

3 MAPAS DE RIESGO. MODELIZACIÓN

A. Felpeto; A. García y R. Ortiz

Un mapa de riesgo volcánico ¹ es una cartografía de las zonas afectadas por la actividad volcánica en función del valor esperado de las pérdidas, para un determinado período de exposición. Sin embargo, esto no es tan fácil de realizar, especialmente porque aparecen mezclados varios conceptos en el tipo de información, para qué se quiere utilizar el mapa y quienes son los destinatarios. Es importante definir claramente qué producto se desea cuando se inicia la realización de un mapa de riesgo volcánico, especialmente si se emplea una tecnología como los Sistemas de Información Geográfica que, en principio, es capaz de soportar todo tipo de datos pero no siempre es posible extraer la información necesaria en cada momento. Para ello, los datos deben estar estructurados de una determinada manera y haber definido cómo acceder a ellos y a sus combinaciones, de forma que sean útiles para la prevención del riesgo volcánico.

Por otra parte, un mapa de riesgo volcánico afecta seriamente los intereses de corporaciones e individuos. Las presiones sobre los investigadores para que una zona aparezca o no afectada en el mapa son muy fuertes, especialmente cuando la zona se reactiva y los habitantes son conscientes de ello. Además, el grado de responsabilidad sobre la zona a proteger no está claro. Ciudadanos y corporaciones tienden a transferirla al Gobierno Regional y al Nacional, independientemente del grado actual de responsabilidad. La educación adquiere una importancia relevante. La educación sobre este tipo de fenómenos naturales es escasa y muy deficiente y por ello es muy importante tener previsto cómo debe ser la información que se debe proporcionar a los habitantes de una posible zona afectada. La aplicación de este tipo de estudio es clara cuando se trata de aparatos volcánicos en actividad continua o que por las características especiales de su estado actual, como es la presencia de un domo en evolución, de una cámara magmática somera activa o de erupciones casi continuas, sea posible conocer cuál será la evolución normal del sistema y establecer el modelo correspondiente.

Situación muy distinta es cuando en una área volcánica activa se desencadena una crisis. En tal situación hay una serie de indicadores que se activan y se empiezan a recibir datos por la aplicación de las distintas técnicas de vigilancia de volcanes. Especialmente significativos son en estos casos los datos de la geodesia y de la geoquímica de fluidos: estos datos nos permiten delimitar con bastante precisión la zona donde se está produciendo realmente el fenómeno. Con los conocimientos volcanológicos de la zona es posible reducir a unos pocos

¹ La mayor parte de las fuentes utilizadas en este capítulo procede de organismos oficiales japoneses, pues son quienes tienen más experiencia práctica en la gestión tecnológica de los desastres volcánicos. Una introducción más amplia puede encontrarse en Riesgo Volcánico de V. Araña y R. Ortiz, incluido en la publicación del CSIC *Nuevas Tendencias en Volcanología*.

tipos de mecanismos la posible erupción. La aplicación de los modelos de simulación numérica acoplados directamente al Sistema de Información Geográfica, permite establecer rápidamente los distintos tipos de mapas de riesgo necesarios para afrontar la crisis. Para que esto pueda funcionar es necesario disponer primero del Sistema de Información Geográfica adecuado donde se haya introducido la topografía de la zona con suficiente detalle, conjuntamente con la información geográfica (poblaciones, estructuras, tipos de construcción, polígonos industriales, centros y vías de comunicación) debidamente actualizada, que los programas de modelización estén operativos y sus formatos de entrada y salida de datos sean compatibles. La información meteorológica e hidrogeológica debe estar disponible en tiempo real en el formato requerido por el modelo. Finalmente, se debe integrar las reconstrucciones de las erupciones tipo que se han desarrollado en la zona y que son utilizadas para ajustar los distintos parámetros requeridos por los modelos.

3.1. MAPAS DE PELIGROS VOLCÁNICOS Y MAPAS DE RIESGO VOLCÁNICO

El concepto de mapa de riesgo volcánico no es sencillo, pues son muchos los factores que en él intervienen, tanto en las aproximaciones adoptadas para su realización como para su uso e interpretación. Inicialmente se puede empezar por definir un mapa como unos datos referenciados a un sistema de coordenadas. Seguidamente se deben introducir los siguientes conceptos, adaptados de los utilizados por Alexander (1993) para el caso general:

Mapa base

Topografía y elementos más representativos de la geografía humana como son: comunicaciones, emplazamientos urbanos, límites administrativos, fronteras, etc.

Mapa temático

Aspectos de tipo geológico y geotécnico (suelos, hidrogeología, tectónica, etc.)

Mapa de desastres volcánicos pasados

Representación de eventos catastróficos ocurridos en el pasado: en general son mapas muy confusos, donde sobre una cartografía actual precisa se representa información procedente de la interpretación, más o menos libre, de fuentes históricas.

Mapa de peligros volcánicos

Representación de los peligros presentes en cada punto. En ocasiones, es una recopilación de los desastres pasados en la suposición de que las erupciones futuras respondan a las mismas pautas. De modo más riguroso debe representar los efectos de las erupciones esperadas en un futuro próximo. Se realizan combinando el conocimiento de eventos ocurridos en el pasado con la predicción teórica de los esperados en el futuro.

Mapa de riesgo volcánico

Transformación del mapa de peligrosidad al incluir la población en riesgo y la

vulnerabilidad de las estructuras. Cuantificado en términos de víctimas potenciales o valor estimado de los daños.

Además debemos considerar las siguientes aproximaciones, en función de la aplicación concreta para cada mapa:

Observacional

Representación de cada factor de desastre en función de su impacto en la comunidad, basándose en estudios de la opinión pública, cuantitativos o subjetivos.

Ingeniería

Para uso técnico, presenta la respuesta estructural a cada tipo de peligro.

Interpretativo

Muestra las zonas de peligro o riesgo en función de aquellas áreas susceptibles de ser habitadas o para realizar acciones estructurales encaminadas a la mitigación del riesgo.

Planificación

Mapa para la ordenación del territorio en función de la peligrosidad.

De acuerdo con las recomendaciones de la IAVCEI (Barberi et al., 1990), un mapa de peligrosidad volcánica debe incluir los siguientes aspectos:

- a) Base topográfica, preferiblemente a escala 1:50.000, incluyendo puesta al día de núcleos urbanos, escuelas y hospitales.
- b) Peligros volcánicos directos (producidos por la erupción), incluyendo descripción detallada de cada uno de ellos, especialmente alcances, velocidades y tiempos, y su impacto en el hombre y el medio.
- d) Peligros volcánicos secundarios o inducidos.
- e) Areas afectadas para cada evento aislado y combinación de eventos.
- f) Bases del mapa: fuente de los datos, hipótesis, condiciones de validez, fecha de preparación y período de aplicación.

Un tipo de mapa especial que se utiliza para la preparación de emergencia, es el que se conoce como *escenario volcánico*. Este mapa se realiza para un determinado evento eruptivo, mediante simulación numérica o simplemente transponiendo una erupción ocurrida en el pasado al momento actual. Este tipo de mapa debe evolucionar temporalmente de igual modo a como lo hace la erupción. Esta serie de mapas es muy útil para la formación de los técnicos que deben intervenir en caso de crisis volcánica y para la preparación del material educativo.

3.1.1. Zonificación

Es la división de una región en zonas y su ordenación en función del grado de riesgo frente a un peligro volcánico potencial. Inicialmente, el concepto de zonificación era muy amplio y de hecho sólo permitía definir las áreas volcánicas activas, para obviar esto se introduce el concepto de microzonificación aplicado a una zona concreta (Alexander, 1993). La técnica de la microzonificación se ha diseñado para mostrar la variación espacial del riesgo, a fin de concentrar los recursos y enviar los equipos de emergencia durante los períodos de crisis. A largo plazo, permite dictar normas encaminadas a la ordenación del territorio y construir las infraestructuras del modo menos vulnerable posible. Hay que tener presente que el concepto de microzonificación es siempre local, el aplicarlo a escalas regionales puede traer problemas a largo plazo, al introducirse datos no exactamente equivalentes para cada una de las zonas: una zona de alto riesgo puede quedar enmascarada por otra de menor riesgo pero de la que haya un conocimiento mayor.

Los elementos básicos a tener siempre presentes cuando se trata de zonificación volcánica son: el número de personas expuestas, sus actividades económicas, la localización de las estructuras y servicios de emergencia, y sus vulnerabilidades frente a cada peligro considerado.

El tipo de mapa de microzonificación depende de dos factores: el peligro considerado y el uso al que va destinado:

Mapa de peligro único y un sólo uso

Es el más fácil y barato de realizar, resulta apropiado para resolver situaciones particulares, donde es posible aislar un único tipo de peligro que afecta a una estructura vulnerable muy simple, por ejemplo analizar la caída de piroclastos sobre una zona residencial para realizar el diseño adecuado de las cubiertas.

Mapa de peligro único y múltiple uso

Apropiado cuando el peligro esperado afecta a más de una actividad. Siguiendo con el ejemplo de la caída de piroclastos, se puede conocer, basándose en un único trabajo de campo, el impacto sobre el sistema de comunicaciones (carreteras y aeropuertos), el suministro de agua y energía, las construcciones residenciales y las zonas agrícolas.

Mapa de peligro múltiple y uso múltiple

Este tipo de mapas es el requerido para la ordenación del territorio. Debe incluir todos los peligros esperados en la zona. Por su complejidad es necesario estructurarlo sobre un Sistema de Información Geográfica. Es importante escalar cada peligro en relación con los otros, tanto en magnitud como en períodos de retorno. Recordemos que cada factor de riesgo está definido como combinación de probabilidades, en función de los períodos de retorno y las vulnerabilidades.

3.1.2. Mapas Volcanológico, Administrativo y Educativo

Dependiendo del "destinatario" podemos considerar tres tipos de mapas de peligrosidad volcánica: un mapa que recoja la información estrictamente volcanológica, un mapa de carácter administrativo y un tercero de tipo educativo (Yoshioka, 1992):

Mapa de Peligrosidad Volcánica basado en Estudios Volcanológicos

En él se muestran las áreas peligrosas bajo ciertas condiciones de cada factor de peligro considerado. Se pueden adoptar dos criterios para establecer este mapa: bien reflejando los efectos de una erupción de un tipo concreto en un punto y bajo unas determinadas condiciones meteorológicas o bien un mapa recogiendo todas las posibles erupciones y fenómenos asociados que puedan tener lugar en la zona. El primero es útil para hacer frente a una crisis, mientras que el segundo es de interés muy relativo y sólo sirve a efectos de ordenación del territorio a muy largo plazo. En muchos casos, se opta por realizar un mapa en el que se superponen todas las erupciones posibles en la zona en un tiempo prudencial o que son esperables durante el desarrollo de una crisis. Estos mapas sirven de base para crear el mapa administrativo y el educativo. Este mapa resulta inútil si no existe un equipo de volcanólogos, debidamente coordinado, trabajando en la zona.

Mapa de Peligrosidad Volcánica con Datos Administrativos

Es el mapa útil para la Administración, (no para especialistas en volcanes) y en él se incluyen las medidas a tomar para cada factor de peligro así como las escalas de tiempo correspondientes. Se debe tener presente que sobre este mapa se planificarán las operaciones de evacuación, las contramedidas a tomar y las actuaciones post-desastre. Se realiza revisando y evaluando el mapa volcanológico desde el punto de vista de la gestión de desastres, añadiendo la información referente a vías y centros de evacuación y todos aquellos datos necesarios para la actuación en la emergencia. Este mapa carece de sentido si no existe una normativa para su aplicación.

Mapa de Peligrosidad Volcánica para Uso Educativo de los habitantes

Está basado en el Mapa Administrativo e incluye información precisa para los habitantes y turistas, especialmente sobre las medidas a tomar en caso de un factor de desastre, como son las instrucciones para el caso de una evacuación pues los carteles y anuncios no pueden improvisarse cuando ya se haya desencadenado la crisis. Debe incidirse en recordar que en la misma zona ya han ocurrido antes erupciones y que ello no siempre supone un desastre, así como dar a conocer el fenómeno volcánico. Inútil si no se dispone de centros capaces de difundirlo adecuadamente, como es la Casa de los Volcanes en Lanzarote (Araña, 1994).

Hay que tener presente que la publicación y distribución de estos mapas puede provocar una alarma infundada que afecte seriamente la economía de la zona: disminuye el número de turistas, bajan los precios de las tierras, los seguros se disparan y muchas empresas pueden abandonar la zona o requerir fuertes compensaciones económicas.

Tipos y características de los mapas de peligrosidad volcánica (adaptado de NLA, 1992)

	Tipo de Mapa		
	Volcanológico	Administrativo	Educativo
Propósito	<p>Probabilidad y características de posibles fenómenos volcánicos que puedan realmente desencadenarse en la zona y diversas circunstancias. Es la base para preparar los otros dos mapas.</p>	<p>Zona de influencia para cada fenómeno volcánico. Distribución de las medidas preventivas y procedimiento de actuación en caso de emergencia.</p>	<p>Muestra el área afectada por los fenómenos volcánicos y los procedimientos a seguir en una emergencia. Para su utilización por residentes y visitantes. Mitigar los efectos de la catástrofe.</p>
Contenido	<p>Historia de los desastres ocurridos en el pasado. Área de peligro para cada uno de ellos. Condiciones de predicción. Espesor de los depósitos. Tiempos de recorrido</p>	<p>Área de influencia de cada factor de desastre. Condiciones de predicción. Clasificación de grados de peligro. Localización de refugios. Infraestructura (oficinas municipales, escuelas, hospitales, carreteras, etc.). Zonificación. Sistema de información y alarma.</p>	<p>Zona afectada por el desastre. Condiciones de predicción. Procedimiento de evacuación: punto de reunión, rutas. Procedimiento de recogida de información. Precauciones y normas a seguir en caso de crisis.</p>
Responsable	<p>Autoridad Gubernamental: Local, Regional, Estatal.</p>		

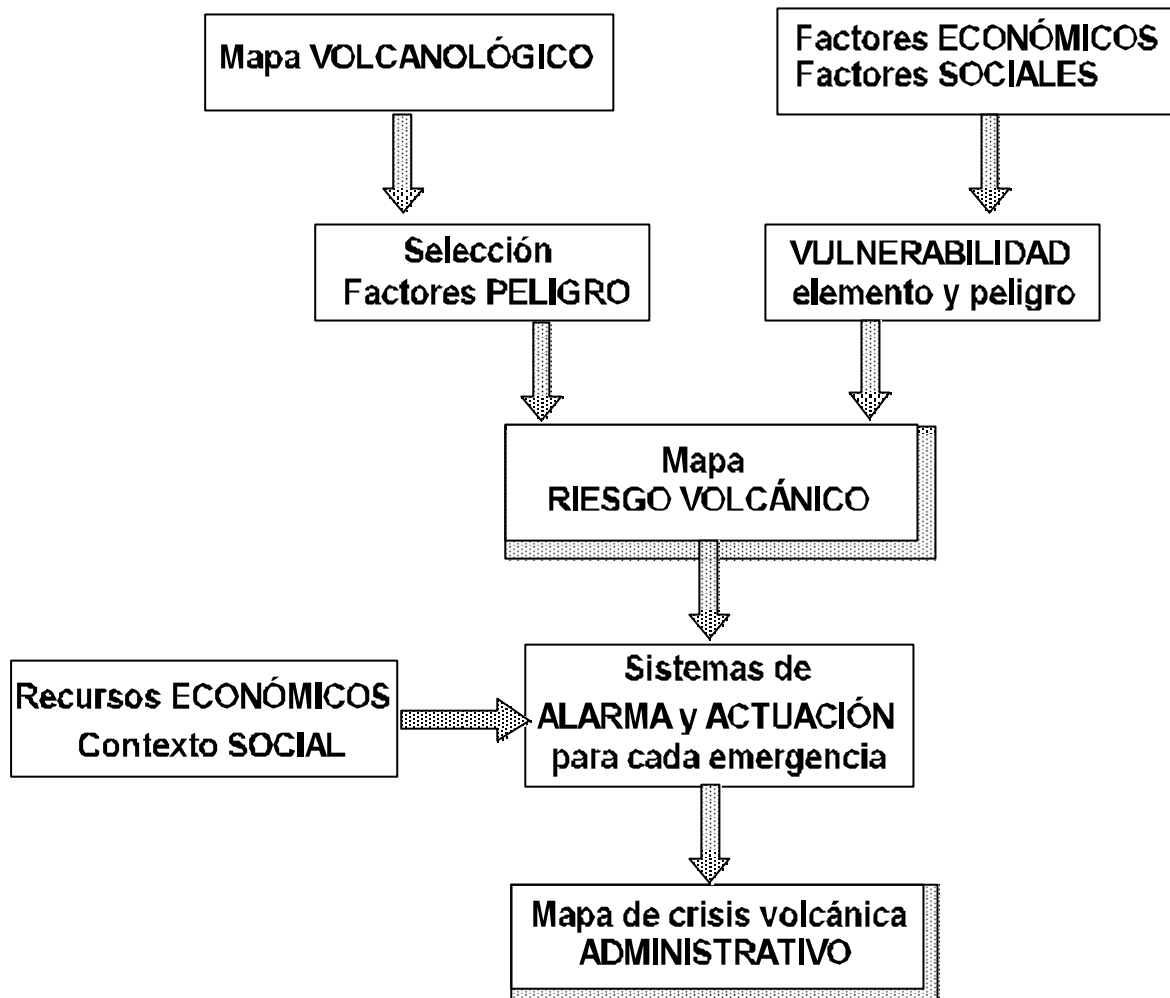


Figura 3-1 Mapas para uso de la Administración

En muchas ocasiones, se confunde el mapa de riesgo con un mapa en el que se representan los materiales procedentes de una posible erupción. Este tipo de mapas se obtiene directamente a partir de los modelos de los distintos mecanismos eruptivos y de los procesos post-eruptivos. Transformando estos mapas en función del valor afectado, su vulnerabilidad y la probabilidad de que ocurra una erupción de este tipo y generalizado para todas las erupciones posibles, se obtiene el mapa de riesgo para la zona. Este tipo de estudios tienen interés dentro de lo que se entiende por gestión del territorio, siempre que no se manipulen los riesgos en una u otra dirección, siendo especialmente frecuente que en áreas de muy bajo riesgo se justifiquen determinada instrumentación y grupos pseudo científicos de vigilancia simplemente magnificando el riesgo.

El Mapa de Riesgo Volcánico de uso Administrativo presenta dos facetas: primera, debe servir para que la Administración conozca cuál es el riesgo volcánico que soporta la zona y poder planificar con ello a largo plazo. Por otro lado, es el mapa que se utilizará en el momento en el que se desencadene una crisis. Para ello, es importante que esté publicada la normativa correspondiente y existan los adecuados protocolos de actuación (Araña et al., 1989b).

Tabla I Mapa para uso de la Administración: Contenido		
Temas		Métodos
Escala del mapa	Regional	1/100.000 a 1/1.000.000
	Municipal	1/25.000 a 1/200.000
Extensión del mapa		Debe cubrir todo el volcán y alrededores.
Tipo de daño	Probabilidad	Tres clases: Mayor, Medio, Menor.
	Magnitud	
Factores que requieren aviso de peligro		Caída de piroclastos. Flujos de lava. Tsunami.
Condiciones		Mostrar claramente magnitud y lugar de la erupción. Condiciones meteorológicas.
Perfil de los fenómenos volcánicos		Contorno de cada desastre ligado a su respectivo volcán.
Escala		
1/200.000 a 1/1.000.000	Caída de piroclastos.	
1/50.000 a 1/200.000	Coladas piroclásticas. Oleadas piroclásticas. Caída de piroclastos. Lahares. Inundaciones. Avalanchas	
1/10.000 a 1/200.000	Balística. Coladas lávicas. Colapso del edificio. Deslizamiento de laderas. Gases.	

El análisis del mapa de riesgo permite organizar el territorio y establecer, si ello es posible, las adecuadas defensas activas. Este tipo de estudios se plantea a muy largo plazo y el impacto práctico que tiene es muy reducido, incluso en situaciones claras y con volcanes tan célebres como el Vesuvio. El establecimiento de los mapas de riesgo para procesos postvolcánicos, como los lahares, se utiliza frecuentemente ya que las defensas activas en estos casos son de mucho menor costo y además la frecuencia con que ocurren estos desastres es mucho mayor, especialmente en todos los volcanes activos situados en zonas de abundantes lluvias.

Este tipo de mapas debe ir acompañado de la correspondiente memoria que facilite su utilización. Es importante insistir en que una información imprescindible que debe figurar en los mapas es el diagrama de tiempos disponibles para actuar frente a cada uno de los peligros. Lógicamente este tipo de información no sirve para nada si no existe una planificación anterior. Es importante disponer del material didáctico necesario y preparado a distintos niveles. Además, éste material debe actualizarse periódicamente.

Hay que pensar que una crisis puede iniciarse en cualquier momento y puede que transcurran varios meses antes de culminar en una fase catastrófica. Pero este tiempo es muy pequeño si hay que improvisar todo el material informativo y preparar al personal que debe intervenir, además de establecer los correspondientes planes de actuación. Hay que recordar que la demanda de información es muy grande en las fases iniciales de la crisis y que ésta se convierte rápidamente en arma política.

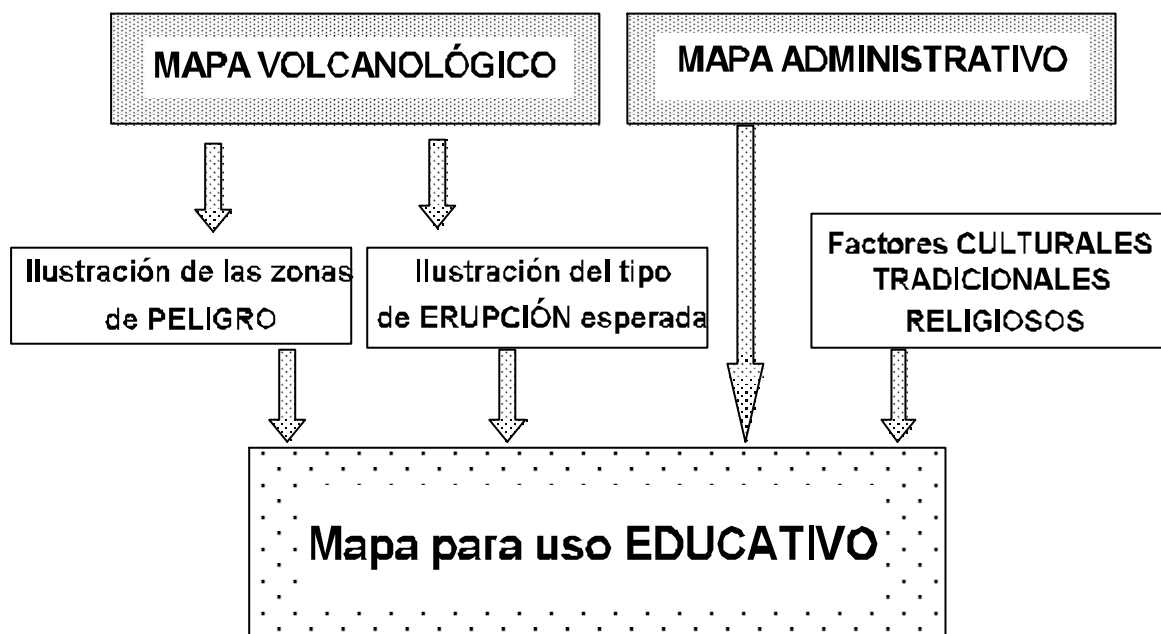


Figura 3-2 Elementos que intervienen en el mapa educativo

MAPA PARA USO DE LA ADMINISTRACIÓN: OBJETIVOS

Indicación	Objetivo	
	para prevención	en emergencia
Erupciones en el pasado	Cráter, conos, domos, área cubierta por las principales emisiones incluyendo fenómenos asociados.	igual
Magnitud para cada factor	Tres categorías: mayor, media, menor.	Tiempo para la caída de piroclastos. Velocidad de lavas. Tiempo de recorrido de tsunamis.
Predicción	Escala y lugar de erupción. Propiedades de los materiales emitidos. Meteorología.	igual
Centros de prevención	Gubernamental: Nacional, Regional o Local.	Organismos de Gobierno. Protección Civil. Policía. Bomberos. Ejército. Servicio Hidrológico y Forestal. Parque Móvil. Comunicaciones. Información Pública.
Evacuación	Puntos de concentración. Lugares de evacuación. Vías y Puertos.	igual
Servicios públicos	Medios de transporte.	Infraestructura de Transporte. Infraestructura de Energía (centrales, líneas, subestaciones). Suministro de Agua. Red de Comunicaciones. Hospitales. Escuelas. Asilos. Centros Militares. etc.
Areas restringidas por ley	Parques Nacionales o Naturales. Zonas de alta peligrosidad. Zonas de defensas activas, etc.	
Límites	Fronteras entre Estados. Límites de municipios.	Areas de tráfico restringido. Areas de acceso prohibido.

MAPA PARA USO EDUCACIONAL: CONTENIDO

Temas	Contenido	
	Importante	Complementario
Centros de prevención de desastres	Localización de los Centros de Emergencia.	Centro de Prevención. Comunicaciones e información pública. Radiocomunicaciones.
Infraestructura para la evacuación	Puntos de concentración. Lugares de evacuación. Vías. Aeropuertos. Helipuertos. Puertos.	
Servicios Públicos		Red de transportes. Suministros de agua. Teléfono. Hospitales.
Límites administrativos Zonas restringidas	Zonas restringidas al tráfico. Zonas de acceso limitado o prohibido.	Fronteras Estatales. Límites Municipales. Zonas de acumulación. Valles. Torrentes.
Información	Mentalización de la población. Información comprensible sobre la catástrofe volcánica. Instrucciones para la evacuación. Línea de contacto durante la evacuación.	
Fenómenos volcánicos	Explicación de cada fenómeno que ocurre en el volcán, situaciones de peligro, factores de desastre facilitados al público en forma accesible.	

3.1.3. Metodología para construir los mapas de Peligros Volcánicos y Riesgo Volcánico

Para establecer un mapa de riesgo volcánico debemos partir de la definición de riesgo expuesta en el capítulo 1.2.1 de este volumen. El riesgo es una densidad de probabilidad $R(x,y,z,\Delta t)$, definida a partir de la peligrosidad, es decir de la densidad de probabilidad $P(x,y,z,\Delta t)$ de que en un punto (x,y,z) , en un intervalo de tiempo Δt , ocurra un evento peligroso y de la vulnerabilidad $V(x,y,z)$, entendida como densidad de probabilidad de que dado el evento peligroso se sufra un determinado daño. Hay que destacar que mientras la peligrosidad es función del intervalo de tiempo y por ello invariante frente a una traslación temporal, la vulnerabilidad es sólo función del punto considerado y de la actividad humana en ella desarrollada y por ello puede ser sujeta a normas tendentes a disminuir el riesgo. Introduciendo el valor $\$(x,y,z)$ de los bienes sujetos a posibles pérdidas se tiene:

$$R(x, y, z, \Delta t) = \$(x, y, z) V(x, y, z) P(x, y, z, \Delta t)$$

Por consiguiente, en la valoración del riesgo los factores primordiales son de carácter social y económico, mucho más próximos a la política regional que a la aproximación científica y técnica de los volcanólogos y técnicos de la protección civil. En consecuencia, cuando a los volcanólogos se les pide un mapa de riesgo, éstos deben limitarse a establecer el mapa de peligrosidad volcánica, dejando a otros especialistas la transformación de este mapa en un mapa de riesgo, mapa que en definitiva viene expresado en dinero y en el que hay que evaluar si es más rentable un hombre, una vaca o una industria, cuyos valores dependen del contexto socioeconómico (Araña y Ortiz, 1993).

Al plantear un mapa de peligrosidad debe empezarse por definir cual es el intervalo de tiempo Δt considerado. Un criterio, es considerar todos aquellos eventos que puedan producirse en los próximos 60 años, lo que supone períodos de retorno del orden de 500 años para margen de confianza del 99.5%. Seguidamente, debe realizarse un estudio geológico de las erupciones habidas en la zona, reconstruyéndose sus mecanismos eruptivos y tratando de establecer claramente las relaciones temporales existentes entre ellas, así como poner de manifiesto la presencia de secuencias significativas. Estos datos son analizados estadísticamente, tratando de establecer el modelo que permita reconstruir las distintas secuencias e intervalos. Este modelo estadístico permite calcular para cada mecanismo eruptivo su densidad de probabilidad para el intervalo de tiempo considerado. En general, los valores obtenidos correspondientes a las erupciones más peligrosas, salvo en volcanes muy particulares, son tremendamente pequeños. Para cada posible evento eruptivo en la zona se modeliza el correspondiente mecanismo eruptivo y fenómenos asociados. En algunos casos, deben modelarse numerosas situaciones que pueden modificar considerablemente los resultados obtenidos; un ejemplo de ello puede ser la modelización de la caída de los piroclastos cuando en la zona no existen vientos dominantes claramente definidos (Araña y Ortiz, 1993).

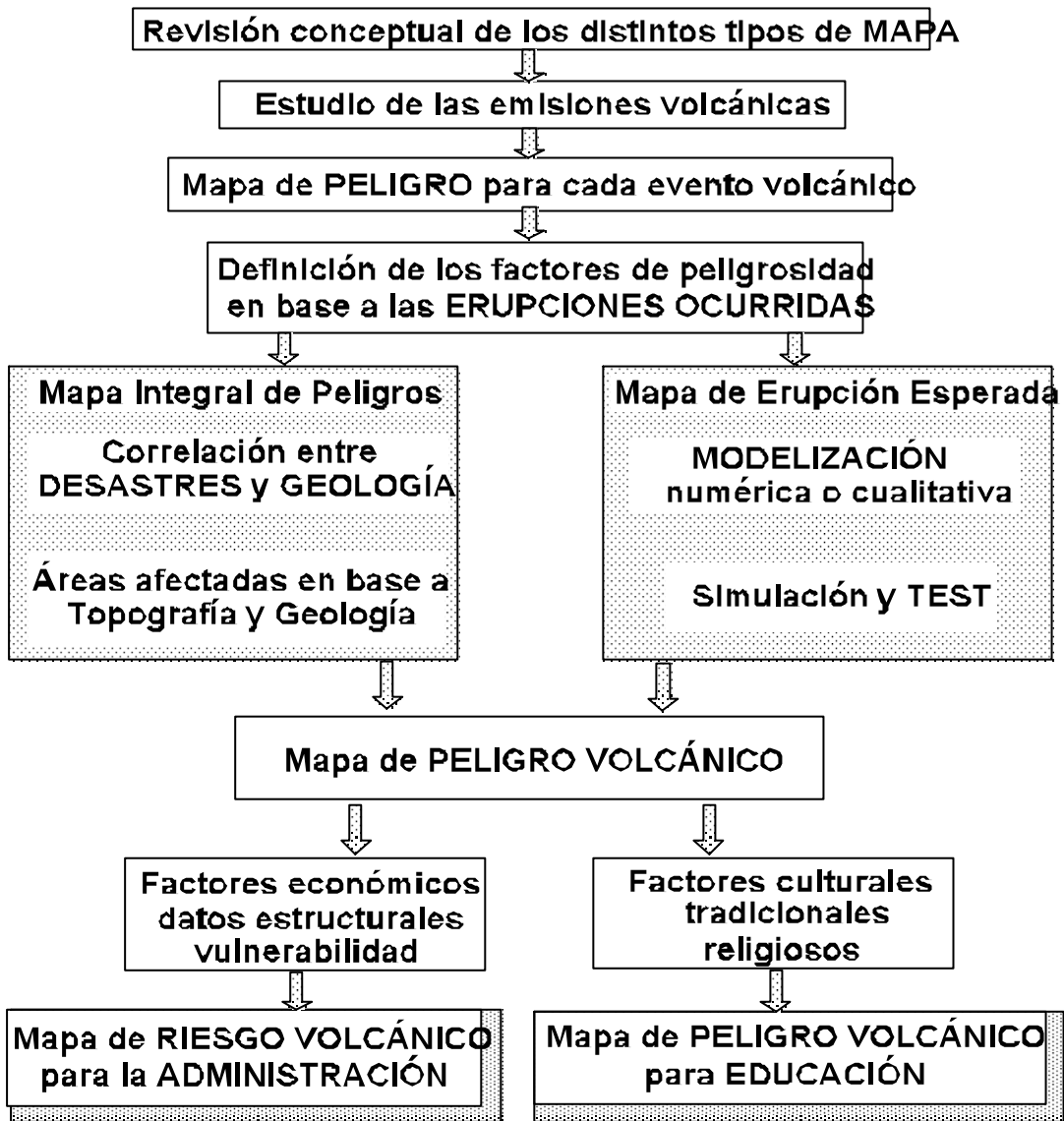


Figura 3-3 Preparación de los mapas de peligrosidad volcánica.

La preparación del Mapa de Peligros Volcánicos requiere una importante inversión en tiempo y dinero para hacerla recopilación completa de datos. Por ello se suele proceder estudiando cada peligro por separado y después integrándolos todos en las bases de datos del Sistema de Información Geográfica. Es importante planificar adecuadamente cómo se realizará el trabajo de adquisición de datos, a fin de evitar por una parte repeticiones y por otra conseguir que el conjunto de datos final sea representativo (Alexander, 1993).

Es necesario destacar la importancia que tiene establecer una buena base cronológica de los eventos con el fin de poder determinar con la menor incertidumbre posible los períodos de retorno de cada uno de los eventos.

Los mapas correspondientes se establecen definiendo un efecto (caída de piroclastos superior a 20 kg/m², coladas de lava, gases, etc) y considerando su densidad de probabilidad. Como el mapa debe integrar todos los posible eventos ocurridos en el área se suman todas las densidades de probabilidad, resultando:

$$P(x, y, z, \Delta t) = \sum_i p_i(\Delta t) P_i(x, y, z, \Delta t)$$

donde $p_i(\Delta t)$ es la densidad de probabilidad de que ocurra el evento en el tiempo Δt . Este mapa es el que los volcanólogos deben construir y que transformado por los especialistas correspondientes incluyendo la población, estructuras y comunicaciones, constituye el mapa de riesgo volcánico.

La metodología para la realización del mapa de riesgo volcánico pasa por la necesaria coordinación de un equipo multidisciplinar (Araña, 1996), necesario para la realización de los estudios geológicos encaminados a la reconstrucción individualizada de cada evento eruptivo, de su modelización física y de su transposición a la realidad social y económica actual de la zona afectada por la posible erupción (Dobran et al., 1990).

Es importante recordar que tanto los datos como los modelos deben utilizarse en una crisis real, lo que implica que mucha de la información requerida puede no estar disponible en ese momento. De poco sirve un sistema muy sofisticado si no es útil en el transcurso de una crisis. En muchos casos la única información de que se dispone en los primeros momentos (horas, días) son las coordenadas del centro de emisión y una vaga idea sobre el tipo de erupción, posteriormente, si la accesibilidad del volcán y las condiciones meteorológicas lo permiten, se podrá empezar a estimar otros parámetros.

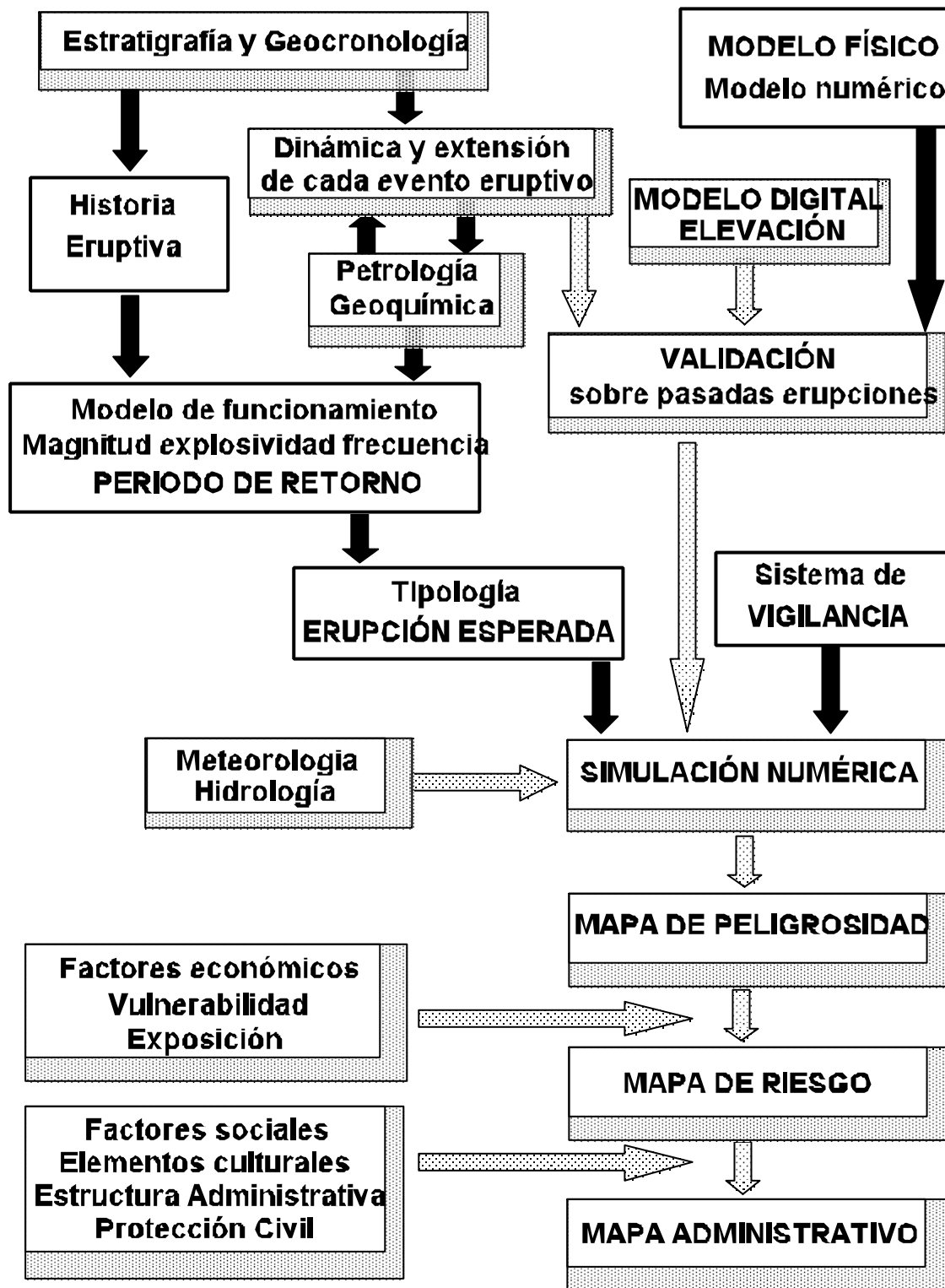


Figura 3-4 Estructura para la realización del Mapa de Riesgo Volcánico. Los elementos en sombreado pertenecen al Sistema de Información Geográfica (Ortiz, 1995).

El primer elemento que debemos introducir en el Sistema de Información Geográfica es el mapa topográfico de la zona. Es importante que este mapa se corresponda exactamente con el modelo digital del terreno utilizado por los modelos numéricos, red viaria, centros urbanos, etc. El material utilizado para los trabajos de campo, foto aérea, foto satélite, cartografía específica, etc, deberá corregirse adecuadamente.

El modelo digital de terreno debe construirse de forma que presente la máxima resolución posible en función de la información topográfica existente de la zona. Difícilmente se puede trabajar con resoluciones de 25 metros partiendo de un mapa básico a 1:100.000. Una resolución de 200m puede resultar insuficiente para el modelado de coladas lávicas, pero resulta más que suficiente para la proyección balística o los flujos piroclásticos. Para la modelización detallada de avalanchas se necesita un modelo topográfico particular que se puede obtener fácilmente transformando el modelo digital de elevación.

Los modelos digitales de terreno contienen numerosos errores, los menos proceden de inexactitudes en la base de datos utilizada para generar el mapa, los más debidos al algoritmo que se ha utilizado para trazar las isolineas en el mapa original y al método seguido para transformarlas en malla regular. Especialmente peligrosos son los *huecos*: un único punto que debido a una oscilación del algoritmo queda por debajo de los puntos que le rodean. En ocasiones, es preferible suavizar el modelo, eliminando los huecos, y después añadir una rugosidad controlada (Dobran, 1995).

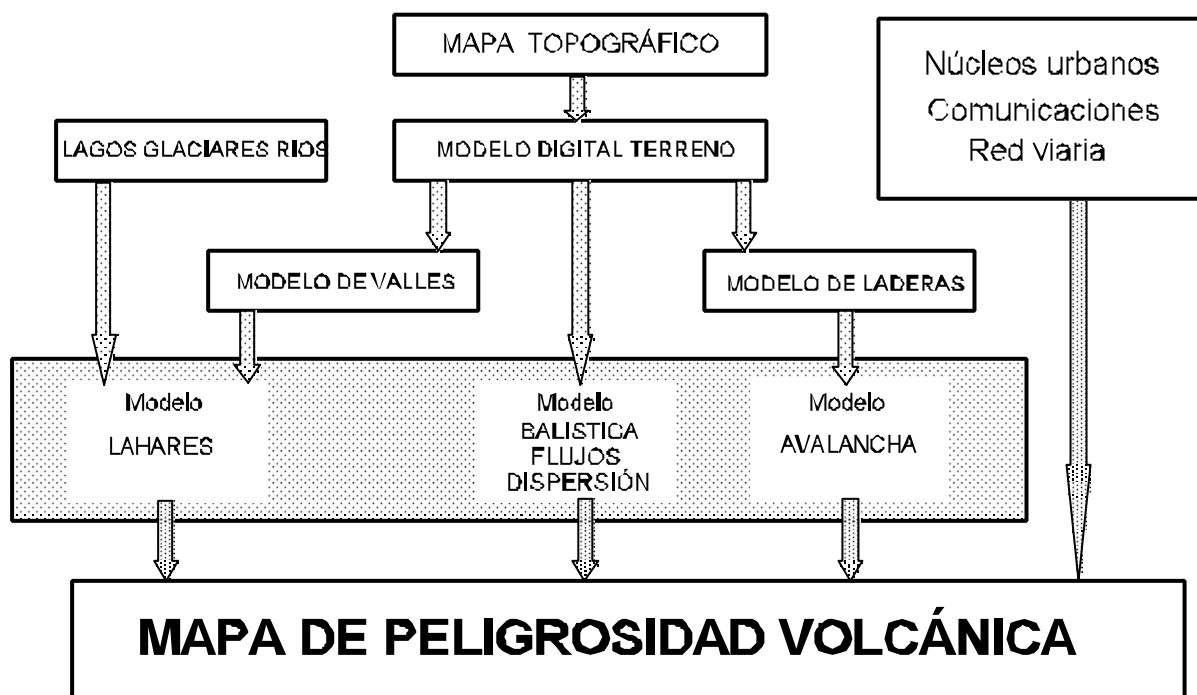


Figura 3-5 Modelo digital del terreno: relaciones y aplicaciones

El modelo digital del terreno es siempre un fichero de dimensiones considerables, por lo que es conveniente disponerlo como una matriz rectangular en enteros y formato binario, empezando por el elemento situado en el extremo Norte-Oeste. Es necesario incluir un pequeño fichero texto en ASCII donde se lean el número de columnas y filas, el espaciado en m y las coordenadas de los extremos. Como información complementaria puede incluirse la referencia del mapa topográfico que ha servido de escala y cualquier información que se considere de utilidad. Para facilidad del usuario es importante que el inicio de la cabecera sea siempre idéntico, es conveniente utilizar para estos datos sólo enteros sin comentarios, para evitar complicar los programas de lectura. Como ejemplo mostramos la cabecera utilizada para los programas de modelización realizados en el Dep. Volcanología del MNCN-CSIC:

```
DEM
4345
5711
25
27 33.25
-3 9.37
*****
Isla de Lanzarote
Mapas Servicio Geográfico del Ejército 1:50.000
Realizado el 12-4-95
```

La modelización de la erupción esperada requiere disponer de un conjunto de programas para la simulación de los distintos peligros volcánicos que pueden presentarse en la zona (Barberi et al., 1989a). Esta modelización debe realizarse a distintos niveles de resolución, pues cuanto más preciso sea el ajuste requerido al modelo mayor será el número de parámetros sobre la erupción que se necesitarán. No hay que olvidar que, a efectos de valoración del riesgo volcánico, se necesita más una valoración global de los efectos de la erupción que el detalle preciso en cada uno de los fenómenos y que está muy lejos de poder ser proporcionado por los modelos actuales. En este aspecto, es interesante organizar los modelos en forma escalonada, entrando cada vez más en el detalle de cada fenómeno mediante modelos más y más elaborados. Así, en primera aproximación, es posible utilizar el mismo modelo gravitacional para todos los fenómenos bajo control topográfico, introduciendo un parámetro que refleje la movilidad de cada evento particular y que se ajusta empíricamente en base a los datos disponibles para cada zona. Procediendo de este modo se puede obtener una buena representación del fenómeno, apta para servir de base al mapa de peligrosidad volcánica para el evento considerado.

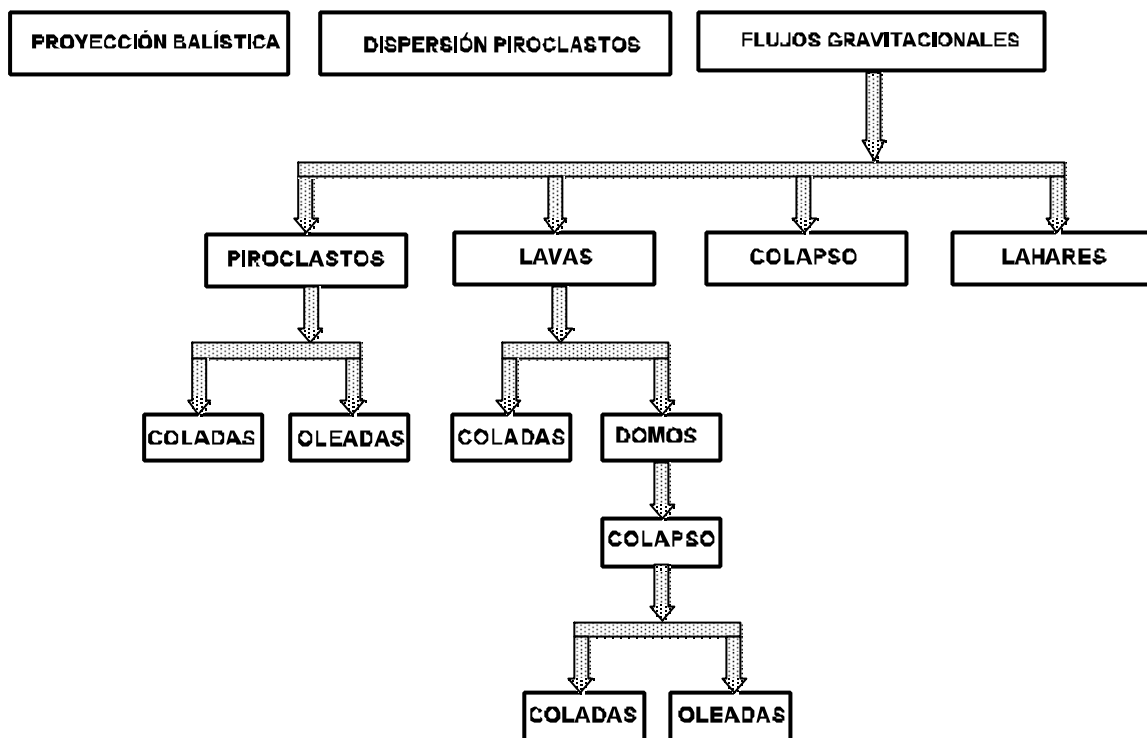


Figura 3-6 Relación entre los Modelos Numéricos de Peligros Volcánicos

Los modelos numéricos de los distintos peligros volcánicos parten de una simplificación del modelo físico del fenómeno y precisan de la entrada de una serie de parámetros característicos de la erupción esperada y utilizan los datos del modelo digital del terreno. En función del tipo de modelo será necesario realizar una transformación de los datos de elevación, generando un modelo local del terreno de menores dimensiones. Este proceder mejora la eficiencia del proceso de cálculo, pues se trabaja con modelos de menores dimensiones. Al finalizar, los resultados de la simulación deben escribirse en un fichero directamente compatible con el Sistema de Información Geográfica.

La transformación del mapa de peligrosidad en mapa de emergencia o en el mapa de riesgo, es un proceso simple que se realiza directamente mediante el uso de las herramientas propias del Sistema de Información Geográfica. Sin embargo, para que esta transformación sea sencilla de realizar es necesario que la salida de los distintos modelos de peligros volcánicos esté adecuadamente escalada, de modo que la aplicación de las tablas de vulnerabilidad sea inmediata. Evidentemente, la utilidad del sistema dependerá fundamentalmente de la correcta actualización de los datos que constituyen la base del Sistema de Información Geográfica. Este tipo de proceso requiere la utilización sistemática de funciones del tipo AND, OR, EXOR y de escala, actuando sobre las vulnerabilidades definidas para todos los elementos. Por consiguiente, es conveniente que desde un principio se introduzcan las distintas capas que constituyen el Sistema de Información Geográfica con este criterio. Esto también debe aplicarse al formato de salida de los distintos modelos.

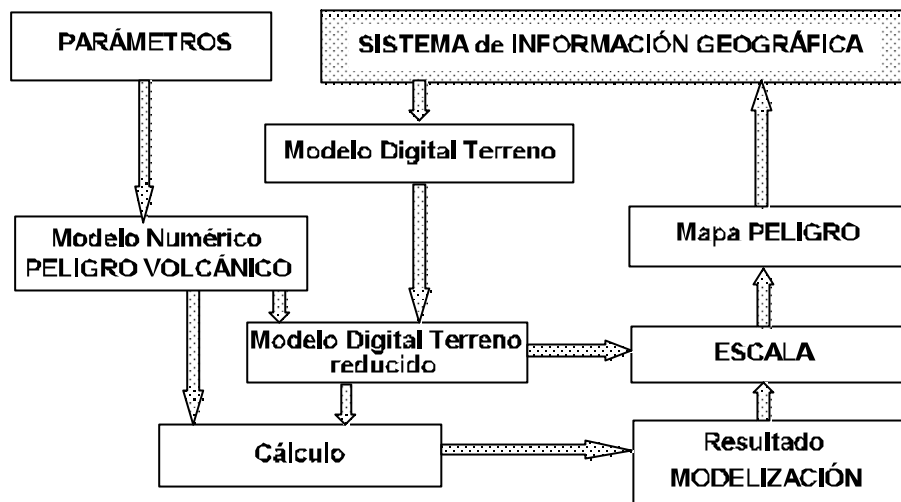


Figura 3-7 Transformaciones de escala del modelo digital del terreno

Los mapas de riesgo y gestión de la emergencia deben actualizarse continuamente en caso de crisis, en función de como vaya evolucionando la actividad del volcán o como los datos procedentes del seguimiento de la crisis vayan permitiendo optimizar el ajuste de los modelos. Para que este proceso pueda realizarse de forma adecuada, el sistema debe poder operar de un modo sencillo sin necesidad de tener que realizar operaciones manuales.

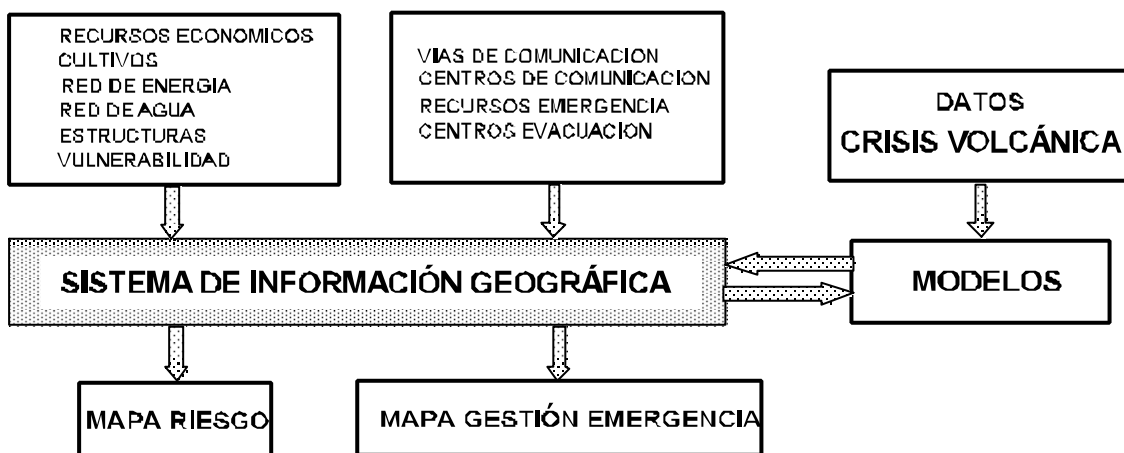


Figura 3-8 Obtención de mapas de riesgo volcánico y gestión de emergencias

Finalmente, los mapas de tipo educativo o informativo deben realizarse manualmente, en colaboración con un equipo de pedagogos, ya que los criterios de tipo cultural y tradicional afectan al contenido de estos mapas, los cuales requieren además un cierto tratamiento artístico con el fin de que resulten atractivos.

3.2. MODELIZACIÓN NUMÉRICA EN MAPAS DE PELIGROSIDAD VOLCANICA

El empleo de modelos físicos para describir los procesos volcánicos es una materia relativamente reciente pero que ha supuesto un cambio radical en la Volcanología en los últimos años. Sin embargo, el objetivo último de la Volcanología sigue siendo el mismo: saber dónde, cómo y cuándo tendrá lugar una erupción. Dentro de la búsqueda de las respuestas a estas preguntas se encuentra el desarrollo de *modelos físicos de procesos volcánicos*, fruto de la investigación interdisciplinar de especialistas en termodinámica de fluidos, físicos, matemáticos, geólogos, ... etc. Los modelos que aquí se describen son aquellos que responden al "cómo" será la erupción y por tanto pueden ser empleados para estimar los efectos de ésta en cada punto del área de estudio, siendo así una herramienta básica para la generación de mapas de peligrosidad. En general, para que un modelo sea aplicable para la generación de mapas de peligrosidad, debe describir los fenómenos físicos básicos que intervienen en el proceso eruptivo, empleando para ello aquellos parámetros que sean necesarios. En principio, parece lógico suponer que un modelo en el que intervengan gran cantidad de parámetros describirá mejor el proceso. Sin embargo, es preciso tener en cuenta que a la hora de plantearse un mapa de peligrosidad volcánica, son pocos los parámetros que pueden acotarse de forma fiable. Por ello, la aplicación de modelos muy complejos puede implicar que varios de los parámetros que intervienen en el mismo no puedan ser bien definidos, de forma que el resultado final puede no ser representativo. Así, en un mapa de peligrosidad debe estar claramente indicado tanto cuál es el modelo empleado para su generación como los valores de los parámetros de entrada. De este modo, nuevos datos procedentes de estudios posteriores que modifiquen los valores de los parámetros de entrada, podrán ser introducidos en los modelos generando nuevos mapas de peligrosidad.

3.2.1 Coladas lávicas

El desarrollo de un flujo de lava depende de múltiples factores. Entre ellos, los principales son el ritmo de emisión, las características reológicas del magma y la topografía (Hulme, 1974; Dobran et al., 1990). En el comportamiento de estos flujos pueden observarse varios aspectos:

- a) Comportamiento no newtoniano del fluido.
- b) Pérdida de calor por conducción, radiación y convección.
- c) Transiciones entre diferentes regímenes de flujo (pahoehoe, aa, ...).
- d) Solidificación de la parte superior del flujo y formación de labios y túneles.
- e) Cambios en la topografía original durante el flujo.
- f) Bifurcaciones del flujo.

Hoy en día no existe un modelo físico que englobe todos estos aspectos. Los modelos actuales describen conjuntamente como mucho tres de estos fenómenos observables. Estos modelos son de muy diversa índole según el modo de aproximación al problema. Así existen desde modelos en los que se resuelven las ecuaciones de transporte a probabilísticos, desde analíticos a empíricos. En general, los modelos analíticos basados en la resolución de las

ecuaciones de transporte (conservación de masa y balance energético y de momento) no tienen en cuenta la usualmente complicada topografía de los volcanes sino que describen el flujo sobre un plano inclinado (Dragoni et al., 1986; Dragoni, 1989; Baloga y Pieri, 1986), por lo que no son aplicables a la generación de mapas de riesgo.

Un modelo que tiene en cuenta la conservación de masa, el intercambio de calor con la atmósfera por radiación, variaciones de viscosidad con la temperatura y el comportamiento no-newtoniano del magma es el de Ishihara et al. (1989). En él se asume que la lava se comporta como un fluido Bingham y que su viscosidad y cizalla umbral dependen de la temperatura. El dominio de cálculo se divide en celdas cuadradas. En cada intervalo de tiempo se calcula la variación de volumen de lava en cada celda como la suma de los flujos de masa a través de los límites de la celda. Estos flujos son calculados en función del espesor, temperatura y propiedades reológicas de la lava en cada celda. Un planteamiento similar es el de Barca et al. (1994) que emplean la técnica de autómatas celulares. Una de las características más sobresalientes del modelo es que permite variar el ritmo de efusión e introducir diversos centros de emisión. Este modelo tiene en cuenta los cambios sobre la topografía original que produce la solidificación de la lava considerando como parámetro de entrada global la temperatura de solidificación de la lava. En el momento en que la temperatura media de la colada en una de las celdas alcanza el valor de solidificación, la altura topográfica de dicha celda se incrementa en un valor igual al espesor de lava. Recientemente Wadge et al. (1994) han presentado un modelo para evaluación de riesgo debido a flujos lávicos empleando un modelo tanto determinista como probabilístico. La característica más sobresaliente de este modelo (descrito en Young et al. (1990) y Wadge y Wadge (1994)), es su rapidez de cálculo, conseguida al simular únicamente el comportamiento del frente de la colada, asumiendo implícitamente la llegada de lava al frente. Considerando que la lava se comporta como un fluido Bingham, en cada iteración toda celda cuyo volumen de lava supera un volumen crítico distribuye la diferencia entre ambos volúmenes entre las ocho celdas vecinas y permanece inactiva en la siguiente iteración. El modelo no considera variaciones en la reología de la lava por cambios de temperatura, pero permite variar el ritmo de efusión y la cizalla umbral. Los mejores resultados se obtienen cuando se emplea una aproximación probabilística basada en una simulación de Monte Carlo, de forma que los parámetros de entrada varían aleatoriamente de acuerdo con probabilidades previamente calculadas a partir de análisis de datos de coladas anteriores.

Considerando la aplicación de estos modelos a la generación de mapas de peligrosidad para una zona volcánica activa específica o para el seguimiento en tiempo real de una crisis volcánica es preciso tener en cuenta varias limitaciones. En el caso de los mapas de peligrosidad es muy difícil determinar la mayor parte de los parámetros de entrada necesarios para el modelo: ritmo de descarga, características físicas de las lavas,... e incluso determinar con precisión el centro (o centros) de emisión. Únicamente, basándose en el conocimiento mayor o menor de la actividad anterior del volcán pueden "acotarse" mejor o peor alguno de estos parámetros aunque, especialmente en los modelos que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes, muchos de ellos deben ser extrapolados o inferidos a partir de los datos disponibles. En el seguimiento del desarrollo de una crisis, a estas limitaciones se añaden el

tiempo de cálculo requerido y las dificultades inherentes a la medida de parámetros como temperatura de emisión, densidad y viscosidad de la lava, ritmo de efusión, ...etc.

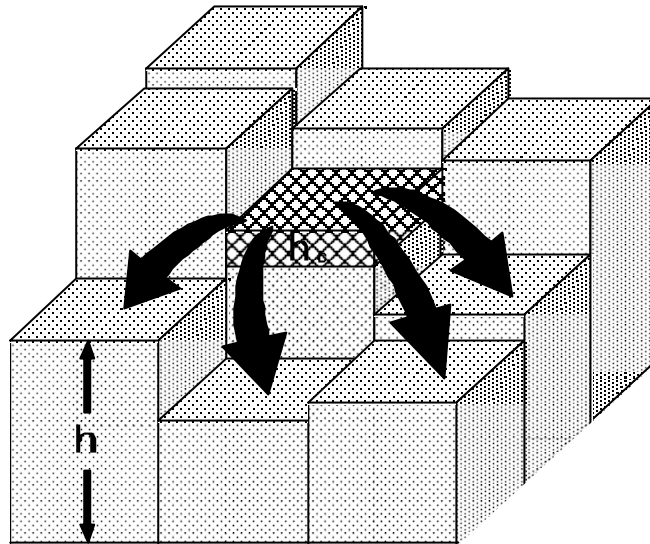


Figura 3-9 Modelización de un flujo lávico por el método de Montecarlo: la probabilidad de que se alcance una celda es proporcional a la diferencia de alturas menos la altura crítica de la colada.

Por los motivos citados, los modelos más empleados en riesgo volcánico son los probabilísticos que, hoy en día, representan una potente herramienta tanto para la generación de mapas de riesgo y peligrosidad como para el seguimiento y actuación en caso de erupción (Barberi et al., 1993). Un modelo sencillo que puede emplearse para la generación de mapas de peligrosidad para erupciones efusivas es el *modelo de máxima pendiente*. En él se asume que la topografía juega el papel principal en la determinación del camino seguido por la colada. El modelo parte de un modelo digital de elevación (Digital Elevation Model, DEM) de la zona de estudio, es decir, la superficie se divide en celdas cuadradas cada una de las cuales tiene asignada una altura (Fig. 3-9). Se selecciona entonces un punto como emisor del flujo y a partir de él se considera que el flujo puede dirigirse a una de las ocho celdas circundantes. La probabilidad de que el flujo se desplace a una celda determinada es proporcional a la diferencia de alturas entre la celda considerada y aquella donde se encuentra el flujo, teniendo en cuenta que si esa diferencia es negativa la probabilidad será cero (es decir, el flujo no puede propagarse "hacia arriba"). Aplicando un algoritmo de MonteCarlo se calcula un posible camino de la colada. Este proceso se repite iterativamente un gran número de veces y finalmente se hace un recuento de cuántas veces ha sido atravesada por un flujo cada celda. Las celdas que han sido atravesadas muchas veces serán las que tienen una mayor probabilidad de ser invadidas por la colada, mientras que las que han sido atravesadas un menor número de veces tienen una probabilidad menor.

Este esquema general presenta un problema de fácil solución: la longitud de la colada es indefinida, por lo que si entra en una zona llana permanece retenido indefinidamente en ella y, en caso contrario, la longitud sería infinita. Para evitar este efecto es práctico introducir

un parámetro denominado "longitud máxima del flujo" (l_{max}). Su función es detener la colada cuando ésta ha recorrido una determinada distancia (es decir, un número determinado de celdas). Otro parámetro que debe introducirse es la "altura crítica" (h_c), entendida como un término que se suma a la altura de cada una de las celdas que recorre la colada. Este parámetro simula el efecto de la altura de la colada lávica u otros efectos como la rugosidad del terreno. En la figura 3-10 puede verse un ejemplo de salida de un modelo de este tipo.

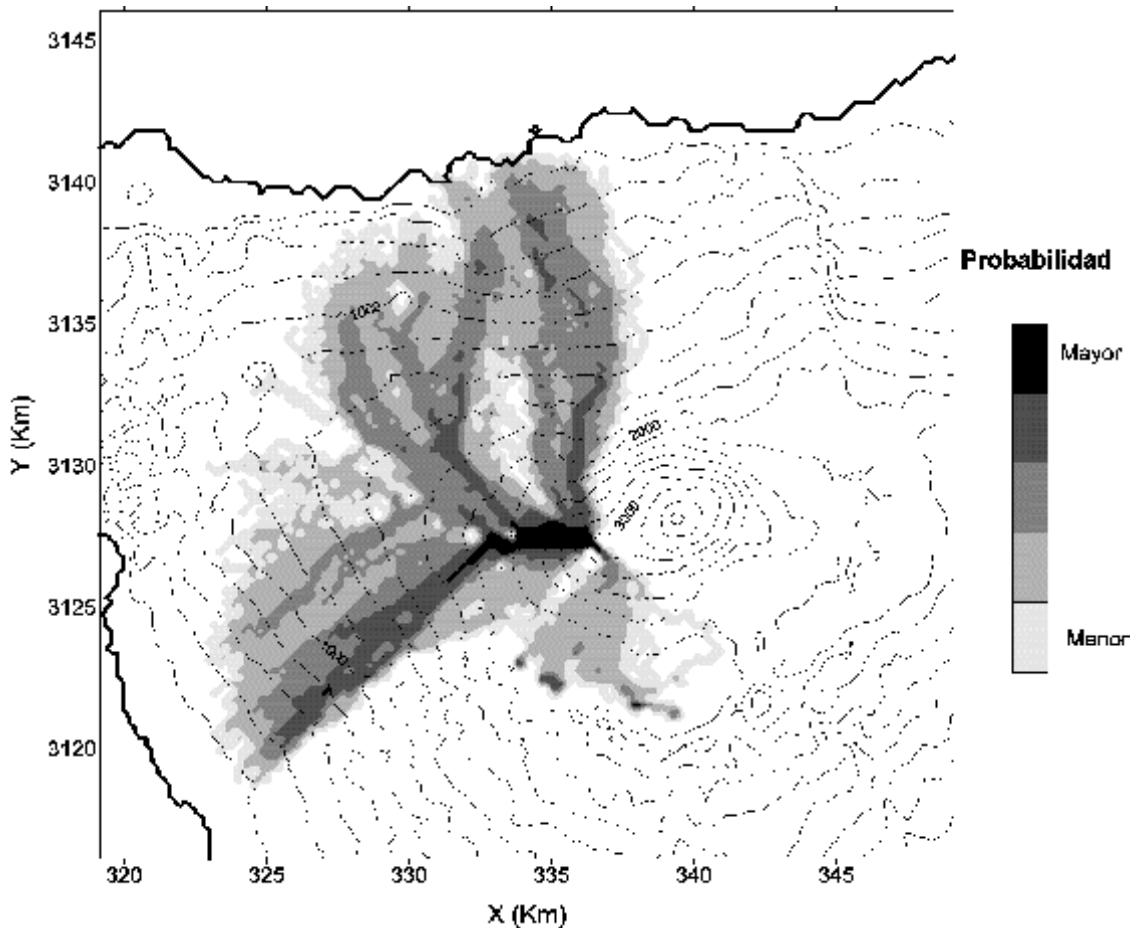


Figura 3-9 Ejemplo de mapa obtenido mediante el modelo de máxima pendiente sobre la topografía de la isla de Tenerife. El centro de emisión se ha situado en el volcán Pico Viejo y los valores de los parámetros l_{max} y h_c son respectivamente 14km y 3m.

Modelos similares se han aplicado tanto a la generación de mapas de riesgo para el Etna basándose en la distribución espacial de cráteres de erupciones históricas como durante la erupción del Monte Etna 1991-1993 (Barberi et al., 1993). Un planteamiento parecido se emplea en un modelo aún más sencillo que podría denominarse *modelo de extensión máxima*. En este modelo se determinarían no los caminos más probables sino todos los caminos probables. El proceso consiste en que una vez definida cuál o cuáles son las celdas del DEM correspondientes al centro de emisión, se determina cuáles de las celdas vecinas presentan una altura inferior y por tanto son susceptibles de ser invadidas por la lava. De cada una de

éstas se determina cuáles de sus vecinas pueden ser invadidas por el flujo y así sucesivamente. De esta forma se define el área máxima que puede ser cubierta por la lava.

3.2.2 Coladas piroclásticas

En una erupción explosiva, del cráter sale expulsado a gran velocidad un jet de gases volcánicos y piroclastos a elevada temperatura (Sparks, 1986). Durante su ascenso (típicamente de cientos de metros) pierde su energía cinética hasta que se alcanza un mínimo. En este punto, si la densidad de la mezcla es mayor que la de la atmósfera circundante, la columna colapsa formando coladas piroclásticas (Kieffer y Sturtevant, 1984; Dobran et al., 1993). Si, por el contrario, la densidad es menor, la columna entra en una región denominada convectiva caracterizada por la entrada de aire frío y ascenso por flotación. La parte superior de esta región convectiva está definida por el nivel en el que la densidad media de la columna es igual a la de la atmósfera circundante. A partir de aquí la columna se expande horizontalmente adquiriendo la típica forma de hongo. El transporte en esta región está fuertemente influenciado por la intensidad y dirección del viento y la turbulencia atmosférica.

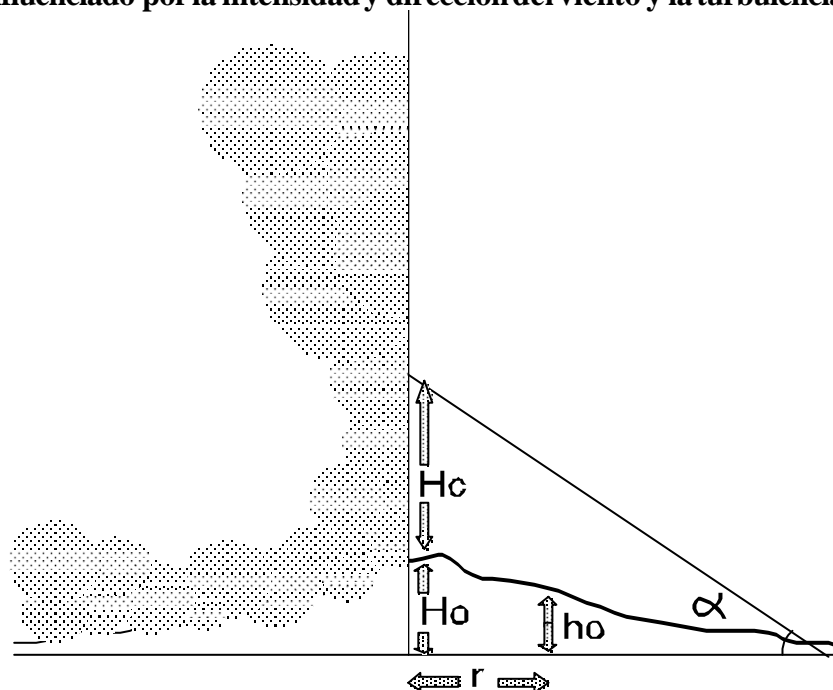


Figura 3-12 Ejemplo de aplicación del modelo de línea de energía sobre la topografía de Isla Decepción (Antártida). La línea de trazo grueso muestra el área potencial alcanzada por flujos piroclásticos cuyo centro de emisión está señalado por un pequeño círculo. $H_c = 300\text{m}$ y $\alpha = 17^\circ$.

Desde hace diez años el estudio del comportamiento físico de columnas volcánicas y flujos piroclásticos ha experimentado un gran avance empleando modelos numéricos bidimensionales de flujo no estacionario y bifásico. Fundamentalmente estos modelos son: el del Laboratorio de Los Alamos (Wholetz et al., 1984; Valentine et al., 1991) y el del Grupo Nacional de Volcanología de Pisa (Dobran et al., 1993). Sin embargo, ambos modelos

presentan simetría cilíndrica con respecto a un eje vertical centrado en el centro de emisión, por lo que la inclusión de efectos de topografía implica considerar que la topografía del volcán presenta también simetría cilíndrica (hecho que evidentemente no se verifica en la mayoría de los volcanes). Por ello, su aplicación a temas de peligrosidad se hace considerando únicamente una dirección concreta y la topografía del perfil correspondiente.

La aproximación a la modelización del comportamiento de coladas y oleadas piroclásticas que más se emplea en mapas de peligrosidad es la basada en el concepto de *línea de energía* (Sheridan, 1979; Malin y Sheridan, 1982). Este modelo considera que el flujo piroclástico se mueve a lo largo de las laderas del volcán disipando su energía de forma lineal con la distancia, de acuerdo con un factor que se asocia a un ángulo denominado *ángulo de colapso* (α) (Fig. 3-10). La energía en cada punto viene dada por la expresión:

$$E(r) = (H_0 + H_c - h) g - \tan(\alpha) r$$

donde r es la distancia al centro de emisión, H_0 la altura topográfica del centro de emisión, H_c la altura equivalente de colapso, h_0 la altura topográfica del punto r considerado, g la gravedad y α el ángulo del cono.

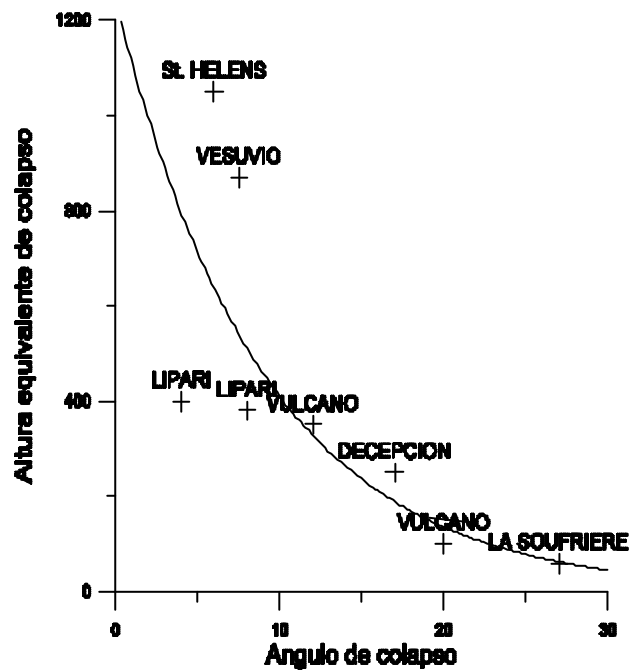


Figura 3-11 Relación entre altura y ángulo de colapso en el modelo de línea de energía

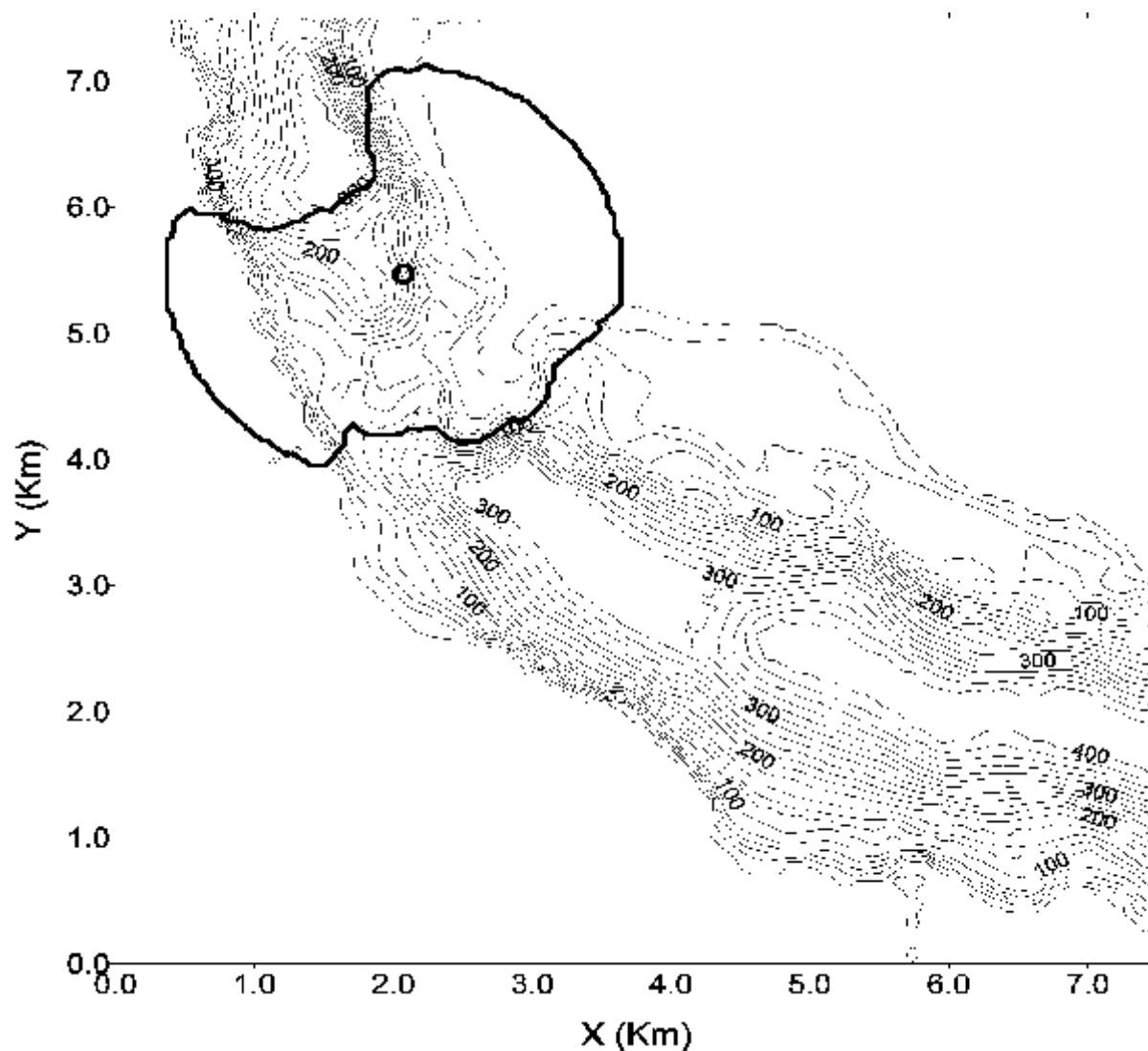


Figura 3.12 Ejemplo de aplicación del modelo de línea de energía sobre la topografía de Isla Decepción (Antártida). La línea de trazo grueso muestra el área potencial alcanzada por flujos piroclásticos cuyo centro de emisión está señalado por un pequeño círculo. $H_c = 300$ m y $\alpha = 17^\circ$.

Por tanto, este modelo sólo necesita, además de la topografía del área, dos parámetros: la altura de colapso de la columna y el ángulo de colapso. Basándose en erupciones bien estudiadas se ha establecido una relación empírica (Fig. 3-11) entre ambos parámetros:

$$H_c(\alpha) = 1300 e^{-0.116\alpha}$$

donde la altura está expresada en metros y el ángulo en grados.

Con este modelo se estima el área potencial que puede alcanzar el flujo (Fig. 3-12), mostrando los efectos producidos por la topografía, como son efectos de sombra y capacidad de

remonte. Sin embargo debe tenerse en cuenta que no se consideran otros efectos como la nube acompañante, la formación de columnas fénix, ... etc.

3.2.3. Caída de cenizas

En los últimos años se han publicado numerosos trabajos sobre modelización física de diversos aspectos de columnas plinianas. Sin embargo, sólo un pequeño número tiene aplicación directa a la generación de mapas de peligrosidad volcánica para caída de cenizas, especialmente porque la mayoría de los modelos no tienen en cuenta la acción del viento, que es un factor fundamental a la hora de definir el área que será cubierta por los piroclastos. Los modelos más empleados son los denominados de advección-difusión. Estos modelos consideran que la expansión de la nube de cenizas lejos del centro de emisión es debida únicamente a la turbulencia atmosférica (difusión) y a la acción del viento (advección), mientras que la deposición de las partículas está controlada por su velocidad límite de caída.

La ecuación básica que describe este proceso es (Armienti et al., 1988):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (V_v C) - \frac{\partial v_{lim} C}{\partial z} = \nabla \cdot (K \cdot \nabla C)$$

donde C representa la concentración de partículas en cada instante y cada punto del espacio, V_v es el campo de velocidad del viento, v_{lim} la velocidad límite de caída de las partículas, K el tensor de difusividad y S es la función fuente que representa la entrada de partículas en el sistema, es decir, la columna eruptiva.

Esta ecuación es válida únicamente para partículas con velocidad límite v_{lim} , por lo que para simular el efecto de una erupción pliniana tiene que ser aplicada a las distintas partículas que constituyen la columna, obteniéndose el depósito final como la suma de las contribuciones de los distintos tipos de partículas consideradas.

Aún con las mayores simplificaciones admisibles, estos modelos necesitan múltiples parámetros de entrada. Así, es preciso introducir el volumen o masa total emitida, la distribución de tamaños de partícula y sus correspondientes densidades y parámetros de frenado, altura máxima alcanzada por la columna y parámetros que definan la distribución de masa dentro de la misma, ritmo de emisión y duración de la erupción e incluso la topografía de la zona, si ésta presenta grandes desniveles. Además de estos parámetros "volcanológicos" es preciso contar con datos de dirección e intensidad de viento a diversas alturas, valores de difusividad y un modelo de atmósfera que determine la variación con la altura de la densidad y viscosidad del aire.

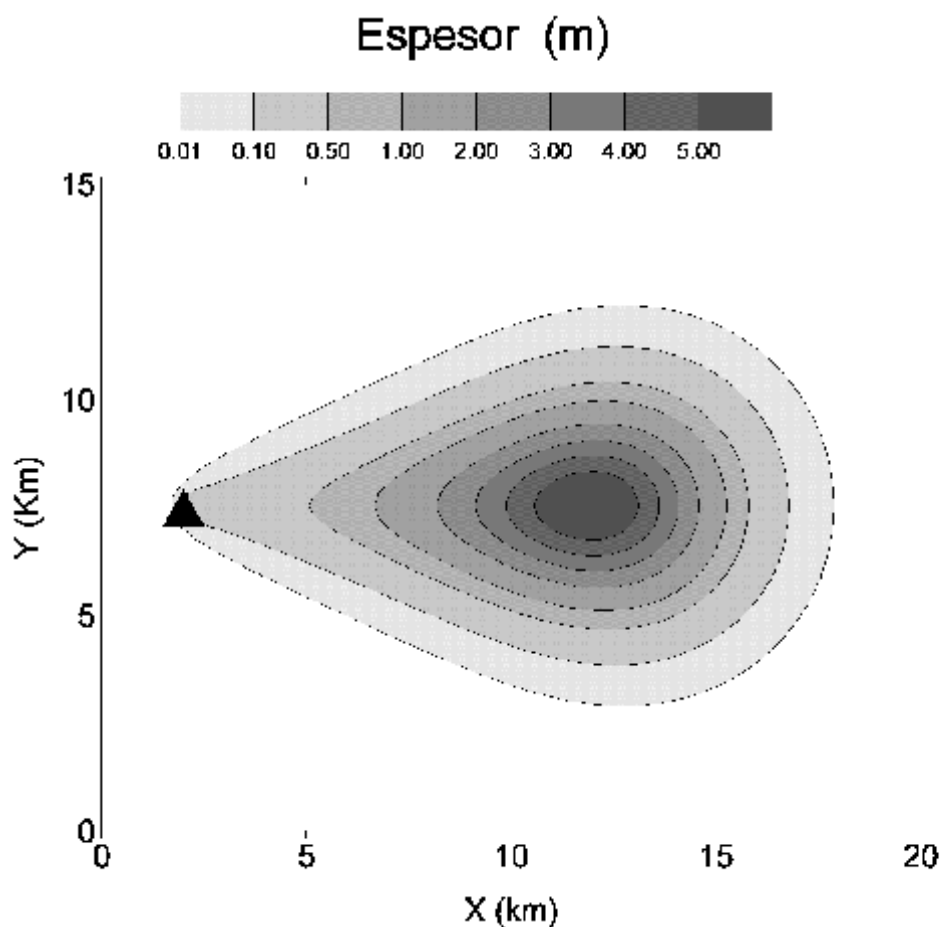


Figura 3-13 Salida del modelo de advección difusión para los siguientes parámetros: volumen total emitido 0.1km^3 , altura de la columna 6km , parámetro de forma 6 , tamaño de partículas $\phi = -1$, densidad 0.8g/cm^3 , viento constante 5m/s con dirección W, $K_x=K_y= 400\text{m}^2/\text{s}$

Evidentemente, la mayoría de estos parámetros debe ser definida basándose en el estudio de la historia eruptiva del volcán, aunque muchos de ellos (como por ejemplo la forma de la columna) son muy difíciles de determinar en erupciones que no sean muy recientes y muy bien estudiadas. En lo referente a los parámetros meteorológicos, para elaborar un mapa de peligrosidad sería necesario disponer de los datos de vientos medios medidos en un observatorio meteorológico cercano, aunque para el seguimiento de una crisis que pueda desembocar en una erupción pliniana sería preciso contar con los datos de viento medidos en tiempo real o bien los proporcionados por un modelo predictivo a plazo medio.

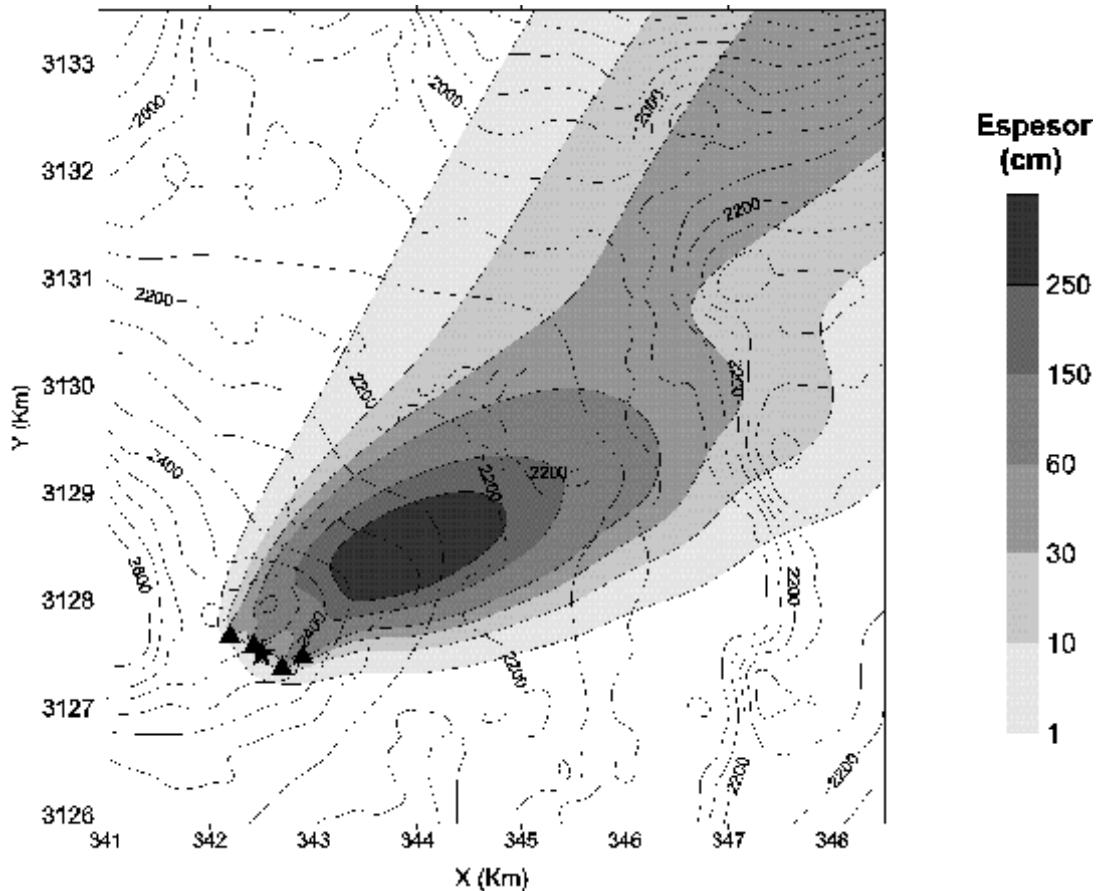


Figura 3-14 Ejemplo de aplicación del modelo de advección difusión a un proceso eruptivo complejo: la erupción de Montaña Blanca (Tenerife). En la simulación numérica se consideran cuatro centros de emisión secundarios (triángulos) y uno principal (estrella) con altura de columna de 8km. El volumen total emitido es de 0.05km^3 , las partículas consideradas son únicamente pómez con una distribución de tamaños deducida de datos de campo. El viento de intensidad 5m/s y dirección W hasta 1.5km sobre el centro de emisión y SW para alturas superiores.

Ejemplos de la aplicación de un modelo de este tipo a la reconstrucción de erupciones históricas como la de Mount St. Helens y la del Vesuvio en 79 son respectivamente los trabajos de Armienti et al. (1988) y Macedonio et al. (1988) mientras que un ejemplo de aplicación a la generación de mapas de peligrosidad es el de Macedonio et al. (1990). Las figuras 3-13 y 3-14 muestran ejemplos de salida de un modelo de este tipo aplicado a la reconstrucción de la erupción subplinaea de Montaña Blanca (Tenerife) ocurrida hace 2000 años.

3.4. MODELO DE DESARROLLO Y MAPA DE RIESGO

La realización del mapa de riesgo para ordenación del territorio a largo plazo requiere estudiar el impacto que provoca la erupción en el medio social, económico y ambiental y ensayar diversas planificaciones que permitan reducir el impacto o facilitar la recuperación. Con este fin, se procede a acoplar los modelos de peligros volcánicos con los utilizados para el seguimiento a largo plazo de los movimientos socioeconómicos.

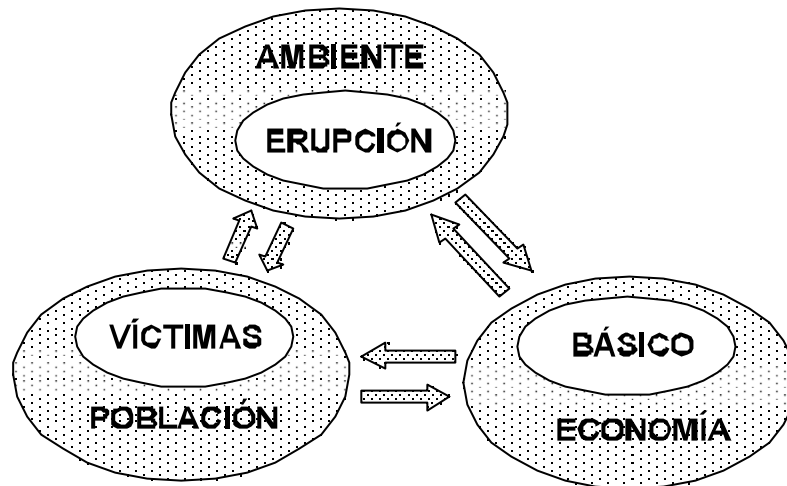


Figura 3-15 Los efectos de una erupción se manifiestan como una alteración en el medio ambiente, provoca un número mas o menos grande de víctimas y unas importantes pérdidas económicas. Para la modelización del impacto se considera un modelo lineal entre todos estos elementos (Cole 1996).

Un modelo sencillo (Fig. 3-15) considera la dependencia lineal entre todos los elementos: E (economía), P (población), B (medio ambiente) y la ocurrencia de la erupción D :

$$E(t+1) = E(t) + \alpha_{1,2}P(t) + \alpha_{1,3}B(t) + \alpha_{1,4}D(t)$$

$$P(t+1) = \alpha_{2,1}E(t) + P(t) + \alpha_{2,3}B(t) + \alpha_{2,4}D(t)$$

$$B(t+1) = \alpha_{3,1}E(t) + \alpha_{3,2}P(t) + B(t) + \alpha_{3,4}D(t)$$

La *calidad de vida* Q se puede obtener como cociente entre la economía y la población:

$$Q(t) = \frac{E(t)}{P(t)}$$

Sin embargo, para aplicar este modelo a un caso real se deben considerar las relaciones existente entre todos los estamentos la sociedad. En la tabla siguiente recoge los elementos

básicos para modelizar una isla dedicada al turismo:

VARIABLES MONETARIAS		VARIABLES AMBIENTALES	
BÁSICO	Aeropuerto Terminal de carga Puerto Refinería Central eléctrica Telecomunicaciones Sistema de Agua Sistema sanitario	SUELO	Residencial Comercial Red viaria Espacios públicos Playas Paisajes: fauna y flora Espacios naturales protegidos
TURISMO	Transporte Hoteles Lujo Hoteles Tiendas turismo Bares/Restaurantes Agencias turismo Casino Coches alquiler/Taxis Cruceros	RESIDUOS	Residuos tóxicos sólido líquido gaseoso Residuos no tóxicos sólido líquido gaseoso Vandalismo Suciedad
TRABAJO	Agricultura Industria Construcción Comercio Servicios	EMPLEO	Ocupación Lugar de residencia Lugar de trabajo
FACTORES	Educación superior Educación media Educación básica Depreciación Plusvalía		
VIVIENDA	Tradicional Urbana Marginal		
INSTITUCIONES CAPITAL	Gobierno local Gobierno estatal Inmobiliario Empresarial		
EXTERIOR	Operadores Turismo Importación Exportación Inversioes extranjeras		

basado en Cole, 1996

Los coeficientes que relacionan las distintas variables entre sí se establecen basándose en el estudio socioeconómico de la región, estimando su variación con la erupción a partir del análisis de vulnerabilidades y exposiciones a los distintos peligros.

Difícilmente se puede caracterizar la actividad de una sociedad con menos de 50 factores, lo que supone considerar matrices de 50x50 elementos (2.500). Pero para obtener un modelo realista deberemos considerar las relaciones existentes entre los distintos municipios, pues no todos ellos evolucionan de la misma manera ni van a sufrir el impacto del mismo modo. Si consideramos sólo una comunidad con 10 municipios la matriz será de $(50 \times 10)^2$ es decir 250.000 elementos que ya es una matriz difícilmente manejable, incluso con grandes computadores. Si queremos aplicar el modelo a nivel de estado nos encontraremos con matrices del orden de 10^8 elementos, tamaño que supera todos los medios disponibles. La única solución es utilizar algoritmos *orientados a objetos* que permiten trabajar simultáneamente con diferentes escalas. Esta información deberá introducirse en el Sistema de Información Geográfica (GIS) para poder evaluar adecuadamente el impacto de la erupción. Esto exige que sea el sistema escogido permita trabajar con dichos algoritmos. Es importante que al introducir cada dato se calculen automáticamente las propiedades de los objetos a las distintas escalas, pues es imposible recalcular toda la base de datos en el momento en el que se inicia la crisis volcánica y se debe empezar a establecer los mapas de riesgo volcánico. Estos modelos, desarrollados inicialmente para el estudio del desarrollo sostenible, se utilizan actualmente para el análisis de los efectos de los grandes desastres y la planificación de la recuperación (Cole, 1993).