

Peligros asociados a los depósitos piroclásticos

Pyroclastic deposits hazards

FRANCISCO JOSÉ PEREZ-TORRADO¹ Y JOSÉ LUIS FERNANDEZ-TURIEL²

¹ Dpto. de Física (GEOVOL), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafiya, 35017 Las Palmas de Gran Canaria. E-mail: franciscojose.perez@ulpgc.es

² Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera, ICTJA-CSIC, c/Solé Sabarís s/h, 08028 Barcelona. E-mail: jlfernandez@ictja.csic.es

Resumen Los depósitos piroclásticos se forman en erupciones de moderada a alta explosividad, normalmente ligadas a magmas con contenidos intermedios a elevados en sílice. Dependiendo del mecanismo de transporte y emplazamiento, se clasifican en depósitos piroclásticos de caída y depósitos piroclásticos de flujo. La gran extensión de terreno que puede afectar la actividad piroclástica, así como el corto tiempo de emplazamiento, hace de los depósitos piroclásticos los productos volcánicos más peligrosos.

Palabras clave: Columna eruptiva, distancia, flujos piroclásticos, piroclastos de caída.

Abstract *Pyroclastic deposits are formed in moderate to high explosive volcanic activity, usually linked to acid and intermediate magma compositions. Depending on the transport and deposition mechanism, they are divided into pyroclastic fall deposits and pyroclastic flows and surge deposits. The pyroclastic deposits can affect large areas in a short time, which makes them the most hazardous volcanic products.*

Keywords: *Eruptive column, distance, pyroclastic flows and surges, pyroclastic falls.*

INTRODUCCIÓN

Los materiales piroclásticos se generan en erupciones de moderada a alta explosividad, de estrombolianas a plinianas (Perez-Torrado y Rodríguez-González, 2015, en este mismo volumen). Representan, junto a lahares y avalanchas, el mayor peligro volcánico debido a la gran extensión de terreno que pueden afectar y al corto tiempo (minutos, horas) de emplazamiento. Por otro lado, estas mismas dos características convierten a los depósitos piroclásticos en excelentes marcadores geológicos, desarrollándose a su alrededor una rama específica de la vulcanología denominada tefrocronología.

Los peligros de los materiales piroclásticos no se limitan sólo a la destrucción de vidas e infraestructuras humanas, sino también tienen otros efectos adversos sobre el clima, suelos y aguas que, además, pueden prolongarse en el tiempo después de haber terminado la erupción.

Pero antes de analizar estos peligros, así como las medidas de prevención y mitigación específicas, conviene repasar una serie de conceptos básicos que permitan comprender la sistemática de los materiales piroclásticos.

CLASIFICACIÓN DE LOS DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS

Los depósitos piroclásticos están formados por una mezcla en distintas proporciones de tres

tipos de componentes: juveniles, cristales y líticos.

- Los componentes **juveniles** son fragmentos inicialmente fundidos que derivan del magma que ha entrado en erupción. Suelen mostrar un alto grado de vesiculación, lo que les permite una alta flotabilidad, y predominio de texturas vítreas. Un tipo específico de componente juvenil muy vesiculado es la pómez, de colores típicamente claros, formada a partir de magmas con contenidos de sílice intermedios a altos.
- Los **cristales** son fragmentos de roca individuales de minerales con bordes más o menos rotos. Según su procedencia, se diferencian entre fenocristales, procedentes del magma que entra en erupción, y xenocristales, derivados de la roca de caja, bien en la zona de formación del magma o a lo largo del conducto de salida.
- Los **líticos** son fragmentos de roca que ya estaban en estado sólido en el momento de la erupción. Según su naturaleza se diferencian entre líticos co-magmáticos (con la misma composición que los juveniles, normalmente asociados a los márgenes externos de domos ya solidificados, que al colapsar posteriormente son arrastrados por los flujos piroclásticos), accesorios (procedentes de las rocas de caja que son fragmentadas durante la erupción a lo largo de los conductos de emisión) y accidentales (clastos sueltos en la superficie que son incorporados por los flujos piroclásticos durante su transporte).

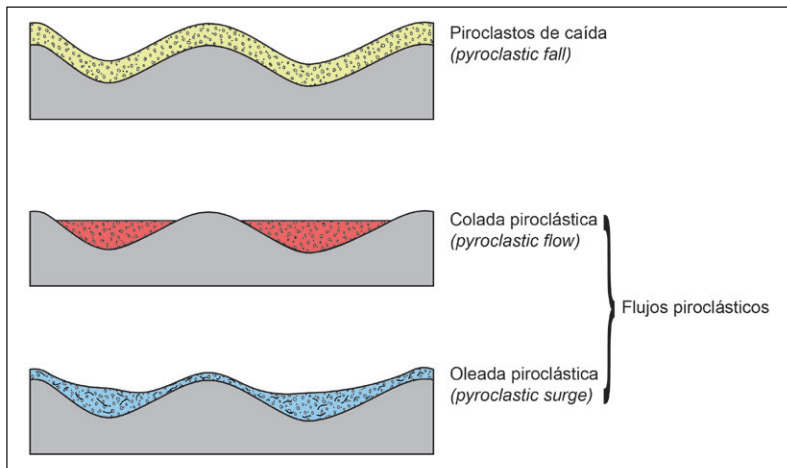


Fig. 1. Clasificación de los depósitos piroclásticos según su tipo de emplazamiento y relación con la topografía previa (modificado de Cas y Wright, 1987).

Existen dos sistemas de clasificación de los depósitos piroclásticos, uno basado en la granulometría que exhiben los distintos fragmentos piroclásticos y el otro en los mecanismos de transporte y depósito. Es decir, un sistema de corte descriptivo y el otro de corte genético (e.g., Fisher y Schmincke, 1984; Cas y Wright, 1987; Pujadas *et al.*, 1999).

La clasificación descriptiva granulométrica establece tres divisiones con límites parecidos a los de la clasificación granulométrica de los sedimentos (Tabla I). Cuando se conoce el quimismo de los fragmentos juveniles, suele emplearse una combinación de la terminología granulométrica con la química, por ejemplo, tefra cinerítica riolítica. Esta clasificación es muy útil en los trabajos de campo, cuando aún no se ha determinado el mecanismo genético de formación de los depósitos piroclásticos. Además, esta clasificación, al estar basada en parámetros objetivos perfectamente medibles, debe ser siempre indicada y no debe sufrir ninguna variación independientemente de los autores que trabajen en los depósitos piroclásticos.

La clasificación genética determina, en base a la geometría y estructuras internas de los depósitos piroclásticos, cual ha sido su mecanismo de transporte y emplazamiento (Fig. 1). Según ello, se distinguen dos tipos principales de depósitos, los de caída y los de flujo, estos últimos divididos en coladas y oleadas piroclásticas (e.g., Fisher y Schmincke, 1984; Cas y Wright, 1987; Colombo y Martí, 1992).

Depósitos piroclásticos de caída

En estos depósitos piroclásticos de caída (*pyroclastic fall deposits* en inglés) la acumulación de los piroclastos se hace “uno a uno”, bien directamente desde el punto de emisión después de describir trayectorias balísticas o bien desde una columna erup-

tiva en dispersión a modo de “lluvia”.

Los depósitos de trayectoria balística, característicos de las erupciones estrombolianas, presentan piroclastos con morfologías muy características como son las bombas volcánicas (con formas fusiformes, en corteza de pan, etc) y las lágrimas y cabellos de Pelé (Fig. 2A), que son piroclastos vítreos de tamaño lapilli a ceniza de magmas básicos muy fluidos. La acumulación de los piroclastos de caída balística alrededor de las bocas de salida forman los típicos conos estrombolianos monogenéticos de bombas-escorias, lapilli y/o cenizas.

En cuanto a los depósitos piroclásticos de caída de dispersión horizontal, característicos de erupciones explosivas de gran magnitud, constituyen capas de gran continuidad lateral que mantienen la topografía previa (ver figura 1), con potencias y tamaño de grano decrecientes con la distancia al foco emisor. Internamente suelen presentar laminación paralela (Fig. 2B), buena selección de tamaño (*sorting*) (Fig. 2C), sobre todo en facies distales, y granoselecciones positivas o negativas. Tanto las granoselecciones como las laminaciones son el resultado de las discontinuidades que existen en la actividad explosiva, de forma que las variaciones verticales en una misma capa en un mismo afloramiento se corresponden con pulsos eruptivos de distinta intensidad en el transcurso de la erupción.

Estos depósitos piroclásticos de dispersión horizontal constituyen las mejores capas guías en los estudios tefrocronológicos, y son la base para la moderna clasificación de las erupciones volcánicas (Perez-Torrado y Rodriguez-Gonzalez, 2015, en este mismo volumen).

Depósitos piroclásticos de flujo

En los flujos piroclásticos los distintos fragmentos son transportados en masa, en el seno de un medio gaseoso que se desplaza a ras del suelo a gran velocidad (hasta 300 km/h) y que al perder su energía cinética obliga a la acumulación de todos esos fragmentos “a la vez”. Si bien estos flujos piroclásticos son capaces de remontar obstáculos topográficos, normalmente se encauzan en el fondo de los valles, por lo que sus depósitos resultantes adquieren morfologías lenticulares adaptadas a la topografía previa (ver figura 1). Los flujos piroclásticos suelen visualizarse en muchos libros de textos como nubes ardientes, término con el que fueron definidos en un primer momento por el vulcanólogo francés Alfred Lacroix que los fotografió durante la erupción de 1902 del volcán Monte Pelée (isla de Martinica, Antillas Francesas).

Dentro de los flujos piroclásticos se distinguen las oleadas y las coladas piroclásticas, diferenciadas en función de la relación gas/partículas que llevan cada una de ellas y que en muchas ocasiones muestran complejas asociaciones.

Las **oleadas piroclásticas** (*pyroclastic surge deposits* en inglés) son corrientes turbulentas poco densas (relación gas/fragmentos alta) en las que el mecanismo principal de transporte es la fluidificación, donde la suspensión de las partículas es posible únicamente mientras la velocidad de movimiento del flujo sea superior a la velocidad de caída de las mismas. Los depósitos de oleadas piroclásticas se caracterizan por presentar estructuras sedimentarias tractivas unidireccionales (laminaciones cruzadas,

Tabla I. Clasificación de los depósitos piroclásticos según sus tamaños y grado de consolidación (modificado de Le Maitre *et al.*, 1989).

TAMAÑO GRANO (MM)	PIROCLASTO	DEPÓSITO PIROCLÁSTICO	
		NO CONSOLIDADO: TEFRA	CONSOLIDADO: ROCAS PIROCLÁSTICAS
64	Bomba	Aglomerado	Aglomerado volcánico
	Bloque (angulosos)	Tefra de bloques	Brecha piroclástica o volcánica
2	Lapilli	Tefra lapílica	Toba lapílica
	Ceniza	Tefra cinerítica	Toba cinerítica

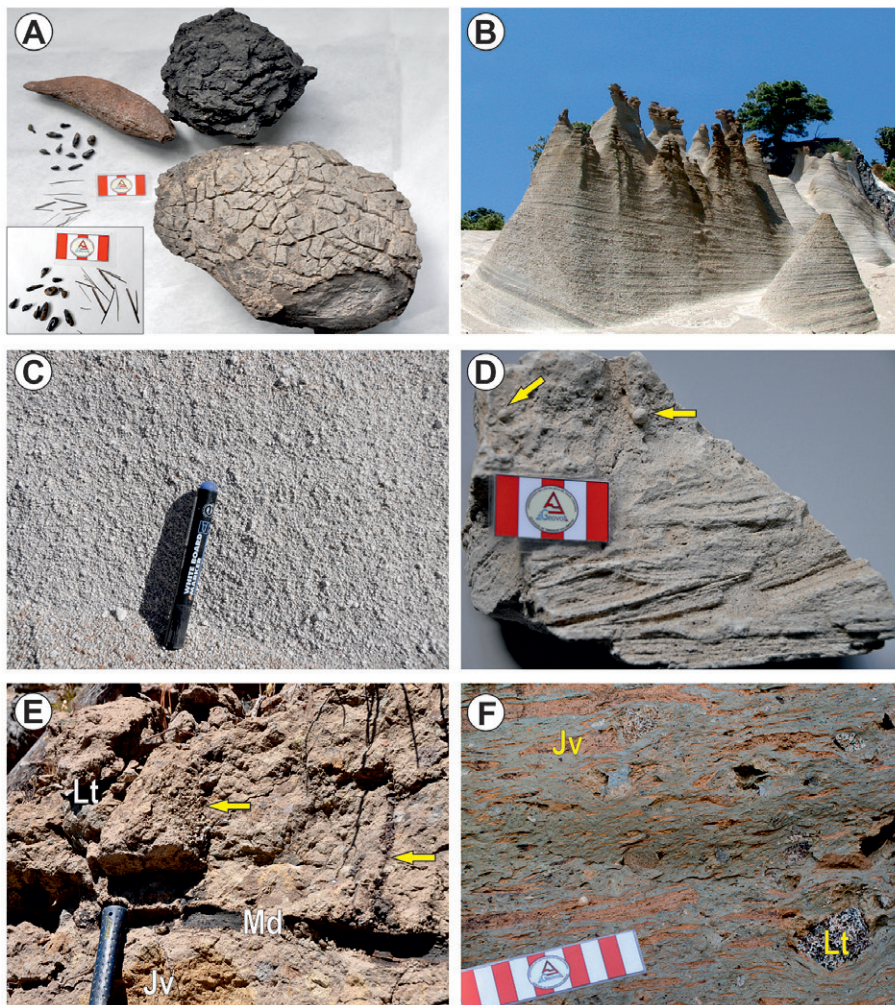


Fig. 2. Depósitos piroclásticos. A) Depósitos piroclásticos de caída balística. Empezando por la izquierda y siguiendo el sentido de las agujas del reloj se observan cabellos y lágrimas de Pelé (foto de detalle en el recuadro inferior izquierdo), bomba fusiforme, en coliflor (típica de erupciones hidromagmáticas) y en corteza de pan. B) Depósitos piroclásticos de caída de dispersión horizontal. Presenta típica laminación paralela reflejo de cambios de intensidad en los sucesivos pulsos eruptivos (Paisaje lunar, Tenerife). C) Vista en detalle de depósito piroclásticos de caída de dispersión horizontal de composición riolítica (volcán de Cerro Blanco, Argentina). Obsérvese su buena selección de tamaño (sorting). D) Depósito de oleada piroclástica (Bandas del Sur, Tenerife) en el que destacan laminaciones cruzadas y lapillis acrecionales (flechas). E) Ignimbrita no soldada en la que destacan moldes vegetales (Md) que fueron carbonizados y su combustión produjo tubos de desgasificación verticales (flechas). Obsérvese además la presencia de fragmentos juveniles (Jv), de colores anaranjados, y fragmentos líticos (Lt), de colores grises, heterométricos (Brecha volcánica Roque Nublo, Gran Canaria). F) Ignimbrita soldada en la que destaca la presencia de numerosos líticos (Lt) alrededor de los cuales se adaptan los fragmentos juveniles (Jv, colores anaranjados) en forma de “flamas” (Formación Mogán, Gran Canaria).

curvas, antidunas, etc.), buenos a regulares *sorting* y, en las erupciones hidromagmáticas, abundante presencia de líticos y lapillis acrecionales (Fig. 2D).

Las **coladas piroclásticas** (*pyroclastic flow deposits* en inglés) son características de erupciones plinianas a partir del colapso vertical de su columna eruptiva, si bien existe una cierta variedad de mecanismos en las erupciones explosivas capaces de generarlas (e.g., Fisher y Schmincke, 1984; Cas y Wrigt, 1987; Colombo y Martí, 1992). En las coladas piroclásticas los fragmentos son transportados en el seno de un flujo de alta densidad y alta temperatura, y en el que la fase gaseosa se mantiene relativamente confinada entre las partículas.

Sus depósitos presentan una mala clasificación, sin estratificación interna y frecuentemente con una doble distribución granulométrica: gradación normal (disminución de tamaños de base a techo) de los fragmentos líticos e inversa de los fragmentos juveniles, especialmente los pumíticos. Otras características son la presencia de tubos de desgasificación (*pipes*) en disposición vertical y moldes de restos vegetales cerca de la base orientados en la dirección del flujo (Fig. 2E). En general, a los depósitos resultantes de las coladas piroclásticas se les denomina ignimbritas, aceptando como tales a aquellos depósitos ricos en material juvenil, emplazados en caliente y que pueden o no presentar texturas de soldaje térmico, textura que se conoce con el término de eutaxítica y en la que los fragmentos juveniles adquieren forma de “flamas” (Fig. 2F).

ESTRUCTURA DE LAS COLUMNAS ERUPTIVAS

En las erupciones explosivas, especialmente en las plinianas, se forman típicas columnas eruptivas en forma de champiñón capaces de alcanzar alturas de más de 50 km. En dichas columnas se distinguen tres regiones con características fluidodinámicas diferenciadas (Sparks, 1986) denominadas como zona de chorro, zona de convección y zona de difusión horizontal o lateral (Fig. 3).

En la **zona de chorro** los gases volcánicos y las partículas piroclásticas son inyectados en la at-

Fig. 3. Estructura de una columna eruptiva típica de erupciones plinianas (modificado de Sparks, 1986). Ver texto para más detalles.

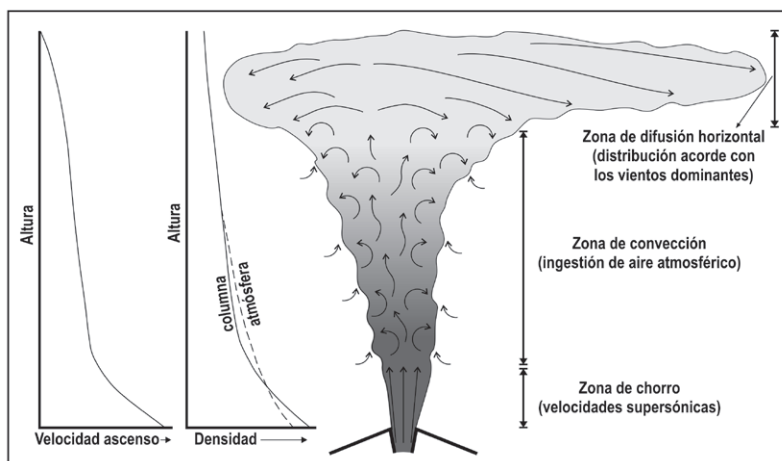
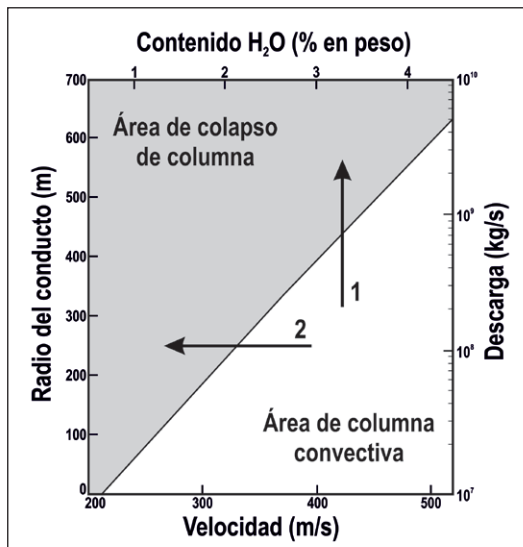
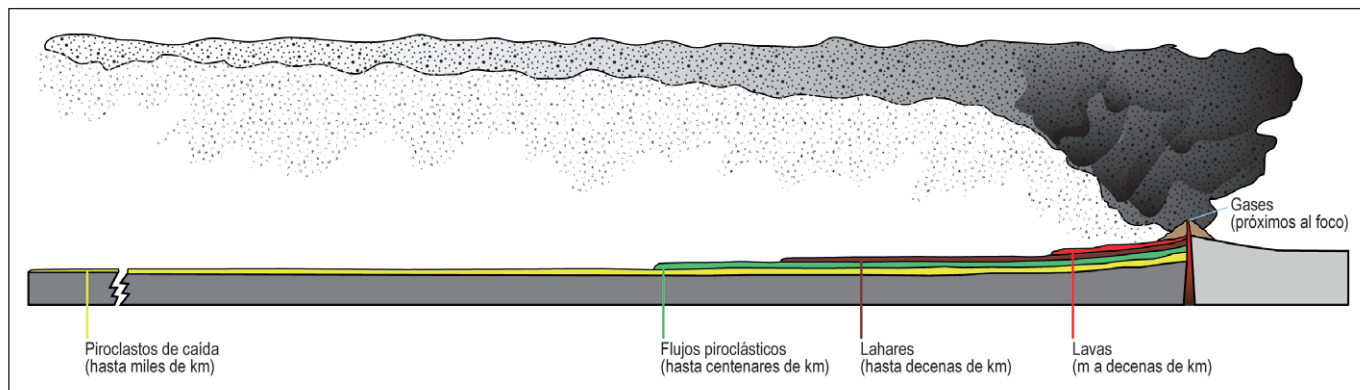


Fig. 4. Convección vs. colapso de una columna eruptiva en función del radio del conducto, velocidad de salida, descarga magmática y contenido en volátiles. La columna puede colapsar si aumenta el radio del conducto y, por tanto, la descarga magmática (1) o disminuye el contenido en volátiles y, por tanto, la velocidad de salida del chorro (2) (modificado de Wilson et al., 1980).



mósfera a gran velocidad debido a la enorme expansión que sufren los gases volcánicos cuando salen del conducto. Esta zona puede alcanzar alturas de centenares de m a algunos km y velocidades supersónicas (> 600 m/s en erupciones plinianas y vulcanianas). Aunque la densidad de la columna eruptiva en esta zona de chorro es mayor que la de la atmósfera circundante, la columna no colapsa debido a la potente inercia del arrastre ascendente de las partículas piroclásticas en el seno del fluido y solo los fragmentos piroclásticos de gran tamaño (los bloques) caen en trayectorias balísticas. Hacia el final de la zona de chorro, la columna eruptiva empieza a incorporar hasta 4 veces su masa inicial de aire frío atmosférico por sus márgenes. Ello provoca el desarrollo de la **zona de convección** con numerosas células convectivas térmicas y una drástica disminución de la densidad de la columna, que llega a hacerse inferior a la de la atmósfera circundante (ver figura 3). De esta forma se consigue que la columna siga ascendiendo y se expanda lateralmente. El techo de esta zona convectiva viene marcado por el nivel de flotabilidad neutra donde la columna eruptiva adquiere la misma densidad y temperatura que la atmósfera contigua. Por encima de este nivel de flotabilidad neutra la columna, aunque se eleva algo más debido a su impulso, tiende a estancarse y expandirse horizontalmente adquiriendo una morfología en champiñón o sombrilla. Se forma así la **zona de difusión horizontal**, cuya distribución final depende de los vientos dominantes en la alta atmósfera (ver figura 3). Desde

Fig. 5. Comparación entre las distancias alcanzadas por los depósitos piroclásticos y otros productos volcánicos.



esta zona de difusión horizontal las partículas piroclásticas irán cayendo a modo de lluvia hacia la superficie del terreno, cubriéndolo de forma más o menos homogénea.

Esta distribución de la columna eruptiva no es estática y en numerosas ocasiones puede colapsar parcial o totalmente. Los parámetros que determinan el paso de la convección al colapso son el radio del conducto, la velocidad de salida de la columna en la zona de chorro, la descarga magmática y la proporción de gases volcánicos involucrados (Wilson et al., 1980). La figura 4 muestra de forma gráfica la relación entre estos cuatro parámetros y la división en los campos de convección y colapso. Se observa que una columna eruptiva estable puede colapsar si aumentan las dimensiones del conducto (por ejemplo, cuando se forman las calderas), lo que conlleva un aumento de la descarga y, por tanto, un aumento en la densidad de la columna, o bien por una disminución en el contenido de volátiles con el paso del tiempo, lo que conlleva una disminución de la velocidad de salida y, en consecuencia, una pérdida del impulso cinético.

Cuando se produce el colapso parcial o total de la columna eruptiva, toda su energía potencial adquirida con la altura alcanzada pasa a transformarse en energía cinética capaz de movilizar esa mezcla de gases y piroclastos formando flujos piroclásticos que se desplazarán a grandes velocidades a ras del suelo.

PELIGROSIDAD DE LOS MATERIALES PIROCLÁSTICOS

Como ya se ha comentado con anterioridad, los depósitos piroclásticos son los productos volcánicos que más distancia llegan a alcanzar (Fig. 5) y en menor tiempo, por lo que son potencialmente los más peligrosos. Por otro lado, es evidente que es muy diferente la peligrosidad de los depósitos piroclásticos de caída y los de flujo, por lo que se tratarán de forma separada.

Peligros asociados a los depósitos piroclásticos de caída

Los piroclastos expulsados en trayectorias balísticas, sobre todo los de tamaño bloques y bombas, dada su velocidad de caída y en muchos de ellos su alta temperatura, representan un peligro directo para las personas y estructuras. No obstante, su escaso radio de acción (alrededor del foco eruptivo) permite eludirlos con facilidad.

No ocurre así con los piroclastos de caída de dispersión horizontal que caen en el terreno con suavidad y, en la mayoría de los casos, ya fríos. Por el contrario, su radio de acción puede llegar a ser a escala planetaria para erupciones de gran explosividad. Los principales peligros que entrañan estos piroclastos son en la aviación, así como en infraestructuras, ganado, cultivos y aguas.

La mayoría de los vuelos comerciales tienen lugar entre los 9 y 11 km de altura, en los límites entre la troposfera y la estratosfera. A esa altura es muy común la inyección de cenizas volcánicas en erupciones con Índice de Explosividad Volcánica (IEV) ≥ 3 (para detalles sobre el IEV ver Pérez-Torrado y Rodríguez-González, 2015, en este mismo volumen), por lo que los encuentros entre la zona de dispersión horizontal de las columnas eruptivas y la creciente actividad aérea resulta común. De hecho, las cenizas volcánicas suponen uno de las mayores causas naturales de pérdidas económicas en las compañías aéreas. Un ejemplo reciente, la erupción del volcán Eyjafjalla (Islandia) en abril-mayo 2010 produjo el mayor cierre del tráfico aéreo en Europa después de la II Guerra Mundial, con la cancelación de más de 100.000 vuelos y pérdidas económicas en las compañías aéreas por valor de más de 1.200 millones de euros (Pérez-Torrado *et al.*, 2010). El principal problema que estos encuentros ocasiona en los aviones, aparte del efecto abrasivo en el fuselaje y la reducción de visibilidad, es el bloqueo de las turbinas de los motores (Miller y Casadevall, 2000). La entrada de cenizas volcánicas en las turbinas, donde se alcanzan más de 700 °C de temperatura, provoca la fusión parcial de su material vítreo y posterior solidificación en masas compactas que impiden el normal giro de las turbinas con la consiguiente parada de los motores.

Otro peligro es el colapso de tejados de edificios por la acumulación de piroclastos, lo que ocurre cuando se acumulan más de 200 mm de cenizas húmedas (Fig. 6A). Este proceso puede llegar a ser muy rápido si el edificio se encuentra a poca distancia del centro emisor, por lo que el peligro se acentúa. A nivel de infraestructuras, dañan las redes eléctricas aéreas, colapsan los sistemas de alcantarillado y desagüe, colmatan balsas de agua e incluso pequeños embalses y en la proximidad del volcán hacen impracticables las rutas de acceso (Blong, 2000).

Una vez depositadas en el suelo, la interacción del agua con la ceniza hace que lixivien una gran variedad de elementos químicos, algunos de ellos en cantidades muy notables. En cuestión de minutos estos procesos generan elevaciones bruscas del pH del agua y de su salinidad, haciendo que gran parte de la vida acuática desaparezca. Estos lixiviados contienen además de los componentes asociados a la salinidad, como cloruros y sulfatos, cantidades elevadas de sodio y potasio. También aportan elementos como hierro, magnesio, calcio, etc. que pueden ser beneficiosos para el suelo. Respecto a los elementos traza potencialmente tóxicos, como arsénico, flúor, antimonio, etc., pueden llegar a permanecer hasta miles de años en las aguas subterráneas siendo, por tanto, sus efectos medioambientales permanentes a largo plazo (Ruggieri *et al.*, 2011, 2012).

Así pues, estos aportes geoquímicos volcánicos tienen una doble vertiente, si bien por un lado existe un riesgo asociado a los elementos potencialmente tóxicos, por otro lado suponen una importante en-

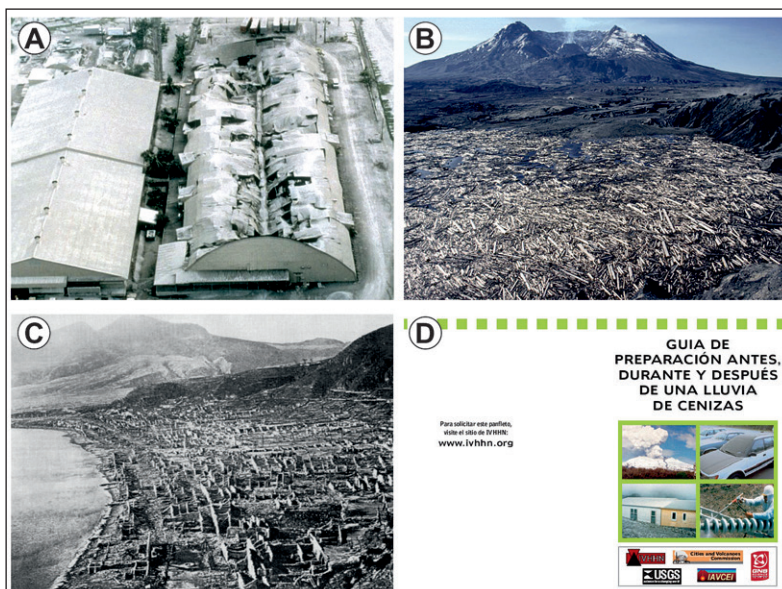


Fig. 6. Peligrosidad de los materiales piroclásticos. A) Colapso de tejado de edificio debido al acúmulo de cenizas volcánicas de caída durante la erupción de 1991 del volcán Pinatubo, Filipinas (foto tomada de la web del Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS). B) Bosque completamente arrasado por el paso de flujos piroclásticos producidos durante la erupción de 1980 del volcán Santa Helena en Estados Unidos (foto tomada de la web del Servicio Forestal Geológico de los Estados Unidos, USFS). C) Destrucción de la ciudad de Saint Pierre en la isla de Martinica (Antillas francesas) por la acción de flujos piroclásticos ("nuées ardentes" en la terminología de Alfred Lacroix) durante la erupción del volcán Monte Pelée. Obsérvese como prácticamente las únicas paredes que se mantuvieron en pie quedaron alineadas en la dirección paralela al avance de los flujos piroclásticos provenientes del volcán localizado al fondo de la foto. D) Portada de la guía para la prevención de riesgos por caída de cenizas editado por el IVHHN (extraída de su web).

trada de nutrientes al sistema ambiental. Este último aspecto condiciona la elevada fertilidad que, en general, muestran los suelos volcánicos y, además, en ambientes pobres en nutrientes pueden ser una de las pocas vías para incrementar de forma rápida la productividad biológica, como ocurre por ejemplo cuando llegan plumas eruptivas cargadas de ceniza volcánica al Atlántico Sur.

Peligros asociados a los flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos suponen el mayor peligro producido de forma directa por las erupciones volcánicas. Las más de 28.000 víctimas en la erupción del Monte Pelée (Isla de Martinica) de 1902, o las más de 6.000 víctimas en la erupción del volcán Santa María (Guatemala) en 1902 así lo atestiguan.

Esta alta peligrosidad que poseen los flujos piroclásticos radica en tres aspectos: movilidad, velocidad y temperatura (Nakada, 2000). Aunque como cualquier fluido tienden a desplazarse a favor de la gravedad en el fondo de los valles, al ser un medio gaseoso el agente de transporte y estar dotado de una gran energía cinética, tienen una mayor movilidad siendo capaces de remontar algunos obstáculos topográficos, arrasando todo en su camino.

La velocidad es otro factor principal, ya que les permite alcanzar grandes distancias en muy corto tiempo. Tanto las coladas como las oleadas piroclásticas viajan a velocidades superiores a los 10 m/s (36 km/h), pudiendo alcanzar valores superiores a los 100 m/s (360 km/h). Por ejemplo, la oleada piroclástica dirigida que se produjo en la erupción del volcán

Saint Helens (Estados Unidos) en mayo de 1980, alcanzó velocidades punta de 150 m/s (540 km/h). Estas velocidades dotan a los flujos piroclásticos de una alta energía cinética capaz de arrasar todo a su paso, como bosques (Fig. 6B), edificios (6C), etc.

La temperatura en el interior de los flujos piroclásticos puede estimarse a través de los efectos que provocan en ciertos materiales y en la vegetación, así como por medidas directas mediante sensores térmicos. Las estimaciones y medidas varían mucho de unos flujos a otros, comprendiendo valores que oscilan entre 100 °C (erupción del volcán Soufriere Hills en la isla de Montserrat, 1995-98) y 660 °C (erupción del Unzen, Japón, en 1992). Estas temperaturas son capaces de provocar todo tipo de incendios al paso de los flujos piroclásticos.

PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN

Como se ha repetido a lo largo de varios trabajos de este monográfico, la mejor prevención para todos los tipos de peligros volcánicos es una correcta ordenación del territorio acorde con los mapas de peligrosidad elaborados. Dado que el crecimiento exponencial de la población no permite esta premisa en muchas áreas del planeta, se hace necesario la toma de medidas de mitigación que minimicen el daño. Para los piroclastos de caída balística se construyen hombreras de hormigón alrededor de las estructuras que se consideran están en su radio de acción. Para los piroclastos de caída de dispersión horizontal es conveniente la construcción de tejados reforzados y con fuertes pendientes ($> 45^\circ$), junto con limpiezas sistemáticas de los mismos para evitar sus colapsos. Durante la "lluvia" de cenizas hay que tener también especial cuidado con las afecciones respiratorias y oculares, por lo que es conveniente protegerse con mascarillas y gafas adecuadas.

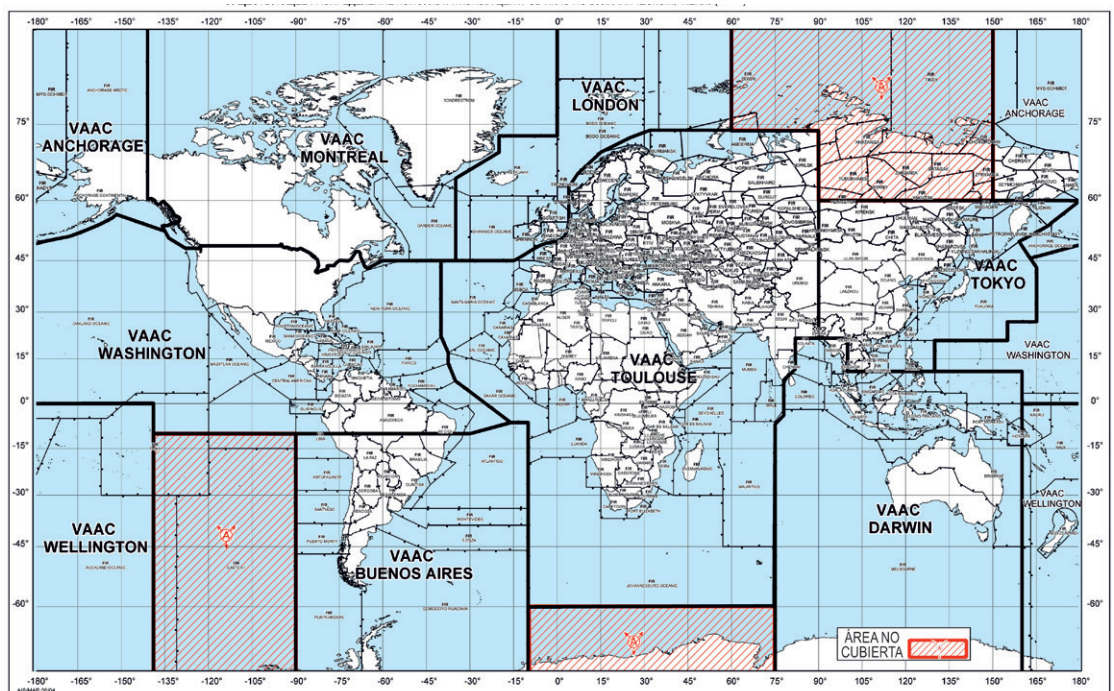
Para prevenir los peligros asociados a la caída de ceniza de erupciones de gran magnitud en áreas rurales, conviene disponer para el ganado de esta-

blos habilitados con agua y comida para al menos dos semanas. De esa forma se evita que el ganado beba agua con altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos y que coma hierba cargada de ceniza, que es muy abrasiva y destruye rápidamente la dentadura en el caso de los rumiantes. En el caso del agua, se recomienda disponer de depósitos de agua cubiertos tanto para las personas como para el ganado. Respecto a las cosechas, dependiendo de la época del año en que se produzca la erupción, las pérdidas pueden ser más cuantiosas. Por lo general, la producción agrícola se ve afectada durante periodos de 2 a 3 años, dependiendo de la magnitud de la erupción.

El Comité Internacional de Riesgos Volcánicos para la Salud (*International Volcanic Health Hazard Network, IVHHN*), en combinación con otros organismos, ha editado en varios idiomas guías para la protección de la población ante la caída de cenizas volcánicas (Fig. 6D) que pueden descargarse de su página web (<http://www.ivhnn.org/>). Ejerce, por tanto, el mejor ejercicio de mitigación como es la educación de la población ante los riesgos. En cualquier caso, aún con una población bien educada, los servicios de protección civil deben tener el entrenamiento necesario para afrontar este tipo de crisis.

En relación al tráfico aéreo, un consorcio entre la Organización Internacional de Aviación Civil, los Observatorios Volcanológicos y los Observatorios Meteorológicos ha creado los Centros de Alerta de Cenizas Volcánicas (*Volcanic Ash Advisory Centers, VAAC*) que son los responsables de transmitir en tiempo real las alertas pertinentes por la presencia de nubes piroclásticas en la atmósfera (Miller y Casadevall, 2000). Estas nubes, que no se detectan en los radares de navegación de los aviones, deben ser estimadas usando observaciones satelitales y modelos de difusión basados en observaciones meteorológicas. Se han creado 9 VAAC que cubren casi toda la superficie de la Tierra (Fig. 7) y cuyas decisiones han evitado graves problemas de seguridad en el tráfico aéreo.

Fig. 7. Distribución de los 9 Centros de Alerta de Cenizas Volcánicas (VAAC) implementados por la Organización Internacional de Aviación Civil. Obsérvese como hay áreas en el N de Rusia, Océano Pacífico e Índico que no tienen cobertura (tomado de <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/washington.html>).



Finalmente, para los flujos piroclásticos sólo puede concluirse que, dadas sus características, no existen medidas eficaces de control, por lo que la mejor mitigación y reducción de riesgo son la detección temprana de su formación y medidas de evacuación.

CONSIDERACIONES FINALES

Los depósitos piroclásticos, productos típicos de erupciones explosivas, presentan la mayor dispersión espacial de todos los materiales volcánicos, pudiendo distribuirse a escala de todo el planeta. Esta capacidad de dispersión, que científicamente los convierte en unos excelentes marcadores cronoestratigráficos, supone severos riesgos para la población e infraestructuras. De hecho, los mayores números de víctimas se han producido por la acción de estos materiales piroclásticos, bien directamente (en flujos piroclásticos) o indirectamente (hambres y asfixias por causa de lluvias piroclásticas contaminando suelos, aguas subterráneas, impidiendo fotosíntesis en las plantas, etc.).

Apenas si existen medidas estructurales de mitigación de sus riesgos, por ello las mejores estrategias pasan por una correcta ordenación del territorio, una adecuada educación de la población y la detección temprana de su formación que permitan evacuaciones eficaces.

BIBLIOGRAFÍA

- Blong, R. (2000). *Volcanic hazards and risk management*. En: Encyclopedia of Volcanoes (Eds.: H. Sigurdsson, B. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer y J. Stix). Academic Press, 1215-1227.
- Cas, R.A.F. y Wright, J.V. (1987). *Volcanic successions. Modern and ancient*. Ed. Allen & Unwin, 528 p.
- Colombo, F. y Martí, J. (1992). *Depósitos volcanosedimentarios*. En: Nuevas tendencias en Sedimentología-I (Ed. A. Arche). Servicio de Publicaciones del CSIC, 271-345.
- Fisher, R.V. y Schmincke, H.U. (1984). *Pyroclastic rocks*. Ed. Springer, 472 p.
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, J., Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Woolley, A.R. y Zanettin, B. (1989). *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Ed. IUGS y Blackwell Scientific Publications, 193 p.
- Miller, T.P. y Casadevall, T.J. (2000). *Volcanic ash hazards to aviation*. En: Encyclopedia of Volcanoes (Eds.: H. Sigurdsson, B. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer y J. Stix). Academic Press, 915-930.
- Nakada, S. (2000). *Hazards from pyroclastic flows and surges*. En: Encyclopedia of Volcanoes (Eds.: H. Sigurdsson, B. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer y J. Stix). Academic Press, 945-955.
- Perez-Torrado, F.J. y Rodríguez-Gonzalez, A. (2015). ¿Cómo se miden las erupciones? El Índice de Explosividad Volcánica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23.1, 24-32.
- Perez-Torrado, F.J., Rodríguez-Gonzalez, A., Carracedo, J.C., Fernández-Turiel, J.L., Gimeno, D. y Wiesmaier, S. (2010). Eyjafalla: El volcán que tuvo en jaque a media Europa. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18.3, 330-332.
- Pujadas, A., Brusi, D. y Pedrinaci, E. (1999). ¡Los volcanes han cambiado! Nuevos enfoques de terminología volcánica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 7.3, 200-209.
- Ruggieri, F., Fernández-Turiel, J.L., Saavedra, J., Gimeno, D., Polanco, E. y Antonio Naranjo, J. (2011). Environmental geochemistry of recent volcanic ashes from the Southern Andes. *Environmental Chemistry*, 8(3), 236-247.
- Ruggieri, F., Fernández-Turiel, J.L., Saavedra, J., Gimeno, D., Polanco, E., Amigo, A. y Caselli, A. (2012). Contribution of volcanic ashes to the regional geochemical balance: The 2008 eruption of Chaitén volcano, Southern Chile. *Science of the Total Environment*, 425, 75-88.
- Sparks, R.S.J. (1986). The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns. *Bulletin of Volcanology*, 48, 3-15.
- Wilson, L., Sparks, R.S.J. y Walker, G.P.L. (1980). Explosive volcanic eruptions - IV. The control of magma properties and conduit geometry on eruption column behaviour. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 63, 117-148. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 27 de julio de 2014 y aceptado definitivamente para su publicación el 26 de enero de 2015.