

Peligros volcánicos ¿predecibles, prevenibles, mitigables?

Volcanic hazards: predictions, preventions, mitigations

JUAN CARLOS CARRACEDO Y FRANCISCO JOSÉ PEREZ-TORRADO

Dpto. de Física (GEOVOL), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria. E-mails: jcarracedo@proyinv.es; franciscojose.perez@ulpgc.es

Resumen Las erupciones volcánicas, consideradas a escala de toda la Tierra, presentan una menor frecuencia y peligrosidad que otros fenómenos naturales como los terremotos o las inundaciones. A pesar de que la orla de población que rodea los volcanes es de unos 600 millones de habitantes y que ocurren una media de 50 erupciones cada año, el avance en la detección temprana de las erupciones, ligado a adecuadas medidas de mitigación de daños, ha permitido que el número de víctimas se haya reducido considerablemente a lo largo del siglo XX. En el presente trabajo se discute la diferente terminología existente alrededor de los peligros volcánicos, la localización, frecuencia y magnitud de los mismos, su predicción y prevención, así como el conocimiento que se dispone en la actualidad para dar respuesta a las preguntas del ¿dónde?, ¿cómo? y ¿cuándo? de las futuras erupciones.

Palabras clave: Detección temprana, peligros volcánicos, riesgos volcánicos, vigilancia

Abstract *Volcanic eruptions, considered on a global scale, present lower frequency and danger compared with other natural hazards such as earthquakes or floods. Although more than 600 million inhabitants live around potentially dangerous volcanoes and an average of 50 eruptions occur each year, advances in early detection of eruptions, linked to appropriate mitigation strategies, have led to a reduction in the number of victims throughout the twentieth century. In this paper we discuss the terminology of volcanic hazards, the location, frequency and magnitude of eruptions, their prediction and prevention, and the knowledge currently available to answer the questions where?, how? and when? related to future eruptions.*

Keywords: *Early detection, volcanic hazards, volcanic risks, monitoring.*

INTRODUCCIÓN

La actividad volcánica, considerada a escala global, ocurre con baja frecuencia, afecta a menos personas y, por consiguiente, causa menos pérdidas de vidas y daños materiales que otros riesgos naturales. Como demostración de esta afirmación, basta repasar los datos de los últimos 4 siglos (desde 1600 a 2010) donde se han reportado un total de 5815 erupciones de las que sólo 533 (un 9,2%) han causado víctimas humanas (Auker *et al.*, 2013).

La peligrosidad volcánica depende, principalmente, del estilo (mecanismo) eruptivo y el volumen de materiales arrojados a la superficie. En última instancia, ambos factores están íntimamente ligados con las propiedades físico-químicas de los magmas y del emplazamiento de los volcanes en el marco de la Tectónica de Placas. Por ello, para poder comprender los peligros volcánicos es necesario conocer la dinámica volcánica, el dónde y cómo se generan los magmas, sus propiedades físico-químicas,

sus tipos de rocas, productos y formas de la actividad volcánica, etc.

Pero para comprender la peligrosidad volcánica es necesario, también, repasar su terminología específica y las acciones que lleva asociada, tales como vigilancia, predicción, mitigación, etc. Son estos aspectos a los que se va a dedicar el presente trabajo.

PELIGRO Y RIESGO VOLCÁNICO ¿CONCEPTOS SINÓNIMOS?

Antes de definir y diferenciar de forma más precisa los conceptos de peligro y riesgo asociados al volcanismo, veamos algunos ejemplos de carácter general, válidos para cualquier clase de fenómeno o situación capaz de generar daños, y tan evidentes que pueden comprenderse sin dificultad.

Tomemos, por ejemplo, una bomba atómica cuyos efectos derivados de su explosión (energía mecánica

como onda de choque, calorífica como pulso térmico, radiaciones, etc.), pueden evaluarse con gran exactitud en función principalmente de la potencia y naturaleza de la bomba (fisión, termonuclear o de neutrones) y la altura de detonación. Generalmente el daño (el peligro) se calcula para la onda de choque, que puede tomarse como mínimo, mediante la fórmula

$$p = 25 Y/R^3$$

donde p es la sobrepresión en psi¹, Y la potencia en megatones, y R el radio de acción en millas. Mediante esta ecuación podemos evaluar con precisión el peligro en términos absolutos en un punto a una distancia dada del lugar de la explosión. Este es el peligro del artefacto, pero ¿Cuál es el riesgo? Si la explosión se produce en un desierto, el peligro es el mismo, pero el riesgo es cero, si lo consideramos para la población y las infraestructuras, aquí inexistentes. El riesgo habría que calcularlo para esa explosión y esa distancia, y una población e infraestructuras determinadas.

Si necesitamos evaluar anticipadamente un peligro volcánico, tendremos que considerar además de

Tabla I. Las 10 erupciones más mortíferas de los últimos 4 siglos. Se indican, además, las otras 523 erupciones que también han causado víctimas del total de 5.815 erupciones ocurridas para ese mismo periodo. IEV es el índice de Explosividad Volcánica, un indicador de la magnitud de una erupción (datos tomados de Auker et al., 2013; Simkin y Siebert, 1994).

VOLCÁN	AÑO	IEV	VÍCTIMAS	
			Nº TOTAL	%
Tambora (Indonesia)	1815	7	>60.000 (*)	22
Krakatoa (Indonesia)	1883	6	36.417	13
Monte Pelée (Martinica)	1902	4	28.800	10
Nevado del Ruiz (Colombia)	1985	3	23.187	8
Unzen (Japón)	1792	2	14.524	5
Lakagígar y Grímsvötn (Islandia)	1783	4	9.350 (*)	3
Santa María (Guatemala)	1902	6	8.700	3
Kilauea (Hawái, Estados Unidos)	1790	4	5.405	2
Kelut (Indonesia)	1919	4	5.088	2
Tungurahua (Ecuador)	1640	3	5.000	2
Resto (523 erupciones)			82.402	30

(*) >90% de las víctimas fueron causadas por hambrunas post-erupción

su poder destructivo la probabilidad de que ocurra en un punto y tiempo determinados, así como las pérdidas previstas de vidas e infraestructuras, lo que define la vulnerabilidad o resistencia al impacto. Con la introducción de este nuevo parámetro el riesgo volcánico puede expresarse mediante la ecuación:

$$\text{Riesgo} = \frac{\text{Peligro} \times \text{Vulnerabilidad} \times \text{Valores en riesgo (población, infraestructuras)}}{\text{Capacidad de respuesta}}$$

Esta fórmula puede emplearse en la mayoría de los riesgos naturales, por ejemplo el sísmico (e.g., González y Mases, 2003), y queda implícito en ella que peligro y riesgo no son palabras sinónimas, por más que en los medios de comunicación los equiparen en numerosas ocasiones. El concepto de riesgo conlleva la presencia humana, mientras que el de peligro hace referencia exclusivamente al proceso geológico (e.g., Brusi y Roqué, 1998), en este caso, el volcánico.

¹ La libra-fuerza por pulgada cuadrada, más conocida como psi (del inglés pounds-force per square inch) es una unidad de presión en el sistema anglosajón.

FRECUENCIA, MAGNITUD Y LOCALIZACIÓN DE LOS PELIGROS VOLCÁNICOS

Existen unos 550 volcanes conocidos activos (aquellos en los que la última erupción se produjo en tiempos históricos) en nuestro planeta, de los que unos 50 entran en erupción cada año. En el periodo Holoceno (los últimos 11.700 años) más de 1.500 volcanes esparcidos por el planeta han entrado en erupción al menos una vez (Simkin y Siebert, 1994) y, durante los últimos 4 siglos fenómenos volcánicos han ocasionado la muerte de unas 300.000 personas (Tabla I), generando pérdidas de miles de millones de dólares. Sin embargo el número de víctimas ocasionadas por erupciones volcánicas es apenas una pequeña fracción de las causadas por terremotos e inundaciones (Fig. 1).

La magnitud de los procesos naturales peligrosos, los volcánicos incluidos, es inversamente proporcional a su frecuencia, como puede observarse en la figura 2. Ello es lógico, dada la energía que liberan los procesos naturales catastróficos que

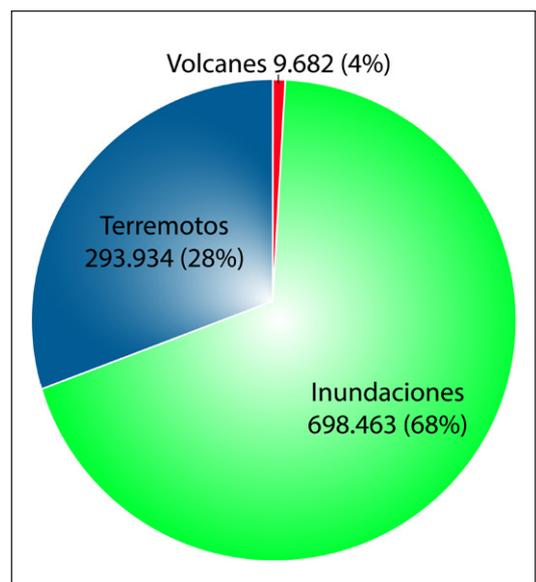


Fig. 1. El número de víctimas (periodo contemplado de 1900 a 2013) ocasionadas por erupciones volcánicas es apenas una pequeña fracción de las causadas por terremotos e inundaciones (modificado de Tilling, 2002).

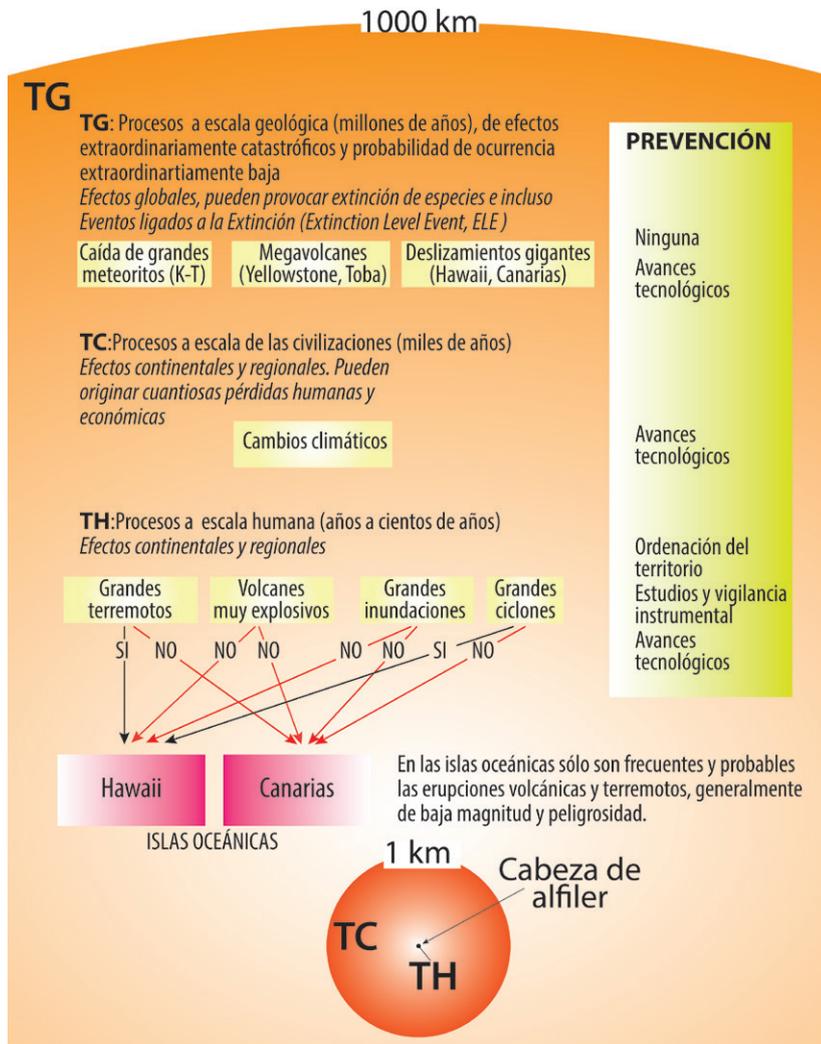


Fig. 2. Escala relativa de los procesos destructivos y tiempo geológico. Los riesgos probables a escala humana son de menor peligrosidad relativa, mientras que los catastróficos, con efectos continentales o globales que pueden provocar extinciones masivas (ELE, eventos ligados a extinción) son extraordinariamente poco frecuentes, incluso a escala geológica. Es obvio que, en caso contrario, no existiría la vida en la Tierra (tomado de Carracedo y Tilling, 2003).

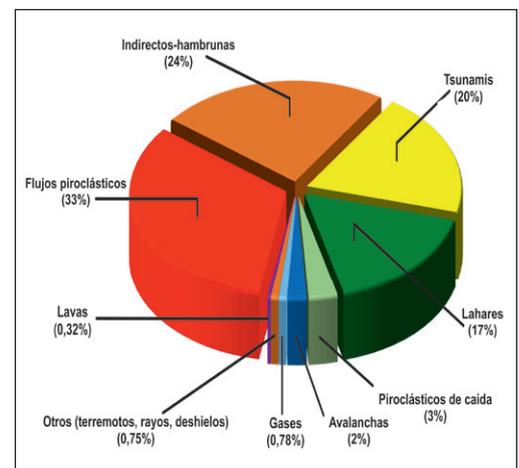


Fig. 3. Relación entre los productos generados en las erupciones volcánicas y el porcentaje de mortandad que ocasionan cada uno de ellos. Datos relativos a los últimos 4 siglos (modificado de Auken et al., 2013)

requieren de grandes tiempos de acumulación. Particularmente, los ELE (Extinction Level Events o Eventos Ligados a la Extinción) sólo pueden ocurrir a intervalos de muchas decenas o centenares de millones de años, bien por glaciaciones particularmente largas y extensas, impactos de meteoritos o intensa actividad volcánica. Si estos ELE fueran frecuentes, no existiríamos nosotros ni posiblemente la vida en la Tierra, que sería un planeta inhabitable. El fenómeno volcánico presenta una amplia gama de magnitudes, generalmente relacionada con la potencia explosiva, aunque hay un gran número de peligros de gran poder destructivo asociados al volcanismo que no requieren una elevada explosividad, e.g. deslizamientos laterales, lahares, flujos de lavas, etc. La magnitud de los peligros eruptivos se suele determinar por su índice de explosividad (VEI en sus siglas en inglés, por Volcanic Explosivity Index), ideado por Newhall y Self (1982) y que combina varios parámetros como la altura de la columna eruptiva y el volumen de depósitos piroclásticos generado (Perez-Torrado y Rodríguez-Gonzalez, 2015, en este volumen). En general, existe una cierta correlación entre el IEV y el número de víctimas, de forma que erupciones con IEV de valor 0, 1 y 2 tienen una probabilidad inferior al 10% de ocasionar víctimas, mientras que erupciones con IEV igual o superior a 3 tienen más del 50% de posibilidades

de generar víctimas, y todas las erupciones históricas que se conocen con IEV = 6 han ocasionado víctimas (Auken et al., 2013). Si bien es cierta esta correlación positiva entre el IEV y el número de víctimas, también lo es que la peligrosidad volcánica varía mucho dependiendo del tipo de productos generados en una erupción. Así, los flujos piroclásticos y los lahares son los productos que más víctimas ocasionan, mientras que las lavas los que menos. Otros fenómenos provocados por las erupciones, como tsunamis y modificaciones climáticas, éstas últimas con efectos perniciosos en la agricultura y ganadería y, como consecuencia, severas hambrunas, han ocasionado también una alta mortandad (Fig. 3). En cuanto a la localización de los peligros volcánicos, al igual que para la gran mayoría de los peligros naturales, están relacionados con la Tectónica de Placas (López-Ruiz y Cebriá, 2015, en este volumen). Tanto los terremotos como los volcanes, además de otros muchos procesos destructivos, son simplemente consecuencia de la liberación de energía acumulada, siendo el movimiento de las placas litosféricas el que genera y concentra esa energía, que luego se libera como energía mecánica (plegamientos, terremotos) o térmica (volcanes). Es lógico pues que la inmensa mayoría de los terremotos y volcanes estén en los bordes de las placas, particularmente en aquellos en los que las placas convergen (Fig. 4).

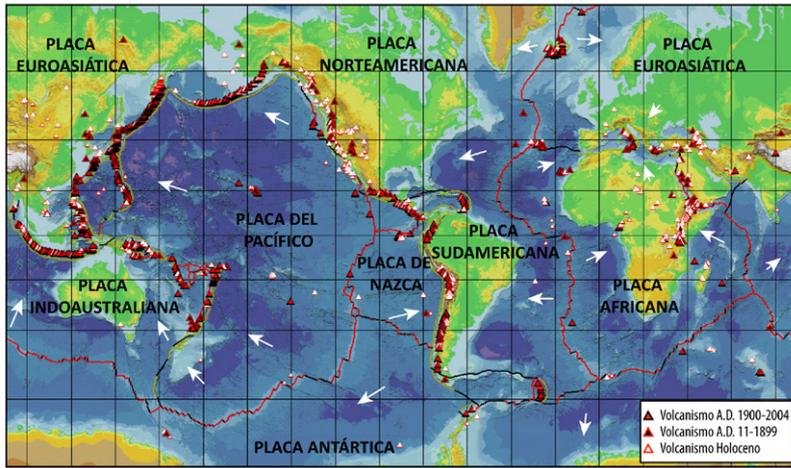


Fig. 4. Localización de los volcanes que han tenido alguna erupción durante el Holoceno y/o en tiempos históricos. Se observa que la inmensa mayoría de ellos se localizan en los bordes de las placas litosféricas, especialmente en los de convergencia (modificado de Simkin et al., 2006).

IDENTIFICACIÓN Y VIGILANCIA

Conocer el comportamiento pasado (al menos del periodo Holoceno) de un área volcánica activa es fundamental para comprender su funcionamiento actual y constituye la base para la elaboración de los mapas de peligros volcánicos (Fig. 5). Pero el estudio de los volcanes que permite comprender su comportamiento pasado y deducir su posible “modus operandi” en el futuro no es ni fácil ni puede improvisarse, requiere de largos y complejos trabajos, aplicando métodos y técnicas muy diversas (cronostratigráficas, petrológicas, geoquímicas, paleomagnéticas, geomorfológicas, cartográficas, etc.). Por ello, deben llevarse a cabo a través de proyectos de investigación multidisciplinarios en periodos prolongados de tiempo anteriores a las crisis eruptivas.

Los mapas de zonificación de los peligros volcánicos parten de las evidencias de erupciones pasadas para localizar las áreas potencialmente más vulnerables a los efectos de los distintos productos volcánicos en una futura erupción. Estos mapas de zonificación deben hacerse para cada tipo de peligro volcánico ya que la distribución de los mismos puede seguir pautas muy diferentes. Por ejemplo, mientras que las áreas que se ven afectadas por los depósitos piroclásticos de caída dependen, principalmente, de

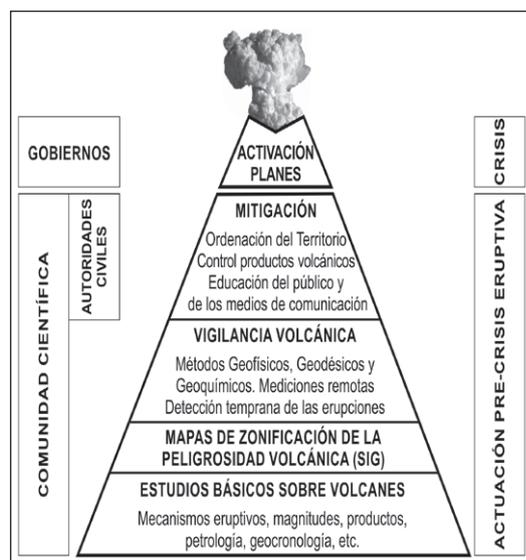


Fig. 5. Diagrama piramidal de los estudios, acciones y personal involucrado tanto en los periodos pre-eruptivos, como en los eruptivos (modificado de Tilling, 1993).

la altura de la columna piroclástica y la dirección de los vientos dominantes, las áreas afectadas por los flujos de lava dependen de la ubicación del foco de salida, del volumen de magma originado y de la topografía previa por la que van a encauzarse dichos flujos lávicos. Existen programas de ordenados específicos para la simulación de diferentes tipos de erupciones y la dispersión de sus productos que ayudan también a la hora de la zonificación de los peligros en una erupción futura. No obstante, no hay que caer en la tentación del uso de estos modelos sin contrastarlos con los estudios geológicos de detalle que deben realizarse con anterioridad.

El estudio geológico de un área volcánica activa y la consiguiente confección de mapas de zonificación de sus peligros volcánicos, debe ir acompañado de un correcto sistema de vigilancia. Casi todos los volcanes exhiben señales precursoras de “actividad” antes de entrar en erupción, inducidas por el magma que asciende hacia la superficie (Fig. 6). Los indicadores más comunes de reactivación volcánica incluyen el inicio o aumento de terremotos debajo del volcán, su hinchazón (inflación), cambios en la composición y tasa de emisión de sus gases (principalmente dióxido de carbono y dióxido de sulfuro) y cambios inusuales de la gravedad o del campo magnético. En conjunto, la medición sistemática de estos cambios en el estado del volcán se denomina monitorización (monitoreo en muchos países latinoamericanos) o vigilancia volcánica, y la experiencia adquirida mundialmente demuestra que la vigilancia volcánica óptima requiere una combinación de técnicas más que la dependencia de una sola de ellas. En décadas recientes, los métodos basados en los satélites, tales como el *Global Positioning System* (GPS) y el sistema interferométrico *Synthetic Aperture Radar* (InSAR) se han venido utilizando cada vez más en la detección y cartografiado de los cambios pre-eruptivos, así como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el volcado de todos los datos georreferenciados medidos. Una detallada revisión de las técnicas de vigilancia volcánica puede encontrarse en McNutt et al. (2000) y, de forma más resumida, en Ortíz (1999).

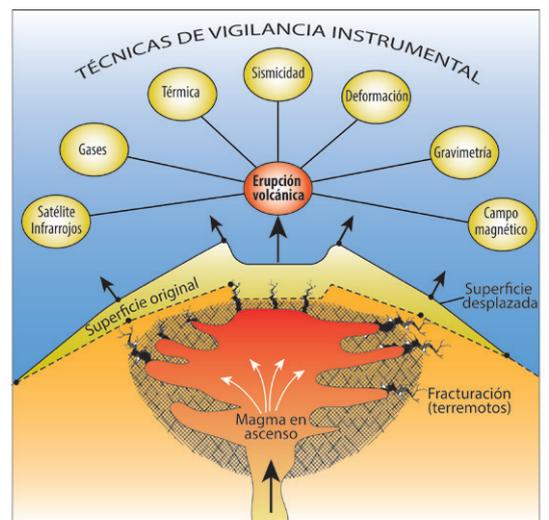


Fig. 6. Cambios en el estado de un volcán previo a una erupción que pueden medirse con precisión y de forma continua mediante instrumentación específica (modificado de John Seach <volcanolive.com> y Carracedo y Tilling, 2003).

PREDICCIÓN Y DETECCIÓN TEMPRANA

En primer lugar debemos formularnos la siguiente pregunta: ¿Qué entendemos por predicción? Según la RAE es anunciar por revelación, ciencia o conjetura algo que ha de suceder. En el caso de los desastres naturales, debemos añadir a esta definición el lugar y fecha de ocurrencia del fenómeno. En la actualidad puede afirmarse que se ha avanzado mucho en la predicción de los lugares y magnitudes donde ocurrirán terremotos o volcanes (es decir, en el ¿dónde? y en el ¿cómo?), pero muy poco en la predicción del momento (el ¿cuándo?) en que ocurrirán.

La predicción meteorológica ha tenido un fuerte impulso gracias al despliegue de satélites que permiten observaciones directas del estado de la atmósfera y los océanos en tiempo real, y a supercomputadoras capaces de trabajar con los sofisticados modelos físicos. De esta forma se ha logrado pronosticar y alertar con cierta antelación a la población de peligros como inundaciones, tornados, etc. Sin embargo, la predicción de terremotos y volcanes topa con un fuerte inconveniente y es que, aunque tengan ciertas manifestaciones externas, el origen de los movimientos sísmicos y el volcanismo está en el subsuelo, a veces a profundidades de decenas de kilómetros, donde la observación directa del fenómeno y su evolución no es posible. Por ello, aún no se ha desarrollado ningún método científico capaz de predecir el momento en que ocurrirá un terremoto o una erupción volcánica. Pero al menos, en el caso de las erupciones volcánicas, si pueden detectarse instrumentalmente con cierta antelación, cosa que en los terremotos es todavía imposible y puede que nunca llegue a serlo si, como suponen algunos autores, los terremotos son sistemas críticos auto-organizados (Self-Organized Criticality) en perpetuo estado de desequilibrio, por ello sin posible predicción ni detección instrumental (e.g., Geller, 1997). Un ejemplo de este concepto es la formación de una montaña de arena, donde cualquier rotura (grano de arena) puede convertirse en el derrumbe de la montaña (un gran terremoto).

La detección o alerta temprana de las erupciones volcánicas es posible porque no son, como los terremotos, sistemas críticos auto-organizados, acumulaciones lentas de esfuerzos que son tan difíciles de medir como imprevisibles en su liberación, sino procesos relativamente rápidos y violentos, que generan cambios importantes en el entorno fácilmente medibles (sismicidad creciente en intensidad, frecuencia y proximidad a la superficie, deformaciones y agrietamiento del terreno, cambios en la temperatura y el nivel del suelo, de la composición y volumen de las emanaciones gaseosas, etc.). Sin embargo, para que la detección temprana sea eficaz es imprescindible acotar con antelación las zonas donde es mayor la probabilidad de que haya nuevas erupciones (los mapas de zonificación de peligros volcánicos), para estudiarlas e instrumentarlas adecuadamente, y establecer un nivel de base de los principales parámetros precursoros, es decir, el comportamiento habitual de estos parámetros para poder dilucidar los estados de anomalía precursora.

Gracias a las técnicas de vigilancia y la detección de precursoros eruptivos, pueden anticiparse las erupciones con cierto margen de tiempo (horas, días) permitiendo una alerta temprana y la adopción

de medidas preventivas y de mitigación de daños. Esto explica el significativo descenso en el número de víctimas ocasionadas por erupciones volcánicas, a pesar del drástico aumento en la población a lo largo del pasado siglo XX (Fig. 7). Incluso, la catástrofe humana ligada a la erupción del Nevado del Ruíz (Colombia) en el año 1985, con más de 23.000 víctimas, pudo evitarse ya que la erupción fue correctamente detectada e interpretada (Carracedo, 2015, en este volumen). En cambio, abundan los ejemplos de una adecuada detección temprana y correctas medidas de mitigación de los riesgos en numerosas erupciones, incluso algunas de gran magnitud como la del Saint Helens (Estados Unidos) en 1980, Pinatubo (Filipinas) en 1991 o Soufrière Hills (isla de Montserrat, Reino Unido) en 2009.

No obstante, aunque la detección temprana de las erupciones volcánicas es posible y necesaria, la predicción, es decir, anunciar con antelación el lugar, fecha y tipo de una erupción que aún no ha dado señal precursora alguna, es totalmente inviable en la actualidad. Sin embargo se producen con frecuencia predicciones de terremotos, erupciones y otras catástrofes naturales con métodos pretendidamente científicos, causando generalmente innecesarias alarmas y confusión. La fácil acogida que se logra en los medios de comunicación sobre el anuncio de estos peligros, lleva a ciertos “científicos”, con escaso sentido deontológico y afán de notoriedad, a predicciones de este tipo. Como indica Wyss (2001), “*Los investigadores de la predicción de terremotos rara vez realizan análisis estadísticos rigurosos. El principal problema es que la mayoría de las alegaciones de precursoros a los terremotos se basan en estudios retrospectivos, lo que facilita el ajuste de estos parámetros después del suceso para producir correlaciones aparentemente significativas que, en realidad, son ficticias. Y esto se debe a que el sueño de descubrir cómo predecir terremotos atrae a personas que ponen un enorme esfuerzo en promocionar entre la población y las autoridades ideas sin fundamento. Desgraciadamente requiere un esfuerzo aún mayor mostrar los fallos de estas pretensiones y pocos pueden comprender las razones por las que estas ideas no son válidas*”. Estas consideraciones son igualmente válidas para las erupciones volcánicas y los deslizamientos gravitatorios masivos.

Estas prácticas, que bordean el chamanismo, producen efectos muy negativos y contribuyen a minar la necesaria credibilidad de la Ciencia en este tipo de escenarios, máxime cuando son propagadas por “científicos” aparentemente expertos en este tipo de estudios.

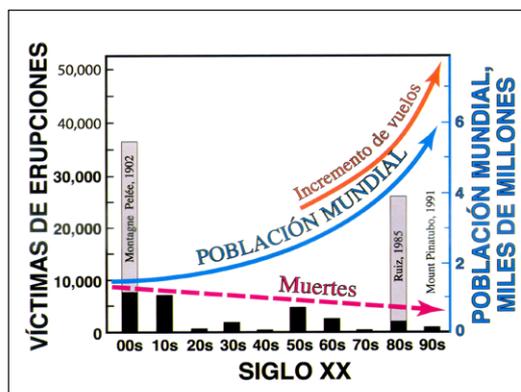


Fig. 7. Número de víctimas mortales por década durante el siglo XX debido a la actividad volcánica. Obsérvese como la mortandad ha ido descendiendo a lo largo del siglo a pesar de que la población mundial se ha multiplicado de forma exponencial, lo que pone de manifiesto el avance en el conocimiento de la detección temprana de erupciones (tomado de Carracedo y Tilling, 2003).

EVALUACIÓN Y TRATAMIENTO

La evaluación y tratamiento de los peligros volcánicos es una tarea que debe encomendarse a los científicos (geólogos, geofísicos, geoquímicos, etc.), puesto que dependen de múltiples factores (que se van a analizar en los capítulos siguientes de este monográfico) que deben ser reconocidos y evaluados anticipadamente. El riesgo volcánico en cambio, que debe estimarse en función del peligro y vulnerabilidad ya determinados, es tarea que corresponde a técnicos en planificación y a las autoridades de protección civil, quedando en este aspecto los científicos como asesores en el seguimiento del proceso eruptivo (ver figura 5).

En algunos países se considera que han de ser los científicos más conocedores de los volcanes de su entorno (es decir, de su historia volcánica, de su “modus operandi”, de la previsible dispersión de sus productos, etc.) los que deben dirigir y coordinar las crisis eruptivas. Sin embargo esta aproximación tiene importantes inconvenientes, que se han puesto de manifiesto en numerosas ocasiones, fundamentalmente por discrepancias entre científicos que afectan a la dirección de la crisis, a veces con graves consecuencias. Un espectacular ejemplo de estas limitaciones fue la supuesta erupción del volcán La Soufrière en 1976, en la isla de Guadalupe (Antillas Francesas). En 1975 se produjo una reactivación sísmica en el volcán y explosiones en el cráter, con caída de partículas de tamaño de ceniza en la ciudad de Basseterre, la capital de la isla. Aunque algunos científicos trataron de rebajar la alarma asegurando que no se trataba de una erupción volcánica sino de explosiones freáticas localizadas, sin riesgo para la población, otros científicos con más apoyo político se inclinaron por una verdadera erupción volcánica potencialmente muy explosiva y peligrosa. Para ello se basaban en la simple observación ocular de la ceniza, en la que aseguraron ver material volcánico juvenil. La respuesta de las autoridades fue la evacuación inmediata y forzada de 72.000 personas, que fueron obligadas a permanecer acampadas en una playa durante cuatro meses. Finalmente, análisis más precisos de las cenizas que llegaron de la metrópoli certificaron que no existía material volcánico juvenil, es decir, que no había existido erupción volcánica. Poco después se acabaron las explosiones freáticas en el cráter y todo volvió a la normalidad. Sin embargo, el daño para la isla fue enorme. El largo parón económico resolvió el delicado equilibrio socioeconómico entre las dos islas mayores (Guadalupe y Martinica) a favor de la última. Las “relaciones conflictivas”, como eufemísticamente las denominó Fiske (1984), entre grupos científicos rivales impidió una valoración objetiva de las observaciones, pero el verdadero problema fue la influencia en las autoridades locales, que acabó generando una crisis de enormes consecuencias por una erupción que nunca tuvo lugar.

Un aspecto digno de análisis es el de las responsabilidades legales de los científicos implicados en la evaluación de los riesgos naturales. Un caso relevante, aunque se refiera al riesgo sísmico, es el de las consecuencias penales para los científicos relacionados con el terremoto de 6,2 grados en la escala de Richter que se produjo el 6 de abril de 2009 en la ciudad de L’Aquila (Italia), matando a 309 personas

e hiriendo a 1.500 (e.g., Pantosti, 2010). Se habían registrado temblores en la zona, pero la noche del terremoto los vecinos se fueron tranquilos a la cama porque solo siete días antes, la llamada Comisión de Grandes Riesgos —formada por científicos expertos en sismos— acudió a L’Aquila y dictaminó que no existía un peligro concreto. “Que la tierra se mueva”, dijeron, “es la señal de que el terremoto está perdiendo energía”. En una sentencia histórica y muy polémica, un juez italiano condenó a los integrantes de la comisión a seis años de cárcel por homicidio culposo múltiple. Según el juez, las informaciones que los expertos suministraron a los vecinos fueron “inexactas, incompletas y contradictorias”, fundamentalmente por haber sido incapaces de predecir el terremoto. Afortunadamente un tribunal de apelaciones italiano revocó la condena ante la “imposibilidad científica de predecir los terremotos”, como avalaron numerosos expertos de todo el mundo.

Si a los científicos se les piden responsabilidades penales por sus opiniones técnicas y habida cuenta de que la geología y la geofísica no son ciencias exactas, se corre el riesgo de que, en previsión de posibles imputaciones, opten por el escenario de mayor peligrosidad, que conlleva la adopción de las medidas más extremas, generalmente la evacuación masiva, lo que, obviamente, les evitaría cualquier posible imputación. En este caso resultarían inoperantes las redes instrumentales y los complejos estudios que permiten una evaluación más ajustada al escenario real de crisis, aliviando las medidas de protección civil adoptadas y sus consecuencias sociales y económicas. Por ello, si se pretende que el asesoramiento científico de peligros naturales como las erupciones volcánicas sea lo más objetivo, preciso y ajustado a la realidad del proceso, ha de dejarse que los científicos hagan su trabajo sin presiones legales, y que sean las autoridades las que tomen las decisiones con todas sus consecuencias.

PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN

La verdadera prevención de desastres naturales pasa por la adecuada ordenación del territorio. Puesto que se conoce con bastante precisión las áreas del planeta en las que se concentran los principales peligros naturales, la mayoría de las cuales se sitúan en los límites de placa, el número de víctimas descendería espectacularmente si esas regiones estuvieran despobladas, principalmente las situadas en límites convergentes. Por el contrario, la abundancia de minerales precisamente en esas regiones, la fertilidad de los suelos volcánicos, la belleza paisajística y otros muchos factores han favorecido su poblamiento, a veces con elevadas densidades, como ocurre en la costa Pacífica de Estados Unidos, Japón, Indonesia, etc. (Fig. 8). De hecho, las civilizaciones más antiguas surgieron y poblaron zonas de elevado riesgo sísmico y volcánico en las costas del Mediterráneo, en la zona de convergencia de las placas Africana y Euroasiática.

En la actualidad (año 2015) son más de 600 millones de habitantes los que viven en áreas bajo la influencia de potenciales peligros volcánicos. Como una reorganización de estas poblaciones es impensable, las soluciones pasan por adecuadas medidas de prevención que minimicen los efectos previsibles de los peligros volcánicos que, indefectiblemente,

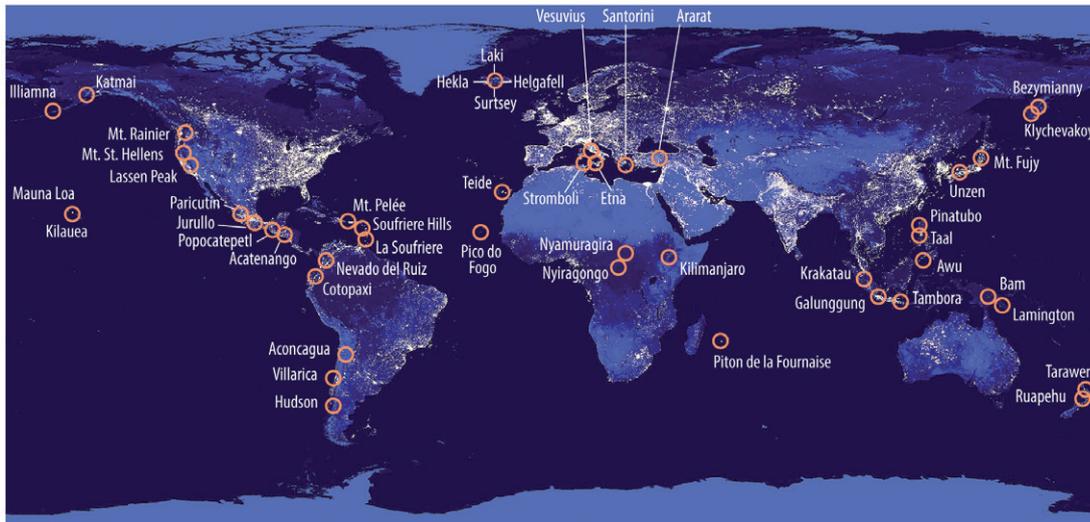


Fig. 8. Localización de volcanos potencialmente peligrosos cerca de grandes concentraciones de población de la Tierra, como puede observarse en este mosaico fotográfico nocturno de la NASA.

volverán a producirse en las mismas zonas que ya los han sufrido. En este campo de la prevención un factor decisivo es el potencial económico. Los países desarrollados pueden invertir grandes sumas en la prevención de los peligros volcánicos, mientras que en los países sub-desarrollados los desastres y la pobreza se refuerzan mutuamente. La falta de recursos aumenta la vulnerabilidad a los desastres y éstos ayudan a perpetuar el subdesarrollo, generando así un “ciclo vicioso de la pobreza” de difícil solución.

En líneas generales, como indica Tilling (2003), la reducción del riesgo volcánico debe descansar en dos estrategias bien definidas (ver figura 5):

1. El estudio geológico de aquellos volcanes que constituyan una amenaza en potencia, con el fin de determinar sus pautas y frecuencia eruptivas. A partir de estos estudios, pueden elaborarse mapas de zonificación de peligros que son la base para la planificación territorial y para la toma de decisiones por las autoridades civiles en los momentos de crisis eruptivas.
2. La segunda estrategia es la vigilancia instrumental constante de los volcanes potencialmente peligrosos, para asegurar la rápida detección de cualquier desviación de su comportamiento “normal” y, en el mejor de los casos, el aviso a tiempo de una posible erupción.

BIBLIOGRAFÍA

Auker, M.R., Sparks, R.S.J., Siebert, L., Croweller, H.S. y Ewert, J. (2013). A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record. *Journal of Applied Volcanology*, 2:2

Brusi, D. y Roqué, C. (1998). Los riesgos geológicos. Algunas consideraciones didácticas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 6.2, 127-137.

Carracedo, J.C. (2015). Peligros asociados a megadeslizamientos y lahares. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23.1, 66-72

Carracedo, J. C. y Tilling, R. I. (2003). *Geología y volcanología de islas volcánicas oceánicas: Canarias-Hawái*. Ed. Servicio de Publicaciones de la Caja General de Ahorros de Canarias (Pub. nº 293), 73 p.

Fiske, R.S. (1984). *Volcanologists, journalists, and the concerned public: A tale of two crises in the eastern Caribbean*. En: Explosive Volcanism: Inception, evolution,

and hazards (Eds.: Geophysics Study Committee). National Academy Press, 170-176.

Geller, R.J. (1997). Earthquake prediction: a critical review. *Geophysical Journal International*, 131, 425-450.

González, M. y Mases, M. (2003). Riesgo sísmico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 11.1, 44-53.

López-Ruiz, J. y Cebriá, J.M. (2015). Volcanismo y tectónica de Placas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23.1, 12-23.

McNutt, S.R., Rymer, H. y Stix, J. (2000). *Synthesis of Volcano Monitoring*. En: Encyclopedia of Volcanoes (Eds.: H. Sigurdsson, B. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer y J. Stix). Academic Press, 1165-1183.

Newhall, C.G. y Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 87-C2, 1231-1238.

Ortíz, R. (1999). ¿Cuándo y cómo se producirá una erupción?. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 7.3, 210-221.

Pantosti, D. (2010). El terremoto esperado pero impredecible: sismólogos italianos ¡a juicio! por no predecir el terremoto de L'Aquila de 2009. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18.3, 333-335.

Perez-Torrado, F.J. y Rodríguez-González, A. (2015). ¿Cómo se miden las erupciones? El índice de explosividad volcánica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23.1, 24-32.

Simkin, T. y Siebert, L. (1994). *Volcanoes of the world*. Ed. Geoscience Press, 349 p.

Simkin, T., Tilling, R.I., Vogt, P.R., Kirby, S.H., Kimberly, P. y Stewart, D.B. (2006). *This dynamic planet: world map of volcanoes, earthquakes, impact craters and plate tectonics*. Ed. U.S. Geological Survey, Series map I-2800, escala 1:30.000.000

Tilling, R.I. (1993). *Introducción y marco general*. En: Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos (Ed. R.I. Tilling). IAVCEI-WOVO, 1-8.

Tilling, R.I. (2002). *Volcanic hazards*. En: Encyclopedia of Physical Science and Technology (Ed.: R.A. Meyers). Academic Press, 559-577.

Tilling, R.I. (2003). Volcano monitoring and eruption warnings. En: Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction (Eds.: J. Zschau y A. Kueppers). Springer-Verlag, 505-510.

Wyss, M. (2001). Why is earthquake prediction not progressing faster? *Tectonophysics*, 338 (3-4), 217-223. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 28 de julio de 2014 y aceptado definitivamente para su publicación el 29 de enero de 2015.