

Ivet EtcheGARAY-MORALES^{1a}, Claudia Mendoza-Pinto^{2b}, Pamela Munguía-Realpozo^{2c}, Maura Cárdenas-García^{3d}, Mario García-Carrasco^{1e}

Resumen

Millones de personas están expuestas a las expulsiones peligrosas de gases, vapores y otras partículas inorgánicas durante y después de las erupciones volcánicas. Estos gases tienen potenciales efectos sobre la salud humana en el sistema respiratorio, oftalmológico, mental y en la piel, entre otros, tanto a corto como a largo plazo. También se ha descrito que las erupciones volcánicas pueden incrementar el riesgo de mortalidad. En 2023, el volcán Popocatepetl ha presentado una actividad aumentada en la que se ha elevado la alerta a fase 3 (actividad a una escala de intermedia a alta). El entendimiento del fenómeno volcánico en la región es esencial para asistir al personal de salud y proveer cuidados de salud informados a tiempo. Es claro que se requiere de la existencia de sistemas de vigilancia de la salud para monitorizar y ayudar a controlar los posibles efectos adversos en la salud de las erupciones volcánicas. En esta revisión, se resume la evidencia más relevante que evalúa los efectos sobre la salud humana de las emisiones generadas tras las erupciones volcánicas y las opciones para su control.

Abstract

Millions of people are exposed to harmful emissions of gases, vapors, and other inorganic particles during and after volcanic eruptions. These gases have potential short- and long-term effects on human health, particularly on respiratory, opthalmic, mental systems, as well as on the skin, among others. It has also been described that volcanic eruptions can increase the mortality risk. In 2023, the Popocatepetl volcano has registered recent intense activity, putting the area on high alert. Understanding local volcanic phenomena is essential to assist health personnel in providing informed and timely care. It is clear that health surveillance systems are required to monitor and help control the possible adverse health effects of volcanic eruptions. This review summarizes the most relevant evidence assessing the human health effects of emissions generated after volcanic eruptions and options for their control.

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Medicina, Departamento de Reumatología. Puebla, Puebla, México

²Instituto Mexicano del Seguro Social, Centro de Investigación Biomédica de Oriente, Departamento de Reumatología. Puebla, Puebla, México

³Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Medicina, Laboratorio de Fisiología Celular. Puebla, Puebla, México

ORCID: [0000-0002-5857-4299^a](https://orcid.org/0000-0002-5857-4299), [0000-0002-5101-7705^b](https://orcid.org/0000-0002-5101-7705), [0000-0002-6967-7939^c](https://orcid.org/0000-0002-6967-7939), [0000-0002-6114-1670^d](https://orcid.org/0000-0002-6114-1670), [0000-0002-1401-0344^e](https://orcid.org/0000-0002-1401-0344)

Palabras clave

Erupciones Volcánicas
Enfermedades Respiratorias
México

Keywords

Volcanic Eruptions
Respiratory Tract Diseases
Mexico

Fecha de recibido: 26/06/2023

Fecha de aceptado: 03/01/2024

Comunicación con:

Claudia Mendoza Pinto

 cmendozap.26@gmail.com

 222 812 153

.....
Cómo citar este artículo: EtcheGARAY-MORALES I, Mendoza-Pinto C, Munguía-Realpozo P, *et al.* Efectos de las erupciones volcánicas en la salud humana. Rev Med Inst Mex Seguro Soc. 2024;62(3):e5457. doi: 10.5281/zenodo.10998899

Introducción

Los desastres naturales, como las erupciones volcánicas, son eventos que afectan a grandes poblaciones cada año en todo el mundo.¹ Se estima que alrededor de 500 millones de personas en todo el mundo habitan en un radio de 100 km en las cercanías de algún volcán con un amplio rango de exposición. Hay regiones cercanas a volcanes activos con ciudades densamente pobladas, por ejemplo, la ciudad de Puebla y la Ciudad de México (México) a 64 y 88 km del volcán Popocatepetl, respectivamente. La investigación indica que existe riesgo de daño a la salud derivado de las emisiones de las erupciones volcánicas. Para poder predecir y cuantificar el daño potencial de estas, pueden emplearse bases de datos con información de análisis de diversos volcanes en varias partes del mundo, en los cuales se han evaluado los posibles efectos sobre la salud. Esta información permite contribuir a la planeación del manejo para futuros eventos volcánicos.² En esta revisión de la literatura, se resumen los principales efectos en la salud humana de las erupciones volcánicas.

Metodología

Este artículo de revisión se ha realizado mediante una búsqueda bibliográfica durante mayo de 2023, en torno a todos los posibles efectos sobre la salud de las erupciones volcánicas hasta la actualidad, y se han incluido tanto estudios de revisión como estudios de cohorte. Se utilizaron los siguientes términos: “volcanic”, “volcanic eruptions”, “health”, “health effects”, y se obtuvieron 177 artículos (151 originales y 26 revisiones). Las fuentes de información utilizadas fueron las siguientes:

- Bases de datos electrónicas: PubMed, ScienceDirect, Web of Science.

- Documentos de organismos oficiales: Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

Resultados

Panorama de erupciones del Popocatepetl en 2023

El volcán Popocatepetl se encuentra ubicado en el centro de México, entre los estados de Morelos (1,971,520 habitantes), Puebla (6,583,278 habitantes), Estado de México (16,999,418 habitantes), y a menos de 100 km de la Ciudad de México (9,209,944 habitantes).³ Se considera uno de los volcanes más peligrosos del planeta por su cercanía a ciudades densamente pobladas. Se calcula que una gran erupción afectaría a más de 25 millones de personas que viven en un radio de 100 km en torno al volcán. El CENAPRED recientemente actualizó el mapa de peligrosidad de flujos piroclásticos, lahares (flujos de lodo) y lava. En el cuadro I se enlistan las localidades ubicadas en las diferentes áreas de peligro de acuerdo con el CENAPRED.⁴

A partir de mayo de 2023 se ha observado un incremento de la actividad del volcán Popocatepetl. Es la sexta vez desde el año 2000 que se emite alerta amarilla fase 3 de precaución (actividad a una escala de intermedia a alta). El 6 de enero del 2023 el CENAPRED determinó que a partir de septiembre del año pasado se han registrado numerosas explosiones y exhalaciones, sin que sobrepase la actividad de años previos.

Material volcánico y sus efectos

Las erupciones volcánicas afectan su entorno por medio de flujos de lava, flujos piroclásticos y salidas de gases

Cuadro I Localidades ubicadas en las áreas de peligro según el CENAPRED

Área 1
Estado de Puebla: Santiago Xalitzintla, San Pedro Yancuitalpan, San Nicolás de los Ranchos, San Buenaventura Nealtican, San Baltazar Atlimeyaya, San Pedro Benito Juárez, La Magdalena Yancuitalpan. Estado de México: Ecatzingo, Atlautla, San Juan Tehuixtltlán, San Pedro Nexapan y Ozumba
Entre el área 1 y 2
Estado de México: Tepetlaxpa. Estado de Puebla: Xochitlán, Tochimilco. Estado de Morelos: Hueyapan
Área 2
Estado de México: Amecameca. Estado de Puebla: San Andrés Calpan, Tlanguimalco, Atlixco, Huaquechula, Acteopan. Estado de Morelos: Jonacatepec, Yecapixtla
Área 3
Estado de México: Tlalmanalco, Juchitepec. Estado de Puebla: Huejotzingo, Cholula. Estado de Morelos: Tepalcingo, Yautepec, Ticumán, Tlaquiltenango, Jojutla

Fuente: Centro Nacional de Prevención de Desastres

de magma. El material volcánico formado por erupciones explosivas consiste principalmente en flujos piroclásticos, especialmente partículas finas que van desde 0.3 a 2.5 micrómetros, y metales como cromo, cobre, magnesio, zinc y gases de magma. Los principales gases emitidos en una erupción volcánica son vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S), monóxido de carbono (CO), pequeñas cantidades de azufre (S₂), gas metano (CH₄), cloruro de hidrógeno o ácido clorhídrico (HCl) y fluoruro de hidrógeno o ácido fluorhídrico (HF). También se puede formar ácido sulfúrico (H₂SO₄). En un estudio realizado en México (región Puebla), al analizar la ceniza del volcán Popocatepetl en 2016, se encontró una composición enriquecida de hierro, magnesio y carbonatos.⁵

Los efectos en la salud humana derivados de las erupciones volcánicas han sido evaluados desde hace varias décadas. Se indica que los daños a la salud pueden presentarse tanto en adultos como en niños.⁶ Los principales síntomas que se presentan son respiratorios, oculares, cutáneos, mentales, entre otros. Los mecanismos que ocasionan las manifestaciones clínicas son inciertos; sin embargo, en algunos estudios se ha evaluado el daño de los componentes de las partículas, como es la inflamación.⁷ En el **cuadro II** se muestran los posibles efectos sobre la salud de las erupciones volcánicas.

Algunos de los efectos de los gases sobre la salud en bajas concentraciones son: cefalea, irritación de los ojos, del tracto respiratorio superior, de las mucosas, la piel, además de síntomas gastrointestinales como náuseas o vómitos. En concentraciones más altas provocan quemaduras y en concentraciones aún más altas afectan el tracto respiratorio inferior y pueden causar edema pulmonar agudo (por ejemplo el SO₂ y el H₂SO₄). Además, hay gases que causan hipoxia debido a los efectos en el transporte de oxígeno y la cadena respiratoria en las células (por ejemplo CO₂ y

CO). Las concentraciones muy altas en el aire causan rápidamente pérdida de conciencia debido a la inhibición de la citocromo oxidasa en la cadena respiratoria celular y pueden ocasionar la muerte.⁸

Efectos en las vías respiratorias

Se han identificado los efectos de la ceniza sobre células epiteliales pulmonares, con daño a los macrófagos alveolares, lo cual disminuye la respuesta inflamatoria y la producción de péptidos bactericidas, por lo que, en consecuencia, aumenta la proliferación bacteriana. Se ha encontrado que la ceniza tiene el potencial de llegar hasta el tejido pulmonar y causar daño, además de signos de una respuesta inflamatoria con citoquinas elevadas (MCP-1, IL-6 e IL-8).⁹ La inhalación de cristales de sílice puede inducir inflamación y estimular el inflamosoma NLRP3 (complejo de señalización innata).

Las manifestaciones respiratorias agudas observadas después de fuertes emanaciones volcánicas son: dolor torácico, odinofagia, rinorrea, exacerbaciones de asma, bronquitis, tos, disnea y sibilancias.¹⁰ La inhalación de partículas finas puede agudizar otras enfermedades crónicas, como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) o la cardiopatía isquémica. La investigación de los efectos sobre la salud a largo plazo puede ser difícil, ya que los síntomas respiratorios graves pueden no hacerse aparentes hasta muchos años después de la exposición inicial. Estudios previos han mostrado efectos respiratorios adversos a la inhalación de partículas volcánicas, pero la mayoría de ellos se basan en seguimientos a corto plazo. Un estudio de seguimiento a 4 años indicó que los pacientes afectados parecían haberse recuperado.¹¹ Por otra parte, se ha descrito una tendencia de dosis-respuesta en cuanto al nivel de exposición y ciertos síntomas como tos, conjuntivitis,

Cuadro II Posibles efectos en la salud derivados de las erupciones volcánicas: inmediatos (horas/días), a corto plazo (semanas/meses) y a largo plazo (3 años)

Período	Efectos	
Inmediatos	Directos	Exposición a gases tóxicos que conducen a asfixia o coma
	Indirectos	Choque hipovolémico secundario a quemaduras extensas, SDRA, edema pulmonar agudo y muerte secundaria a trauma
A corto plazo	Directos	Exacerbaciones de EPOC y asma o nuevo establecimiento de enfermedad, conjuntivitis, deficiencia o pérdida auditiva y otitis
	Indirectos	Infecciones de vías respiratorias altas y bajas, infecciones en las quemaduras y retraso en la cicatrización, heridas por presión, déficits neurológicos, fascitis necrotizante, SDRA, edema pulmonar agudo, secundario a quemaduras extensas o sepsis, envenenamiento por metales pesados debido a lluvias ácidas, TEPT, depresión y ansiedad
A largo plazo	Directos o indirectos	Flemas matutinas durante el invierno, sibilancias sin presencia de infección viral, erupciones cutáneas o eccemas, dorsalgia, lumbalgia, insomnio, estrés psicológico

SDRA: síndrome de distrés respiratorio agudo; EPOC: enfermedad pulmonar obstructiva crónica; TEPT: trastorno de estrés postraumático

dermatitis, etcétera. La posible explicación de la persistencia de los síntomas a largo plazo es la exposición continua a las partículas respirables. Un estudio previo describió que la ceniza de volcán contenía altos niveles de partículas polimorfos de sílice y sus niveles fluctuaban durante el tiempo de la erupción, lo que a largo plazo podría provocar silicosis.¹⁰

Efectos en piel y tejidos profundos

En 1986, después del desastre del Lago Nyos (Camerún), los pacientes presentaron lesiones cutáneas eritematosas y lesiones similares a quemaduras. El área cigomática, seguida por las piernas y el abdomen fueron áreas comunes para la aparición de úlceras a los 2 y 3 días de la liberación de CO₂ volcánico. La mayoría fueron superficiales y se curaron en 2 semanas. Las lesiones de tejidos más profundos requirieron tratamiento por un periodo extendido. También se han mencionado lesiones cutáneas menores y transitorias, asociadas con la exposición de ceniza volcánica y niveles de SO₂, y contaminación aérea volcánica, respectivamente.^{12,13} En la erupción del volcán Merapi en Indonesia (año 2010), se describieron quemaduras de segundo y tercer grado por corrientes de densidad piroclástica.¹⁴ El 45% de los pacientes presentaron quemaduras en un rango del 40-79% de la superficie corporal total (SCT), mientras que el 3% sufrió quemaduras en el 80% de la SCT. El choque hipovolémico secundario a las quemaduras, edema laríngeo y síndrome de distrés respiratorio agudo (SDRA) fueron las causas tempranas de muerte. Las lesiones en tejidos blandos debido al flujo de lodo incluyeron laceraciones generales, fracturas, heridas penetrantes, trauma interno, síndrome compartimental, síndrome de aplastamiento de extremidades e infecciones, (por ejemplo tétanos y gangrena por el género *Clostridium* y mucormicosis). Los pacientes con fascitis necrotizante tuvieron una tasa de mortalidad global del 47.7%, y con mucormicosis del 80%. El tratamiento incluyó desbridación radical y amputaciones.¹⁵

Efectos oculares

Los gases volcánicos, así como las macro y micropartículas inorgánicas y el viento plantean un riesgo al sistema ocular. Carlsen *et al.*¹² investigaron los efectos inmediatos (horas/días) y a mayor plazo (6-9 meses) del volcán Eyjafjallajökull en Islandia (años 2010 y 2013) y encontraron que el 25% de los pacientes experimentaron irritación ocular, mientras que en un estudio secuencial se informó que hubo efectos oculares caracterizados por irritación ocular y prurito.

Después de la erupción de Monte Etna (Italia) en 2002, se incrementó el número de consultas al servicio de

urgencias por síntomas oculares en comparación con el mismo periodo en el año previo.¹⁶ Seis años después de la erupción del volcán Miyakejima, (en Japón, en el 2000), se observaron molestias oculares como irritación y dolor, lagrimeo entre individuos después de 2 semanas de exposición diaria a partículas volcánicas y altos niveles de SO₂. Estos síntomas se resolvieron en un periodo de 24 horas a una semana. Los hallazgos no fueron estadísticamente significativos. El efecto de la composición de las partículas volcánicas sobre las células conjuntivales humanas (CCH) fue medido *in vitro*. Al emplear partículas compuestas de dióxido de silicio (SiO₂), óxido de sodio (Na₂O) y óxido de potasio (K₂O), con un tamaño entre 10-100 nm, tuvieron un efecto citotóxico sobre las CCH, lo cual disminuyó la proliferación celular, la expresión de proteínas de barrera y el aumento en la respuesta proinflamatoria, lo cual condujo a un daño oxidativo mediado por IL-6 e IL-8. Entre los factores de riesgo para la afección ocular más grave estuvieron el uso de lentes de contacto (especialmente lentes duros) y el diagnóstico previo de síndrome sicca.¹⁶ Estos síntomas se resolvieron en un periodo de 24 horas a una semana. Algunos pacientes mejoraron de forma rápida usando gotas oculares (flourometolona u ofloxacino) para conjuntivitis grave y abrasiones, mientras que síntomas más leves fueron tratados con lágrimas artificiales.¹⁷

Efectos en la salud mental

Diversos estudios evaluaron los efectos psicológicos en varios tipos de desastres naturales y demostraron que los supervivientes están propensos a experimentar efectos en la salud mental, como el trastorno de estrés postraumático (TEPT), depresión y ansiedad. Los factores de riesgo asociados con problemas mentales (TEPT) fueron la alta exposición, ser de género femenino y tener antecedente de problema psiquiátrico. También se ha encontrado un patrón de dosis-respuesta entre el nivel de exposición volcánica y el estrés psicológico en las erupciones volcánicas.¹⁸ Se identificaron alteraciones en el sueño después de la erupción del volcán Eyjafjallajökull (Islandia 2010 y 2013) a 3 años. Por lo anterior, la detección de factores de riesgo podría ayudar potencialmente a identificar aquellos pacientes más vulnerables para desarrollar morbilidad psicológica después de las erupciones volcánicas.¹⁸

Otros efectos en la salud

Se han descrito síntomas neurológicos como debilidad de extremidades, incluso mononeuritis múltiple. También se presentaron varios casos de hipoacusia unilateral, sin evidencia de daño del sistema nervioso central. Además, se han descrito incrementos en las admisiones hospitalarias por

enfermedad cardiovascular. En el ámbito obstétrico se han reportado 7 abortos espontáneos en la semana 20 de gestación, y 4 muertes fetales. Por otra parte, se observaron alteraciones gastrointestinales y hemostáticas, presumiblemente debido a fascitis necrotizante y algunos casos de otitis.¹⁹

Los síntomas musculoesqueléticos, evaluados a largo plazo, como dorsalgia, lumbalgia y mialgias, incrementaron en un seguimiento a 3 años.^{20,21}

Mortalidad

Un estudio publicado con datos de Nueva Zelanda, mostró que la caída difusa de ceniza en 1996 del Monte Raupehu puede haber contribuido a un aumento en la mortalidad observada en el periodo después de la erupción volcánica en la ciudad de Hamilton, a 166 km del volcán. A pesar del número de erupciones volcánicas en el siglo XX y hasta ahora en el siglo XXI, ha habido muy pocas muertes por erupciones volcánicas en los últimos 100 años. Sin embargo, cierta evidencia ha demostrado que la exposición a largo plazo de emisiones volcánicas está asociada con una mortalidad elevada debido a enfermedades respiratorias, incluida la EPOC, como muestra un estudio inglés.²²

Efectos del volcán Popocatepetl en la salud

De acuerdo con nuestra revisión de la literatura, se encontró limitada evidencia del impacto de previas erupciones del volcán Popocatepetl, México (1994-1995). En un estudio realizado en México por Rojas-Ramos *et al.*²³, se observaron los efectos de una serie de erupciones del volcán Popocatepetl con un incremento en la incidencia de síntomas respiratorios y una disminución de la función pulmonar en el periodo inmediato, los cuales fueron reversibles después de 7 meses de seguimiento. Un estudio de seguimiento a 3 años, documentó reversibilidad de las alteraciones en las pruebas de función respiratoria, pero persistencia de síntomas respiratorios.²⁰

Discusión

En nuestra revisión se describió la evidencia existente sobre el impacto de las erupciones volcánicas a corto y largo plazo en diferentes aparatos o sistemas en los individuos afectados por estos desastres naturales. Los más afectados principalmente a corto plazo son las vías respiratorias, el sistema ocular y la piel. Sin embargo, aunque la evidencia es limitada, cada vez más estudios demuestran que otras áreas pueden ser afectadas por el impacto

de las erupciones volcánicas, como la salud mental o el sistema musculoesquelético. Los daños en la salud derivados de estos eventos pueden deberse principalmente a los gases volcánicos tóxicos, a la ceniza y a los flujos piroclásticos. Actualmente se sabe que los efectos sobre la salud derivados de las erupciones volcánicas pueden ser también a largo plazo. En algunos estudios recientes se ha demostrado que las personas afectadas pueden padecer sibilancias crónicas, exacerbaciones de EPOC, erupciones cutáneas, estrés psicológico, entre otros. Por lo anterior, la vigilancia de los efectos en la salud debe llevarse a cabo tanto a corto como a largo plazo.

La previsión de la actividad volcánica es el sistema de vigilancia más importante para prevenir efectos no deseados sobre la salud. La vigilancia debe abarcar desde la prevención primaria para tomar medidas que faciliten la prevención secundaria o terciaria.²⁴ Las recomendaciones actuales que hace la Secretaría de Salud para evitar efectos adversos directos sobre la población son: mantenerse alejados del área de exposición, evitar realizar actividades al aire libre, uso de pañuelos o cubrecocas, uso de lentes y ropa de protección, lavado de ojos con abundante agua, cerrar puertas y ventanas. Otras medidas recomendadas de acuerdo con eventos previos similares en otras regiones del mundo incluyen respirar a través de un pañuelo húmedo o respiradores que filtran partículas finas en caso de que las actividades externas sean inevitables. Los efectos de exposición a metales pesados y otras toxinas asociadas con el material expulsado son más difíciles de monitorizar. Los efectos de agentes carcinogénicos (por ejemplo partículas de sílica) no están documentados en datos de registro de cáncer, debido a que el intervalo entre la exposición y el desarrollo de cáncer puede observarse después de 30 a 40 años. Como se mencionó previamente, existe evidencia de efectos a largo plazo sobre la salud, por lo que debe haber un monitoreo continuo de salud. Los potenciales riesgos de la exposición a largo plazo de ceniza no deben ser subestimados, y se deben desarrollar estrategias para prevenir o minimizar el riesgo de los residentes expuestos.^{25,26}

Nuestra revisión tiene varias limitaciones. En primer lugar, aunque se hizo una búsqueda en diversas bases de datos, no podemos asegurar que toda la evidencia sobre los efectos de las erupciones volcánicas en la salud humana estén mencionados en este artículo. En segundo lugar, nuestra revisión incluyó solo estudios publicados en inglés y español, por lo que artículos publicados en otros idiomas con evidencia relevante no fueron incluidos. En tercer lugar, nuestra búsqueda de la literatura abarcó hasta el mes de mayo de 2023, por lo que evidencia más reciente pudo no haberse incluido en nuestra revisión. Finalmente, por el momento se desconocen las consecuencias en la salud humana derivadas de las erupciones del volcán Popocatepetl.

petl del año 2023. Se requieren estudios en la región para conocer el impacto en la salud de estas erupciones en la población afectada.

Conclusiones

Esta revisión resume la evidencia y describe los principales efectos sobre la salud tanto a corto como largo plazo, durante y después de las erupciones volcánicas. Entre las manifestaciones clínicas más frecuentes se encuentran las respiratorias, oculares, cutáneas, y se incluyen tejidos profundos y alteraciones mentales. Aunque hay pocos estudios que evalúen los efectos a largo plazo, la literatura describe que pueden persistir efectos en la salud respiratoria y mental en las personas expuestas. El actual impacto en la

salud de las erupciones del volcán Popocatepetl debe ser evaluado, vigilado y controlado para disminuir el daño en la población afectada y evitar el desarrollo de enfermedades crónico-degenerativas.

Agradecimientos

Agradecemos al CENAPRED la disponibilidad de los datos requeridos.

.....
Declaración de conflicto de interés: los autores han completado y enviado la forma traducida al español de la declaración de conflictos potenciales de interés del Comité Internacional de Editores de Revistas Médicas, y no fue reportado alguno relacionado con este artículo.

Referencias

1. Jones RL, Guha-Sapir D, Tubeuf S. Human and economic impacts of natural disasters: can we trust the global data? *Sci Data* 2022; 9:572.
2. Beylin D, Mantal O, Haik J, et al. Soft tissue-related injuries sustained following volcanic eruptions: An integrative review. *Burns* 2022;48:1727-42.
3. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Resultados del Censo de Población 2020. México: INEGI; 2020. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/servicios/widgets_poblacion.html
4. Coordinación General de Protección Civil y Gestión Integral del Riesgo, Secretaría General de Gobierno del Estado de México. Plan Operativo del Volcán Popocatepetl. Gobierno del Estado de México; 2023. https://cgproteccioncivil.edomex.gob.mx/plan_perativo_popocatepetl
5. Shruti VC, Rodríguez-Espinosa PF, Martínez-Tavera E, et al. Metal concentrations in recent ash fall of Popocatepetl volcano 2016, Central Mexico: Is human health at risk? *Ecotoxicol Environ Saf.* 2018; 162: 324-33.
6. Hlodversdóttir H, Thorsteinsdóttir H, Thordardóttir EB, et al. Long-term health of children following the Eyjafjallajökull volcanic eruption: a prospective cohort study. *Eur J Psychotraumatol* 2018;9:1442601.
7. Carlsen HK, Gislason T, Benediktsdóttir B, et al. A survey of early health effects of the Eyjafjallajökull 2010 eruption in Iceland: a population-based study. *BMJ Open* 2012;2:e000343.
8. Tomašek I, Damby DE, Horwell CJ, et al. Assessment of the potential for in-plume sulphur dioxide gas-ash interactions to influence the respiratory toxicity of volcanic ash. *Environ Res.* 2019;179:108798.
9. Tomašek I, Horwell CJ, Bisig C, et al. Respiratory hazard assessment of combined exposure to complete gasoline exhaust and respirable volcanic ash in a multicellular human lung model at the air-liquid interface. *Environ Pollut* 2018;238:977-87.
10. Carlos WG, Gross JE, Jamil S, et al. Volcanic Eruptions and Threats to Respiratory Health. *Am J Respir Crit Care Med.* 2018;197:21-2.
11. Ruano-Ravina A, Acosta O, Díaz Pérez D, et al. A longitudinal and multidisciplinary epidemiological study to analyze the effect of the volcanic eruption of Tajogaite volcano (La Palma, Canary Islands). *The ASHES study protocol. Environ Res* 2023; 216:114486
12. Carlsen HK, Hauksdóttir A, Valdímarsdóttir UA, et al. Health effects following the Eyjafjallajökull volcanic eruption: a cohort study. *BMJ Open.* 2012;2:e001851.
13. Milford C, Torres C, Vilches J, et al. Impact of the 2021 La Palma volcanic eruption on air quality: Insights from a multi-disciplinary approach. *Sci Total Environ.* 2023;869:161652.
14. Baxter PJ, Jenkins S, Seswandhana R, et al. Human survival in volcanic eruptions: Thermal injuries in pyroclastic surges, their causes, prognosis and emergency management. *Burns.* 2017; 43:1051-69.
15. Cuthbertson J, Stewart C, Lyon A, et al. Health Impacts of Volcanic Activity in Oceania. *Prehosp Disaster Med.* 2020;35: 574-8.
16. Tesone AI, Lasagni Vitar RM, Tau J, et al. Volcanic ash from Puyehue-Cordón Caulle Volcanic Complex and Calbuco promote a differential response of pro-inflammatory and oxidative stress mediators on human conjunctival epithelial cells. *Environ Res.* 2018;167:87-97.
17. Barone G, De Giudici G, Gimeno D, et al. Surface reactivity of Etna volcanic ash and evaluation of health risks. *Sci Total Environ.* 2021;761:143248.
18. Gissurardóttir ÓS, Hlodversdóttir H, Thordardóttir EB, et al. Mental health effects following the eruption in Eyjafjallajökull volcano in Iceland: A population-based study. *Scand J Public Health.* 2019;47:251-9.
19. Brook RD, Brook JR, Tam EK. Volcanic smog and cardiometabolic health: Hawaiian hypertension? *J Clin Hypertens (Greenwich).* 2019;21:533-5.
20. Hlodversdóttir H, Petursdóttir G, Carlsen HK, et al. Long-term health effects of the Eyjafjallajökull volcanic eruption: a prospective cohort study in 2010 and 2013. *BMJ Open.* 2016; 6:e011444.
21. Muir JA, Cope MR, Angeningsih LR, et al. Community recovery after a natural disaster: Core data from a survey of communities affected by the 2010 Mt. Merapi eruptions in Central Java, Indonesia. *Data Br.* 2020;32:106040.
22. Heaviside C, Witham C, Vardoulakis S. Potential health im-

- pacts from sulphur dioxide and sulphate exposure in the UK resulting from an Icelandic effusive volcanic eruption. *Sci Total Environ.* 2021;774:145549.
23. Rojas-Ramos M, Catalan-Vazquez M, Pozzo ALM-D, et al. A Seven Months Prospective Study of the Respiratory Effects of Exposure to Ash from Popocatepetl Volcano, Mexico. *Environ Geochem Health.* 2001;23:379-92.
 24. Ruano-Ravina A, Acosta O, Díaz Pérez D, et al. Analysis of Exposure and Respiratory Health Effects of Volcanic Eruption in the Canary Islands (ASHES). A SEPAR Study. *Archivos de Bronconeumología.* 2022;58:780-2.
 25. Mueller W, Cowie H, Horwell CJ, et al. Standardized epidemiological protocols for populations affected by volcanic eruptions. *Bull World Health Organ* 2020; 98: 362-4.
 26. Neumann NR, Butler-Dawson J, Krisher L, et al. Urinary concentrations of metals before and after volcanic eruption: a natural experiment surrounding the eruption of Volcán de Fuego, 2018. *Environ Geochem Health.* 2023;45:2461-72.