

## 2 DAÑOS QUE PUEDEN PRODUCIR LAS ERUPCIONES

R. Ortiz y V. Araña

El daño causado por los distintos factores de peligro de una erupción volcánica depende en primer lugar del tipo y magnitud de la erupción, de la distancia entre el elemento de riesgo y la fuente, de la topografía, del viento y otras variables meteorológicas, de la vulnerabilidad del elemento de riesgo y finalmente, del sistema de alarma y de la optimización del riesgo. Una vez evaluados los distintos factores de peligro volcánico, con clara referencia a su magnitud, extensión, duración y período de retorno, se debe proceder a estudiar los elementos de riesgo, definiendo para cada uno de ellos y para cada uno de los peligros su vulnerabilidad, la cual será función de sus propiedades estructurales y de su distancia al centro de emisión. El factor de exposición, que siempre reduce el factor de riesgo, introduce el hecho de que el elemento de riesgo no estará permanentemente en la zona de peligro y se expresa en % del tiempo total. Por ejemplo una construcción se supone que sólo durará 50 años, que una cosecha sólo está amenazada durante seis meses al año, los turistas sólo están en verano, etc.

### 2.1. PELIGROSIDAD VOLCANICA <sup>1</sup>

El concepto de peligrosidad volcánica engloba aquel conjunto de eventos que se producen en un volcán y pueden provocar daños a personas o bienes expuestos, por encima de un nivel o grado de riesgo asumido. Los fenómenos que ocurren en un volcán son bien conocidos desde hace mucho tiempo, sin embargo, para valorarlos en su aspecto directamente relacionado con el riesgo volcánico es útil repasar las grandes catástrofes de origen volcánico de las que tenemos noticias (Tabla I). Se observa inmediatamente que las erupciones que han producido mayor número de muertes lo han hecho de modo indirecto: provocando hambre al arruinar las cosechas, desencadenándose lahares o tsunamis que han llevado la destrucción muy lejos del aparato volcánico o por terremotos probablemente tectónicos ocurridos en la zona. Esto es debido a que un volcán no pasa inmediatamente del más absoluto reposo a la más violenta actividad, por lo que todas las grandes erupciones vienen precedidas de actividad menor, pero suficiente para que las poblaciones próximas al volcán evacúen espontáneamente.

---

<sup>1</sup> En este capítulo no pretendemos analizar detalladamente todos los fenómenos que pueden ocurrir en un volcán y constituir un peligro volcánico. El lector interesado puede consultar la Volcanología de Araña y Ortiz (1984), Nuevas Tendencias en Volcanología de Martí y Araña, (editores científicos 1993) ambos publicados por el CSIC o los Elementos de Volcanología de la serie Casa de los Volcanes (Díez Gil, editor científico 1992).

<b>Tabla I: GRANDES CATÁSTROFES VOLCÁNICAS</b>			
<b>Volcán</b>	<b>año</b>	<b>muertos</b>	<b>Fenómeno responsable</b>
Kelud (Indonesia)	1586	10.000	Lahar
Vesuvio (Italia)	1631	3.500	Explosión. Lavas. Lahar
Etna (Italia)	1669	20.000	Terremoto. Lavas.
Merapi (Indonesia)	1672	3.000	Colada piroclástica. Lahar
Awu (Indonesia)	1711	3.200	Lahar
Papandayan(Indonesia)	1722	2.957	Colapso del edificio volcánico
Oshima (Japón)	1741	>1.500	Tsunami
Asama (Japón)	1783	1.200	Colada piroclástica
Laki (Islandia)	1783	10.000	Grandes coladas de lava. Hambre en toda Europa
Unzen (Japón)	1792	15.000	Colapso del edificio volcánico. Tsunami
Tambora (Indonesia)	1815	92.000	Erupción gigante. Hambre
Galunggung (Indonesia)	1822	>4.000	Lahar.
Awu (Indonesia)	1856	2.800	Lahar.
Krakatoa (Indonesia)	1883	36.417	Tsunami generado por caldera
Awu (Indonesia)	1892	1.500	Colada piroclástica. Lahar.
Mont Pelée (Antillas)	1902	28.000	Colada piroclástica.
Soufriere St. Vincent (Antillas)	1902	1.565	Colada piroclástica.
Kelud (Indonesia)	1919	5.000	Lahar
Lamington (Papua NG.)	1951	3.000	Explosión. Flujo piroclástico.
Agung (Indonesia)	1963	2.000	Colada piroclástica.
Nevado del Ruiz (Colombia)	1985	25.000	Lahar
Lago Nyos (Camerún)	1986	1.700	Emisión de gases
Pinatubo (Filipinas)	1991	5.000	Lahares

Una erupción gigante, como la del Krakatoa en 1883, duraba ya varios meses cuando se produjo el cataclismo (Simkim y Fiske, 1983). Pompeya, la ciudad símbolo de la capacidad de destrucción del volcán, había sido destruida por un terremoto 15 años antes de la erupción del Vesuvio del año 79, siendo las víctimas causadas directamente por la erupción relativamente pocas. Más escaso es aún el número de víctimas (una veintena) en Herculano, cuya población fue evacuada por mar ante la reactivación del Vesuvio. Varios miles de años antes, la ciudad de Akrotiris en la isla de Thera, en el mar Egeo, también fue abandonada por sus habitantes antes de que fuese sepultada por las cenizas de una erupción. En sentido contrario, poblaciones destruidas por el volcán como Armero (Colombia, erupción del Nevado del Ruiz en 1985) (Podesta y Giesecke, 1989; Williams, 1989-1990), o Saint Pierre, (Martinica, erupción del Mont Peleé en 1912) (Boudon y Gourgaud, 1989), en una u otra forma no se les permitió evacuar.

La mayor parte de los eventos volcánicos está limitada a las proximidades del volcán (caída de grandes bombas y nubes de gases tóxicos) o bien presenta una movilidad baja, como las lavas. Incluso, los grandes efectos del volcanismo explosivo están limitados a un entorno de pocos kilómetros. Otras catástrofes asociadas a los volcanes, como pueden ser los lahares o los deslizamientos de ladera pueden ocurrir sin erupción o terremoto, disparados simplemente por unas lluvias anormales que inestabilizan los materiales volcánicos.

No sólo las vidas humanas son los elementos de riesgo, ya que nuestras sociedades poseen y depende estructuras básicas muy vulnerables, como son los sistemas de comunicación o las redes de distribución de agua y energía. Además, los núcleos urbanos en la proximidad de volcanes potencialmente peligrosos son cada vez mayores, llegándose en algunos casos a urbanizar hasta las laderas de un volcán de alto riesgo como el Vesuvio. Es probable que la Tabla I haya que modificarla dentro de pocos años, cuando se produzca una catástrofe volcánica en el nuevo orden urbanístico (Chester, 1993). Como ejemplo podemos citar el volcán Redoubt (Alaska, año 1989): una erupción que no provoca ninguna víctima, pero produjo daños en el tráfico aéreo comercial a más de 4000 km del volcán, que supusieron 80 millones de dólares en un sólo avión (Przedpelski y Casadevall, 1994). Durante la erupción del Pinatubo (Filipinas, año 1991) sufrieron daños por la nube eruptiva 14 grandes aviones (Boeing 747 y DC10) con el resultado de tener que cambiar 10 motores (Casadevall, 1991 & 1995).

### 2.1.1. Magnitud de una erupción

Uno de los problemas no resueltos de la volcanología actual es poder comparar dos erupciones, habiéndose propuesto varios tipos de escala basadas generalmente en el volumen de materiales emitidos o en la energía liberada  $W$ :

$$W = mc (T_e - T_a) + mL$$

donde  $m$  es la masa total del material emitido,  $c$  el calor específico (0.25 cal/g °C) y  $L$  el calor de fusión (50 cal/g).  $T_e$  la temperatura de emisión y  $T_a$  la temperatura del aire. Sin embargo, estas escalas fácilmente evaluables, no reflejan los efectos de la erupción, especialmente el carácter explosivo o no de la misma.

**Tabla II INDICE DE EXPLOSIVIDAD VEI (Basado en Newhall y Self 1982, en Simkim y Siebert 1994)**

<b>VEI</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>Descripción general</b>	no explosiva	pequeña	moderada	media	grande	muy grande			
<b>Volumen de cenizas (m<sup>3</sup>)</b>	<10 <sup>4</sup>	<10 <sup>6</sup>	<10 <sup>7</sup>	<10 <sup>8</sup>	<10 <sup>9</sup>	<10 <sup>10</sup>	<10 <sup>11</sup>	<10 <sup>12</sup>	
<b>Altura de columna (km) sobre el cráter sobre el nivel del mar</b>	<.1	.1-1	1-5	3-15	10-25	>25	....	....	....
<b>Descripción cualitativa</b>	---	Efusiva	Explosiva			Cataclismo	Paroxismo	Colosal	
						Severa	Violenta	Terrible	
<b>Tipo de Erupción</b>		Stromboliana				Plineana			
		Hawaiana	Vulcaniana			Ultra-Plineana			
<b>Duración (horas) (solo fase explosiva)</b>		..... < 1 .....				..... > 12 .....			
			..... 1-6 .....						
				..... 6-12 .....					
<b>Inyección troposférica</b>	mínima	pequeña	media	grande.....					
<b>Inyección estratosférica</b>	No	No	No	Posible	Siempre	Significativa .....			

Otra aproximación parte de la altura alcanzada por la columna eruptiva, obteniéndose una escala conocida como Índice de Explosividad Volcánica (VEI), que refleja bien la actividad explosiva, aunque no es capaz de valorar adecuadamente las grandes erupciones de tipo basáltico. Como las grandes catástrofes volcánicas han sido siempre provocadas por erupciones explosivas, la utilización del VEI se ha generalizado para caracterizar todo tipo de erupción.

### 2.1.2. Metodología para la evaluación de la peligrosidad volcánica

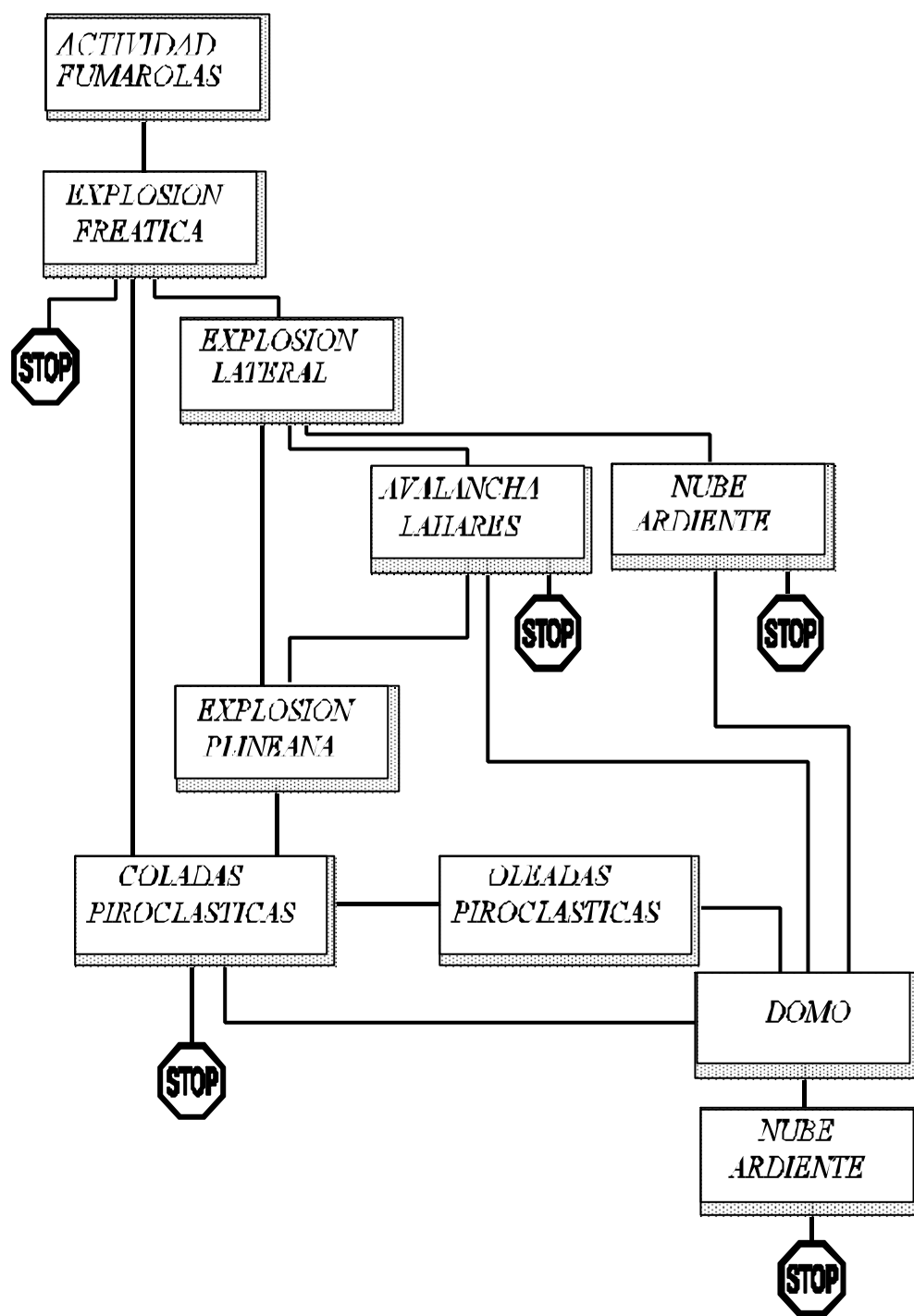
El estudio de la peligrosidad volcánica exige dividir cada uno de los episodios volcánicos en elementos muy sencillos que se evalúan independientemente. Cada uno de estos elementos constituye un peligro volcánico, debiéndose definir para cada uno de ellos su magnitud (volumen, energía), alcance, duración del impacto y tiempo de propagación. Además, deberemos establecer las relaciones secuenciales entre ciclos eruptivos, peligros y períodos de retorno. Debe tenerse presente que toda esta información será procesada posteriormente de modo homogéneo, entrando como capa en el sistema de información geográfica a fin de poder establecer los mapas de riesgo volcánico. Este proceder es muy distinto al que se sigue habitualmente para fines académicos.

Una vez aislados los tipos de peligro correspondientes a cada una de las fases del ciclo eruptivo, debe procederse a analizarlos individualmente, siempre tratando de poner de manifiesto aquellos aspectos que tengan relevancia a efectos de daños. Además, en aquellos casos que sea posible, debe realizarse el análisis del peligro volcánico de forma que puedan determinarse los parámetros físicos necesarios para la modelización numérica del mismo. En todo caso deberemos establecer las leyes de atenuación con la distancia, aunque sea de modo empírico. Una vez más hay que insistir en que toda esta información deberá procesarse después en un sistema de información geográfica, por lo que deberá prestarse especial atención a que todos los datos estén adecuadamente referenciados y cuantificados. De otra forma, es muy fácil que todo el trabajo de campo sea sólo útil en un porcentaje muy pequeño, al no haberse operado de forma sistemática desde el primer momento.

La preparación de formularios o procedimientos para cada peligro permite sistematizar el trabajo de campo y evita que se olviden datos importantes para la adecuada caracterización del peligro. Este punto es importante cuando se quiere proceder al análisis de un complejo aparato volcánico, trabajo en el que deberá participar un elevado número de investigadores de formación muy variada.

La referencia geográfica es otro elemento que deberá cuidarse especialmente: GPS, base cartográfica, foto aérea y foto satélite no tienen porque ser coincidentes, por lo que se debe tener mucho cuidado al utilizarlas. La experiencia señala que es necesario reciclar al personal que realiza habitualmente trabajos de campo del tipo de cartografía geológica para que realice adecuadamente el reconocimiento de las formas volcánicas a efectos de riesgo. Aspectos como la superposición de coladas, las alturas críticas en lavas y coladas piroclásticas o el

**adecuado muestreo de las distintas formaciones pasan generalmente desapercibidas en los trabajos de campo.**



**Figura 2-1** La reconstrucción de la historia eruptiva de un aparato volcánico es el primer eslabón de cualquier evaluación de riesgo volcánico. Es importante establecer las relaciones temporales entre los distintos eventos eruptivos, detallando las transiciones entre ellos. La figura correspondiente a la síntesis y secuencias de los eventos reconocidos en la historia eruptiva del volcán Mont Pelee (Martinica) y representa el escenario eruptivo que se espera para la próxima crisis del volcán (Cheminée et al., 1995)

<b>Tabla III PELIGROSIDAD VOLCANICA (NLA 1992 modificado)</b>	
<b>Factores de Peligro</b>	<b>Tipo de Daño</b>
Proyección de bombas y escorias	Daños por impacto. Incendio.
Caída de piroclastos	Recubrimiento por cenizas. Colapso de estructuras. Daños a la agricultura. Daños a instalaciones industriales.
Dispersión de cenizas	Problemas en tráfico aéreo. Falta de visibilidad
Lavas y domos	Daños a estructuras. Incendios. Recubrimiento por lavas.
Coladas y Oleadas Piroclásticas. (Nubes ardientes)	Daños a estructuras. Incendios. Recubrimiento por cenizas.
Lahares	Daños a estructuras. Arrastres de materiales. Recubrimiento por barros.
Colapso total o parcial del edificio volcánico	Daños a estructuras. Recubrimiento por derrubios. Avalanchas. Tsunami inducido.
Deslizamiento de laderas	Arrastres de materiales. Recubrimiento por derrubios. Daños a estructuras.
Gases	Envenenamiento. Contaminación aire y agua.
Onda de choque	Rotura de cristales y paneles.
Terremotos y temblores volcánicos	Colapso del edificio volcánico. Deslizamiento de masas. Daños a estructuras.
Deformación del terreno	Fallas. Daños a estructuras.
Variaciones en el sistema geotérmico de acuíferos	Cambios en la temperatura y calidad del agua
Inyección de aerosoles en la estratosfera.	Impacto en el clima. Efectos a largo plazo y/o a distancia.

<b>Tabla IV INFORMACIÓN REQUERIDA SOBRE CADA PELIGRO (NLA 1992)</b>	
<b>Factor de Peligro</b>	<b>Información y relación de daños</b>
Proyección balística	Centro de emisión. Área de caída. Tamaño. Número impactos. Temperatura.
Caída de piroclastos	Centro de emisión. Espesor del depósito. Tamaños de partícula (máxima, media). Isopacas
Coladas de lava	Centro de emisión. Espesor. Dirección de flujo. Tiempos de recorrido. Temperatura. Área cubierta.
Domos	Emplazamiento. Velocidad de crecimiento. Tamaño crítico. Vías de destrucción.
Coladas y oleadas piroclásticas. Nubes ardientes.	Punto de origen. Espesor. Dirección de flujo. Tiempos de recorrido. Temperatura. Zona límite.
Lahares	Punto de ocurrencia. Cauce. Área inundada. Nivel del agua. Tiempos de recorrido.
Inundaciones	Punto de ocurrencia. Cauce. Área inundada. Nivel del agua. Tiempos de recorrido.
Colapso del volcán. Avalanchas.	Lugar del colapso. Alcance del depósito. Topografía antes y después del colapso.
Deslizamiento de ladera	Lugar de ocurrencia. Meteorología.
Tsunami	Altura de inundación. Zona inundada.
Emisión de gases	Lugares afectados. Meteorología. Composición.
Ondas de choque	Lugares afectados.
Terremotos	Epicentro. Magnitud.
Deformación cortical	Localización de las fallas. Desplazamiento. Duración de la deformación. Zonas afectadas.
Actividad geotérmica	Puntos de observación. Cambios de temperatura en fumarolas y fuentes.
Fluctuaciones en acuíferos	Puntos de observación. Cambios en el nivel del agua.
Información común	Fuentes de información. Fecha del evento. Duración. Datos.

## Ejemplo de Ficha para peligros volcánicos

VOLCÁN						
ERUPCIÓN CICLO ERUPTIVO			CENTRO DE EMISIÓN		PERÍODO DE RETORNO	
N	PELIGRO	MAGNITUD	ALCANCE	DURACIÓN	TIEMPO DE PROPAGACIÓN	P
1						
2						
3						
.						
N número de orden. P actividad precedente (si existe)						

## 2.2. VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad de los elementos de riesgo es muy difícil de evaluar, pues no existen suficientes experiencias recientes en las que haya sido posible determinar directamente los daños sobre elementos de riesgo y grandes concentraciones de riesgo. Las vulnerabilidades se han establecido en base al análisis de observaciones antiguas y extrapolaciones.

La vulnerabilidad se expresa en % del valor total del elemento en riesgo. Este valor, al ser un concepto estadístico, hay que calcularlo para todos los elementos similares (igual tipo de construcción, de cultivo, etc), por ello se prefiere definir una escala de daños de tres niveles: ligero (0-20%), moderado (10-60%) y grave (50-100%) que se superponen por la dificultad real de distinguir si un daño es del 45% o 55% del total. Hay que tener presente que cuando una estructura sufre daños superiores al 40% ya no es rentable su reparación y debe ser destruida. De modo semejante, la Escala Macrosísmica Europea 1992 (Grünthal, 1993), define cinco niveles para valorar los daños sufridos por los edificios frente a una sacudida sísmica: mínimo, moderado, substancial, grave y destrucción total, correspondiendo los dos primeros a daños no estructurales y los tres siguientes a daños en la estructura: ligeros, graves y colapso del edificio.

Para cada uno de los peligros volcánicos, en sus distintos grados de intensidad, y para cada uno de los elementos de riesgo hay que analizar la correspondiente vulnerabilidad. El resultado de este análisis se puede expresar en forma matricial (matriz de vulnerabilidad) para transferirlo al sistema de información geográfica como capas distintas. En general, el

daño producido por coladas lávicas está limitado al entorno próximo del volcán y fuertemente controlado por la topografía. Las avalanchas, incluyendo en ellas las coladas y oleadas piroclásticas, pueden causar la destrucción total a decenas de km del volcán. Las nubes de cenizas pueden causar pérdidas millonarias a miles de km del volcán. La complejidad de la actual sociedad tecnológica hace que sea mucho más vulnerable que las primitivas sociedades de subsistencia. Hoy, nuestros sistemas de energía y comunicaciones nos hacen tremendamente vulnerables ante la catástrofe volcánica.

<b>Elemento de riesgo</b>	<b>Pérdidas en millones de dólares</b>
Bosques (madera para construcción)	450
Propiedades (casas)	103
Agricultura	39
Limpieza	363
Comunicaciones	112
Total	1.418

(Lipman y Mullineaux 1981)

### 2.2.1. Coladas lávicas

El daño producido por una colada lávica depende de la velocidad de avance del frente de lava, es decir del tiempo disponible para establecer las medidas de mitigación del riesgo una vez recibida la alarma. La viscosidad, el ritmo de emisión y la topografía son los factores condicionantes. Especialmente grave es la situación, cuando la lava se canaliza en barrancos y/o desarrolla túneles lávicos que le permiten recorrer grandes distancias sin enfriarse y mantener una alta movilidad muy lejos del centro de emisión. Velocidades de hasta 16 km/h se han medido en canales abiertos, mientras que en túneles se alcanzan los 100 km/h. El conocimiento que se tiene sobre los efectos de los flujos lávicos procede mayoritariamente del estudio de las coladas de los grandes volcanes basálticos como Kilauea, Etna y Piton de la Fournaise, mientras que se sabe muy poco de la dinámica de las coladas de andesitas, dacitas o riolitas. La erupción del Lonquimay (Chile 1988) permitió estudiar el comportamiento de una colada andesítica de volumen considerable ( $0.23\text{km}^3$ ) (Naranjo et al., 1992).

Las muertes por flujos lávicos son un hecho raro y son debidas generalmente a imprudencias o a intoxicación por la desgasificación de la colada. Un caso excepcional fue la descarga lateral del lago de lava del Nyragongo en 1977, que produjo entre 50 y 300 víctimas por una

colada de una viscosidad extremadamente baja, consecuencia de la desgasificación experimentada durante su larga permanencia en el lago de lava.

La relativa fluidez de las lavas basálticas hace que éstas no posean un alto poder destructor sobre las estructuras, siendo frecuente observar edificios totalmente rodeados de lava, sin haber sufrido daños estructurales. Sin embargo, la elevada temperatura de la lava puede provocar el incendio del edificio. En todo caso, el coste de la excavación en la colada lávica para facilitar el acceso puede ser mayor que el coste del edificio. La experiencia obtenida contemplando la resistencia de las estructuras frente al avance de una lava ha permitido diseñar defensas activas, mediante barreras sencillas de construir, que pueden limitar determinadas concentraciones de riesgo. Evidentemente, grandes erupciones lávicas provocan la total destrucción de todos los elementos de protección. Si el volumen de lava emitido es suficientemente grande todas las barreras serán superadas en más o menos tiempo o bien el coste de las defensas superará el valor de los elementos de riesgo. Otra solución es desviar las coladas a través de canales artificiales hacia otras zonas que presenten menor valor (Abersten, 1984).

Aplicando grandes chorros de agua sobre las lavas, especialmente cuando están muy próximas a la costa, es posible enfriar su frente, que así constituye una barrera. Sin embargo, la baja conductividad térmica de las lavas hace que esta técnica sólo pueda ser utilizada si el frente de lava está muy fracturado, de forma que permita entrar el agua al interior de la colada y no sólo rociar la superficie. Otra actuación importante es el refuerzo de los flancos laterales de las coladas, para evitar que, con condiciones topográficas favorables, se pueda producir el colapso parcial del flanco, dando origen a una colada secundaria que puede desarrollar una velocidad de avance elevada y afectar zonas que se creían seguras.

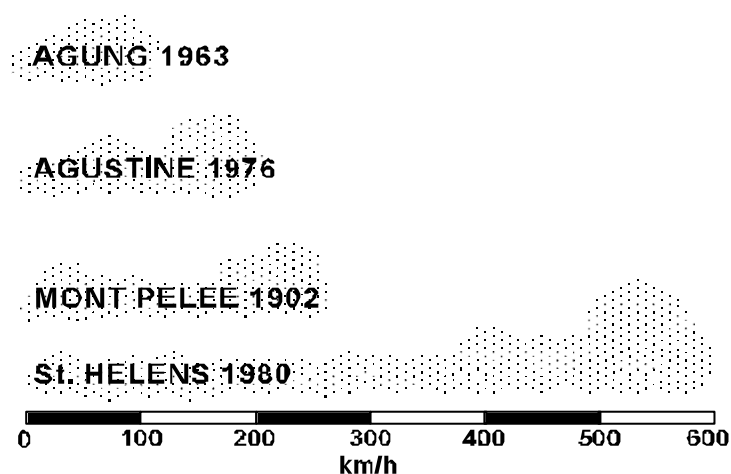
Es importante recordar que las lavas están calientes, y que en las proximidades de una colada la radiación térmica es importante. Los materiales plásticos se degradan a temperaturas muy bajas, desprendiendo gases que son a su vez tóxicos y corrosivos. Estos elementos constituyen hoy una parte muy importante de nuestras estructuras (construcciones y vehículos) y aumentan considerablemente la vulnerabilidad. Obviamente la vulnerabilidad para las cosechas cubiertas por una colada lávica es del 100%, por el contrario, es frecuente en islas volcánicas que las coladas ganen terreno al mar, aumentando con ello los recursos de la isla.

### 2.2.2. Coladas y oleadas piroclásticas

Si la experiencia sobre daños producidos por coladas lávicas que afectan a estructuras modernas es escasa, más escasa es la existente sobre los daños producidos por coladas y oleadas piroclásticas. Todos estos fenómenos tienen en común que pueden transportar materiales a muy alta temperatura a considerable distancia del volcán. Una fórmula empírica nos proporciona la distancia  $X$  a la que se alcanza la temperatura  $T$  en flujos procedentes de una erupción de índice de explosividad VEI (Tiedemann, 1992):

$$X = \frac{\sqrt[3]{VEI^{13.6}}}{1.94 t^{0.67}}$$

según esto, en una erupción moderadamente explosiva, VEI 4, se pueden alcanzar más de 100°C a 10 km del centro de emisión, con VEI 5 a 10 km se superan los 500 °C y los 100 °C a 30 km. Obviamente, los puntos considerados deben poder ser alcanzados por los flujos. Obstáculos topográficos interpuestos hacen que el flujo se detenga o quede muy debilitado y la temperatura decrece rápidamente. La mortandad en la población depende principalmente de la temperatura, desde relativamente pocas víctimas a 200°C hasta la total aniquilación de la población a 600°C. El otro factor a considerar es el contenido en partículas finas, admitiéndose que con una concentración de sólo 0.1 kg/m<sup>3</sup> se produce la muerte. Temperaturas o concentraciones más bajas pueden producir también daños importantes. (Baxter et al, 1995)



**Figura 2-2** Velocidades máximas estimadas para algunas coladas piroclásticas. (Datos tomados de Bardintzeff, 1992).

Además del choque térmico debemos considerar el impacto de estos flujos sobre los elementos de riesgo. Es suficiente recordar las imágenes de la ciudad de Saint Pierre que en su mayor parte quedó reducida a escombros por la erupción del Mont Peleé en 1902. Debido a la falta de datos, podemos considerar que estos efectos van a presentar una ley de variación similar a la inferida para la temperatura y seguir utilizando la fórmula anterior para establecer de modo simple la vulnerabilidad para este tipo de eventos. En primera aproximación podemos considerar velocidades del orden de 50 m/s, aunque en zonas próximas al centro de emisión se alcanzan fácilmente 150 m/s. A estas velocidades los tiempos de recorrido son tan cortos que la única defensa es haber evacuado anteriormente a la población expuesta. El estudio mediante modelización numérica de todo el complejo proceso que tiene lugar en una erupción explosiva (establecimiento de la columna, colapso, génesis de coladas y oleadas piroclásticas, desarrollo de nubes acompañantes) sugiere la posibilidad de construir grandes

barreras que, situadas estratégicamente, limitarían considerablemente el alcance de los flujos (Dobran 1993).

Las oleadas piroclásticas presentan menor importancia a efectos de valoración de riesgo que las coladas, aunque pueden utilizarse criterios similares para su valoración, teniendo presente que están menos controladas por la topografía que las coladas. Un caso especial lo constituyen las erupciones en aguas someras, como las surseyanas, donde las oleadas pasan a convertirse en el primer factor de peligro. Un modelo sencillo, del tipo del cono de energía permite delimitar fácilmente las zonas afectadas (Malin y Sheridan, 1982).

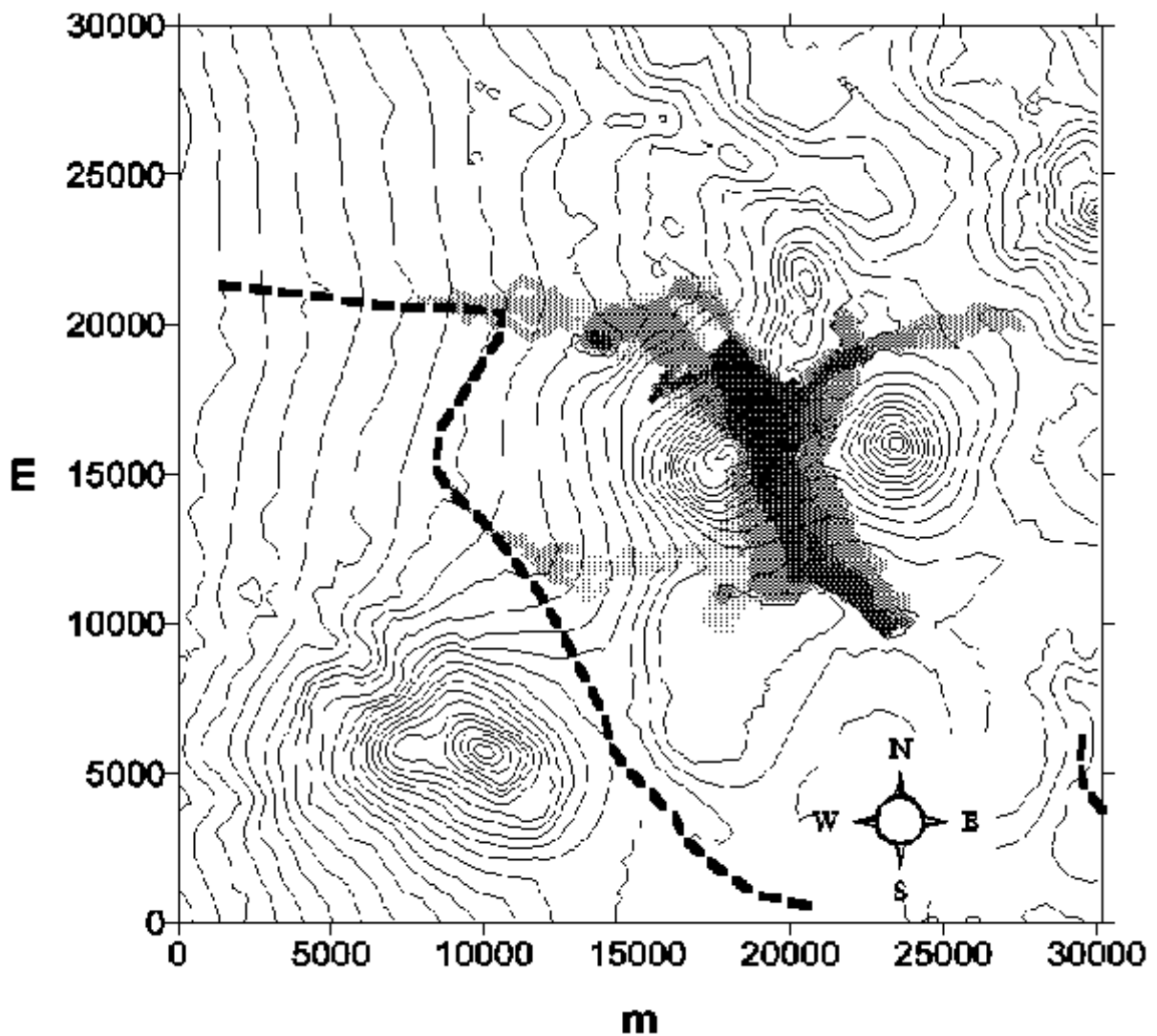
Tabla VI ESCALA PARA COLADAS PIROCLÁSTICAS (NLA 1992)				
Escala	Volumen del depósito km <sup>3</sup>	Dirección del flujo	Camino seguido	Distancia recorrida km
Menor	$V < 0.01$	Zonas bajas alrededor del cráter. En la dirección de apertura del cráter.	Siguiendo los valles, hacia las zonas bajas.	1 ~ 5
Media	$0.01 < V < 1$	Se extiende desde todas las zonas altas del cráter	Siguiendo los valles. Supera pequeños desniveles.	5 ~ 20
Grande	$1 < V$	En todas las direcciones	Se expande en todas direcciones. Supera valles y pequeñas elevaciones.	20 ~ 100

En cada zona volcánica deberemos estudiar detalladamente como son estos depósitos piroclásticos, correlacionándolos con cada estado del volcán y determinando los parámetros necesarios para su modelización. Aunque algunas estructuras pueden resistir, los seres vivos son muy vulnerables a este tipo de evento, donde están expuestos a temperaturas que pueden alcanzar los 300°C, a la sofocación provocada por la gran cantidad de partículas en suspensión y al impacto de las mismas.

La ciudad de Herculano puede servir de ejemplo para efectos producidos por oleadas piroclásticas cuya fuente está relativamente lejana: la ciudad fue alcanzada por una serie de oleadas piroclásticas de baja y alta temperatura, en general las estructuras resistieron el impacto de los flujos, aunque muchos elementos de madera se incendiaron; las personas que no habían podido evacuar, murieron al ser alcanzadas por las primeras oleadas (frías), las partes de los cuerpos que no estaban completamente cubiertas por los depósitos piroclásticos fueron calcinados posteriormente por las oleadas de alta temperatura. Las cosechas

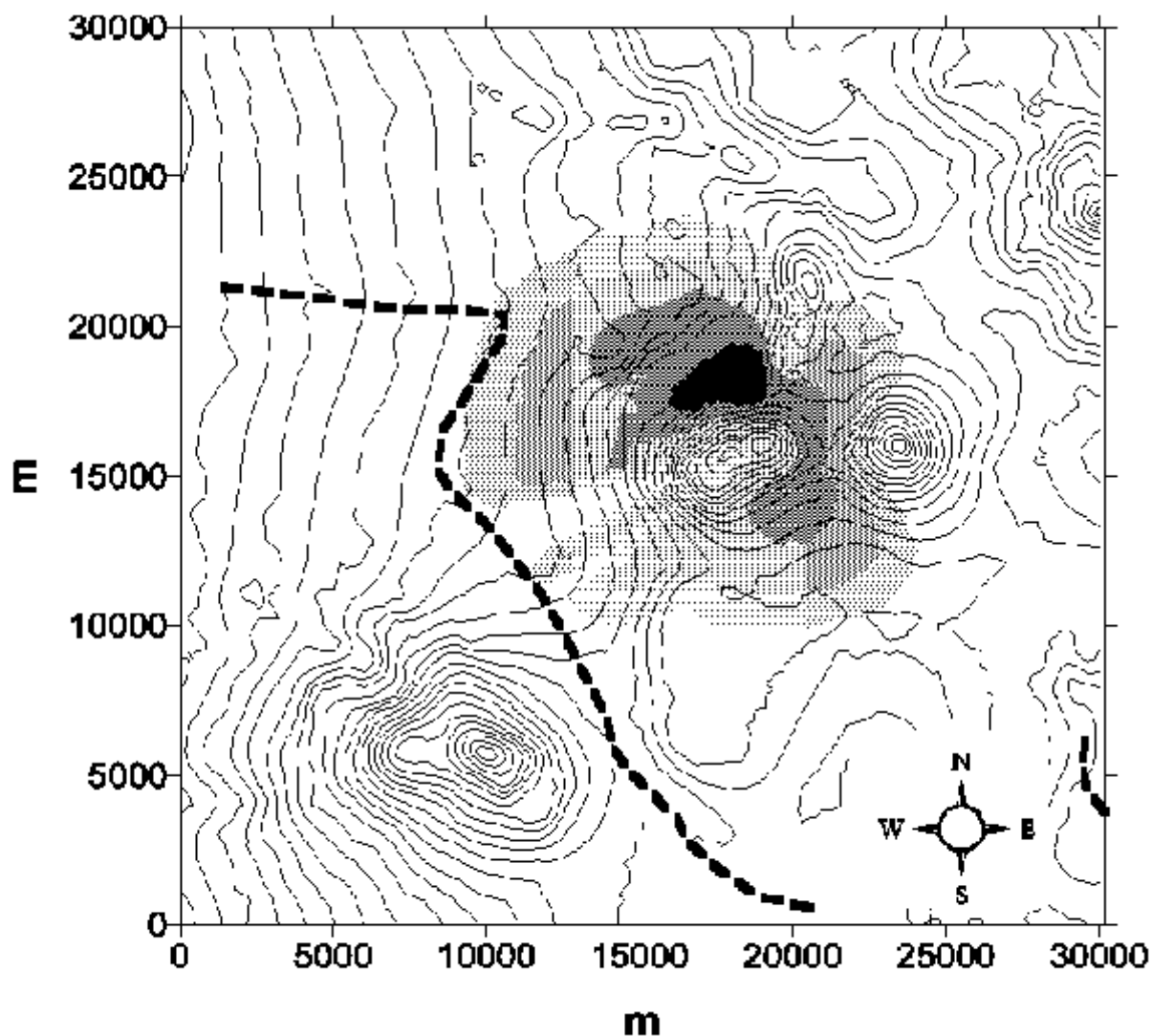
**afectadas por un evento de este tipo resultan destruidas en un 100%. Sólo en zonas marginales pueden sufrir daños menores. La pequeña extensión de estas zonas con respecto al área afectada directamente por el flujo hace que sea irrelevante a efectos de valoración del riesgo.**

**Las figuras siguientes corresponden a la modelización de las coladas y oleadas piroclásticas para el volcán Lascar, situado al norte de Chile (Gonzalez-Ferrán, 1994). Se asume una erupción de VEI 4, similar a la ocurrida el 18 de Abril de 1993 en cuyo estudio participaron miembros del Dep. de Volcanología del CSIC, junto con colegas de Argentina y Chile (Gardeweg et al, 1993). El carácter asimétrico del volcán Lascar se refleja en todos los fenómenos, siendo un buen ejemplo del control topográfico de estos flujos gravitacionales. Estos modelos para la evaluación del riesgo volcánico se realizaron una vez conocida la noticia de la erupción para poder preparar la expedición al volcán.**



**Figura 2-3** Volcán Lascar: Modelo de la zona afectada por coladas piroclásticas. La línea de trazos corresponde al paso de Toconao (Chile) a Catua (Argentina) por la laguna Lejía. Los ejes x, y están en m. Obsérvese que el recorrido de los flujos supera los 12 km.

**El mapa de las coladas piroclásticas generado por el modelo presenta un buen acuerdo con lo que se pudo observar posteriormente (Gardeweg 1993). Especialmente significativo es el corte de la pista que une las poblaciones de Toconao y Cátua.**



**Figura 2-4** Volcán Lascar: Modelización de la zona afectada por oleadas piroclásticas. Se ha utilizado un modelo de cono de energía, con altura equivalente de colapso de 200 m.

### 2.2.3. Proyección balística

La vulnerabilidad frente a la proyección balística de bloques, bombas o lapilli es función del alcance de los objetos proyectados y de la velocidad de impacto (velocidad terminal). En general, la proyección de bombas es característica de las fases vulcanianas de la erupción, típica en el momento de apertura del cráter y siendo los grandes bloques fragmentos de la cobertera, que caen bastante fríos, por lo que la temperatura de los mismos no supone un riesgo añadido, al menos para elementos de riesgo no altamente inflamables. En erupciones basálticas también se proyectan bombas cuyo núcleo permanece fundido, pero su alcance está muy limitado al entorno del centro de emisión.

Las velocidades de impacto o velocidad límite de caída son función de las dimensiones, densidad y forma del proyectil y alcanzan fácilmente los 100 m/s (360 km/h) para una bomba de 20 cm de diámetro y 5 kg. El alcance es función de las dimensiones, forma y densidad del proyectil y de la velocidad de proyección, que depende de la velocidad de salida de los gases en el último tramo del conducto, pudiendo alcanzar 1000 m/s en las erupciones más explosivas. En erupciones basálticas la velocidad de proyección es considerablemente menor (100 m/s). Se han referenciado caídas de bombas hasta a 40 km del volcán, aunque distancias de 5-20 km son las más habituales en este tipo de eventos. La topografía del volcán es otro factor a tener presente, por ejemplo el Stromboli, con una erupción VEI 3 en el año 1930 lanzó un bloque de 30 Tm a 3 km del cráter. La caída de bombas es muy peligrosa para las personas y pueden dañar seriamente las estructuras de los edificios que sufran los impactos. Especial cuidado deberá tenerse con las instalaciones industriales para evitar que el calor residual provoque incendios en productos inflamables. Igualmente las líneas de alta tensión, transformadores, cables, depósitos de agua, etc. deberán protegerse adecuadamente. La caída de lapilli, con velocidad límite mucho menor y alcance limitado, también provoca daños en ventanas y elementos débiles. Su acumulación en techos puede provocar el colapso de los mismos.

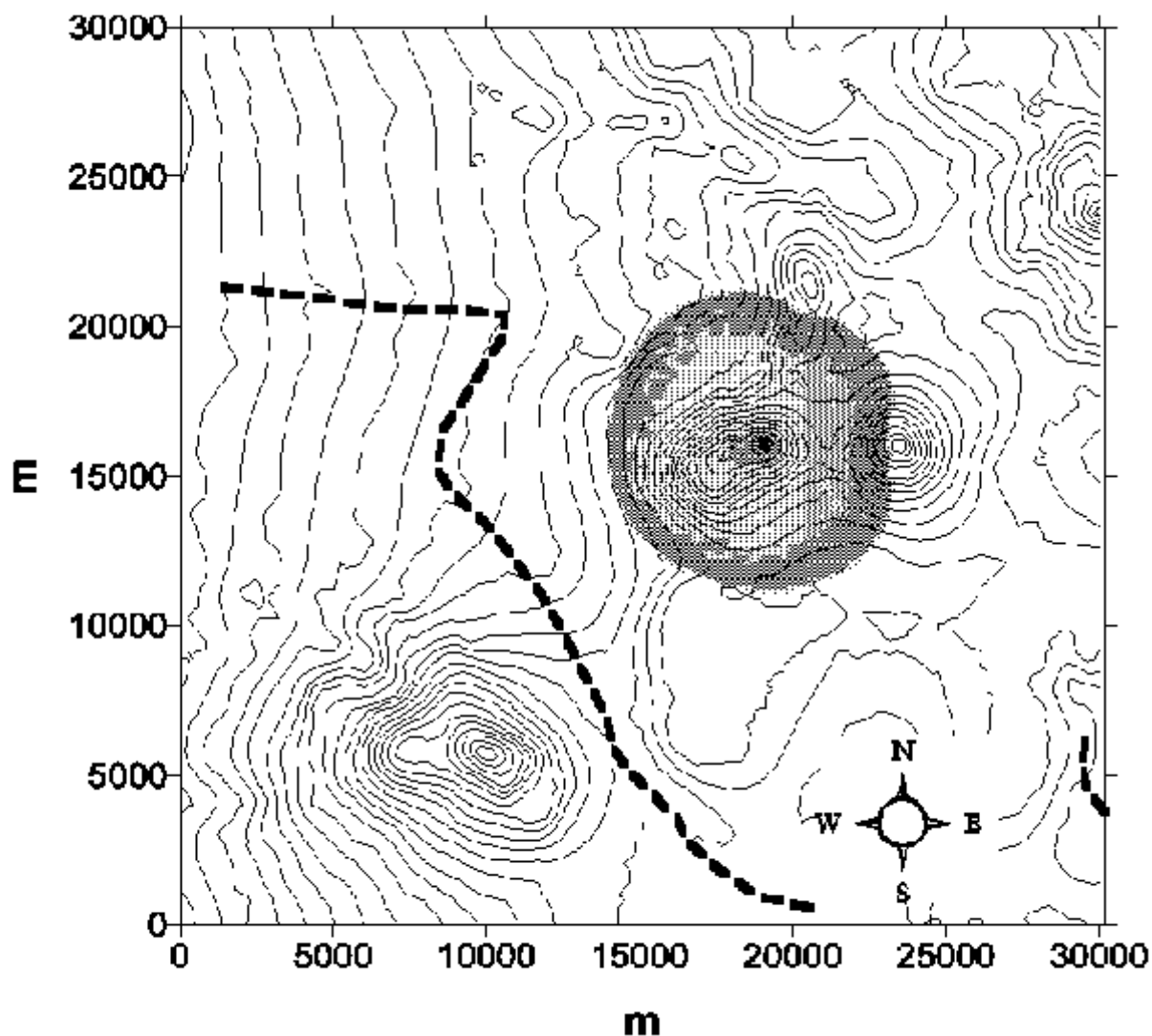
La densidad de los impactos disminuye con la distancia, (los impactos de bombas a más de 10 km del volcán pueden considerarse como muy poco frecuentes), la probabilidad de sufrir daños por caída de bombas es una función que disminuye con la distancia y aumenta con la superficie expuesta de la estructura. Para calcular la distribución de impactos se utiliza la ecuación diferencial del movimiento de una bomba en el aire (Araña y Ortiz, 1984):

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -\rho \frac{c s v^2}{2} \frac{\vec{v}}{v} - m \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_b} \right) \vec{g}$$

que tiene presente la masa de la bomba  $m$ , su densidad  $\rho_b$ , la densidad del aire  $\rho$  que varía con la altura, el factor de forma  $c$ , la sección frontal de la bomba  $s$ , y la gravedad  $g$ . Para velocidades muy pequeñas puede utilizarse la expresión del tiro parabólico:

$$R(\alpha) = \frac{2 \cdot v^2 \cdot \sin(\alpha)}{g}$$

Donde  $V$  es la velocidad de proyección,  $\alpha$  el ángulo de proyección y  $g$  la gravedad. Esta fórmula da siempre valores superiores, por ejemplo a 250 m/s el alcance sin aire es de 6 km, mientras que con aire es de sólo 2.6 km. No hay que olvidar introducir las alturas del centro de emisión y de la zona de impacto. Admitiendo que la proyección se produce con igual densidad en todos los ángulos es fácil determinar la distribución espacial de impactos. La velocidad de proyección se puede obtener estudiando la distribución de impactos en erupciones anteriores o bien ensayando las velocidades más usuales: valores comprendidos entre 250 m/s y 150 m/s son bastante frecuentes. Para establecer el peligro por caída de bombas se calculan los límites de caída para el margen de velocidades de proyección esperadas, teniendo presente los efectos topográficos (muy importantes).



**Figura 2-5** Volcán Lascar: Zona de caída de bombas, de 30 cm y proyectadas a 300 m/s, evaluada considerando el efecto topográfico y el frenado por aire.

A altas velocidades de proyección, el alcance de una bomba es tanto mayor cuanto mayor sea su tamaño, los impactos de los que se tiene conocimiento a más de 6 km son de bombas de varias toneladas.

Para las cosechas, el riesgo de destrucción disminuye con la distancia aunque existe el problema añadido de los incendios en zonas proximales. Para las zonas cubiertas de lapilli se pueden aplicar los mismos criterios que para la caída de piroclastos.

El relación con las vidas humanas, el riesgo por impacto de bombas es pequeño, especialmente si lo comparamos con el riesgo de las oleadas y coladas piroclásticas. Evidentemente el impacto directo de una bomba provoca heridas o muerte, pero la densidad

a una cierta distancia del volcán es suficientemente baja para que la probabilidad de impacto sea muy pequeña. Un casco ofrece suficiente protección frente a la caída de lapilli. La caída de las bombas en las proximidades de los cráteres es un hecho muy frecuente en volcanes con actividad moderada. Ello provoca todos los años víctimas mortales entre los turistas que se acercan demasiado al volcán en su afán de contemplar de cerca una erupción.

#### 2.2.4. Dispersion y caída de piroclastos

De todos los peligros volcánicos es éste el que presenta una mayor superficie afectada, habiéndose constatado daños a más de 4.000 km del volcán. El material fino es arrastrado en la columna convectiva hasta grandes alturas, donde se dispersa por el efecto combinado de la difusión y el arrastre del viento. La caída de las partículas se hace en función de su velocidad límite, la cual disminuye rápidamente con el tamaño, alcanzando valores tan pequeños que algunas partículas pueden permanecer varios meses en la alta atmósfera. En general, cuando la ceniza cae lo hace ya fría, la característica más importante de estas partículas es la de ser tremendamente abrasivas, por lo que provocan importantes daños en todo tipo de maquinaria, desde motores de aviación hasta impresoras o discos de ordenador, etc. Los vehículos sufren considerables daños al circular por vías cubiertas de cenizas. Es importante tener esto en cuenta, ya que la maquinaria que se utiliza para retirar los depósitos piroclásticos quedará fuera de uso en muy poco tiempo al no estar preparada para sufrir tan fuerte desgaste. En Japón donde son frecuentes estos problemas, han tenido que diseñar máquinas especiales para la limpieza de piroclastos. Los filtros ordinarios de los motores se taponan en poco tiempo, siendo necesario utilizar filtros con capacidad de separación de las cenizas.

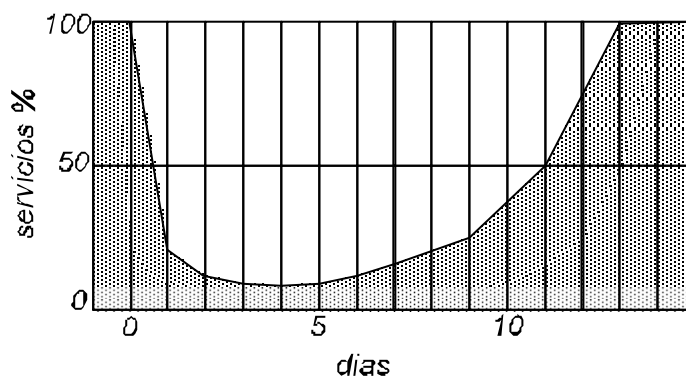
**Tabla VII EFECTOS PROVOCADOS POR LAS CENIZAS EN LOS AVIONES  
(basado en Foreman, 1994)**

impacto	daños directos incluso a miles de millas del volcán
abrasión	daños en bordes, mecánicas y sistemas hidráulicos
acreción	las cenizas se funden en las cámaras de combustión de las turbinas, acrecionando y provocando importantes daños al motor. Flameo de la turbina.
corrosión	los gases volcánicos combinados con agua forman ácidos
adhesión	la ceniza se adhiere a las superficies, taponando el sistema de refrigeración y sensores.
psicológicos	los ocupantes del avión notan la presencia de gases y partículas en el aire

Las propiedades físicas y químicas de las cenizas volcánicas dependen de las proporciones relativas en vidrio, minerales y fragmentos líticos, de las composiciones químicas de cada uno de ellos, así como de su tamaño. La erupción del Mt. St. Helens del 18 de Mayo de 1980,

permitió realizar un estudio minucioso de las propiedades de las cenizas y de su variación con la distancia. La dureza varía entre 2 y 7 en la escala de Moh, aunque puede tomarse 5.5 como valor medio, que corresponde al vidrio. Debemos recordar que muchos abrasivos industriales se obtienen de cenizas volcánicas. Los datos siguientes corresponden a un punto situado a 50 km del volcán, donde la caída de cenizas duró 20 horas alcanzando un espesor sin compactar de 188 mm. La densidad para la ceniza compactada varía entre 0.7 y 1.89 g/cm<sup>3</sup>, siendo el valor medio de 1.54 g/cm<sup>3</sup> para una compactación del 60% y un diámetro de 75 μm. La concentración media de la ceniza en el aire es de 174 μg/m<sup>3</sup>. La conductividad eléctrica correspondiente a la ceniza humedecida (1:1 agua/ceniza) varía desde 214 Ωm para cenizas de grano inferior a 74 μm hasta 1640 Ωm para tamaños superiores a 0.8 mm. Este aumento de la conductividad eléctrica al disminuir el tamaño de grano provoca que los mayores daños en los sistemas de distribución de energía se produzcan en las zonas afectadas por caída de cenizas más alejadas del volcán (Heiken et al. 1995).

La densidad de la ceniza varía entre 0.5 y 2 g/cm<sup>3</sup>, dependiendo de la compactación que experimente y del contenido en agua. Esto supone para 1 cm de ceniza cargas de hasta 20 kg/m<sup>2</sup>. La ceniza se acumula en tejados lisos con pendientes menores de 20°. Se ha constatado el colapso de tejados con espesores de sólo 2-3 cm de ceniza. En zonas muy expuestas a la caída de cenizas deben construirse los tejados de forma que impidan su acumulación, así como el bloqueo del sistema de drenaje (Deguchi, 1988). La erupción del Mount St. Helens permitió estudiar los efectos provocados por la caída de cenizas en poblaciones con alto grado de desarrollo (Warrick, et al., 1981). La caída de unos pocos cm de ceniza bloqueó completamente todas las actividades, tardando entre 5 y 10 días en recuperar todos los servicios (Figura 2-6).



**Figura 2-6** La figura muestra el bloqueo de los servicios en una población tras la caída de 10 cm de ceniza. Erupción de Mount St. Helens de 1980. (modificado de Warrick, 1981)

Los equipos electrónicos sufren importantes daños tanto por la capacidad abrasiva de la ceniza como por su comportamiento eléctrico. Las cenizas son tremendamente conductivas cuando están humedecidas, hecho que es bastante frecuente, provocando importantes cortocircuitos. Es importante tenerlo muy presente en las plantas generadoras de energía y estaciones transformadoras. Igual cuidado deberá tenerse con el sistema de agua, bombas, filtros y válvulas, muy susceptibles a sufrir daños por la caída de una fina capa de cenizas.

<b>Tabla VIII EFECTOS PROVOCADOS POR LA CAIDA DE CENIZA EN LOS SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA (Heiken et al., 1995)</b>	
<b>PROBLEMA</b>	<b>POSIBLES SOLUCIONES</b>
Acumulación de ceniza seca en los sistemas de distribución. Especialmente en aisladores.	Limpiar con chorro de aire y cepillos. Vientos superiores a 40 km/h remueven hasta el 95% de la ceniza siempre que ésta se mantenga seca.
Acumulación de ceniza húmeda. Las condiciones meteorológicas durante la caída de cenizas gobiernan la adherencia de la ceniza a las superficies y su conductividad eléctrica. Una capa de ceniza de sólo 3-6 mm es equivalente a un depósito de sal de 0.3 0.6 mg/cm <sup>2</sup> que en la normativa IEEE corresponde a una grave contaminación. Daños importantes en líneas de 115 kV. Los aisladores de resina EPOXI resultan especialmente vulnerables.	Una lluvia intensa remueve 2/3 del depósito. Se recomienda el empleo de aisladores de porcelana en toda la zona de posible caída de las cenizas. Hay que limpiar cuidadosamente la ceniza de los transformadores y aisladores de las subestaciones. En ellas es conveniente disponer de un sistema de chorro de aire a presión.
Gran acumulación de cenizas en la grava del parque de maniobras de una subestación provoca una pérdida importante de aislamiento (100 Ωm) haciendo muy peligrosa cualquier operación.	Recubrir el suelo con una nueva capa de grava limpia.
Gran acumulación de cenizas (más de 15 cm), especialmente si está húmeda, provoca el colapso de los tejados.	Retirar la ceniza de los tejados. Hay que ir con cuidado ya que la ceniza humedecida es muy resbaladiza. Retirar la acumulación de cenizas de las proximidades de los edificios. Fijar las cenizas para evitar futuras removilizaciones por el viento y disminuir el contenido en polvo del aire.
Caída de árboles sobre las líneas de alta tensión debido al peso de la ceniza.	Mantener adecuadamente la limpieza del entorno de la línea de alta tensión.
Atascos en los filtros de los sistemas de ventilación de los ordenadores y sistemas de control	En zonas de riesgo hay que disponer de un número extra de filtros de aire.
Problemas en los sistemas de aire comprimido	Cambiar más frecuentemente los filtros.
Sobrecarga en los ventiladores de los transformadores debida a la acumulación de ceniza	Limpiar cuidadosamente las palas de los ventiladores. La ceniza húmeda es muy difícil de remover y suele exigir una limpieza a fondo.
Incremento del ruido inducido por las líneas de alta tensión (500 kV) alcanzando valores de 39-48 dB	No hay remedio

Vehículos inmovilizados: atasco en los filtros de aire, aceite o combustible. Pérdida de la visibilidad del conductor por la caída de la ceniza o por acumulación de la misma (húmeda) en el parabrisas.	Importante reserva de filtros. Utilizar un sistema de pre-filtro. Cambiar el aceite frecuentemente. No mover el vehículo si no es por razón de una emergencia
Daños en actuadores hidráulicos, rodamientos, interruptores, etc. Las cenizas volcánicas son muy abrasivas.	Limpiar y lubricar el material expuesto frecuentemente.
Elevado contenido en polvo volcánico en el aire. Problemas pulmonares.	Los trabajadores deben llevar máscara antipartículas. La ceniza debe estabilizarse para evitar que su removilización siga dañando los sistemas.
La caída de la ceniza provoca una gran oscuridad. El encendido imprevisto y rápido de los sistemas de alumbrado origina un pico en la demanda de energía que sobrecarga el sistema.	Anuncios por radio-tv para que la población ahorre energía.
Fuerte erosión en los álabes de las turbinas de los generadores que utilizan gas.	En general la caída de cenizas es lo suficientemente excepcional para no plantear un problema. En zonas donde la caída de cenizas es frecuente no puede utilizarse este tipo de generadores

**El material fino disminuye rápidamente la capacidad de filtración del suelo, atasca las conducciones y ciega los cauces de agua, aumentando considerablemente el riesgo de inundaciones. Al tratarse de material extremadamente fino es muy fácil que penetre en salas limpias como pueden ser quirófanos, laboratorios farmacéuticos, mecánica de precisión, óptica o en la industria de la alimentación provocando todo tipo de problemas.**

**Una capa de sólo 1-2 mm de piroclastos provoca daños de suma importancia en la industria con equipamiento mecánico, eléctrico o químico. La maquinaria expuesta deberá ser sometida a un cuidadoso procedimiento de limpieza, de otro modo en poco tiempo empezarán a aparecer importantes problemas como consecuencia de la abrasión. Igualmente, la limpieza de los depósitos deberá hacerse con maquinaria especialmente preparada para trabajar en medios muy abrasivos (Matsura et al., 1988, Satoh, 1988)**

**El coste de la limpieza no es proporcional al espesor del depósito de cenizas, sino de la complejidad del elemento afectado (Tiedemann, 1992). La utilización de material dañado por la erupción (por ejemplo madera, lanas) provoca daños no esperados en la maquinaria utilizada en su procesado.**

**Los depósitos de cenizas pueden permanecer mucho tiempo sin fijar, especialmente en zonas**

áridas, siendo removidos fácilmente por el viento, organizándose megatormentas de polvo que propagan el desastre mucho más lejos y durante mucho tiempo. Especialmente dañino resulta este tipo de fenómeno para la ganadería, arruinando pastos y dañando considerablemente la lana, que queda inservible al retener las cenizas.

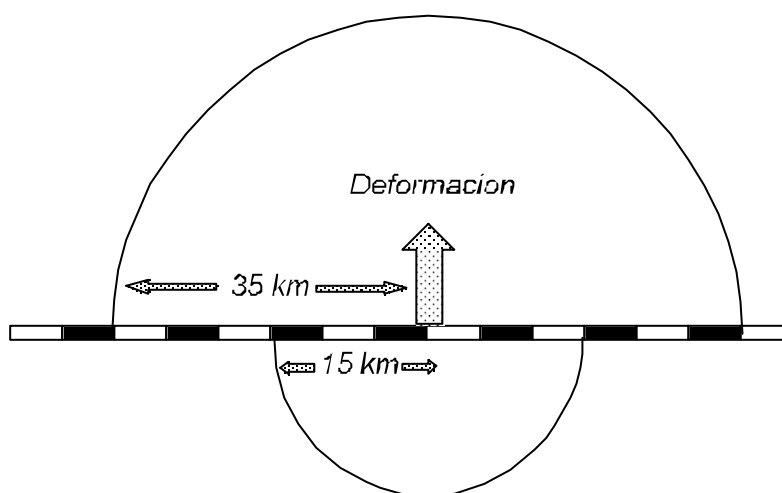
Para las vidas humanas el riesgo por caída de piroclastos es muy pequeño, salvo el asociado al colapso de las techumbres. Evidentemente en zonas proximales, la caída de grandes volúmenes de cenizas sería un factor de riesgo muy importante, pero estas mismas zonas están también afectadas por la densa caída balística de bombas y por las oleadas y coladas piroclásticas. Salvo en la zona proximal no son de esperar quemaduras producidas por la caída de cenizas. Los efectos sobre la agricultura dependen del tipo de cultivo, de su grado de desarrollo y evidentemente del espesor de la capa de cenizas caída (Cook, 1981). Sin embargo, en el trópico la vegetación se recupera en muy poco tiempo: zonas cubiertas con más de 20 cm de lapilli por la erupción del volcán Cerro Negro (Nicaragua) de diciembre 1995 en septiembre de 1996 estaban ya completamente recuperadas.

<b>Tabla IX DAÑOS EN LA AGRICULTURA PROVOCADOS POR LA CAÍDA DE CENIZAS (basado en Blong 1984)</b>	
<b>espesor mm</b>	<b>CULTIVOS</b>
>2000	Toda la vegetación queda destruida
1500 1000	La mayor parte de la vegetación muere. Parcialmente recuperable
200	Arrozales destruidos
150	Cafetales destruidos
100	Palmas y ramas rotas por el peso de las cenizas
50	Plataneras destruidas. Otros cultivos deben cosecharse prematuramente.
40	50% de pérdidas en legumbres, 15-30% en trigo, verduras, cebada, heno, etc.
30	Daños en cerezas y otros. Los frutos pueden quedar inservibles por la capa de ceniza.
25	Daños en caña de azúcar, patatas, etc.
20	Daños considerables en naranjas, mandarinas, moras y otros frutos y verduras. 30% en legumbres
15	Pérdidas de pastos. Incluso si es afectada una vez recogida tampoco es utilizable.
10	Daños en manzanas, balas de algodón, plátanos, tabaco y verduras. 20-40% de la cosecha dañada
<10	Menores daños en pastos, trigo y maíz.

Los gases retenidos en las cenizas se liberan lentamente, pudiendo provocar problemas respiratorios y asfixia, especialmente en zonas donde la acumulación de cenizas es importante. La exposición a las cenizas volcánicas trae consigo la aparición de problemas médicos, agravándose las dolencias respiratorias. Además, el polvo volcánico contiene minerales semejantes a los asbestos que producen asbestosis. Un factor muy importante a tener en cuenta es la posibilidad de que las cenizas arrastren algún tipo de elemento nocivo, como arsénico o flúor. Estos elementos se disuelven en el agua y contaminan suelos, pastos y especialmente la red de distribución de agua potable. Una recopilación de datos sobre tamaño, forma y composición de cenizas volcánicas se puede encontrar en Heiken y Wohletz, 1995.

### 2.2.5. Explosión dirigida

Teóricamente, la explosión dirigida constituye el episodio más dañino de una erupción, ya que desencadena una combinación de oleadas, coladas piroclásticas y proyecciones balísticas. La dispersión de estos flujos se realiza con un ángulo muy bajo, pero que se abre hasta cubrir un sector de  $180^\circ$  afectando a decenas de kilómetros (Scott 1989). En este siglo se han podido observar dos eventos de este tipo: la explosión del Bezymianny ocurrida en 1956 y la del Mount St. Helens en 1980. La superficie afectada alcanzó los  $500 \text{ km}^2$  destruyendo todo tipo de vida y estructuras a consecuencia de la onda de presión, el impacto de los piroclastos y líticos, la abrasión producida por la proyección de las cenizas y finalmente la onda térmica ( $300^\circ\text{C}$ ).



**Figura 2-7** Zonificación para una explosión lateral. Basado en Crandell y Hoblitt, 1986.

Este tipo de fenómenos va siempre precedido por una importante deformación del aparato volcánico, debida al proceso de inyección que se desarrolla internamente. La aparición de grietas en la superficie señala la existencia de zonas débiles donde se producirá el fallo del

edificio (Crandell y Hoblitt, 1986). Al ser éste un proceso lento es posible establecer con suficiente tiempo el mapa de peligrosidad.

#### 2.2.6. Gases volcánicos

Los gases volcánicos en general sólo plantean problemas muy cerca de las bocas eruptivas y campos fumarolianos, pues se diluyen rápidamente en la atmósfera a niveles inferiores al umbral de toxicidad. Sin embargo, en algunas circunstancias pueden resultar nocivos e incluso mortales: Alguno de estos gases, como el  $\text{CO}_2$  es más pesado que el aire, por lo que tiende a acumularse en las zonas bajas, tales como valles o barrancos. El  $\text{CO}_2$  es además uno de los componentes mayoritarios de los gases volcánicos, por lo que puede concentrarse en grandes cantidades y desplazarse ladera abajo como un flujo denso, asfixiando a todo ser vivo que encuentre a su paso. Bien conocidos son los Lagos de la Muerte, en Indonesia, que son lagos cratéricos muy cerrados donde se acumula el  $\text{CO}_2$ . En ocasiones se produce una pequeña explosión en el fondo del lago, emitiéndose una cantidad de  $\text{CO}_2$  suficiente para acabar con la vida en los valles situados en la base del volcán (Barberi et al., 1989b). Otra situación tremendamente peligrosa es que se produzca un pequeño deslizamiento de ladera en un cono con abundante emisión fumaroliana, la nube de gas podría provocar la muerte de los habitantes situados en las proximidades del cono (Martini, 1993).

La población que vive en la base de un volcán activo está muy expuesta al peligro que supone una emisión de gas, debida por ejemplo a un pequeño deslizamiento de ladera (Caruso et al., 1995). En general, las referencias más abundantes de daños asociados a gases volcánicos corresponden a procesos de desgasificación de lavas y piroclastos. Es frecuente que en zonas cubiertas por importantes espesores de cenizas o lapilli se produzca una acumulación de gases que provoca problemas médicos o incluso la muerte.

Otro factor de riesgo lo constituye la lluvia ácida producida al formarse las gotas de agua sobre aerosoles volcánicos que actúan como de núcleos de condensación. Este hecho provoca una importante deforestación que se ha constatado a más de 500 km de un volcán con actividad persistente, incluso en zonas tropicales. Los tejados con recubrimiento de chapa metálica sufren una importante corrosión. Hay que destacar que hoy en día muchos de los elementos de riesgo de nuestra sociedad son más sensibles a este tipo de problemas que la piel humana. Las pérdidas por corrosión de elementos eléctricos o electrónicos, motores etc, causada por los gases volcánicos y derivados pueden llegar a ser muy cuantiosas.

#### 2.2.7. Colapso del edificio

Este evento que se produce frecuentemente a pequeña escala, en ocasiones puede afectar a una parte considerable del edificio volcánico. En general, los pequeños colapsos se deben analizar con la técnica habitual de estudio de taludes. Los colapsos de gran magnitud se producen asociados a otros procesos volcánicos, especialmente emplazamiento de criptodomas, fuerte actividad hidrotermal, etc. Esto es consecuencia de que el edificio

volcánico es intrínsecamente muy estable (Borgia, 1994) y sólo la degradación local de las características mecánicas del material posibilita estos grandes colapsos, que por esta razón, presentan una movilidad mayor que en las avalanchas de origen no volcánico (Ui, 1983; Siebert, 1984).

Los materiales afectados por el colapso se mueven gravitacionalmente, pudiendo recorrer casi 100 kmy aparecer distribuidos cubriendo varios centenares de km<sup>2</sup>. Las vulnerabilidades para estos eventos se estiman fácilmente en base al conocimiento que se tiene de procesos similares no volcánicos (ver Alexander, 1993).

#### 2.2.8. Deformación del terreno

Es frecuente en zonas volcánicas activas que se produzcan procesos lentos de deformación (*bradisismos*) que suelen ir acompañados de una moderada sismicidad. Aunque los procesos más frecuentes son de deformación vertical, el terreno se infla a causa de una inyección magmática o un aumento en la presión de un acuífero geotérmico, también se han constatado casos de deformación horizontal y subsidencia (Barberi et al., 1984). Estos procesos afectan extensiones considerables de terreno (km), alcanzan velocidades de deformación de varios cm/día y deformaciones finales de varios metros. Los procesos de deformación provocan importantes daños en estructuras y vías de comunicación. Por otra parte, la alteración del relieve desencadena nuevos y rápidos procesos de erosión y sedimentación que afectan muy negativamente a la zona. Aunque estos procesos suelen ser precursores de una erupción, ésto no siempre ocurre, siendo frecuente que al cabo de un cierto tiempo se produzca un proceso de subsidencia.

La lentitud con la que se produce el fenómeno permite la evacuación de toda la población, sin embargo, las estructuras sufren muchos daños, debido a fenómenos de deformación diferencial y especialmente a la inclinación de la base. Un fenómeno asociado que debe tenerse en cuenta es que la deformación cortical puede desestabilizar el edificio volcánico, dando lugar a diversos tipos de avalanchas o facilitando importantes fenómenos de erosión (Kadomura et al., 1983)

#### 2.2.9. Lahares

Un lahar es un flujo denso producido al fluidizar el agua los materiales volcánicos, especialmente piroclastos. Estos flujos presentan una gran movilidad por lo que pueden recorrer grandes distancias. La elevada densidad del flujo le confiere una gran capacidad de transporte. Los lahares son tremendamente destructivos, ya que pueden recorrer grandes distancias, siguiendo valles y alcanzando poblaciones aparentemente protegidas del volcán. La presencia de lagos cratéricos, hielo o nieve en la cumbre del volcán son factores primarios para la producción de lahares, pero también pueden desencadenarse por lluvias intensas como es frecuente en el trópico (volcán Concepción, Nicaragua). Hay que tener presente que un

lahar puede desencadenarse en una erupción pequeña ( $VEI < 2$ ) pero sus daños pueden ser muy elevados. En ocasiones el lahar puede producirse a cierta distancia del volcán, por ejemplo la acumulación de cenizas puede provocar la inestabilidad de un glaciar situado a decenas de kilómetros del volcán (erupción del Lascar de 1993). En las grandes erupciones, con emisión de volúmenes importantes de cenizas, los lahares se producen durante mucho tiempo, prolongando los daños provocados por la erupción durante meses o años (la erupción del Pinatubo en 1991 puede servir de referencia).

Los lahares más destructores pueden modelarse de forma bastante ajustada ya que transcurren confinados en los grandes valles. Esta modelización permite evaluar la altura que alcanzará el lahar en cada tramo de su cauce y estimar la deposición (Macedonio y Pareschi, 1992). Las zonas cubiertas por espesores importantes de fangos son difícilmente transitables, lo que supone un grave problema para auxiliar a las víctimas. La evaluación del riesgo de los lahares es similar a la que se realiza para las grandes avenidas. Los factores de tipo volcánico son marginales en la valoración del impacto del lahar. Es importante, en zonas donde se ha producido una acumulación importante de cenizas, controlar los ritmos de precipitación, ya que al superar una cierta tasa se producirá la fluidización de la masa de cenizas, iniciándose el lahar (Hirano y Hikida, 1988; Matsukura, 1988).

Los efectos de los lahares son fácilmente predecibles y por consiguiente es posible realizar obras para minimizarlos. Desde una adecuada ordenación del territorio que pasa por mantener despejados los cauces hasta la construcción de grandes obras hidráulicas que canalizan el lahar y mediante un sistema escalonado de defensas retienen los materiales arrastrados y dejan pasar el agua. Muchas de estas defensas pueden realizarse con medios económicos, como es el adecuado uso de la vegetación y la utilización de jaulas metálicas llenas con bloques de piedras.

#### 2.2.10. Ondas de presión

Este fenómeno, asociado a las explosiones volcánicas, se propaga a la velocidad del sonido (330 m/s). A distancias moderadas del volcán puede producir pequeños daños, especialmente rotura de cristales y heridas al proyectarse estos. La rotura de cristales, incluso con erupciones moderadas ( $VEI 2$ ), se puede producir a más de 10 km del volcán. Refinerías y complejos químicos son elementos de riesgo muy vulnerables por este tipo de evento y se debe estudiar con especial atención la posibilidad de que se produzcan detonaciones, incendios o escapes de productos peligrosos (Tiedemann, 1992). Sólo en las grandes erupciones explosivas ( $VEI 7$ ) se tienen noticias de daños importantes a estructuras asociados a las ondas de presión.

<b>Tabla X EFECTOS DE UNA ONDA DE PRESIÓN</b>	
<b>Sobrepresión Pa</b>	<b>Daños</b>
0-50	No provoca daño alguno.
50-100	Ligeros en circunstancias especiales.
100-250	Daños incipientes en las estructuras.
30000	Rotura del tímpano.
100000	Daños en los pulmones.

### 2.2.11. Terremotos volcánicos

Los terremotos volcánicos son, a efectos de riesgo, exactamente iguales a los terremotos tectónicos, por lo que la extensa experiencia en valoración del riesgo sísmico se puede aplicar en este caso. Sin embargo, la pequeña magnitud que presentan generalmente los eventos típicamente volcánicos, hace que el número de víctimas producidas por ellos sea insignificante frente a los otros factores de peligro volcánico. Es importante destacar que muchas zonas volcánicas también son zonas sísmicas y están declaradas como tales, existiendo por lo tanto una determinada normativa para el tratamiento del riesgo sísmico. Sin embargo, es necesario tener presente el diferente contenido espectral y especialmente que la sismicidad volcánica se presenta en enjambres con muchos cientos de eventos diarios, lo que produce un efecto de fatiga en las estructuras, provocando su colapso.

La crisis de Puzzoli de 1983-85 puede servir de ejemplo (Barberi et al, 1984). No es extraño que los sismos volcánicos alcancen intensidades elevadas en las zonas próximas al volcán, pudiendo llegar a provocar el colapso de algunas edificaciones. En algunas erupciones de volcanes andesíticos los temblores volcánicos (sismos y *tremor*) pueden llegar a ser perceptibles por las personas a más de 50 km del volcán.

### 2.2.12. Tsunamis

Algunos de los más famosos tsunamis de la historia (Krakatoa, Unzen, Santorín) están asociados a eventos volcánicos. Erupciones en aguas someras o en un lago, colapso de calderas en islas volcánicas, deslizamiento de laderas sobre el mar son las causas conocidas de tsunamis originados por erupciones volcánicas. Al igual que para el caso de los terremotos, los efectos de los tsunamis son bien conocidos y se pueden modelar adecuadamente. Existe una abundante experiencia en la valoración del riesgo de los tsunamis, independientemente de su origen (Ferrerías y Sanchez, 1991).

### 2.2.13. Tormentas

Una gran erupción volcánica supone una considerable inyección de energía térmica en la atmósfera, además del importante volumen de cenizas y gases aportados. Es frecuente que este proceso desencadene una fuerte tormenta, con notable aparato eléctrico y vientos que pueden llegar a ser huracanados, incluso a gran distancia del volcán. Estas tormentas pueden también causar importantes daños, similares a los producidos por huracanes y lluvias torrenciales. Este hecho obliga a que en los complejos industriales, especialmente refinerías e industria química, se extreme la protección contra los rayos, aunque no sean habituales las tormentas con aparato eléctrico en la zona.

Un efecto añadido es que una erupción provoca importantes alteraciones del campo electromagnético, que dificultan, cuando no imposibilitan, las comunicaciones radioeléctricas. Hay que tenerlo presente, ya que todo el sistema de comunicaciones de la emergencia puede verse fuertemente alterado o bloqueado.

## 2.3 ERUPCIONES VOLCANICAS Y SALUD

Aunque la vulnerabilidad del hombre se ha analizado con cada peligro volcánico, es interesante realizar un primer análisis de los efectos que la actividad volcánica produce en la salud humana (ver p. ej. Baxter, 1990). Los datos de que se dispone hacen referencia al volcanismo explosivo, ya que los efectos del volcanismo efusivo directamente sobre el hombre son muy limitados, salvo que el afectado se acerque peligrosamente a las bocas eruptivas o coladas lávicas. La experiencia<sup>2</sup> obtenida en la erupción del Mount St. Helens en 1980, muestra que la mortalidad debida a asfixia (76%), quemaduras (12%) o traumas (12%) por cenizas y otros peligros volcánicos fue directamente proporcional al grado de los daños producidos en el entorno.

Un caso especial lo constituye la silicosis, que afecta a las poblaciones que viven muy cerca de volcanes con actividad persistente, con magmas relativamente ricos en sílice y que emiten continuamente cenizas muy finas. Un volcán como el Sakurajima entre 1978 y 1986 llegó a emitir 2.366 Tm de polvo volcánico por  $\text{km}^2$  y mes. Sin embargo, las investigaciones muestran que en el área de influencia del Sakurajima el riesgo de problemas respiratorios es pequeño, debido a que las partículas son demasiado grandes (Shirakawa, 1988).

---

<sup>2</sup> Las actuaciones médicas durante la erupción del Mount St. Helens están recopiladas en un volumen especial del American Journal of Public Health, Vol 76, 1986.

<b>Tabla XI EFECTOS DE LOS GASES VOLCÁNICOS</b>		
<b>Gas</b>	<b>Toxicidad mg/m<sup>3</sup></b>	<b>Efectos</b>
CO <sub>2</sub>	9000	Asfixia
CO	115	Envenenamiento de la sangre, mortal
SO <sub>2</sub>	13	Inflamación de la piel, ojos, nariz y garganta
SH <sub>2</sub>	28	Irritación y asfixia
SO <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	1	Quemaduras, dermatitis, inflamación del sistema respiratorio
F <sub>2</sub>	0.2	Cáustico, degeneración de los huesos
HF	2	Corrosión de la piel y mucosas
HCl	7	Irritación de los ojos y sistema respiratorio
NH <sub>3</sub>	79	Irritación de la piel, ojos, nariz y garganta

<b>Tabla XII EFECTOS SOBRE LA SALUD, LEJOS DEL CENTRO ERUPTIVO POR CAÍDA DE CENIZAS Y EMISIONES GASEOSAS</b>	
<b>RESPIRATORIOS</b>	
Inhalación de cenizas ( <10µm )	Asma. Empeoramiento de enfermedades pulmonares
Inhalación de polvo silíceo cristalino	Silicosis por exposición prolongada al aire libre
<b>TÓXICOS</b>	
Ingestión de agua contaminada con flúor y posiblemente con metales pesados (arsénico, mercurio, etc)	Trastornos gastrointestinales (incluso la muerte en personas vulnerables o con males crónicos)
Ingestión de alimentos contaminados (incluida la leche)	
<b>OCULARES</b>	
Cuerpos extraños en los ojos	Conjuntivitis. Abrasiones en la córnea
<b>MECÁNICOS</b>	
Hundimiento de techos y caída brusca de cenizas acumuladas en los tejados.	Traumas
Accidentes de automóviles (carreteras resbaladizas y escasa visibilidad)	Traumas
Accidentes aéreos	Fallo en los motores.
Interferencias en radio y televisión	Imposibilidad de recibir alarmas
Mala visibilidad	Interrupción del transporte de emergencia. Aislamiento de casas y viajeros.
Fallos en el suministro eléctrico	Interrupción de servicios.

<b>Tabla XIII PELIGROS PARA LA SALUD, LA SEGURIDAD Y EL BIENESTAR PRODUCIDOS POR LA ACTIVIDAD VOLCANICA EXPLOSIVA</b>	
<b>Categoría genérica de los daños</b>	<b>Ejemplos específicos y posibles efectos</b>
Directos e inmediatos	<p>Bombas, coladas lávicas, coladas y oleadas piroclásticas, sismos.</p> <p>Inhalación de cenizas y gases (irritación del tracto respiratorio por SO<sub>2</sub>, envenenamiento por CO, sofocación por CO<sub>2</sub> o cenizas)</p> <p>Ingestión de agua o elementos contaminados</p> <p>Problemas psicosociales, ambientales y económicos producidos por rumores o incertidumbre sobre los riesgos presentes o futuros, por la interrupción de servicios y actividades rutinarias, por la evacuación a lugares o campos de refugiados, por el desplazamiento a zonas alejadas, por la destrucción de propiedades y bienes.</p>
Indirectos e inmediatos	Avalanchas, lahares, rayos, incendios, tsunamis.
Indirectos y retardados	<p>Aumento del potencial patogénico de patógenos pulmonares tóxicos e infecciosos, debidos a los efectos tóxicos e irritantes de gases y cenizas en los mecanismos de defensa pulmonar.</p> <p>Problemas psicológicos resultantes de los intensos o prolongados disturbios en el ambiente y la sociedad.</p>