes aumentan el riesgo al favorecer la penetración al tracto respiratorio y / o los ojos [9]. Las partículas de ceniza de 10  $\mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>) y menor, son la principal causa de irritación de las vías respiratorias superiores e inferiores [8,10]; expresándose mediante tos, flema, opresión en el pecho y disnea junto con exacerbaciones del asma y la EPOC previamente controladas en el período inmediato (2 semanas después del evento) [11-13]. Las cenizas con altas concentraciones de sílice cristalina libre (58%), iones ferrosos y trazas de cuarzo (una sustancia tóxica conocida [14]) se asociaron con resultados adversos [13]. El contenido de iones ferrosos aumenta la generación de radicales libres [15]. La sílice no causa daño significativo a corto plazo, pero incrementa el riesgo de silicosis pulmonar a largo plazo. Además, las cenizas con > 55% de contenido total de sílice pueden contener cantidades significativas de sílice cristalina y cuarzo, cristobalita y tridimita [9]. Se ha establecido un límite umbral de polvo respirable que contiene sílice basado en una exposición diaria de 8 horas (Límites de exposición permitidos - PEL) [16] a 0.05 mg / m<sup>3</sup>, un nivel que debe reducirse a la mitad si la sílice libre mide uno de los polimorfos más tóxicos (cristobalita o tridimita) [11]. El riesgo para la salud del polvo silíceo no correlaciona directamente con la concentración de sílice cristalina en las cenizas (Health and Safety Executive 2002, 2003). Otros factores contribuyen a modular este riesgo; incluyendo a: 1) el tipo polimórfico (cuarzo o cristobalita); 2) la presencia de otros minerales, tales como arcilla con contenidos protectores de aluminio; 3) tamaño de partícula; y 4) variabilidad entre superficies recién fracturadas y "envejecidas" [17,18].

La emisión de cenizas que siguió a la erupción de Eyjafjallajökull se asoció con una mayor prevalencia de síntomas respiratorios autoreportados; incluyendo: tos (OR 2,6; 95% 1,73,9, p <0,001), flema (OR 2,1; 95% 1,33,2, p <0,001), opresión en el pecho (OR 2,5; 95% 1,15,8, p = 0,03) y disnea (OR 2,1; 95% 1,23,6, p = 0,011). Los síntomas duraron de 6 a 9 meses después del período de erupción y mostraron una relación dosis-respuesta con la exposición a las cenizas [13]. También en la erupción del volcán Etna (2002), la tasa de visitas a urgencias (VU) por síntomas respiratorios superiores e inferiores fue significativamente mayor que en el mismo período del año anterior (diferencia media = 1,27, p <0,01; media diferencia = 1,29, p <0,01 respectivamente) [10]. Se postuló que la composición de las partículas de ceniza, que incluían sílice cristalina grande (Si) e iones ferrosos (Fe<sup>2+</sup>), desempeñaba un papel crucial en la inflamación aguda. Tras la erupción del volcán Soufrière Hills, se confirmó que la exposición prolongada de los trabajadores a restos de cenizas con sílice incrementaba el riesgo de silicosis pulmonar [19,20].

Los estudios experimentales (in vitro e in vivo) publicados confirman que, a pesar de haberse utilizado muestras de cenizas de forma heterogénea y diferentes abordajes metodológicos, las cenizas volcánicas provocan escasa toxicidad pulmonar en las personas sanas, independientemente de su concentración; salvo cuando contienen sílice cristalino libre; debido a la capacidad altamente fibrogénica de este [21].

## 2.2.- Gases y aerosoles volcánicos

Los gases específicos que se han identificado como responsables de toxicidad y muerte a través de esta revisión incluyen CO y CO<sub>2</sub> [22], SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S [23,24], HCl, HF, y radon.

El CO<sub>2</sub> es un gas asfixiante simple, incoloro e inodoro. Las grandes emisiones CO<sub>2</sub> se han asociado con una ligera irritación respiratoria, así como con hemoptisis y disnea [20]. En concentraciones superiores al 11% provoca la pérdida del conocimiento en el primer minuto de la exposición. Se logra una rápida recuperación tras la eliminación de la fuente [25]. La pérdida del conocimiento durante varias horas se atribuye a las propiedades anestésicas del CO<sub>2</sub>. No se ha observado efectos sobre el sistema nervioso central [22]. El CO<sub>2</sub> se acumula en depresiones topográficas, pozos, y sótanos; pudiendo provocar muertes por asfixia [26]. Más raramente, el CO<sub>2</sub> se acumula en aguas profundas de lagos o acuíferos en áreas volcánicas; pudiendo provocarse liberación repentina del gas, sofocando a personas y animales; tal como ocurrió en las 2000 muertes del Lago Nyos (Camerún), en 1986 [22].

El SO<sub>2</sub> es otro gas volcánico prevalente, conocido principalmente por sus propiedades inflamatorias e irritantes sobre el tracto respiratorio (6-12 ppm), el sistema ocular (> 20 ppm) y en alta concentración (10,000 ppm), puede irritar la piel húmeda. La afectación respiratoria puede acontecer a pesar del uso de equipo de protección personal respiratoria (EPPR) ( $p < 0,01$ ); con una mayor susceptibilidad para las mujeres [23]. Dado su olor acre, el SO<sub>2</sub> se puede percibir en 0,3-1,0 ppm [25] con umbrales para exposiciones de SO<sub>2</sub> fijados en 175 ppb durante 10 minutos y 44 ppb al día [27]. Las consecuencias de su exposición, sobre la salud, se asocian a incrementos en la morbilidad y mortalidad por causas respiratorias (para aquellos con enfermedades preexistentes); sin afectar a la incidencia de asma o de otros problemas funcionales respiratorios en la infancia [8]. Dependiendo de la intensidad de las emisiones, se han descrito impactos a gran escala en lugares y países remotos (erupción de la fisura de Laki, 1783-1784) [28]. En la erupción de Holuhraun (Islandia) en 2014-2015, los profesionales que usaron EPPR y estuvieron expuestos a niveles de SO<sub>2</sub> de  $> 1$  ppm durante 45 días experimentaron una tendencia creciente hacia la irritación nasal. Aunque no fue estadísticamente significativa ( $p = 0,37$ ), el 6% y el 24% de los participantes del estudio informaron de irritación nasal antes y después de la exposición, respectivamente [24]. No se identificaron cambios en la función pulmonar, restricción de las vías respiratorias o inflamación en el período posterior a la exposición [10]. Sin embargo, las emisiones de SO<sub>2</sub> superiores a 3000 toneladas/día, llegan a producir niveles de SO<sub>2</sub> dentro de viviendas, colegios y hospitales, superiores a los establecidos; con niveles que podían variar dependiendo de las características de las construcciones, el uso de aire acondicionado y la conducta de la población [29].

Otros fenómenos a considerar son las nubes de aerosoles, denominadas vog en EE.UU, o "laze volcánico", que constituye una niebla de ácido clorhídrico (HCl), formada cuando la lava volcánica se combina con el agua de mar [30]; ambos fenómenos ocurren en Hawaii. La Vog puede desempeñar un papel fundamental en la exacerbación de afecciones respiratorias preexistentes como el asma y la EPOC, aunque las pruebas son ambiguas [31].

El H<sub>2</sub>S es otro gas ácido predominante emitido por áreas volcánicas y geotérmicas en Japón, Nueva Zelanda y Hawai [8,32]. Los niveles mínimos de riesgo se han fijado en 70 ppb para exposición aguda (1-14 días) y 30 ppb para exposición intermedia (15-364 días) [33]. Sin embargo, en concentraciones elevadas, el H<sub>2</sub>S puede ser inodoro debido a la rápida fatiga olfativa y la parálisis olfativa, lo que permite una exposición prolongada a esta toxina

potencialmente mortal [34]. A concentraciones de 20-150 ppm, el H<sub>2</sub>S puede actuar como irritante para el sistema ocular y en concentraciones más altas para el tracto respiratorio superior, lo que puede provocar bronquitis y neumonitis inducida por sustancias químicas. También se han producido muertes después de la exposición a grandes cantidades debido a la depresión del centro respiratorio, con una exposición a 700-2000 ppm que puede conducir al coma en una sola respiración [25,35]. La exposición prolongada, tal como ha sido estudiada en Rotorúa (Nueva Zelanda), sugiere posibles efectos sobre el sistema nervioso, similares a los efectos observados en exposiciones industriales agudas.

Otras partículas suspendidas en neblina (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y HCl) pueden conducir potencialmente a asma inducida por irritantes, incluido el síndrome de disfunción reactiva de las vías respiratorias (RADS), espasmo laríngeo y quemaduras graves y diversos grados de irritación ocular [8,25]. Algunas fuentes [36] han especulado sobre la presencia de radón (Rd) en los gases emitidos debido a sus rastros en el suelo en el área del desastre. Sin embargo, no hay información sobre el efecto no canceroso agudo de los radionucleidos en humanos [25].

La "lluvia ácida", originada cuando la lluvia cae a través de una columna de gas ácido (pH 2,5-3,5) se ha asociado a consecuencias anecdóticas sobre la salud, consistentes en irritación ocular y dermatitis cutánea [8,25]. Sin embargo, su mayor impacto acontece sobre la agricultura, la vegetación, los hogares y la calidad del agua (debido a los techos de zinc galvanizado que afectan a metales pesados) [37].

### **3.- Objetivos del informe**

Este informe rápido se lleva a cabo a solicitud de la Jefatura de Servicio de Atención Especializada de la Dirección General de Programas Asistenciales del Servicio Canario de la Salud, con la finalidad de identificar, evaluar críticamente y sintetizar, la información disponible y de mayor validez, sobre:

- 1.- Los problemas sanitarios más frecuentes y relevantes que podrían acontecer tras la exposición de la población a erupciones volcánicas.
- 2.- Las posibles actuaciones preventivas y asistenciales para hacerles frente, a corto, medio y largo plazo, considerando incluso los posibles modelos organizativos de los servicios sanitarios para acometer estas tareas del modo más efectivo y eficiente.

## 4.- Métodos

Se llevó a cabo una búsqueda de literatura amplia en buscadores generales, Medline, EMBASE, WoS; mediante combinaciones de los siguientes términos clave: Volcanic eruptions, Respiratory injuries; Ocular and Ophthalmologic injuries; Skin and Soft tissue injury; Burns; Volcano; Volcanic ash; Hazard; Risk mitigation. Review Preventive and Health Care Policies. La búsqueda se efectuó sin restricciones temporales, ni de idiomas.

Se incluyeron todo tipo de estudios: descriptivos, analíticos, evaluativos y experimentales. La calidad científica de cada tipo de estudio se llevó a cabo de acuerdo a los criterios de la Universidad de Mc Master [38]. Dado el carácter eminentemente descriptivo de los estudios identificados e incluidos y la baja calidad de los estudios, los resultados fueron sintetizados narrativamente.

## 5.- Resultados

Se identificaron 245 estudios iniciales; de los que se excluyeron 37 tras retirar duplicaciones. Tras la lectura de resúmenes, el número de estudios seleccionados se redujo sustancialmente, hasta los 32 estudios; de los que finalmente se incluyeron (tras lectura completa) 8 estudios [8,10,19,21,29,39-41]. Todos estos estudios proporcionaban información sobre los efectos sobre la salud de la población expuesta a las cenizas, gases y aerosoles volcánicos, a corto-medio plazo. No hemos encontrado literatura relevante

### 5.1.- Problemas de salud más frecuentes y relevantes

La revisión de la literatura internacional, centrada en la evaluación sistemática del impacto inmediato y a corto-medio plazo en la salud, asociados a las erupciones volcánicas, confirma que los territorios corporales más común y gravemente afectados, tanto por las cenizas como por los gases volcánicos, son el sistema respiratorio, oftálmico y cutáneo. Los efectos sobre la salud mental, provocado por los estresores directos e indirectos (temor, pérdidas de propiedades o daños a personas allegadas, etc.), han sido poco estudiados.

Exacerbación de problemas respiratorios preexistentes: Se han informado exacerbaciones en el asma, bronquitis y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) en personas expuestas a ceniza volcánica. Con respecto a asma, EPOC / exacerbaciones de enfisema, nasofaringitis, neumonía, y bronquitis, hubo un aumento del 10,4% en las VU en las dos semanas posteriores a la erupción de volcán St. Helen (1980); normalizándose a la 3ª semana [11]. También se informaron varios casos de enfermedad broncoespástica “de novo”, que se atribuyeron a la inhalación de cenizas volcánicas. También se observó un aumento en las hospitalizaciones debido a la exacerbación de afecciones respiratorias crónicas previamente controladas en individuos susceptibles en 27 hospitales durante un período de hasta dos semanas después de la erupción. Se observó una correlación entre el número total de VU y la cantidad de ceniza (30 a 70 mm) [12]. En los residentes de áreas expuestas a cenizas en Islandia, el 50% de los adultos y todos los niños examinados que habían sido previamente diagnosticados con asma informaron de una exacerbación aguda en los 2 meses posteriores a la erupción de Eyjafjallajökull de 2010 [13]. Se sabe poco sobre los efectos a largo plazo en la función pulmonar de esta población. En contraste, en un estudio anterior que revisó un período de 4 años (1997-2001) para el volcán Kilauea en Hawái, las VU por asma y EPOC dependieron más del mes del año que de la variación de gases de SO<sub>2</sub> [31]. El aumento del 25% en las VU tuvo lugar en los 3 días después de las exposiciones más altas de SO<sub>2</sub> (33,7 ppb frente a 0 ppb) [42]. Además de estos hallazgos, la incidencia de asma, EPOC y exacerbación del enfisema entre las personas expuestas a cenizas volcánicas después de la erupción de Eyjafjallajökull no difirió del grupo de control (residentes que viven en un área remota al volcán) [asma (OR 0,8; 95 % 0,61,1, p = 0,17), EPOC (OR 1,7; 95% 0,55,2, p = 0,36), enfisema (OR 1; 95% 0,52,3, p = 0,96)] [42].

En 1986 se produjo una considerable emisión de CO<sub>2</sub> en el lago Nyos (Camerún), la inhalación de gas asfixiante provocó grados variables de congestión pulmonar y asfixia a miles de personas, atribuidos al CO<sub>2</sub>; sin que se identificaran otros gases ácidos [22]. En la fase eruptiva principal del monte St. Helens de 1980, la asfixia por inhalación de cenizas fue la causa de muerte en el 78% de los casos que llegaron a la autopsia [12].

Afectación ocular: Irritación ocular inespecífica. Bajo los efectos de vientos fuertes, los gases ácidos volcánicos y las macro y micro partículas inorgánicas, representan un riesgo para el

sistema ocular [12,43-46]. Carlsen et al [13,42] realizaron dos estudios que investigaron los efectos oculares inmediatos (horas / días) y a más largo plazo (69 meses), tras la erupción del volcán islandés Eyjafjallajökull (2010). Una cuarta parte de los pacientes experimentaron algún grado de irritación ocular a corto plazo, caracterizado por "irritación ocular" y "picazón" (OR 2,9; 95% 2,04,1,  $p < 0,001$ ). Tras la erupción del monte Etna en 2002, se evaluó un aumento en el número medio de VU por molestias oculares en comparación con el mismo período del año anterior (diferencia media 1,57,  $p < 0,01$ ) [10]. También se observó un aumento en las VU debido a conjuntivitis después de la erupción del Monte St. Helens dos semanas después del evento [11,12], aunque no hubo un aumento significativo en las molestias oculares generales. También se observó que la irritación ocular, el dolor y el lagrimeo presentaban molestias entre los individuos dos semanas después de la exposición diaria a la caída de ceniza y altos niveles de SO<sub>2</sub>, 6 años después de regresar a la isla después de la erupción del volcán Miyakejima (Japón) en 2000 [23]. Sin embargo, estos hallazgos no fueron estadísticamente significativos. Los síntomas oculares asociados con la erupción del monte St. Helens de 1980 también se evaluaron en dos estudios paralelos: (a) 1523 pacientes residentes cerca del volcán; y (b) leñadores que trabajan muy cerca de la erupción (grupos expuestos), apareados con otros leñadores de bosques distales (grupo de control). Ambos grupos estuvieron expuestos a cenizas volcánicas 618 meses antes del examen; sin usar gafas protectoras de forma rutinaria [43]. Entre los afectados, los diagnósticos más frecuentes incluyeron sensación de cuerpo extraño (71%), conjuntivitis (49,50%), cuerpo extraño conjuntival (8,27%) y cuerpo extraño corneal (8%). Los fenómenos meteorológicos (viento, lluvia) potenciaron el grado de exposición y el tamaño de las partículas, contribuyendo a la patología ocular aguda. Las partículas grandes actuaron de forma abrasiva, mientras que las partículas pequeñas fueron irritantes en la fase aguda, provocando sensación de cuerpo extraño, pero en general fueron bien toleradas. En un área muy expuesta a cenizas cerca del monte Sakurajima (Japón) se encontró una correlación positiva entre la frecuencia de síntomas oculares (picazón, epífora, inyección conjuntival y secreción) y la exposición a cenizas (16,5% de años activos versus 11,5% de años inactivos,  $p = 0,02$ ). El efecto de la composición de las cenizas volcánicas en las células conjuntivales humanas se evaluó *in vitro* utilizando cenizas de dos volcanes diferentes (PCCVC y montaña Calbuco). Las cenizas de PCCVC, que estaban compuestas principalmente de SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O y tenían un tamaño inferior a 10-100 nm, tuvieron un efecto citotóxico sobre la conjuntiva, disminuyendo la proliferación celular, alterando la expresión de las proteínas de barrera, y aumentando la respuesta sistémica proinflamatoria; lo que favoreció el daño oxidativo mediado por interleucina 6 y 8. Las cenizas de Calbuco, de composición química similar a PCCVC pero de mayor tamaño (100-300 nm), no tuvieron efecto sobre la conjuntiva [47]. Entre los factores de riesgo para los casos oculares más graves, se identificaron el uso de lentes de contacto (especialmente lentes duros) y pacientes diagnosticados previamente con síndrome sicca [43]. Con base en estos hallazgos, se planteó la hipótesis de que la ceniza volcánica actuaba como un material abrasivo, que arañaba las lentes de contacto duras [9]. En otros dos estudios en los que las personas no utilizaron protección ocular, los síntomas se resolvieron en un plazo de 24 horas a una semana [43,48]. Algunos pacientes informaron de una rápida resolución de los síntomas después de usar colirios oftálmicos (fluorometolona y / o ofloxacina) para la conjuntivitis grave y las abrasiones, mientras que los síntomas más leves se trataron eficazmente con lágrimas artificiales [48].

Irritación cutánea inespecífica, ulceraciones superficiales y ampollas subepidérmicas. El desastre de 1986 acontecido en el lago Nyos (Camerún) [22] provocó frecuentes lesiones cutáneas eritematosas semejantes a quemaduras, y posteriormente ulceradas, localizadas

preferentemente en el área cigomática, piernas y abdomen; dos o tres días después de la liberación de gas CO<sub>2</sub> volcánico. La mayoría de ulceraciones fueron superficiales y se resolvieron en dos semanas. Las lesiones tisulares más graves y profundas requirieron tratamiento durante un período prolongado. También se observaron manifestaciones cutáneas transitorias y menores en las erupciones de Eyjafjallajökull y Mt. Oyama, asociadas con la exposición a la caída de cenizas volcánicas y altos niveles de SO<sub>2</sub> [23,42]

Riesgos específicos relacionados con la salud ocupacional: Las personas con exposiciones repetidas y/o prolongadas a los entornos volcánicos, especialmente aquellas que llevan a cabo actividades relacionadas con la vulcanología, estaciones de energía geotérmica o instalaciones geotermiales; o los involucrados en turismo volcánico; incrementan el riesgo de desarrollar problemas de salud y, deberían, por lo tanto, extremar su prevención. De forma semejante, habría que actuar con los trabajadores de la construcción, la explotación de canteras, la agricultura y afines, en zonas próximas a volcanes. Dependiendo de la composición de las cenizas, a largo plazo, se puede ver incrementado el riesgo de silicosis; asbestosis y mesotelioma [8].

Esta revisión puede ayudar a preparar equipos médicos y de apoyo a través de un mayor: (1) Comprensión de las características eruptivas (es decir, conocer antes de la llegada el tipo de peligro específico de la erupción, por ejemplo, PDC y peligros específicos, por ejemplo, exposición al SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>), lo que podría ayudar equipos para protegerse y traer equipo médico apropiado; (2) Conciencia del potencial de deterioro rápido de las lesiones menores (fascitis necrotizante, múltiples lesiones complejas como quemaduras); (3) Colaboración entre los equipos de rescate y los servicios de salud (y de salud pública) que pueden mejorar la preparación del hospital, la prestación de servicios, p. duchas para lesiones por caída de ceniza y estrategias de prevención, p. ej. prueba de fuentes de agua en busca de contaminación.

## 5.2.- Posibles actuaciones preventivas y asistenciales para afrontar los riesgos y problemas de salud asociados a exposiciones volcánicas

La literatura científica sobre la organización de los servicios sanitarios para hacer frente a la gestión / tratamiento, a medio-largo plazo, de los problemas de salud derivados de las crisis volcánicas, son prácticamente inexistentes. Tan solo hemos encontrado 1 artículo claramente centrado en este aspecto [49]; si bien su contexto no es, afortunadamente, trasladable a la situación actual en la isla de La Palma. La erupción del volcán de Montserrat (1997) no solo destruyó las infraestructuras sanitarias, sino que obligó a evacuaciones masivas y a trasladar la ubicación de la mayoría de los servicios esenciales a otra localización. Más allá de esta situación extraordinaria, la literatura disponible se centra sobre tareas preventivas; quedando los aspectos organizativos/terapéuticos de los servicios sanitarios, limitados a la creación de redes de vigilancia y sistemas de información para identificar precozmente los casos, recabar información clínica y epidemiológica, y monitorizar su evolución. Paralelamente, se contempla el desarrollo de sistemas de información, educación y empoderamiento de la población general y de mayor riesgo (enfermedades respiratorias previas), para extremar las medidas de protección personal (mascarillas y gafas), familiar (alimentos y agua no contaminada), y domiciliario (aislamiento de gases y cenizas), durante el tiempo que los datos procedentes de los sistemas de monitorización establezcan.

Trasladando la información previamente expuesta sobre incidencia y gravedad de los problemas de salud comúnmente observados en las zonas expuestas a una crisis volcánica, al caso

particular de la erupción de Montaña Vieja en La Palma, caso de mantenerse la situación actual sin cambios relevantes; habría que asegurar y reforzar la capacidad de respuesta de la Atención Primaria, en proximidad, para identificar y gestionar, precozmente, los problemas respiratorios, oftálmicos y cutáneos; sin que parezca necesario efectuar cambios relevantes en la atención especializada.

5.2.1.- La colaboración interinstitucional y multidisciplinar es fundamental y requerida, para gestionar con éxito las crisis provocadas por las erupciones volcánicas, al igual que acontece en cualquier otra crisis que amenace la salud pública de amplios colectivos de la población. La colaboración es necesaria, tanto para diseñar medidas preventivas "primarias" y "secundarias"; como para identificar las barreras para la implementación, con éxito, de tales medidas. Las medidas preventivas primarias son aquellas que interrumpen la transmisión o causa de enfermedades y lesiones mediante el control o eliminación de las exposiciones a los agentes de riesgo [50]. Una evacuación bien planificada, oportuna y ejecutada de manera segura hacia barrios residenciales temporales es un ejemplo de "prevención primaria" de la morbilidad y la mortalidad por vulcanismo explosivo. Las medidas preventivas secundarias pretenden reducir la gravedad, duración y propagación o extensión de enfermedades o lesiones que ya han ocurrido. Existe muy poca información, y de poca validez científica, sobre la efectividad, la efectividad comparada y el coste-efectividad de financiar medidas preventivas primarias o secundarias, cuando existen limitaciones de recursos para afrontar el diseño de actuaciones en las erupciones volcánicas.

Para evaluar la efectividad de las medidas preventivas primarias y secundarias, en este contexto, se requieren datos específicos sobre: 1) la naturaleza y alcance de las medidas preventivas primarias, incluyendo la planificación y preparación previas al desastre, la capacidad de predicción, los sistemas de alerta y los esfuerzos de evacuación; 2) todos los "agentes" potencialmente peligrosos asociados con condiciones climáticas severas y peligros sísmicos; 3) número y grado de vulnerabilidad de personas en riesgo; 4) influencia de factores ambientales, sociales y políticos; 5) factores asociados con la supervivencia, así como con lesiones, enfermedades o muerte entre la población en riesgo de exposición; 6) etiología y caracterización clínica de los efectos adversos sobre la salud, la seguridad y el bienestar; 7) diseño basado en pruebas científicas de las posibles respuestas (triage, transporte y tratamiento de las víctimas; operaciones de búsqueda y rescate, etc.) y otras medidas preventivas secundarias (por ejemplo, programas de asistencia social, de salud mental y económica) [39,40]

5.2.2.- Para evaluar el impacto real de las medidas preventivas y de control, sobre la salud, se recomienda: 1) establecer, precozmente, un sistema de vigilancia activa, basado en registros sanitarios (idealmente públicos y privados) y comunicaciones desde diferentes sectores de la comunidad, para identificar la mayoría de casos con incidencias de problemas de salud potencialmente relacionados (directa o indirectamente) con los riesgos provocados por la erupción; complementado con 2) estudios epidemiológicos de campo, para incrementar la identificación de casos (afectados/ fallecidos), tanto en las áreas de mayor riesgo/exposición, como en otros lugares más alejados, para documentar, caracterizar y monitorizar mejor los eventos y sus consecuencias; e identificar las necesidades sanitarias y de supervivencia (contaminación del aire, agua, alimentos, etc.); para posteriormente llevar a cabo 3) estudios transversales, de casos y controles o longitudinales, sobre los efectos adversos entre los grupos de alto riesgo (hipersensibles o muy expuestos); y evaluar los factores asociados con la enfermedad, supervivencia o muerte, en las personas expuestas, a diferentes tramos de distancia del volcán. Precozmente, y a lo largo del tiempo, habría que 4) efectuar y repetir los

análisis de laboratorio sobre la toxicidad de las cenizas volcánicas por métodos in vitro e in vivo (animales experimentales) [39,40].

5.2.2.1.- Red de vigilancia hospitalaria: Los hospitales insulares, tanto en La Palma como, con menor intensidad en El Hierro, la Gomera, y los de referencia en Tenerife, deberían coordinarse para llevar a cabo la evaluación sistemática de las visitas a Atención primaria, visitas, a los servicios de urgencias (VU), e ingresos hospitalarios relacionados con la exposición a las emisiones volcánicas; incluyendo traumatismos por accidentes relacionados con cenizas (accidentes de tráfico, resbalones, etc.), problemas respiratorios, oftalmológicos, cutáneos o relacionados con problemas de salud mental, o con cambios en la incidencia de enfermedades transmisibles. Para ello podría disponerse de un registro electrónico común, anidado en la historia clínica electrónica, que proporcionara, dinámicamente, información objetiva a partir de los totales diarios de asistencia en Atención Primaria, VU e ingresos hospitalarios o mortalidad, por causas específicas seleccionadas. Estos datos también deberían ser accesibles y procesables desde la Dirección General de Salud Pública y Programas Asistenciales; desde fechas previas a la erupción, para disponer de datos de referencia previos sobre uso de servicios de urgencia, Atención Primaria y hospitales. La información sobre utilización de servicios asistenciales del SCS, obtenida de este modo, serviría para alertar sobre la posible necesidad de investigaciones epidemiológicas de campo, adicionales, orientadas a grupos de riesgo por exposiciones intensas/prolongadas; por enfermedad previa, o hipersensibilidad [39,40].

Los datos proporcionados por la red de vigilancia corresponderían a los "numeradores"; siendo de utilidad para describir tendencias y evolución en el tiempo. Estos datos, por sí solos, no pueden utilizarse para evaluar el impacto sobre la salud de la erupción (exposición a cenizas o gases), o de las posibles intervenciones que pudieran implantarse (ni en la población general ni en los grupos de alto riesgo). Para poder disponer de información sobre el impacto de la exposición o de las intervenciones de salud pública, es necesario obtener información adicional mediante estudios transversales, de casos y controles y de cohortes; preferentemente centrados en grupos de alto riesgo. En este último caso, se precisarían entrevistas (tanto para los casos como para los controles), basadas en cuestionarios específicos y validados; como el cuestionario de síntomas respiratorios del British Medical Research Council [51], complementado con preguntas específicas sobre: 1) exposición a cenizas (tiempo pasado al aire libre, participación en la limpieza de la casa y la comunidad, uso de máscaras, incidentes en los que puede haber ocurrido una exposición intensa); 2) aparición y duración de los síntomas respiratorios antes y después de la erupción, incluidas las visitas médicas y el uso de medicamentos; y, 3) información sobre características de la vivienda (ubicación, número de habitaciones y ocupantes, uso de contraventanas y puertas, y tipo de ventilación/calefacción, cocina; etc) [39-40]

**Tabla 1. Secuencia de investigaciones epidemiológicas, ante presuntos brotes, que podrían trasladarse al caso de la vigilancia de la salud de la población expuesta en la erupción del volcán Montaña Vieja (La Palma), 2021.**

1. Confirmación de casos nuevos y su distribución, a partir de los registros sanitarios y datos de vigilancia epidemiológica disponibles.
2. Verificar diagnósticos de casos índice; mediante: a) examen a pacientes y revisión de informes médicos y de laboratorio; b) discutir y consensuar los criterios de diagnóstico con los profesionales de la salud informantes.
3. Desarrollar definiciones de caso estandarizadas: a) definir criterios para casos definitivos, probables y sospechosos, b) incluir criterios clínicos, de laboratorio y epidemiológicos; c) caracterizar las exposiciones mediante medidas cuantitativas
4. Búsqueda e investigación de casos adicionales (datos del numerador), a partir de los casos índice. A tal efecto se podrían articular, conjuntamente, los siguientes procedimientos: a) número de teléfono específico de carácter público y gratuito; b) llamamiento de medios de comunicación municipales, insulares, regionales y nacionales; c) revisión de registros sanitarios públicos y privados; y d) encuestas a barrios o lugares de trabajo expuestos.
5. Plasmar todos los hallazgos anteriores en un listado dinámico de recuento de casos aproximado; complementado por un listado sistemático de líneas de datos descriptivos (persona, lugar, tiempo), que permita representar curvas evolutivas para todos los datos.
6. Determinar el tipo y la cuantía de personas en riesgo de verse afectado; para disponer de datos para el denominador de las ratios.
7. Identifique y consensue una hipótesis etiológica y seleccione los métodos e instrumentos de recogida de datos y de análisis estadísticos apropiados para probar su validez. Paralelamente, a) considere oportunidades de prevención y / o control; y b) explique los riesgos para la afectación.
8. Analizar los datos descriptivos y comparar las hipótesis, con los hechos establecidos; a) identificando los posibles factores de riesgo ambientales; y las b) posibles fuentes, reservorios, vectores y agentes.
9. Implementar medidas de control provisionales y perfeccionar a) el sistema de comunicación pública; b) de coordinación entre los diferentes estamentos involucrados en la gestión de la crisis; y c) de vigilancia epidemiológica
10. Revisar los análisis de datos y valorar la posible necesidad de estudios adicionales: a) revisar las definiciones de casos y los procedimientos de identificación; b) determinar la necesidad de estudios de casos y controles o longitudinales (cohortes); c) identificar una población de referencia, adecuada para la comparación.
11. Elaborar y difundir informes dinámicos con los resultados y recomendaciones adaptadas (potencialmente cambiantes).
12. Evaluar la efectividad de las medidas de control y / o prevención

## **6.- Deficiencias en el conocimiento detectadas en esta revisión**

De la revisión de la literatura, se identifican varias áreas relevantes que precisan de investigación adicional de calidad. Estas áreas son:

1. Morbilidad y mortalidad asociada a la exposición intensa / prolongada de ceniza, especialmente en áreas con viviendas y refugios inadecuados; exposiciones ambientales extremas; contaminación de alimentos y acuíferos.
2. Caracterización de cenizas de los volcanes: tamaño y forma de partículas, contenido de sílice cristalina y otros elementos tóxicos.
3. Efectividad y coste-efectividad de las mascarillas faciales industriales desechables para la prevención de trastornos respiratorios en comunidades expuestas.
4. Perfiles de gases volcánicos, incluido el radón, y su concentración en el aire a nivel del cráter y del suelo, incluido el seguimiento personal y la vigilancia médica de los geólogos en cráteres activos.
5. Causas de muerte y lesiones en relación con fenómenos eruptivos en las cercanías de volcanes.
6. Efectos psicosociales derivados de la pérdida de vidas y bienes tras una erupción
8. Evaluación epidemiológica de la efectividad de las políticas de gestión general para afrontar los peligros volcánicos.

## 7.- Conclusiones y recomendaciones

Se requiere un abordaje (análisis y diseños de intervenciones) multidisciplinar en la investigación y gestión de los peligros para la salud asociados a las emisiones volcánicas

Los programas de información, sensibilización, y empoderamiento de la población (con énfasis en grupos de riesgo), son cada vez más utilizados como integrantes de las intervenciones de gestión y prevención del riesgo volcánico. Proporcionando información válida, creíble, oportunamente difundida a la población general; incluyendo recomendaciones precoces sobre el uso de medidas preventivas que incluyan mascarillas y gafas protectoras; asegurando la ingesta de líquidos y alimentos no contaminados, y el cierre y aislamiento de los domicilios y eliminación de cenizas.

La síntesis de resultados procedentes de la literatura sobre las consecuencias en la salud de las personas expuestas a cenizas volcánicas, sugiere un incremento de riesgos de problemas respiratorios a corto y medio plazo; especialmente en las personas con enfermedades respiratorias preexistentes. Los efectos a largo plazo no están claros y pueden variar de un volcán a otro sin que se pueda confirmar el riesgo de desarrollo de enfermedades crónicas. Las pruebas científicas no son suficientes ni en cantidad ni en calidad, debido a la escasez y a las frecuentes limitaciones científicas observadas en los estudios disponibles.

La afectaciones oftalmológicas y cutáneas son, asimismo comunes, pero limitadas al corto plazo y de carácter autolimitado; especialmente si se cumplen las medidas de protección recomendadas.

Analizar, mineralógica y toxicológicamente, las cenizas sedimentadas y en suspensión, a lo largo del tiempo, es un requisito indispensable para evaluar y establecer relaciones (agudas y crónicas) con los posibles problemas de salud que puedan acontecer en la región afectada y sus inmediaciones.

Se requiere activar y mantener en el tiempo, investigación multidisciplinar que incluya la caracterización toxicológica de las cenizas y gases relacionadas con el tipo de erupción; recabar información para mejorar la cuantificación de las exposiciones individuales (dependiendo del tipo de actividad efectuada al aire libre a diferentes distancias y localizaciones); llevar a cabo análisis epidemiológicos a nivel individual; y evaluar formalmente, los riesgos para la salud a medio-largo plazo.

Se deberían medir y monitorizar las concentraciones aéreas de SO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>, SH<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, aerosoles ácidos, sílice cristalino libre, y Mercurio; tanto en proximidad (aire, depósitos de agua, acuíferos y cosechas); como en otros territorios más alejados de La Palma; y en otros territorios insulares a los que los gases pudieran llegar transportados por los vientos.

Tanto en el área volcánica como en las áreas residenciales y acuíferos próximos a los cráteres volcánicos es conveniente medir y monitorizar tanto los niveles de CO<sub>2</sub> y radón, como los de Selenio, Flúor, Mercurio, Hierro, Manganeso, Calcio, Cloro, y CO<sub>3</sub>H; para asegurar que se mantienen por debajo de los niveles recomendados; y, en caso contrario, activar las intervenciones precisas.

Es conveniente llevar a cabo estudios epidemiológicos para examinar la relación entre exposición a tóxicos (cenizas, gases, aerosoles) y el desarrollo, a corto y largo plazo, de problemas respiratorios, cutáneos u oftálmicos.

La escasez y limitaciones científicas del conocimiento disponible obliga a que las agencias de protección civil y salud pública deban basarse en extrapolaciones de otras evidencias, a la hora de estimar y prevenir los riesgos para la salud, asociados, especialmente, a la determinación de niveles de contaminantes aéreos. Para evaluar el posible impacto sanitario de la exposición de las personas a la inhalación de cenizas volcánicas, habría que aplicar, en la actualidad, las estimaciones del riesgo de contaminación del aire libre en las zonas afectadas y circundantes. Sin embargo, debido a la ausencia de conocimiento sobre los efectos de la exposición a cenizas volcánicas sobre la salud, y a las diferencias en la composición de las cenizas, existe una incertidumbre inherente en esta aplicación.

Las personas con exposiciones repetidas y/o prolongadas a los entornos volcánicos, especialmente aquellas que llevan a cabo actividades relacionadas con la vulcanología, estaciones de energía geotérmica o instalaciones geotermales; o los involucrados en turismo volcánico; incrementan el riesgo de desarrollar problemas de salud y, deberían, por lo tanto, extremar su prevención. De forma semejante, habría que actuar con los trabajadores de la construcción, la explotación de canteras, la agricultura y afines, en zonas próximas a volcanes.

La literatura científica sobre la organización de los servicios sanitarios para hacer frente a la gestión / tratamiento, a medio-largo plazo, de los problemas de salud derivados de las crisis volcánicas, son prácticamente inexistentes. La literatura disponible se centra sobre tareas preventivas; quedando los aspectos organizativos/terapéuticos de los servicios sanitarios, limitados a la creación de redes de vigilancia y sistemas de información para identificar precozmente los casos, recabar información clínica y epidemiológica, y monitorizar su evolución

El Servicio Canario de la Salud debería desarrollar, precozmente, un programa de vigilancia clínico-epidemiológico, basado en un registro específico, anidado en la historia clínica electrónica, para identificar todos los casos y monitorizar los efectos a medio-largo plazo de la población/trabajadores expuestos a cenizas, gases o aerosoles en el entorno del volcán Montaña vieja, sus áreas circundantes e islas más próximas.

Es preciso analizar, comparativamente, las causas de la utilización de recursos sanitarios (visitas a Atención Primaria, urgencias, consultas hospitalarias, hospitalizaciones), y muertes, entre las poblaciones afectadas y no afectadas, para poder estimar indicadores válidos.

## Referencias

1. Moulton C, Auston I, Kenton C: Biomedical Effects of Volcanoes: 138 Selected Citations. USDHHS Pub. No. SBS 1980-1. Bethesda, MD:National Library of Medicine, July 1980.
2. Macdonald GA: Volcanological Aspects. In: Disaster Prevention and Mitigation: A Compendium of Current Knowledge, Vol. 1, Pub. No. GE.77-6194 (7828). Geneva: United Nations Disaster Relief Coordinator (UNDRO), 1976.
3. Blong RJ: Volcanic Hazards. North Ryde, New South Wales, Australia: Academic Press, 1984.
4. Walker GPL: Volcanic Hazards. *Interdisc Sci Rev* 1982; 7:148-157.
5. Bernstein RS, Baxter PJ, Falk H, Ing R, Foster L and Frost F. Immediate Public Health Concerns and Actions in Volcanic Eruptions: Lessons from the Mount St. Helens Eruptions, May 18-October 18, 1980. *AJPH March 1986, Vol.76, Supplement, pp:25-38*
- 6.- Horwell, C. J., & Baxter, P. J. (2006). The respiratory health hazards of volcanic ash: A review for volcanic risk mitigation. *Bulletin of Volcanology*, 69(1), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0052-y>
- 7.- Baxter PJ, Bernstein RS, and Buist S. Preventive Health Measures in Volcanic Eruptions. *AJPH*, March 1986, Vol 76, Suppl.
- 8.- A L Hansell, C J Horwell, C Oppenheimer. The health hazards of volcanoes and geothermal areas. *Occup Environ Med* 2006;63:149–156. doi: 10.1136/oem.2005.022459
- 9.- Baxter PJ. Medical effects of volcanic eruptions. Main causes of death and injury. *Bulletin of Volcanology* volume 52, pages532–544 (1990).
- 10.- Lombardo D, Ciancio N, Campisi R, Di Maria A, Bivona L, Poletti V, et al. A retrospective study on acute health effects due to volcanic ash exposure during the eruption of Mount Etna (Sicily) in 2002. *Multidiscip Respir Med* 2013;8(1):51.
- 11.- Horwell CJ, Baxter PJ. The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bulletin of Volcanology*.
- 12.- Nania J, Bruya TE. In the wake of Mount St Helens. *Ann Emerg Med* 1982;11(4):18491.
- 13.- Baxter PJ, Ing R, Falk H, French J, Stein GF, Bernstein RS, et al. Mount St Helens eruptions, May 18 to June 12, 1980: an overview of the acute health impact. *JAMA* 1981;246(22):2585-9.
- 14.- Carlsen HK, Gislason T, Benediktsdottir B, Kolbeinsson T, Hauksdottir A, Thorsteinsson T, et al. A survey of early health effects of the Eyjafjallajökull 2010 eruption in Iceland: a population-based study. *BMJ Open* 2012;2(2):e000343.
- 15.- Beck BD, Brain JD, Bohannon DE. The pulmonary toxicity of an ash sample from the MT. St. Helens Volcano. *Exp Lung Res* 1981;2(4):289-301.
- 16.- Horwell CJ, Fenoglio I, Ragnarsdottir KV, Sparks RSJ, Fubini B. Surface reactivity of volcanic ash from the eruption of Soufriere Hills volcano, Montserrat, West Indies with implications for health hazards. *Environ Res* 2003;93(2):202-15.

- 17.- Ziskind M, Jones RN, Weill H. Silicosis. *Am Rev Respir Dis* 1976;113(5):643-65.
- 18.- Health and Safety Executive (2002) Respirable crystalline silica: phase 1. Variability in fibrogenic potency and exposure response relationships for silicosis.
- 19.- Health and Safety Executive, Sudbury, EH75/4 Health and Safety Executive (2003) Respirable crystalline silica: phase 2. Carcinogenicity. Health and Safety Executive, Sudbury, EH75/5
- 20.- Beylin D , Mantal O, Haik J, Kornhaber R, Cleary M, Neil A, Harats M .Soft tissue-related injuries sustained following volcanic eruptions: An integrative review, *Burns*, 2021,ISSN 0305-4179, <https://doi.org/10.1016/j.burns.2021.09.008>.
- 21.- Claire J. Horwell . Peter J. Baxter The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bull Volcanol* (2006) 69: 1–24. DOI 10.1007/s00445-006-0052-y
- 22.- Martin TR, Wehner AP, and Butler J. Evaluation of Physical Health Effects Due to Volcanic Hazards: The Use of Experimental Systems to Estimate the Pulmonary Toxicity of Volcanic Ash. *AJPH March* 1986, Vol. 76, Supplement
- 23.- Baxter PJ, Kapila M, Mfonfu D. Lake Nyos disaster, Cameroon, 712 1986: the medical effects of large scale emission of carbon dioxide? *BMJ* 1989;298(6685):1437 41.
- 24.- Ishigami A, Kikuchi Y, Iwasawa S, Nishiwaki Y, Takebayashi T, Tanaka S, et al. Volcanic sulfur dioxide and acute respiratory symptoms on Miyakejima island. *Occup Environ Med* 2008;65 703 (10):701 7
- 25.- Carlsen HK, Aspelund T, Briem H, Gislason T, Jóhannsson T, Valdimarsdóttir U, et al. Respiratory health among professionals exposed to extreme SO<sub>2</sub> levels from a volcanic eruption. *Scand J Work Environ Health* 2019;45(3):312-5
- 26.- Williams-Jones G, Rymer H. Hazards of volcanic gases. *The encyclopedia of volcanoes*. Elsevier; 2015. p. 985-92.
- 27.- Hansell, A., & Oppenheimer, C. (2004). Health hazards from volcanic gases: A systematic literature review. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 59(12), 628–639. <https://doi.org/10.1080/00039890409602947>
- 28.- World Health Organization. Air quality guidelines for Europe. European Series, No. 91. 2nd ed. Copenhagen: WHO Regional Publications; 2000. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/107335/9789289013581-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- 29.- Witham CS, Oppenheimer C. Mortality in England during the 1783–4 Laki Craters eruption. *Bulletin of Volcanology* 2004;67:15–26.
- 30.- Bernadette M. Longo, PhD, RN; Wei Yang, PhD, MD; Joshua B. Green, MD; Anthony A. Longo, PhD; Merylyn Harris, MHSc, RN; Renwick Bibilone, An Indoor Air Quality Assessment for Vulnerable Populations Exposed to Volcanic Fog From Kilauea Volcano. *Fam Community Health*, 2010 Vol. 33, No. 1, pp. 21–31
- 31.- You Lim Z, Flaherty G. Fiery eruptions: travel health risks of volcano tourism. *J Travel Med* 2020;27(6):taaa019, doi:<http://dx.doi.org/10.1093/jtm/taaa019>.

- 32.- Michaud JP, Grove JS, Krupitsky D. Emergency department visits and “vog”— related air quality in Hilo, Hawai’i. *Environ Res* 2004;95(1):11-9.
- 33.- Bates MN, Garrett N, Shoemack P. Investigation of health effects of hydrogen sulfide from a geothermal source. *Arch Environ Health Int J* 2002;57:405-11.
- 34.- Chou C-H, Ogden JM, Pohl HR, Scinicariello F, Ingerman L, Barber L, et al. Toxicological profile for hydrogen sulfide and carbonyl sulfide. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/797tp114.pdf>.
- 35.- Guidotti TL. Hydrogen sulfide: advances in understanding human toxicity. *Int J Toxicol* 2010;29:569-81.
- 36.- Costigan MG. Hydrogen sulfide: UK occupational exposure limits. *Occup Environ Med* 2003;60(4):308-12.
- 37.- Linhares DPS, Garcia PV, Silva C, Barroso J, Kazachkova N, Pereira R, et al. DNA damage in oral epithelial cells of individuals chronically exposed to indoor radon ((222)Rn) in a hydrothermal area. *Environ Geochem Health* 2016;40 (5):1713-24
- 38.- Baxter P, Stoiber R, Williams S. Volcanic gases and health: Masaya volcano, Nicaragua. *Lancet* 1982;320 (8290):150-1.
- 39.- H. Thomas (2003). Quality Assessment Tool For Quantitative Studies. Effective Public Health Practice Project. Toronto: McMaster University. [https://merst.ca/wp-content/uploads/2018/02/quality-assessment-tool\\_2010.pdf](https://merst.ca/wp-content/uploads/2018/02/quality-assessment-tool_2010.pdf).
- 40.- CHAPTER 10 Preventive Health Measures in Volcanic Eruptions PETER J. BAXTER, MD, ROBERT S. BERNSTEIN, MD, PHD, AND A. SONIA BUIST, MD AJPB March 1986, Vol. 76, Supplement 84-90
- 41.- Bernstein RS, Baxter PI, Falk H, Ing R, Foster I, and Frost F. Immediate Public Health Concerns and Actions in Volcanic Eruptions: Lessons from the Mount St. Helens Eruptions, May 18-October 18, 1980. AJPB Chapter 3, March 1986, Vol. 76, Supplement pp: 25-38
- 42.- Mueller, W., Cowie, H., Horwell, C. J., Hurley, F., & Baxter, P. J. (2020). Health impact assessment of volcanic ash inhalation: A comparison with outdoor air pollution methods. *GeoHealth*, 4, e2020GH000256. <https://doi.org/10.1029/2020GH000256>
- 43.- Carlsen HK, Hauksdottir A, Valdimarsdottir UA, Gíslason T, Einarsdottir G, Runolfsson H, et al. Health effects following the Eyjafjallajökull volcanic eruption: a cohort study. *BMJ Open* 2012;2(6):e001851
- 44.- Fraunfelder FT, Johnson DS, Kalina RE, Buist AS, Bernstein RS. Ocular effects following the volcanic eruptions of Mount St Helens. *Arch Ophthalmol* 1983;101(3):376-8
- 45.- Heggie TW, Heggie TM. Viewing lava safely: an epidemiology of hiker injury and illness in Hawaii Volcanoes National Park. *Wilderness Environ Med* 2004;15(2):77-81.
- 46.- Patiño JF, Castro D, Valencia A, Morales P. Necrotizing soft tissue lesions after a volcanic cataclysm. *World J Surg* 1991;15 (2):240-7.

- 47.- Carlsen HK, Aspelund T, Briem H, Gislason T, Jóhannsson T, Valdimarsdóttir U, et al. Respiratory health among professionals exposed to extreme SO<sub>2</sub> levels from a volcanic eruption. *Scand J Work Environ Health* 2019;45(3):312-5
- 48.- Thompson MA, Lindsay JM, Leonard GS. More than meets the eye: volcanic hazard map design and visual communication. In: Fearnley C, Bird D, Haynes K, McGuire W, Jolly G, editors. *Observing the volcano world: volcano crisis communication*. Switzerland: Springer Open; 2017. p. 621-40, doi:[http://dx.doi.org/10.1007/11157\\_2016\\_47](http://dx.doi.org/10.1007/11157_2016_47)
- 49.- Cooper R, Tuitt J. Montserrat. Managing health care in a volcanic crisis. *West Indian Med J*. 1998 Dec;47 Suppl 4:20-1. PMID: 10368618.
- 50.- Kimura K, Sakamoto T, Miyazaki M, Uchino E, Kinukawa N, Isashiki M. Effects of volcanic ash on ocular symptoms: results of a 10-year survey on schoolchildren. *Ophthalmology* 2005;112(3):478-81.
- 51.- Medical Research Council's Committee on the Aetiology of Chronic Bronchitis: Standardized questionnaires on respiratory symptoms. *Br Med J* 1960; 2:1665.