

Exposición a ceniza volcánica producida por el volcán Turrialba y enfermedades respiratorias, Costa Rica, 2016

Exposure to volcanic ash produced by the Turrialba volcano and respiratory diseases, Costa Rica, 2016

Maite Vargas-Alfaro¹,  Sharline Douglas-Gordon²,  Horacio Alejandro Chamizo-García³ 

DOI: 10.19136/hs.a22n3.5628

Artículo Original

• Fecha de recibido: 30 de mayo de 2023 • Fecha de aceptado: 7 de julio de 2023 • Fecha de publicación: 18 de septiembre de 2023

Autor de correspondencia

Horacio Chamizo García. Dirección postal: Escuela de Tecnologías en Salud de la Facultad de Medicina de la Universidad de Costa Rica. Distrito de San Juan, Cantón de la Unión, Danza del Sol, 45H, Código postal: 30303. San José, Costa Rica. Correo electrónico: horacio.chamizo@ucr.ac.cr

Resumen

Objetivo: Describir el comportamiento espacial de la contaminación por cenizas volcánicas y el efecto sobre la incidencia de enfermedades respiratorias agudas y crónicas, en las comunidades expuestas a la ceniza producida por la actividad del Volcán Turrialba, durante el año 2016.

Materiales y métodos: Se realizó un estudio ecológico, observacional retrospectivo, transversal y correlacional, en donde se categorizaron 36 cantones a 50 km a la redonda del volcán Turrialba, según su nivel de contaminación.

Resultados: Se constata un comportamiento diferenciado en el espacio geográfico de afectación de la pluma de ceniza volcánica, todos los territorios incluidos en el estudio resultaron con algún nivel de contaminación, sin embargo, se distinguen tres zonas, alta, media y baja contaminación. Un 46.6% de los eventos epidemiológicos estudiados poseen un mayor riesgo de presentarse en cantones con alta contaminación, sobre los cantones con media y baja contaminación.

Conclusiones: Es posible que la afectación por contaminación debido a la ceniza volcánica haya incrementado el riesgo de exacerbación de enfermedades respiratorias crónicas, en la zona bajo la influencia directa de la pluma de cenizas volcánicas.

Palabras clave: Ceniza Volcánica; Enfermedades Respiratorias; Erupciones Volcánicas.

Abstract

Objective: Describe the spatial behavior of contamination by volcanic ash and the effect on the incidence of acute and chronic respiratory diseases in communities exposed to the ash produced by the activity of the Turrialba Volcano during the year 2016.

Materials and methods: An ecological, observational, retrospective, cross-sectional and correlational study was carried out, where 36 cantons within 50 km of the Turrialba volcano were categorized, according to their level of contamination.

Results: A differentiated behavior is verified in the geographical space affected by the volcanic ash plume, all the territories included in the study resulted in some level of contamination, however three zones are distinguished, high, medium and low contamination. 46.6% of the epidemiological events studied have a higher risk of occurring in cantons with high contamination, over cantons with medium and low contamination.

Conclusions: It is possible that the contamination due to volcanic ash has increased the risk of exacerbation of chronic respiratory diseases in the area under the direct influence of the volcanic ash plume.

Keywords: Volcanic Ash; Respiratory Tract Diseases; Volcanic Eruptions.

¹Licenciada en Salud Ambiental. Investigadora de la Escuela de Tecnologías en Salud de la Facultad de Medicina de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

²Licenciada en Salud Ambiental. Investigadora de la Escuela de Tecnologías en Salud de la Facultad de Medicina de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

³Doctor en Ciencias. Investigador de la Escuela de Tecnologías en Salud de la Facultad de Medicina de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.



Introducción

La interacción del ser humano con el entorno constituye uno de los mayores determinantes de la salud, con capacidad de aumentar la incidencia de enfermedades y la carga de morbilidad. La Organización Mundial de la Salud (OMS), calcula que el 24% de la carga de morbilidad mundial y el 23% de todos los fallecimientos pueden atribuirse a factores ambientales¹.

La exposición inhalatoria a partículas representa un riesgo para la salud. La OMS² estima que cerca de 9 de cada 10 personas respiran aire con niveles importantes de polución, solo en el 2016 se valora que provocó cerca de 4.2 millones de muertes. Además, reitera que siete millones de personas mueren al año, propiamente, por la exposición a partículas finas. Se reconoce que la contaminación del aire es un factor de riesgo importante de la mortalidad, se asocia con un 24% de defunciones por cardiopatías, así con un 43% de las defunciones por neumopatía obstructiva crónica y el 29% por cáncer de pulmón.

Tras una erupción volcánica, los materiales emitidos representan un gran impacto socioeconómico a las comunidades cercanas³. Además, producto de la exposición al material particulado y a los gases pueden derivar efectos en el sistema respiratorio, el cual es uno de los más comprometidos debido a que puede generarse una exacerbación de procesos inflamatorios crónicos y alteraciones en las vías respiratorias⁴.

Todo material sólido emanado durante la actividad volcánica se le llama tefra, en este sentido, la ceniza constituye un tipo de tefra, las cuales miden menos de 2 mm⁵. Estas son un componente importante en la contaminación atmosférica, existen, entre otros aspectos, dos factores que intervienen en su toxicidad aparte de su composición físico-química y de la concentración; estos son el tamaño, ya que, según explica, sólo las partículas más pequeñas pueden penetrar profundo en el pulmón con la capacidad de transportar compuestos volátiles absorbibles⁴.

Como parte de la toxicidad de la ceniza volcánica, se ha demostrado que, “en animales de laboratorio se han descrito diferentes efectos bioquímicos, inmunológicos, por ejemplo: la persistencia de las cenizas en el tejido pulmonar es aproximadamente de 39 días y alrededor de 10 % de ellas se retiene en el tejido pulmonar hasta dos meses después”⁴. Lo que demuestra que en una exposición constante estos valores pueden aumentar, lo que podría ocasionar efectos adversos a la salud de gran importancia.

En el 2015, hubo actividad del volcán Cabulco en Chile, donde se realizó un estudio poblacional cinco días después de la erupción, obteniéndose como resultado que no hubo diferencias significativas en la prevalencia de sibilancias poblaciones expuestas y no expuestas. Sin embargo, se hallaron prevalencias

elevadas en: síntomas respiratorios y oculares posteriores, así como la percepción de exposición, suspensión aérea y percepción de riesgo de salud⁶.

La exposición a la contaminación por partículas, como es el caso de las cenizas, tiende a afectar en su mayoría a personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, niños y adultos mayores; siendo estas las poblaciones que se pueden considerar susceptibles⁷. Su tamaño está relacionado directamente con la capacidad de afectación en la salud; ya que las partículas con un tamaño menor a los 10 µm de diámetro, como es el caso de las cenizas, pueden llegar a alvéolos, mientras que las mayores a 10 µm se quedará en las zonas respiratorias más elevadas, nasales y la garganta⁸.

La localización del material particulado dentro de los pulmones y su capacidad de provocar inflamación depende del volumen de la corriente de aire, el patrón de distribución en el órgano, la frecuencia de la respiración, el tamaño de las partículas y la morfología de las vías respiratorias⁹.

En el escenario costarricense, la emanación de cenizas a la atmósfera representa una problemática en la salud pública de las zonas afectadas. Situación que ocurre con frecuencia, ya que Costa Rica es un país caracterizado por la actividad volcánica constante.

Yglesias y Chamizo establecen que, debido al dinamismo de la actividad volcánica de forma natural se generan sustancias capaces de producir cambios ambientales y daños a la salud de los seres humanos que residen en las zonas cercanas a los volcanes. En su estudio realizado sobre la emanación de gases del volcán Turrialba, Costa Rica, define que para un grupo altamente expuesto la presencia de otros factores de riesgo relacionados con las enfermedades respiratorias podría aumentar la susceptibilidad de la población a desarrollar dichas patologías o síntomas respiratorios¹⁰.

El objetivo de esta investigación fue describir el efecto sobre la frecuencia de enfermedades respiratorias, en las comunidades expuestas a la ceniza generada por la actividad del volcán Turrialba, Cartago, Costa Rica, en el año 2016. Se tomó como objeto de estudio este volcán, debido a que durante los últimos años se ha caracterizado por un aumento en su actividad. Según Campos y Alvarado, el 2016 fue el año de más reportes desde el 2010 al 2018¹¹.

El 20 de mayo del 2016 ocurrió una erupción del volcán Turrialba, considerada como la tercera más importante de los últimos dos años en ese momento, con una duración de ocho minutos y una expulsión de cenizas, rocas y gases, provocando un gran impacto en la ciudad de San José ubicada a 45 km. Se generó un fuerte olor a azufre, y varios edificios y automóviles quedaron cubiertos de ceniza. Otros efectos importantes se

manifestaron en las comunidades de Goicoechea, Coronado y Montes de Oca; territorios en los que se registraron eventos respiratorios y de la piel¹².

Materiales y Métodos

Se realizó un estudio ecológico de carácter observacional y correlacional, para lo cual se consideraron los cantones de Costa Rica afectados potencialmente por el material particulado. Una vez determinado el patrón espacial de distribución de la ceniza volcánica, se procedió a establecer relaciones de manera exploratoria con el riesgo de la población de padecer enfermedades respiratorias.

La metodología de esta investigación se ejecutó en dos etapas. En la primera se estableció el patrón de la dispersión de la ceniza con el fin de identificar las zonas expuestas y luego se determinó el riesgo de padecer enfermedades respiratorias asociado con la exposición a material particulado.

Para la primera etapa, se contó con 13 muestras de cenizas sedimentadas tomadas por Volcanes Sin Fronteras tras cada erupción, y analizadas por el Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC) en el periodo del 30 de abril al 14 de octubre de 2016.

El muestreo se hizo mediante la recolección de partículas sedimentadas. Razón por la cual se utilizó el diagrama de TAS (Total Alkali Silica), en el cual se hace una comparación entre el contenido total de álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) y de sílice (SiO_2), que permite identificar aquellas muestras de origen volcánico y eliminar aquellas que se encuentren contaminadas por el método de recolección. Para ello, se realizó el cálculo del factor gravimétrico para los porcentajes de sodio, potasio y silicio presentes en la roca. Este factor es utilizado para determinar la masa de un analito, en este caso de los óxidos antes mencionados, a partir de la masa de los elementos que participan en la reacción¹³.

Para conocer la composición elemental, se realizó espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS). Y, en cuanto a la caracterización morfológica de las cenizas, se realizó un análisis mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM). Ambos estudios fueron realizados por LANOTEC. De acuerdo con los análisis SEM, el tamaño promedio de estas muestras es de $95.7 \mu\text{m}$ con una desviación estándar de $65.69 \mu\text{m}$; una moda de $50 \mu\text{m}$ y una mediana de $100 \mu\text{m}$. El programa utilizado para conocer la dispersión de cenizas toma en cuenta muestras menores a los $100 \mu\text{m}$; por tanto, estas muestras están contempladas en el modelo utilizado.

Seguidamente, en colaboración con el Laboratorio de Química de la Atmósfera de la Universidad Nacional (LAQAT-UNA), se determinó la concentración y dispersión de las cenizas

emanadas del volcán Turrialba en el año 2016. Para lo cual, se usó el modelo Gaussiano, empleando el programa AERMOD View 9.8.3. Para ello se elaboró un mapa de dispersión de ceniza para cada muestra, los cuales incluyen los datos de difusión de material particulado el día de la toma de muestra, partiendo del mediodía, 24 horas hacia atrás y se consideró un espacio geográfico de 50 km a la redonda con respecto al volcán Turrialba.

En conjunto con el programa QGIS 3.18 se recreó la dispersión de materiales sólidos emitidos a la atmósfera. Para alimentar el software y realizar las simulaciones de las plumas de ceniza se tomaron datos de emisión constantes tales como: la temperatura de salida de los gases ($300 \text{ }^\circ\text{C}$), la tasa de emisión (1000 g/s de ceniza), el diámetro interno (230 m), la velocidad de salida (5 m/s) y la elevación ($3310,79 \text{ m}$). En cuanto al tipo de estabilidad atmosférica, el modelo lo calcula en función de los valores atmosféricos por hora y por cada 24 horas.

En total, se abordan 36 cantones, los cuales fueron clasificados por su nivel de contaminación por ceniza volcánica. Para clasificar los niveles de contaminación según la concentración, se hace referencia a los límites establecidos por la OMS y la regulación nacional, tanto PM₁₀ y PM_{2.5} (Tabla 1). Basado en esto, para este estudio se considera como contaminación baja, las áreas cuyos niveles de concentración van de 0 a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, media aquellas con niveles de 10 a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y alta las concentraciones mayores a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para la segunda etapa, se utilizó información de vigilancia epidemiológica brindada por la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS) asociada con la frecuencia de seis enfermedades respiratorias, divididas en 15 diagnósticos, según la Clasificación Estadística Internacional de Enfermedades y Problemas Relacionados con la Salud X, como se cita: 1.EPOC con exacerbación aguda, no especificada, 2. Otras EPOC especificadas, 3.EPOC no especificada, 4.Asma, no especificado, 5. Estado asmático, 6. Bronquitis aguda, no especificada, 7. Bronquitis, no especificada como aguda o crónica, 8. Bronquitis crónica no especificada, 9.Rinitis alérgica, no especificada, 10. Rinitis crónica, 11. Neumoconiosis debida a otros polvos que contienen sílice, 12. Tumor maligno del lóbulo superior, bronquio o pulmón, 13. Tumor maligno del lóbulo medio, bronquio o pulmón, 14. Tumor maligno del lóbulo inferior, bronquio o pulmón, 15. Tumor maligno de los bronquios o del pulmón, parte no especificada. Algunas enfermedades crónicas se incorporaron a este estudio exploratorio, considerando que al tratarse de zonas contiguas al edificio volcánico pudieron haber sufrido exposiciones sucesivas durante procesos efusivos anteriores al que se aborda en el presente estudio. Aunado a lo anterior, se consideró que los impactos en la salud y su gravedad dada la exposición de ceniza, varían según la dosis absorbida por el organismo, el tiempo de exposición, la morfología y toxicidad de las sustancias, las condiciones

Tabla 1. Concentraciones máximas para las partículas (PM_{10} y $PM_{2.5}$).

Directriz	Contaminante	Tipo estándar	Valor de referencia (0)	Tiempo promedio
Costa Rica: Reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio N°39951	Partículas con diámetros Primario menores a 2,5 μm ($PM_{2.5}$)	Primario	15	Anual
		Secundario	15	Anual
		Primario/ secundario	35	24 horas
	Partículas con diámetros Primario menores a 10 μm (PM_{10})	Primario	30	Anual
		Secundario	40	Anual
		Primario/ secundario	100	24 horas
Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.	Partículas con diámetros Primario menores a 2,5 μm ($PM_{2.5}$)	-	10	Anual
		-	25	24 horas
	Partículas con diámetros Primario menores a 10 μm (PM_{10})	-	20	Anual
		-	50	24 horas

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos obtenidos por el Reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio N°39951, 2016 y de las Guías de calidad del aire de la OMS, 2005.

meteorológicas y las características topográficas de la zona. Por otro lado, los efectos pueden ser desde agudos y reversibles en sujetos sanos, hasta la exacerbación de enfermedades respiratorias crónicas y graves o fatales¹⁴. Según lo definen Urbilla y Yohannessen, otros factores que determinan el impacto en la salud son el estado anatómico o fisiológico de la persona y su patrón de respiración o nivel de actividad, entre otros¹⁵.

Con el propósito de explorar el riesgo de enfermar y morir se calculó la tasa de morbilidad y mortalidad general y específica por sexo y edad; y los Índices de Morbi/Mortalidad Estandarizado por Edad (IME). Como población estándar se utilizó la población total que forma parte del estudio, por lo cual la interpretación y comparación de datos se da con respecto a los niveles de contaminación.

Se utilizó la prueba Chi-cuadrado con un nivel de significancia del 5% para comparar las medidas de frecuencia de los eventos epidemiológicos según zonas de exposición a cenizas. Se realizaron dos comparaciones de proporciones de morbilidad y mortalidad para cada diagnóstico, por zonas según su nivel de exposición. La primera comparación fue entre los grupos

de alta y baja contaminación; y la segunda entre los grupos de media y baja. Esto permitió determinar si hay alguna relación entre la ocurrencia de enfermedad o de defunción y el nivel de contaminación.

Las hipótesis planteadas fueron interpretadas de la siguiente manera: *Hipótesis nula*: $H_0: P_1 = P_2$ no existe diferencia entre las proporciones de las poblaciones ($P_1 - P_2 = 0$). *Hipótesis alternativa*: $H_1: P_1 \neq P_2$, existe una diferencia entre los sujetos enfermos que podría estar asociada al nivel de contaminación de su lugar de residencia.

Cabe mencionar que, los resultados de este estudio corresponden a datos secundarios, por lo que puede existir una no correspondencia espacial de las unidades de observación y el análisis. Al tratarse de un estudio ecológico no se puede vincular la contaminación por cenizas volcánicas con el riesgo individual de las personas, sino con el riesgo colectivo a nivel territorial.

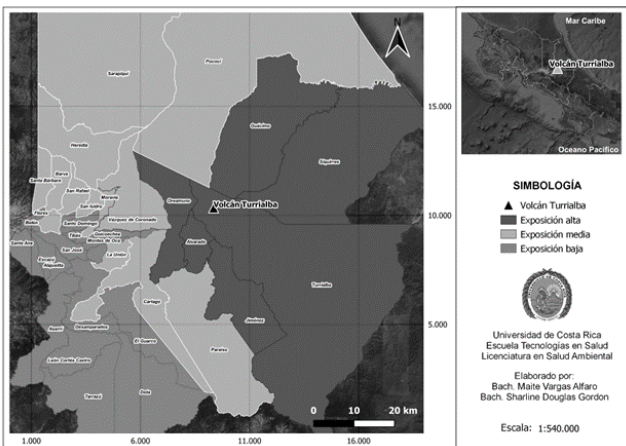
Resultados

En esta sección se presenta el patrón espacial de distribución de la ceniza volcánica y el riesgo de la población de padecer enfermedades respiratorias. El siguiente mapa muestra la clasificación de las unidades geográficas de acuerdo con su potencial de contaminación. Se muestran los niveles de contaminación por ceniza proveniente del Volcán Turrialba por cantón en el 2016.

Para la elaboración de este mapa se analizó la frecuencia de afectación de la pluma de ceniza en cada uno de los cantones involucrados dentro de la unidad observacional, a partir de las 13 fechas de actividad (13 muestras). Aquellos con mayor frecuencia de afectación de la pluma de ceniza, se han catalogado como contaminación alta, los que han estado con una frecuencia de contaminación a niveles medios, en la categoría media y finalmente, los cantones poco frecuentes en la afectación de ceniza y con un bajo nivel de contaminación, corresponden a contaminación baja.

El mapa anterior muestra que la provincia de Cartago, específicamente los cantones de Turrialba, Oreamuno, Alvarado y Jiménez; y Limón, en Guácimo y Siquirres, tuvieron una mayor contaminación en el periodo analizado. Se trata de territorios ubicados en el entorno del volcán. Otros de los cantones que también estuvieron expuestos, pero en una menor medida y se consideran con una contaminación baja son: El Guarco en Cartago, seguido de San José, Escazú, Tarrazú, Aserri, Goicoechea, Santa Ana, Alajuelita, Tibás, Montes de Oca, Dota, Curridabat, León Cortés Castro en la Provincia de San José, y Santo Domingo, Belén, Flores y San Pablo en Heredia.

Figura 1. Costa Rica. Contaminación por ceniza por cantón, 2016.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de LAQAT-UNA, 2021.

En términos del riesgo por enfermedades respiratorias, se presentan los hallazgos del análisis del riesgo epidemiológico para cada una de las seis enfermedades elegidas y sus diagnósticos asociados. Se presenta a continuación la comparación entre proporciones (morbilidad y mortalidad) a partir de las frecuencias de morbilidad y mortalidad brutas y estandarizadas según zonas de contaminación por ceniza volcánica.

Tabla 2. Índice de Morbilidad y/o Mortalidad Estandarizado por edad, por cada 100.000 personas.

Enfermedad Pulmonar Obstructiva crónica con exacerbación aguda, no especificada			
	Contaminación alta	Contaminación media	Contaminación baja
Morbilidad bruta	30,6	6,9	11,7
IME	3,07	0,6	0,89
Mortalidad bruta	1,2	0,9	2,5
IME	0,89	0,64	1,32
Otras Enfermedades Pulmonares Obstructivas Crónicas especificadas			
Morbilidad bruta	3,7	0,6	1,7
IME	2,98	0,5	1,06
Mortalidad bruta	0	0,1	0,2
IME	0	0,81	1,33
Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica, no especificada			
Morbilidad bruta	1,7	6,2	4,6
IME	0,38	1,38	0,79
Mortalidad bruta	0,4	0,6	0,8
IME	0,74	0,97	1,07

continuará...

continuación...

Asma, no especificada			
Morbilidad bruta	7,8	3,1	3,3
IME	2,27	0,87	0,86
Estado asmático			
Morbilidad bruta	24,8	37,3	51,8
IME	0,54	0,88	1,26
Mortalidad bruta	0	0,2	0,3
IME	0	0,92	1,28
Bronquitis aguda, no especificada			
Morbilidad bruta	6,2	2,8	1
IME	2,63	1,21	0,41
Bronquitis, no especificada como aguda o crónica			
Morbilidad bruta	0,8	0,2	0,3
IME	3,08	0,65	0,92
Bronquitis Crónica, no especificada			
Morbilidad bruta	0	0	0,1
IME	0	0	2,33
Rinitis alérgica, no especificada			
Morbilidad bruta	0	0,09	0,2
IME	0	0,71	1,61
Rinitis Crónica			
Morbilidad bruta	0	0,7	0,7
IME	0	1,17	1,05
Neumoconiosis debida a otros polvos que contienen sílice			
Morbilidad bruta	0	0,1	0,2
IME	0	0,75	1,45
Tumor maligno del lóbulo superior, bronquio o pulmón			
Morbilidad bruta	0,4	0	0,5
IME	1,76	0	1,76
Mortalidad bruta	0	0	0,1
IME	0	0	1,98
Tumor maligno del lóbulo medio, bronquio o pulmón			
Morbilidad bruta	0	0,1	7,04
IME	0	2,52	0
Tumor maligno del lóbulo inferior, bronquio o pulmón			
Morbilidad bruta	0	0	0,2
IME	0	0	2,07
Tumor maligno de los bronquios o del pulmón, parte no especificada			
Morbilidad bruta	7	7	7,8
IME	1,05	1,02	0,97
Mortalidad bruta	2,5	2,4	1,6
IME	1,35	1,28	0,69

Fuente: elaboración propia.

El cuadro anterior evidencia que existen tendencias claras de un exceso de riesgo en los territorios de mayor contaminación por ceniza volcánica para la morbilidad bruta y estandarizada por edad, en el caso del EPOC con exacerbación aguda, otras enfermedades pulmonares obstructivas crónicas especificadas, el asma no especificada y la bronquitis aguda no especificada y en la bronquitis no especificada como aguda o crónica. En el caso del tumor maligno de los bronquios o de pulmón, parte no especificada, se observó una clara tendencia de exceso de riesgo en la mortalidad estandarizada en los territorios de mayor contaminación, no así en el caso de la mortalidad bruta y en la morbilidad.

No se observa exceso de riesgo en la morbilidad, en las zonas de mayor contaminación ambiental por ceniza volcánica en los casos de los eventos: estado asmático, bronquitis crónica no especificada, rinitis alérgica, rinitis crónica, neumoconiosis, así como los tumores malignos de bronquio o pulmón de lóbulo superior, medio e inferior.

Se observa exceso de riesgo de morir, bruto y estandarizado en las zonas de mayor contaminación por ceniza volcánica en la mortalidad bruta por del EPOC con exacerbación aguda y en el caso del tumor maligno de los bronquios o de pulmón, parte no especificada. En otros indicadores de mortalidad no se observa exceso de riesgo en la zona de mayor contaminación en los eventos: otras enfermedades pulmonares obstructivas crónicas especificadas y enfermedad pulmonar obstructiva crónica no especificada.

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de hipótesis realizadas al comparar las frecuencias de morbilidad y mortalidad según zonas de contaminación por ceniza volcánica.

Tabla 3. Comparación de proporciones.

	Nivel	Diferencia de proporciones	Estadística de prueba	Significancia
EPOC con exacerbación aguda, no especificada				
Morbilidad	Alto-bajo	0.01888%	45.418	P < 0.0001
	Medio-bajo	0.00474%	12.713	P = 0.0004
Mortalidad	Alto-bajo	0.00123%	1.324	P = 0.2499
	Medio-bajo	0.00155%	7.518	P = 0.0061
Otras EPOC especificadas				
Morbilidad	Alto-bajo	0.00203%	3.883	P = 0.0488
	Medio-bajo	0.00103%	4.828	P = 0.0280
Mortalidad	Alto-bajo	0.00020%	0.484	P = 0.4865
	Medio-bajo	0.00010%	0.441	P = 0.5064

continuará...

EPOC no especificada				
Morbilidad	Alto-bajo	0.00290%	4.118	P = 0.0424
	Medio-bajo	0.00165%	2.631	P = 0.1048
Mortalidad	Alto-bajo	0.00038%	0.394	P = 0.5304
	Medio-bajo	0.00024%	0.452	P = 0.5015
Asma, no especificado				
Morbilidad	Alto-bajo	0.00458%	9.859	P = 0.0017
	Medio-bajo	0.00022%	0.08	P = 0.7772
Estado asmático				
Morbilidad	Alto-bajo	0.02700%	30.594	P < 0.0001
	Medio-bajo	0.01450%	24.803	P < 0.0001
Mortalidad	Alto-bajo	0.00030%	0.726	P = 0.3941
	Medio-bajo	0.00012%	0.316	P = 0.5740
Bronquitis aguda, no especificada				
Morbilidad	Alto-bajo	0.00520%	26.466	P < 0.0001
	Medio-bajo	0.00178%	8.661	P = 0.0033
Bronquitis, no especificada como aguda o crónica				
Morbilidad	Alto-bajo	0.00053%	1.363	P = 0.2430
	Medio-bajo	0.00012%	0.316	P = 0.5740
Bronquitis Crónica, no especificada				
Morbilidad	Alto-bajo	0.00010%	0.242	P = 0.6227
	Medio-bajo	0.00010%	1.081	P = 0.2985
Rinitis alérgica, no especificada				
Morbilidad	Alto-bajo	0.00020%	0.484	P = 0.4865
	Medio-bajo	0.00010%	0.441	P = 0.5064
Rinitis crónica				
Morbilidad	Alto-bajo	0.00069%	1.671	P = 0.1962
	Medio-bajo	0.00005%	0.018	P = 0.8926
Neumoconiosis				
Morbilidad	Alto-bajo	0.00020%	0.484	P = 0.4865
	Medio-bajo	0.00010%	0.441	P = 0.5064
Tumor maligno del lóbulo superior, bronquio o pulmón				
Morbilidad	Alto-bajo	0.00008%	0.026	P = 0.8711
	Medio-bajo	0.00049%	5.297	P = 0.0214
Mortalidad	Alto-bajo	0.00010%	0.242	P = 0.6227
	Medio-bajo	0.00010%	1.081	P = 0.2985
Tumor maligno del lóbulo medio, bronquio o pulmón				
Morbilidad	Alto-bajo	-	-	-
	Medio-bajo	0.00010%	0.909	P = 0.3404

continuará...

continuación...

Tumor maligno del lóbulo inferior, bronquio o pulmón				
Morbilidad	Alto-bajo	0.00020%	0.484	P = 0.4865
	Medio-bajo	0.00020%	2.162	P = 0.1414
Tumor maligno de los bronquios o del pulmón, parte no especificada				
Morbilidad	Alto-bajo	0.00080%	0.163	P = 0.6863
	Medio-bajo	0.00079%	0.44	P = 0.5072
Mortalidad	Alto-bajo	0.00090%	0.902	P = 0.3423
	Medio-bajo	0.00082%	1.752	P = 0.1856

Fuente: elaboración propia.

Se constatan diferencias significativas entre las zonas de contaminación en el caso de la morbilidad por EPOC con exacerbación aguda no especificada, como se había mencionado, esta es una de las causas de morbilidad que presenta exceso de riesgo y que tiende a disminuir sostenidamente en los territorios que presentaron un nivel intermedio y bajo de contaminación. En el caso de la morbilidad no se observan variaciones significativas. Para otras EPOC no especificadas y en el caso del estado asmático y la bronquitis aguda no especificada, se aprecia una tendencia parecida: existen diferencias estadísticamente significativas en el caso de morbilidad, pero no en el caso de la mortalidad (en las causas donde se cuenta con registros de defunciones).

En el resto de las causas consideradas no se observan diferencias significativas estadísticamente, salvo excepciones como son: el tumor maligno de lóbulo inferior, bronquio o pulmón, donde se observan diferencias estadísticamente significativas entre la zona de nivel intermedio de contaminación y la zona de baja contaminación, así como en EPOC no especificada y asma no especificada (donde existen diferencias significativas entre las zonas de alta contaminación y la zona de mediana contaminación).

Discusión

Costa Rica es un país atravesado por una cordillera volcánica y afectado con frecuencia por procesos efusivos que deben tener un potencial impacto en la salud de las personas y particularmente en la salud respiratoria. El presente estudio ofrece datos y genera conocimiento exploratorio que expone a la discusión científica, el papel del entorno natural en la epidemiología de enfermedades que comprometen el bienestar de la población.

El mapa sobre dispersión de la ceniza volcánica presentado en este estudio a partir del muestreo realizado, evidencia un patrón espacial en el que pueden influir factores meteorológicos y geográficos. El factor meteorológico es muy importante y a veces muy predominante, según la posición geográfica de Costa Rica en Centroamérica, ya que tiene una alta influencia de los vientos alisios y baja influencia de los vientos ecuatoriales.

El dinamismo volcánico constituye una fuente de contaminación biogénica, en otras palabras, natural. La emisión de contaminantes implica un riesgo para el ambiente y la salud de las personas. Como lo definen Dingwell, Lavallée y Kueppers, uno de los aspectos más notables de la actividad volcánica es la capacidad que posee de cambiar abruptamente de estilo efusivo de riesgo relativamente bajo a estilo explosivo de alto riesgo¹⁶. Por tanto, su actividad provoca efectos a nivel de salud, productivo, económico, estructural, entre otros.

Durante la liberación de los contaminantes a la atmósfera, como en el caso de la ceniza, son transportados por el aire, por lo que su concentración se diluye con el pasar del tiempo. Algunos de los parámetros que afectan la dilución son: temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, altura de mezcla, estabilidad atmosférica, turbulencia, entre otros¹⁷. Esta liberación de elementos se da en forma de plumas de dispersión.

Para Horwell, la caída de ceniza es considerada como un riesgo secundario con efectos tanto a corto como a largo plazo. Este aspecto es importante de considerar, ya que tiene la capacidad de permanecer en el ambiente durante meses o años después de una actividad eruptiva, afectando consigo a muchas poblaciones, no solo a las cercanas sino también a las ubicadas a varios kilómetros de distancia del volcán¹⁸.

En la presente investigación, con respecto a la geografía o dispersión espacial, en la parte norte y este, no hay montañas que puedan generar una obstrucción de flujos de aire, ya que el sistema montañoso de Costa Rica se orienta de noroeste a sureste y se ubica más cerca de la costa pacífica. Este sistema se divide en tres cordilleras principales que son: La Cordillera de Guanacaste en la parte noroeste, la Cordillera Volcánica Central (en esta se ubica el volcán Turrialba en la parte más oriental) y la Cordillera de Talamanca al sureste. En cuanto a la meteorología de la zona, los vientos alisios cuyas direcciones predominantes son del este y del noreste influyen en la dispersión, ya que persisten durante todo el año siendo febrero el mes en el que alcanzan la mayor velocidad promedio de hasta 30 Km/h¹⁹. Estos factores podrían facilitar que se dé una afectación alrededor del foco emisor; los gases y partículas que emana el volcán durante una erupción podrían dispersarse hacia el noroeste, el oeste y el suroeste.

El análisis de frecuencia de las enfermedades incluidas en esta investigación, se enfocó en la exposición a ceniza volcánica. Se destaca que la clasificación de estos cantones ubicados en zonas de alta, media y baja contaminación se fundamenta en los hallazgos obtenidos sobre el comportamiento espacial de la contaminación, según la dirección de la pluma y la concentración de partículas en suspensión durante el año 2016.

En el estudio realizado por Sierra se determinó que después de una exposición a ceniza volcánica es frecuente la exacerbación de enfermedades respiratorias⁴. En el caso de esta investigación, la EPOC con exacerbación aguda y el asma fueron los eventos más frecuentes entre los considerados, durante el año 2016.

De los diagnósticos elegidos en esta investigación, un 40% presentaron defunciones durante el 2016. En cantones con contaminación alta, existe, en comparación con los niveles medio y bajo, un mayor riesgo de defunción a causa de tumor maligno de los bronquios o del pulmón, no especificado. En el nivel medio de contaminación no se observó un riesgo mayor de mortalidad. En el nivel bajo se evidenció un exceso de riesgo de mortalidad, en comparación con los niveles alto y medio de contaminación, en 33.3% de los diagnósticos, situación que no es coherente con la hipótesis que sostiene el papel de la exposición a ceniza como factor de riesgo.

Los resultados en cantones ubicados en una zona de baja contaminación podrían sugerir la intervención de otros factores ambientales. Se destaca que estos se ubican en una zona mayormente urbana en comparación con los niveles alto y medio, por lo que pueden estar expuestos a contaminación por gases vehiculares, actividades industriales, entre otros. Como lo indica Gallego la presencia de infraestructuras (como lo hay en zonas urbanas) influyen en la dispersión de los contaminantes²⁰.

En la presente investigación se evidenció que en los cantones con alta exposición, comparado con los niveles medio y bajo, existe un mayor riesgo de presentar algunas de las enfermedades, consideradas siendo estas: EPOC con exacerbación aguda no especificada, otras EPOC especificadas, asma no especificada, bronquitis aguda no especificada, bronquitis no especificada como aguda o crónica, tumor maligno de los bronquios o del pulmón, parte no especificada y tumor maligno del lóbulo superior, bronquio o pulmón.

Los resultados coinciden parcialmente con lo descrito en el estudio realizado por Sierra en el 2012, en donde indica que la exposición a ceniza volcánica, produce en la población cuadros de inflamación aguda en las vías respiratorias superiores e inferiores⁴. Otro estudio en el 2020, determina que existe prevalencia de síntomas de asma en poblaciones expuestas a ceniza comparado con poblaciones no expuestas. Se ha señalado que se produce un aumento de la prevalencia de sibilancias y síntomas de severidad de asma bronquial en la población expuesta³. Cifuentes y Alvarado también corroboraron en su estudio, que existe una asociación entre la exposición a ceniza y la presencia del antecedente de asma²¹.

Betteta observó que la contaminación ambiental por micropartículas influye en la presencia de enfermedades respiratorias como el asma y la rinitis en el distrito de Ate en Perú, en donde, específicamente en el asma, el aumento de

la concentración a lo largo de los años infiere un aumento de casos²². Este caso no refiere la presencia de actividad volcánica, sin embargo, comprueba que los materiales particulados, como la ceniza volcánica, se asocia a la presencia de enfermedades respiratorias.

Sobre la actividad volcánica y los posibles efectos sobre las personas y sus potenciales respuestas a la contaminación por ceniza, en un estudio realizado en el 2018 por Maldonado et al. del volcán Tungurahua en Ecuador durante 2007, se reportaron alteraciones a nivel bronquial en el 10 % de las personas con menos de 40 años a pesar de no contar con antecedentes de exposición a otros factores (como el fumado o humo de leña), lo que indica una posible consecuencia del contacto con la ceniza volcánica. En la población mayor de 40 años, el 46 % presentó cambios a nivel bronquial y además se observó que la población más afectada corresponde a la femenina. En los reportes de la espirometría no se evidencia un patrón obstructivo en ningún individuo estudiado, pero sí patrones restrictivos, lo que tiene sentido puesto que se observa un efecto inflamatorio a causa de la exposición a la ceniza²³.

Conclusiones

La dirección de la pluma de dispersión y la concentración de partículas, permitió precisar los cantones por nivel de exposición. En este sentido, todos los cantones seleccionados se consideraron expuestos, sin embargo, se logran distinguir zonas de mayor contaminación, media y baja contaminación.

Las zonas de mayor exposición a ceniza volcánica presentaron exceso de riesgo de enfermar en algunos eventos epidemiológicos como son el EPOC con exacerbación aguda no especificada, otras EPOC especificadas, EPOC no especificada, bronquitis aguda, no especificada, asma, no especificada y también en el caso del estado asmática y el tumor maligno de los bronquios o del pulmón no especificado. Esta tendencia sostiene la hipótesis de una posible asociación a nivel ecológico, entre la exposición a ceniza volcánica y el riesgo de enfermar, circunstancia que no se corrobora en otros eventos como estado asmático, bronquitis crónica no especificada, rinitis alérgica, rinitis crónica, neuromoconiosis, así como los tumores malignos de bronquio o pulmón de lóbulo superior, medio e inferior.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Consideraciones éticas

Se llevó a cabo un estudio ecológico a partir de datos secundarios sobre la incidencia de enfermedades, utilizando bases de datos de acceso público y en línea, agregada según unidades geográficas (no individualizadas). De acuerdo con la ley Reguladora de la

Investigación Biomédica No 9234 y su reglamento (Reglamento de la Ley Reguladora de la Investigación Biomédica, Decreto 39061, este tipo de investigación no necesita ser sometida a consideración del Comité Ético Científico, correspondiente a la Universidad de Costa Rica.

Contribución de los autores

Conceptualización y diseño, M.V.A., S,D,G., H.C.G.; Metodología, M.V.A., S,D,G., H.C.G.; Adquisición de datos y Software, M.V.A., S,D,G.; Análisis e interpretación de datos, M.V.A., S,D,G., H.C.G.; Investigador Principal, M.V.A., S,D,G., Investigación, M.V.A., S,D,G., Redacción del manuscrito—Preparación del borrador original, M.V.A., S,D,G.; Redacción revisión y edición del manuscrito, M.V.A., S,D,G., H.C.G.; Visualización, M.V.A., S,D,G., H.C.G.; Supervisión, H.C.G.

Agradecimientos

Los autores reconocen el apoyo brindado por la Universidad de Costa Rica, al Laboratorio Nacional de Nanotecnología, a Gino González y al Laboratorio de Química de la Atmósfera de la Universidad Nacional de Costa Rica. Se reconoce el apoyo científico de la Escuela de Tecnologías en Salud de la Universidad de Costa Rica.

Referencia

1. Prüss-Üstün A, Corvalán C. AMBIENTES SALUDABLES Y PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES [Internet]. Who.int. 2006 [citado el 10 de abril de 2023]. Disponible en: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43452/9243594206_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
2. Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado [Internet]. Who.int. 2018 [citado el 15 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
3. Zabert I, Benitez S, Maldonado PDC, Uribe Echevarría L, Zabert GE. Prevalencia de síntomas de riesgo asma en adolescentes expuestos a ceniza volcánica, en dos ciudades de la Patagonia. *Rev Fac Cien Med Univ Nac Córdoba* [Internet]. 2020;77(2):61–7. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.31053/1853.0605.v77.n2.27927>
4. Sierra M. Las cenizas, gases volcánicos y la salud respiratoria. *Neumología y Cirugía de Tórax* [Internet]. 2012 [citado el 10 de abril de 2023];71(2):132–138. Disponible en: <https://www.medigraphic.com/pdfs/neumo/nt-2012/nt122a.pdf>
5. Soto G, Mora M. Actividad del volcán Turrialba (2007-2011) y perspectivas de amenaza volcánica. En: Adamson M, Castillo F, editores. *Desastres: Costa Rica en el tercer milenio desafíos y propuestas para la reducción de vulnerabilidad* [Internet]. Costa Rica; 2013 [citado el 17 de mayo de 2023]. p. 287–310. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/257580096_Actividad_del_volcan_Turrialba_2007-2011_y_perspectivas_de_amenaza_volcanica
6. Zabert I, Benítez S, Zabert G. Impacto respiratorio de la exposición aguda a las cenizas volcánicas en la Patagonia Argentina: un estudio transversal. *Revista Americana de Medicina Respiratoria*. 2019 [citado el 15 de mayo de 2023];19(2):112–118. Disponible en: https://www.ramr.org/articulos/volumen_19_numero_2/articulos_originales/articulos_originales_impacto_respiratorio_de_la_exposicion_a_las_cenizas_volcanicas_en_la_patagonia_un_estudio_trasversal.pdf
7. Us Epa OA. Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medio ambiente. 2018 [citado el 15 de mayo de 2023]; Disponible en: <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
8. Boischio A. Los impactos a la salud asociados con las cenizas de los volcanes [Internet]. Pan American Health Organization / World Health Organization. 2013 [citado el 15 de mayo de 2023]. Disponible en: https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=8194:2013-los-impactos-salud-asociados-cenizas-volcanes&Itemid=39797&lang=pt
9. Grob B Edgardo, Oyarzún G Manuel, Cavieres C Isabel, Zarges T Pablo, Bustamante M Gabriel. ¿Son las cenizas volcánicas un riesgo para la salud respiratoria?: Revisión a propósito de la erupción del cordón del Cauille en junio de 2011. *Rev. chil. enferm. respir.* [Internet]. 2012 Dic [citado 2023 Abr 10]; 28(4): 294-302. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-73482012000400005&lng=es
10. Yglesias M, Chamizo H. A. Riesgo de padecer enfermedades y síntomas respiratorios asociado a la exposición a dióxido de carbono y dióxido de azufre provenientes del volcán Turrialba, Costa Rica. *Universidad de Costa Rica. Horizonte Sanitario* [Internet]. 2013 [citado el 15 de mayo de 2023];12(1):7-13. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=457845143002>



11. Campos D, Alvarado GE. Análisis de la distribución espaciotemporal de la caída de cenizas del volcán Turrialba (2010 - 2018), Costa Rica: isofrecuencia, volumen y afectación. *Rev Geol Am Cent* [Internet]. 2018 [citado el 15 de mayo de 2023];59:23–39. Disponible en: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rgac/n59/0256-7024-rgac-59-22.pdf>
12. Costa Rica: impresionantes imágenes de la fuerte erupción del volcán Turrialba [Internet]. BBC News Mundo. 2016 [citado el 15 de mayo de 2023]. Disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/05/160521_galeria_fotos_volcan_turrialba_cartago_costa_rica_lb
13. Instituto Geológico y Minero de España. Vocabulario de Rocas, Sedimentos y Formaciones Superficiales [Internet]. Igme.es. 2019 [citado el 6 de julio de 2023]. Disponible en: <https://www.igme.es/Publicaciones/publiFree/Vocabulario%20de%20rocas%20edición%20final.pdf>
14. Cifuentes Moreira A. C, Alvarado Aguirre L. A, Naranjo Noboa A. R, Naranjo Noboa C. E, Acosta Preciado A. K, , Chamba Vozmediano F. D. Asociación entre alteraciones respiratorias y espirométricas con la exposición inhalatoria crónica de las cenizas del volcán Tungurahua. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica* [Internet]. 2017;36(6):148-152. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=55954943003>
15. Ubilla C, Yohannessen K. Contaminación atmosférica efectos en la salud respiratoria en el niño. *Revista Médica Clínica Las Condes* [Internet]. 2017 [citado el 6 de julio de 2023];28(1):111–118. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rmcl.2016.12.003>
16. Dingwell DB, Lavallée Y, Kueppers U. Volcanic ash: A primary agent in the Earth system. *Phys Chem Earth* (2002) [Internet]. 2012 [citado el 15 de mayo de 2023];45–46:2–4. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706511001239>
17. Chakraborty M, Bansal S, Masiwal R, Awasthi A. Air-Pollution modeling aspects: an overview. En: *Air pollution: sources, impacts and controls*. UK: CAB International; 2019. p. 79–95.
18. Horwell CJ. Grain-size analysis of volcanic ash for the rapid assessment of respiratory health hazard. *J Environ Monit* [Internet]. 2007 [citado el 15 de mayo de 2023];9(10):1107–15. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2007/EM/b710583p>
19. Ramírez P. Estudio Meteorológico de los Veranillos en Costa Rica [Internet]. Imn.ac.cr. 1986 [citado el 31 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Estudio+sobre+veranillos+en+Costa+Rica>
20. Gallego A, González I, Sánchez B, Fernández P, Garcinuño R, Bravo JC, et al. Contaminación atmosférica [Internet]. Editorial UNED; 2012. Disponible en: <https://books.google.at/books?id=7xYvtMyRP7EC>
21. Cifuentes A, Alvarado L. Efectos en la salud respiratoria de las comunidades de Pillate, Manzano y Choguntus expuestas crónicamente a la inhalación de ceniza del volcán Tungurahua [Internet]. [Quito]: Universidad de las Américas; 2015. Disponible en: <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/3225>
22. Betetta J. Los efectos de la polución ambiental por micropartículas PM2.5 y PM10 en la presencia de enfermedades respiratorias en los pobladores del distrito de Ate [Internet]. [Perú]: Universidad Inca Garcilaso de La Vega; 2021 [citado el 15 de mayo de 2023]. Disponible en: <http://repositorio.uigv.edu.pe/handle/20.500.11818/5283>
23. Maldonado F, Maldonado F, Maldonado K, Silva J. Vista de Enfermedades respiratorias restrictivas-obstructivas y ceniza del volcán Tungurahua en el año 2007. *La Ciencia al Servicio de la Salud y la Nutrición* [Internet]. 2018 [citado el 15 de mayo de 2023];9(2):7–13. Disponible en: <http://revistas.espoeh.edu.ec/index.php/cssn/article/view/86/86>