

Emisión de ceniza volcánica y sus efectos

A. Rivera-Tapia, A. Yañez-Santos, L. Cedillo-Ramirez

Posgrado en Ciencias Ambientales, Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Edificio 76 Complejo de Ciencias, Ciudad Universitaria, C.P. 72570. Puebla, México.

La actividad volcánica es una fuente natural de contaminación, la cual aporta una cantidad considerable de contaminantes, principalmente a la atmósfera. Se ha documentado que dicha actividad representa riesgos para los ecosistemas y las poblaciones humanas que se ubican cerca de los edificios volcánicos, no obstante se ha descrito que incluso organismos que se localizan a distancias considerables de las zonas con actividad volcánica también pueden verse afectados. Dentro de los principales riesgos volcánicos destacan la emisión de ceniza y gases, relacionándose con la cantidad y el número de exposiciones a dichos eventos. En este contexto, la colaboración entre vulcanólogos, meteorólogos, químicos, biólogos, agrónomos y profesionales de la salud permitirá mitigar los riesgos de la actividad volcánica. El objetivo de esta revisión es presentar los riesgos para el medio ambiente y la salud asociados con la emisión de ceniza volcánica.

Actividad volcánica y sus efectos en el ambiente

Se han denominado volcanes de mayor riesgo a los que tienen probabilidades de experimentar una erupción explosiva en décadas o en menos tiempo, que carecen de análisis exhaustivo o monitoreo actualizado y que están rodeados por grandes poblaciones. La prevención de riesgos volcánicos depende del tipo de actividad que presente el volcán. Tales actividades van desde las columnas verticales de ceniza con alturas de diez a cuarenta kilómetros, cargadas de fragmentos de variados tamaños, hasta las caracterizadas por la circulación de una emulsión de ceniza caliente y densa, particularmente devastadora debido a su temperatura, que puede alcanzar los 500 °C, y a su velocidad, entre diez y cien metros por segundo (Zimanowski *et al.*, 2002; Avery, 2003).

La actividad volcánica acaecida en Indonesia a finales del siglo XIX, provocó efectos claramente perceptibles por la cantidad de ceniza liberada. Las corrientes atmosféricas propiciaron su dispersión alrededor del planeta, provocando el llamado *año sin verano*, debido a un oscurecimiento generalizado y un descenso marcado de la temperatura provocado por el material particulado suspendido (Carrillo, 1994).

Las erupciones explosivas del Monte Santa Helena en Washington (1980, **fig. 1**) y la del Pinatubo en Filipinas (1991) representaron un importante riesgo, especialmente este último, que arrojó una cantidad colosal de sulfatos a la estratosfera, lo que provocó un descenso de la temperatura mundial que se prolongó durante dos años (Brasseur, 1992; Krees, 1997). La erupción del Monte Santa Helena fue mayor que la registrada por el Chichón en México (1982), pero expulsó menos aerosoles a la atmósfera. La mayoría de las partículas emitidas por el Monte Santa Helena fueron grandes y sedimentaron desde la atmósfera en cuestión de semanas. Por su parte, el Chichón produjo una cantidad mayor de azufre, el cual formó dióxido de azufre, que después de reaccionar con el vapor de agua en la estratosfera, dio paso a una bruma de gotas de ácido sulfúrico, caracterizadas por su estabilidad química y sus elevados tiempos de sedimentación. Las predicciones del efecto final de la nube de polvo producida por el Chichón sobre el clima fueron que la nube provocaría un enfriamiento global en la superficie de la Tierra de 0.3 °C (Dollberg *et al.*, 1986; Nicholls, 1996).



Figura 1. Panorámica del Monte Santa Helena (Washington, EE.UU.) tomada en 1992, 12 años después de la erupción de 1980. Se puede apreciar la zona antiguamente cubierta por bosques de coníferas cuyos troncos aparecen alineados en la dirección de la nube ardiente que generó la erupción. Los troncos arrancados de cuajo se acumulan en la superficie del lago en la imagen de la derecha.

El estudio referente a las partículas suspendidas en la atmósfera de las zonas urbanas y rurales cercanas al volcán de Colima en México (**Fig. 2**), reveló la presencia de material particulado con un tamaño comprendido entre 2.5 y 10 micras, partículas que fueron asociadas con padecimientos en vías respiratorias (Miranda *et al.*, 2004).

México alberga a 22 de los 300 volcanes activos del mundo que, junto con Centroamérica y la zona andina, constituyen las regiones geográficas con mayor actividad volcánica en el mundo. En México han sido trece los volcanes que han producido erupciones en tiempos históricos, actividad originada por la dinámica en la zona de subducción del Pacífico, las fallas Montagua-Polochic, la falla Rivera y la reactivación de la falla que de este a oeste configura el Eje Neovolcánico Transmexicano (Plan de contingencias del volcán Popocatepetl, Puebla 1995).



Figura 2. Mapa que muestra las zonas geográficas de actividad volcánica en México, durante los últimos años, volcán de Colima y volcán Popocatepetl.

Efectos en diversos organismos

La evaluación realizada posteriormente a la erupción del volcán Irazu en Costa Rica (1963-1965) mostró que la ceniza altera significativamente las condiciones ecológicas de diversas poblaciones de insectos (Willie y Fuentes, 1975), mientras que en Alaska se contabilizaron pérdidas económicas por los cambios adversos sufridos por comunidades de salmón debido a las condiciones ambientales derivadas de la actividad volcánica (Dorova y Milner, 1999). Por su parte, Vandergast *et al.* (2004) plantean que la actividad volcánica influye en la estructura genética de poblaciones de invertebrados en Hawaii, lo que condiciona la fragmentación, el crecimiento masivo y el potencial para una evolución acelerada.

Actualmente los estudios de contaminación ambiental se ven favorecidos por la utilización de modelos experimentales, buscando con esto interpretar de la mejor manera posible la interacción medio ambiente-ser vivo (Lawton, 1995; Housley *et al.*, 2002). Los resultados de los diversos trabajos experimentales sugieren que la influencia de un factor ambiental, ya sea físico, químico o biológico, representa una fuente potencial de desequilibrio en los sistemas reguladores de los organismos (Fajer *et al.*, 1989; Romieu *et al.*, 1996; Sorokin *et al.*, 2003).

Los efectos causados por la contaminación han permitido detectar manifestaciones y alteraciones, tanto en el hombre como animales, que aún no han sido bien definidas (Venkatesh, 1988). Por ejemplo, la exposición de un grupo de ratas a cenizas, no favoreció la susceptibilidad a la infección por citomegalovirus; sin embargo, la infección por estreptococos provocó la muerte de los animales a las 24 horas (Grose *et al.*, 1985). Antonini *et al.* (2002) demostraron una mayor susceptibilidad a la infección por *Listeria monocytogenes* tras la exposición a ceniza, produciéndose daños en el tejido pulmonar.

Trabajos relacionados con la exposición a la inhalación de ceniza volcánica en modelos animales indican un aumento de los niveles de fibrinógeno en plasma y un incremento en el porcentaje de leucocitos polimorfonucleares, principalmente eosinófilos, así como una disminución del porcentaje de macrófagos a nivel alveolar. Por su parte, los estudios citogenéticos en animales que han sido expuestos a diferentes concentraciones y tipos de contaminantes ambientales muestran una elevada frecuencia de células alteradas (Grose *et al.*, 1985; Rubes *et al.*, 1992; Gardner *et al.*, 2000).

El estudio de exposición a la inhalación de la ceniza volcánica procedente del Monte Santa Helena, a un grupo de hámsters (dos horas diarias durante un año), permitió detectar cambios en la función pulmonar y en la arquitectura del tejido de los animales, caracterizado por alveolitis y áreas con fibrosis, y a nivel traqueal, reducción en la actividad ciliar y cambios citomorfológicos. Así mismo, se observó la llegada de neutrófilos que regulan la adhesión local de moléculas, induciendo quimiotaxis de células inflamatorias en las vías aéreas (Schiff *et al.*, 1981; Raub *et al.*, 1985; Graham *et al.*, 1985). La exposición a la inhalación de ceniza en hámsters, proveniente de la actividad del volcán Popocatépetl (**Fig. 3**), provocó una reacción inflamatoria aguda y crónica, foco neumónico con detritus celulares e infiltración de linfocitos en el tejido pulmonar (Rivera *et al.*, 2003).



Figura 3. Actividad del volcán Popocatépetl durante el año 2000, uno de los períodos más activos.

Efectos en poblaciones humanas y mecanismos de daño

La exposición a cenizas y sus efectos en la salud tienen como antecedentes la presencia de broncoespasmos de la vía aérea en infantes, posterior a la erupción del volcán Soufriere (Horwell *et al.*, 2003). También se han registrado la aparición de síntomas respiratorios como disminución en el flujo expiratorio forzado (FEV) y aumento en la sintomatología respiratoria en poblaciones que se localizaron a 24 y 50 kilómetros del edificio volcánico, como sucedió durante la actividad del volcán Sakurajima en Japón y el Monte Santa Helena en Washington (Johnson *et al.*, 1982; Baxter *et al.*, 1983; Yano *et al.*, 1990). Estudios epidemiológicos referentes a la actividad del volcán Masaya en Nicaragua, revelaron casos de irritación de la piel y de las vías aéreas (Baxter *et al.*, 1993). Las implicaciones en la salud de poblaciones cercanas al volcán Yasur en Tanna-Nueva Zelanda se caracterizaron por alteraciones respiratorias, estrés y por la aparición de fluorosis a nivel óseo y dental (Cronin y Sharp, 2002).

La evaluación de la exposición ocupacional a ceniza volcánica de los guardabosques en Washington, mostró una disminución en los niveles de C3 y C4 (factores de complemento; proteínas involucradas en el proceso de inflamación) con respecto al grupo de referencia, además de un marcado descenso de los niveles de inmunoglobulina G (IgG) en el suero después de un año de exposición a la ceniza volcánica. Los datos plantean que la exposición a la inhalación de ceniza afecta las funciones inmunológicas (Olenchock *et al.*, 1983).

Estudios epidemiológicos realizados en Biancavilla, una población al oeste de Sicilia localizada en un área volcánica, han revelado el incremento en la incidencia de mesotelioma pleural maligno, carcinoma, fibrosis pulmonar y daños en el ADN. Estos efectos se relacionan con la exposición que presenta la población a rocas de origen volcánico y que contienen fibras amfíbolos. El tipo de reactividad biológica de las fibras amfíbolos es parecido al de las fibras de asbestos, las cuales se sabe que inducen fibrosis inflamatoria a nivel pulmonar y daños en el ADN a largo plazo, ocasionando carcinoma y mesotelioma pulmonar (Rapisarda *et al.*, 2003; Umran, 2003).

El diagnóstico referente a los efectos sobre la función pulmonar en personas expuestas a cenizas del volcán Popocatepetl, durante el periodo de diciembre de 1994 a enero de 1995, indujo la presencia de alteraciones en la función pulmonar en una proporción mayor a la que se esperaría en una población con baja prevalencia de tabaquismo. De esta forma, se sugiere que el patrón restrictivo corresponde a la inflamación de la vía aérea y del intersticio pulmonar (Rojas *et al.*, 1995; Rojas *et al.*, 1996). En la **Tabla 1** se muestran diversos trabajos referentes a los efectos derivados de la exposición a ceniza volcánica, de forma natural o experimental.

Tabla 1. Efectos inducidos por la exposición a ceniza, en diversos episodios de actividad volcánica.

Volcán	Efectos	Referencia
Sta. Helena 1980, Washington	Exacerbación de asma, bronquitis y silicosis	Baxter <i>et al.</i> 1981 Nania y Bruya 1982
	Efectos agudos en la función pulmonar en población infantil	Adler <i>et al.</i> 1984 Bland <i>et al.</i> 1985
	Aves que inhalaban ceniza desarrollaron hiperplasia linfoide y granulomas	Buist <i>et al.</i> 1986
	Toxicidad celular <i>in vitro</i>	Martin <i>et al.</i> 1984
Hudson 1991, Chile	Casos de fluorosis en animales y humanos	Rubin <i>et al.</i> 1994
Unzen-Fugen	Crisis nerviosa, atención	Araki 1995

1992-1994, Japón	psiquiátrica a adultos	
Rabaul 1994, Papua Nueva Guinea	Efectos en vías respiratorias, conjuntivitis, dermatitis	Dent <i>et al.</i> 1995
Popocatépetl 1994-1996, México	Alteraciones en la función pulmonar	Rojas <i>et al.</i> 1995
Soufriere 1995, Isla Montserrat	Actividad citotóxica en células alveolares tipo II A549 Silicosis ocupacional Exacerbación de asma Fibrosis pulmonar y granuloma	Wilson <i>et al.</i> 2000 Searl <i>et al.</i> 2002 Forbes <i>et al.</i> 2003 Lee y Richards 2004

Es importante mencionar que la capacidad para inducir daño por parte de las muestras de ceniza difiere, ya que no presenta la misma capacidad hemolítica una muestra de ceniza de un evento explosivo reciente con respecto a una muestra de ceniza sedimentada, de óxido de titanio o del compuesto tóxico conocido como polvo de cuarzo DQ12 (Wilson *et al.*, 2000).

Como es evidente los síntomas son difíciles de atribuir a una enfermedad específica y menos en nuestro medio, en el que las manifestaciones son comúnmente causadas por la desnutrición, las enfermedades parasitarias o las infecciones crónicas. Tal es el caso de la etiología de las enfermedades autoinmunes que pueden ser multifactoriales (estando involucrados la genética, aspectos hormonales, inmunológicos o factores ambientales). Los factores ambientales son diversos y los más comunes incluyen infecciones por virus, bacterias y parásitos, los cuales se pueden asociar a PM_{10} y $PM_{2.5}$ (Seaton *et al.*, 1995; Michaud *et al.*, 2004; Agopyan *et al.*, 2004), además de la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos, partículas de mercurio y radón en el ambiente (Stracquadanio *et al.*, 2003; Nriagu y Becker, 2003; D'Alessandro y Vita, 2003).

Se sabe que los macrófagos pulmonares participan en la eliminación de partículas inhaladas, demostrándose que los asbestos inhalados activan factores quimiotácticos dependientes del complemento en la superficie alveolar, que facilitan el reclutamiento de macrófagos a sitios de depósitos fibrosos. No obstante, se ha determinado que la exposición a ceniza volcánica no siempre induce la acumulación de macrófagos. Esto sugiere que, debido a las características fisicoquímicas de las cenizas, en ciertas ocasiones se puede activar el complemento y, consecuentemente, atraer macrófagos (Warheit *et al.*, 1988). También se ha demostrado que durante la exposición continua a la inhalación de polvo fino la afección se puede complicar con algún tipo de infección; por tanto, la importancia de investigar los contaminantes en la atmósfera radica en conocer los riesgos que suponen para la salud y el tiempo que pueden permanecer en el ambiente sin que se desarrollen lesiones definitivas (Yano *et al.*, 1986; Mentasi, 1995; Bonner *et al.*, 1998).

Cuando la presencia de la causa irritadora o de sus consecuencias inmediatas se prolongan, el proceso de defensa tisular puede dar lugar a la fibrosis, iniciándose en cualquier punto de la estructura broncopulmonar. La fibrosis puede ser localizada y considerada como cicatricial o terminal, pero si persiste, la fibrosis será evolutiva y aumentará en intensidad y en extensión llegando a ser total. En ocasiones la fibrosis puede iniciarse de forma simultánea en varios puntos y, si es progresiva, llegar a confluir. Por su parte, los mecanismos inmunológicos pueden ser los responsables de las alteraciones en la arquitectura del pulmón como consecuencia de la exposición a partículas contaminantes (George *et al.*, 1997; Hansell, 2003). Los estudios de campo y laboratorio indican que la exposición moderada a la ceniza volcánica puede dar paso a enfermedades respiratorias e incluso a la fibrosis pulmonar (Beck *et al.*, 1981; Vallyathan *et al.*, 1983; Bernstein *et al.*, 1986; Martín *et al.*, 1986; Malilay *et al.*, 1996; Housley *et al.*, 2002).

Conclusiones

El considerar los riesgos volcánicos ha tomado importancia debido a los efectos que se relacionan con la contaminación de la atmósfera, el impacto en los ecosistemas y principalmente por los efectos adversos que puede condicionar en la salud. Siendo evidente que la cantidad de dióxido de azufre emitido a la atmósfera a nivel mundial por la actividad volcánica ha

producido sobre el clima un enfriamiento global en la superficie del planeta. Por su parte, la presencia de material particulado con un tamaño inferior a 10 micras, se ha asociado con padecimientos en el aparato respiratorio.

Por su parte, la aplicación de los modelos experimentales buscan interpretar de la mejor manera posible la interacción medio ambiente-ser vivo. Ya que se ha establecido que la influencia de uno o varios factores ambientales representa una fuente potencial de alteraciones de los sistemas reguladores en los organismos

Puesto que la ceniza volcánica está constituida principalmente por dióxido de azufre, este compuesto puede producir irritación local y desarrollar silicosis. En los pacientes con hiperreactividad bronquial, asma o enfermedades pulmonares obstructivas crónicas la exposición a las cenizas puede complicar la enfermedad. A nivel de la conjuntiva, la ceniza actúa como un cuerpo extraño, siendo los cristales de dióxido de azufre los que afectan directamente a la conjuntiva y a la córnea, produciendo abrasiones, además del efecto irritante. También el efecto de la ceniza a nivel de la piel es principalmente irritante. Por su parte, los microelementos como el bromo volcánico pueden formar parte del agua de vertientes y durante la potabilización generar trihalometanos, que son compuestos cancerígenos.

Si las emanaciones de cenizas volcánicas son frecuentes se favorece la alteración de los ecosistemas, además de causar problemas en la salud a medio y largo plazos. Debido a la dificultad de probar todos los efectos ambientales adversos de cada sustancia, se sugiere el desarrollo de métodos para predecir los efectos ecológicos, sociales, económicos y en la salud derivados de la contaminación ambiental (Woodward *et al.*, 2000; Green *et al.*, 2000; Leung *et al.*, 2003).

Referencias

- Adler, K.B., Mossman, B.T., Butler, G.B., Jean, L.M. y Craighead, J.E. 1984. Interaction of volcanic ash with cells of the respiratory epithelium. *Environ. Res.* 35: 346-361.
- Agopyan, N., Head, J., Yu, S. y Simon, S.A. 2004. TRPV1 receptors mediate particulate matter-induced apoptosis. *Am. J. Physiol. Lung Cell Mol. Physiol.* 286: 563-572.
- Antonini, J.M., Roberts, J.R., Jernigan, M.R., Yang, H.M., Jane, Y.C. y Clarke, R.M. 2002. Residual oil fly ash increases the susceptibility to infection and severely damages the lungs after pulmonary challenge with a bacterial pathogen. *Toxicol. Sci.* 70: 110-119.
- Araki, K. 1995. Mental health activities for evacuees of the volcanic eruption of Mt. Unzen-Fugen-crisis intervention of a psychiatrist. *Seishin Shinkeigaku Zasshi* 97: 430-444.
- Avery, J.G. 2003. The aftermath of a disaster. Recovery following the volcanic eruptions in Montserrat, West Indies. *West Indian Med. J.* 52: 131-135.
- Baxter, P.J., Ing, R., Falk, H., French, J., Stein, G.F., Bernstein, R.S., Merchant, J.A. y Allard, J. 1981. Mount St. Helens eruption, May 18 to June 12, 1980. An overview of the acute health impact. *JAMA* 246: 2585-2589.
- Baxter, P.J., Ing, R., Falk, H. y Plikaytis, B. 1983. Mount St. Helens eruptions: the acute respiratory effects of volcanic ash in a North American community. *Arch. Environ Health* 38: 138-143.
- Baxter, P.J., Stoiber, R.E. y Williams, S.N. 1993. Volcanic gases and health. Masaya volcano, Nicaragua. *Lancet* 2: 150-151.
- Beck, B.D., Brain, J.D. y Bohannon, D.E. 1981. The pulmonary toxicity of an ash sample from the St. Helens volcano. *Exp. Lung Res.* 2: 289-301.
- Bernstein, R.S., Baxter, P.J., Falk, H., Ing, R., Foster, L. y Frost, F. 1986. Immediate public health concerns and actions in volcanic eruptions: lessons from the Mount St. Helens eruptions, May 18-October, 1980. *Am. J. Public Health* 76: 25-37.
- Bland, M.C., Nakahue, H.S., Goeger, M.P. y Helfer, D.H. 1985. Duration of exposure histological effects on broiler lungs, performance, and house Environment with Mt. St. Helens volcanic ash dust. *Poult. Sci.* 64: 51-58.
- Bonner, J.C., Rice, A.B., Lindroos, P.M., O'Brien, P.O., Dreher, K.L., Rosas, I., Alfaro-Moreno, E. y Osornio-Vargas, A.R. 1998. Induction of the myofibroblast PDGF receptor system by urban ambient particles from Mexico city. *Am. J. Respir. Cell Mol. Biol.* 19: 672-680.

- Brasseur, G. 1992. Mount Pinatubo aerosols, chlorofluorocarbons and ozone depletion. *Science* 257: 1239-1242.
- Buist, A.S., Vollmer, W.M. Johnson, L.R., Bernstein, R.S. y McCamant, L.E. 1986. A four year study of the prospective effects of volcanic ash from Mt. St. Helen. *Am. Rev. Respir. Dis.* 133: 526-534.
- Carrillo, R. 1994. La amenaza de los volcanes. *ICYT-CONACYT* 211: 12-15.
- Cronin, S.J. y Sharp, D.S. 2002. Environmental on health from continuous volcanic activity at Yasur (Tanna) and Ambrym, Vanuatu. *Int. J. Environ Health Res.* 12: 109-123.
- D' Alessandro, W. y Vita, F. 2003. Groundwater radon measurements in the Mt. Etna area. *J. Environ. Radiact.* 65: 187-201.
- Dent, A.W., Davies, G., Barret, P. y de Saint Ours, P.J. 1995. The 1994 eruption of the Rabaul volcano, Papua New Guinea: injuries sustained and medical response. *Med J. Aust.* 163: 635-639.
- Dollberg, D.D., Bolyard, M.L. y Smith, D.L. 1986. Evaluation of physical health effects due to volcanic hazards: crystalline silica in Mount St. Helen ash. *Am. J. Public Health* 76: 53-58.
- Dorova, J.M. y Milner, A.M. 1999. Research: effects of recent volcanic eruptions on aquatic habitat in the drift river, Alaska, USA: implications at other cook inlet region volcanoes. *Environ. Manage.* 23: 217-230.
- Fajer, E.D., Bowers, M.D. y Bazzaz, F.A. 1989. The effects of enriched carbon dioxide atmospheres on plant-insect herbivore interactions. *Science* 243: 1198-1200.
- Forbes, L., Jarvis, D., Potts, J. y Baxter, P.J. 2003. Volcanic ash and respiratory symptoms in children on the island of Montserrat, British West Indies. *Occup. Environ. Med.* 60: 207-211.
- Gardner, S.Y., Lehmann, J.R. y Costa, D.L. 2000. Oil fly ash-induced elevation of plasma fibrinogen levels in rats. *Toxicol. Sci.* 56: 175-180.
- George, J., Levy, Y. y Shoenfeld, Y. 1997. Smoking and immunity: an additional player in the mosaic of autoimmunity. *Scand. J. Immunol.* 45: 1-6.
- Graham, J.A., Miller, F.J., Davies, D.W., Hiteshew, M.E. y Walsh, L.C. 1985. Inhalation studies of Mt. St. Helens volcanic ash in animals I. Introduction and exposure system. *Environ. Res.* 37: 61-71.
- Green, E., Short, S.D., Stuu, E. y Harrison, P.T. 2000. Protecting environmental quality and human health: strategies for harmonization. *Sci. Total Environ.* 256: 205-213.
- Grose, E.C., Grady, M.A., Illing, J.W., Daniels, M.J., Selgrade, M.K. y Hatch, G.E. 1985. Inhalation studies of Mt. St. Helens volcanic ash in animals III. Host defense mechanisms. *Environ. Res.* 37: 84-92.
- Hansell, A.L. 2003. Respiratory effects of volcanic emissions. *Occup. Environ. Med.* 60: 529-530.
- Horwell, C.J., Fenoglio, I., Vala, R.K., Sparks, R.S. y Fubini, B. 2003. Surface reactivity of volcanic ash from eruption of Soufriere Hills volcano, Montserrat, West Indies with implications for health hazards. *Environ. Res.* 93: 202-215.
- Housley, D.G., Bérubé, K.A., Jones, T.P., Anderson, S., Pooley, F.D. y Richards, R.J. 2002. Pulmonary epithelial response in the rat lung to instilled Montserrat respirable dust and their major mineral components. *Occup. Environ. Med.* 59: 466-472.
- Johnson, K.G., Loftsgaarden, D.O. y Gideon, R.A. 1982. The effects of Mount St. Helen volcanic ash on the pulmonary function of 120 elementary school children. *Am Rev. Respir. Dis.* 126: 1066-1069.
- Kress, V. 1997. Magma mixing as a source for Pinatubo sulphur. *Nature* 389: 591-593.
- Lawton, J.H. 1995. Ecological experiments with model system. *Science* 269: 328-331.
- Lee, S.H. y Richards, R.J. 2004. Montserrat volcanic ash induces lymph node granuloma and delayed lung inflammation. *Toxicology* 195: 155-165.

- Leung, M.F., Santos, J.R. y Haimes, Y.Y. 2003. Risk modeling assessment, and management of lahar flow threat. *Risk Anal.* 23: 1323-1335.
- Malilay, J., Real, M.G., Ramirez, V.A., Noji, E. y Sinks, T. 1996. Public health surveillance after a volcanic eruption: lessons from Cerro Negro, Nicaragua, 1992. *Bull Pan. Am. Health Organ.* 30: 218-226.
- Martin, T.R., Ayars, G., Butler, J. y Altman, L.C. 1984. The comparative toxicity of volcanic ash and quartz. Effects on cells derived from the human lung. *Am. Rev. Respir. Dis.* 130: 778-782.
- Martin, H.S., Wehner, A.P. y Butler, J. 1986. Evaluation of physical health effects due to volcanic hazards: the use of experimental systems to the pulmonary toxicity of volcanic ash. *Am. J. Public Health* 76: 59-65.
- Mentasi, E. 1995. Spread of toxic substance and environmental pollution. *Ambio* 24: 250-251.
- Michaud, J.P., Grove, J.S. y Krupitsky, D. 2004. Emergency department visits and 'vog' related air quality in Hilo, Hawaii. *Environ. Res.* 95: 11-19.
- Miranda, J., Zepeda, F. y Galindo, I. 2004. The possible influence of volcanic emissions on atmospheric aerosols in the city of Colima, México. *Environ. Pollut.* 127: 271-279.
- Nania, J. y Bruya, T.E. 1982. In the wake of Mount St. Helens. *Ann. Emerg. Med.* 11: 184-191.
- Nicholls, N. 1996. An incriminating fingerprint. *Nature* 382: 27-28.
- Nriagu, J. y Becker, C. 2003. Volcanic emission of mercury to the atmosphere: global and regional inventories. *Sci. Total Environ.* 304: 3-12.
- Olenchock, S.A., Mull, J.C., Mentnech, M.S., Lewis, D.M. y Bernstein, R.S. 1983. Changes in humoral immunologic parameters after exposure to volcanic ash. *J. Toxicol. Environ. Health* 11: 395-404.
- Plan de contingencias del volcán Popocatepetl. 1995. Gobierno del Estado Libre y Soberano de Puebla, Secretaria de Gobernación y Sistema Estatal de Protección Civil, 77 p.
- Rapisarda, V., Amati, M., Coloccini, S., Bolognini, L., Gobbi, L. y Duscio, D. 2003. The in vitro release of hydroxyl radicals from dust containing fluoro-edenite fibers identified in the volcanic rocks of Biancavilla (eastern Sicily). *Med. Lav.* 94: 200-206.
- Raub, J.A., Hatc, G.E., Mercer, R.R., Grady, M. y Hu, P.C. 1985. Inhalation studies of Mt. St. Helens volcanic ash in animals II. Lung function, biochemistry, and histology. *Environ. Res.* 37: 72-83.
- Rivera, T.J.A., Cedillo, R.L., Gil, J.C. y Giono, C.S. 2003. Efectos de la exposición a la inhalación de ceniza del volcán Popocatepetl en hámsters. *Rev. Universidad y Ciencia* 19: 53-61.
- Rojas, R.M., Noa, O.H., Pérez, N.J. y Villalba, C.J. 1995. Efectos sobre la función pulmonar en personas expuestas a cenizas del volcán Popocatepetl, Diciembre de 1994-Enero de 1995. *Rev. Inst. Nal. Enf. Resp. Mex.* 8: 112-118.
- Rojas, R.M., Pérez, N.J., Villalba, C.J., Catalán, V.M., Hernández, V.E. y Hernández, D.P. 1996. San Nicolás de los Ranchos ¿Un caso representativo de afecciones respiratorias por exposición a cenizas volcánicas? *Rev. Int. Nal. Enf. Resp. Mex.* 9:14-18.
- Romieu, I., Meneses, F., Ruiz, S., Sierna, J.L., Huerta, J., White, M.C. y Etzel, R.A. 1996. Effects of air pollution on the respiratory health of asthmatic children living in México city. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 154: 300-307.
- Rubes, J., Borkovec, L., Horinova, Z., Urbanova, J., Prokova, I. y Kulikova, L. 1992. Cytogenetic monitoring of farm animals under conditions of environmental pollution. *Mutation Res.* 283: 199-210.
- Rubin, C.H., Noji, E.K., Seligman, P.J., Holtz, J.L., Grande, J. y Vittani F. 1994. Evaluating a fluorosis hazard after a volcanic eruption. *Arch. Environ. Health* 49: 395-401.

- Searl, A., Nicholl, A. y Baxter, P.J. 2002. Assessment of the exposure of islanders to ash from the Soufriere Hills volcano, Montserrat, British West Indies. *Occup. Environ. Med.* 59: 523-531.
- Seaton, A., MacNee, W., Donalson, K. y Godden, D. 1995. Particulate air and acute health effects. *Lancet* 345: 176-178.
- Schiff, L.J., Byrne, M.M., Elliot, S.F., Moore, S.J., Ketels, K.V. y Graham, J.A. 1981. Response of hamsters trachea in organ culture to Mount St. Helen volcano ash. *Scan. Electron. Microsc.* 2: 169-178.
- Sorokin, Y.I., Sorokin, P.Y. y Zakouskina, O.Y. 2003. Microplankton and its function in a zone of shallow hydrothermal activity: the Craternaya Bay, Kurile Island. *J. Plankton Res.* 25: 495-506.
- Stracquadano, M., Dinelli, E. y Trombini, C. 2003. Role of volcanic dust in the atmospheric transport and deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons and mercury. *J. Environ. Monit.* 5: 984-988.
- Umran, A.D. 2003. Mesothelioma in cappadocian villages. *Indoor Built Environ.* 12: 367-375.
- Vallyathan, V., Mentnech, M.S., Tucker, J.H. y Green, F.H. 1983. Pulmonary response to Mount St. Helens volcanic ash. *Environ. Res.* 30: 361-371.
- Vandergast, A.G., Gillespie, R.G. y Roderick, G.K. 2004. Influence of volcanic activity on the population genetic structure of Hawaiian tetragnatha spider: fragmentation, rapid population growth and the potential for accelerated evolution. *Mol. Ecol.* 13: 1729-1743.
- Venkatesh, I.G. 1988. Human health and trace elements including effects on high-altitude populations. *Ambio* 17: 31-35.
- Warheit, D.B., Overby, L.H., George, G. y Brody, A.R. 1988. Pulmonary macrophages are attracted to inhaled particles through complement activation. *Exp. Lung Res.* 14: 51-66.
- Wilson, M.R., Stone, V., Cullen, R.T., Searl, A., Maynard, R.L. y Donaldson, K. 2000. In vitro toxicology of respirable Montserrat volcanic ash. *Occup. Environ. Med.* 57: 727-733.
- Willie, A. y Fuentes, G. 1975. Effects of the Irazu volcano (Costa Rica) on various insects. *Rev. Biol. Trop.* 23: 165-175.
- Woodward, A., Hales, S., Philips, D. y Martin, J. 2000. Protecting human health in a changing world: the role of social and economic development. *Bull World Health Organ* 78: 1148-1155.
- Yano, E., Yokoyama, Y. y Nishii, S. 1986. Chronic pulmonary effects of volcanic ash: and epidemiological study. *Arch. Environ. Health* 41: 94-99.
- Yano, E., Yokoyama, Y., Higashi, H., Nishii, S., Maeda, K. y Koizumi, A. 1990. Health effects of volcanic ash: a repeat study. *Arch Environ Health* 45: 367-373.
- Zimanowski, B., Wohletz, K., Dellino, P. y Buttner, R. 2002. The volcanic ash problem. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 122: 1-5.