

1 INTRODUCCIÓN

V. Araña y R. Ortiz

1.1. PLANTEAMIENTOS ACTUALES DE LA VOLCANOLOGÍA ¹

La volcanología es una ciencia joven que ha experimentado un considerable avance en estos últimos veinte años, existiendo buenas escuelas de volcanólogos y una amplia literatura al respecto (Araña y Ortiz 1984, Cas y Wright 1987, Wohletz y Heiken 1992). Sin embargo, el estudio de la actividad volcánica en una región cambia substancialmente cuando va dirigido a la evaluación de la peligrosidad volcánica (Blong 1984, Tilling 1989). Debe plantearse el estudio del volcán en dos frentes: por una parte hay que conocer cual es el estado del volcán a través de su historia eruptiva, de los magmas que intervienen, de sus ciclos de evolución magmática y de los distintos mecanismos eruptivos. Por otra parte se deben individualizar los peligros volcánicos asociado a cada estado evolutivo, determinando su período de retorno y los parámetros que lo caracterizan.

¿Que representa el riesgo volcánico? ¿Cómo puede hacerse frente a la catástrofe volcánica? ¿Cual es la situación social de la volcanología?... Dos circunstancias enmarcan hoy los trabajos sobre volcanismo activo: los grandes programas internacionales de investigación volcanológica que estudian los *volcanes laboratorio* europeos o los *volcanes de la década* (ver Fig. 1.1) y el haberse apagado ya la euforia que la erupción del St. Helens provocó en todo el mundo científico incitando al estudio del riesgo volcánico, sobrevalorando el impacto del volcán en el medio económico y social.

Una reciente revisión de los desastres naturales ha centrado la catástrofe volcánica en su justo término (2% en pérdidas del total de las catástrofes), lo que contribuye a desarrollar una política realista de mitigación del riesgo volcánico a largo plazo y de cobertura mundial. Hoy también se tiende a analizar el impacto del fenómeno volcánico en paralelo con los otros desastres naturales, con la finalidad de desarrollar una política de mitigación homogénea (McCall et al., 1992, Alexander, 1993; Kovach, 1995), A la vez que se desarrollan nuevas herramientas que facilitan la toma de decisiones en situaciones críticas (Funtowicz y Ravetz, 1995).

En estos últimos años se ha producido un cambio substancialmente importante en la vigilancia y prevención de erupciones: ya nadie pretende llenar de aparatos todo volcán que presuntamente ha entrado en erupción en los últimos cien mil años, antes al contrario, se trata de conocer cuales son sus mecanismos eruptivos, de establecerlos correspondientes modelos

¹ En trabajos recientes hemos abordado repetidamente el Riesgo Volcánico, especialmente en sus aspectos más científicos. No es de extrañar que en esta introducción repitamos casi literalmente lo que expusimos en La Volcanología Actual (Araña y Ortiz 1993)

de estos mecanismos y de determinar cual es el estado de reposo en esta área volcánica activa. En la mayoría de los estos casos, bastan unos pocos instrumentos operando en la zona unas pocas semanas cada uno o dos años, aunque debe estar perfectamente establecido como, quien y con qué hay que intervenir en caso de crisis.

Distinto es el caso de aquellos volcanes que ya están en crisis o que presentan una actividad persistente. En estos volcanes, y más para aumentar nuestro conocimiento de como es y como funciona ese volcán, sí se instalan nuevos y complejos instrumentos. Igualmente se está pretendiendo desarrollar nuevas técnicas e instrumentos que permitan medir los parámetros físicos durante el proceso eruptivo, especialmente en las erupciones de mayor violencia. La imposibilidad real de actuar directamente en las crisis más violentas hace que el desarrollo de sensores remotos, ópticos y electromagnéticos, junto con cápsulas del tipo de las empleadas en investigación espacial, tengan un nuevo campo (Rothery, 1990). El desarrollo de nuevas estructuras matemáticas (Turcotte et al., 1990), como los sistemas dinámicos, física del caos (Turcotte, 1989) o fractales (Dubois y Cheminee, 1991) encuentran una aplicación inmediata en el estudio de los procesos volcánicos. Las nuevas herramientas del cálculo electrónico, como es la inteligencia artificial (Costa et al., 1989) facilitan el procesado de los miles de datos recogidos hasta el momento en los distintos volcanes del mundo y que actualmente se están intentando estudiar conjuntamente y con la menor manipulación posible.

Los volcanólogos han tomado conciencia de que no todos los volcanes son iguales y que a efectos de vigilancia y peligro potencial no es lo mismo un volcán con actividad continua que un sistema volcánico en evolución (por ejemplo un domo o una caldera en formación), que una zona donde ocasionalmente se desencadenan erupciones fisurales con magmas que ascienden muy rápidamente y cuyos períodos de retorno pueden ser de muchos años. Cada uno de estos casos debe ser estudiado especialmente y establecer aquellos protocolos de actuación que resulten más adecuados. Tampoco debe confundirse la investigación científica de aspectos particulares de la actividad volcánica con los trabajos rutinarios de vigilancia y evaluación del riesgo.

Revisando los boletines del Global Volcanism Network (antes SEAN, también de la Smitshonian Institution) de los últimos años, puede comprobarse la reiterada referencia a la actividad, más o menos intensa de determinados volcanes. Algunos de estos volcanes son viejos conocidos (Kilauea, Etna, Sakurajima), mientras que otros saltaron bruscamente a la popularidad por sus efectos catastróficos tras despertarse violentamente de un prolongado sueño (St. Helens, Nevado del Ruiz, Pinatubo por ejemplo). Es obvio que ambos grupos de volcanes son ahora permanentemente observados, por lo que a ellos se refiere la gran mayoría de las experiencias instrumentales, máxime si estos volcanes se encuentran en países desarrollados. Otro grupo de volcanes, con igual o mayor actividad que los citados, recibe menos atención, bien porque sus períodos de actividad son más efímeros o bien porque se trata de volcanes localizados en zonas poco accesibles o alejadas, en países con menor nivel tecnológico. Dada la imposibilidad de abordar en un próximo futuro el estudio intensivo de todos los volcanes activos y potencialmente peligrosos, se tiende a concentrar los esfuerzos de la investigación volcanológica en un número reducido de volcanes significativos

o representativos por sus erupciones, estructuras, entorno socio-económico, etc.

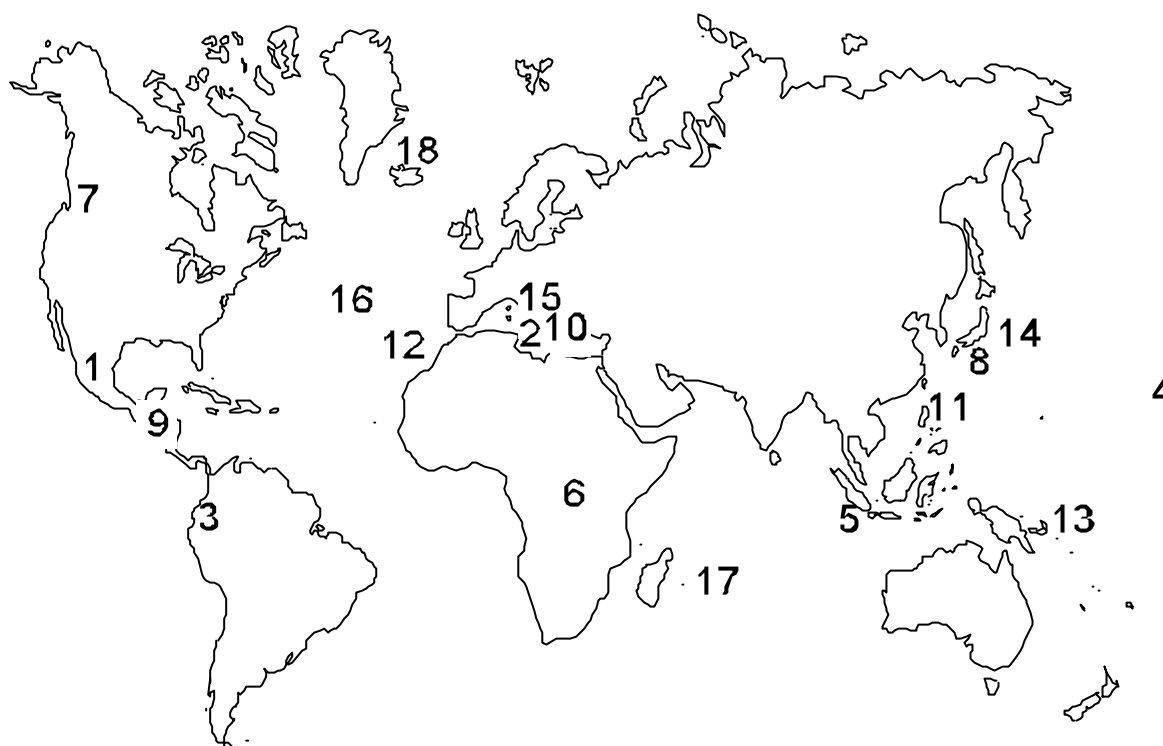


Figura 1-1 Volcanes de la Década y Volcanes Laboratorio Europeos

Volcanes elegidos para ser objeto de estudio especial durante la Década Internacional para la Mitigación de los Desastres Naturales(1990-2000).		
1 Colima, Mexico	6 Niragongo, Zaire	11 Taal, Filipinas
2 Etna, Italia	7 Rainer, USA	12 Teide, España
3 Galeras, Colombia	8 Sakurajima, Japón	13 Ulawun, Papua Nueva Guinea
4 Mauna Loa, USA	9 Santa Maria, Guatemala	14 Unzen, Japón
5 Merapi, Indonesia	10 Santorín, Grecia	15 Vesuvio, Italia

Volcanes Laboratorio Europeos		
2 Etna, Italia	10 Santorín, Grecia	17 Piton de la Fournaise, Francia
12 Teide, España	16 Furnas, Portugal	18 Krafla, Islandia

La declaración por Naciones Unidas de la Década Internacional para la Mitigación de los Desastres Naturales (IDNDR) ha conducido a la Comisión para la Mitigación de Desastres Volcánicos de la Asociación Internacional de Volcanología (IAVCEI) a seleccionar 15 volcanes en todo el mundo, para su estudio y vigilancia por equipos internacionales durante la citada IDNDR, 1990-2000. Los logros obtenidos en estos trabajos de carácter multidisciplinar podrán, en cierta forma, aplicarse a volcanes que por distintas circunstancias no pueden ser objeto de un estudio profundo (Newhall 1994).

En este mismo sentido la Unión Europea ha impulsado un importante programa para mejorar el conocimiento de los volcanes europeos, así como para el desarrollo de nuevas tecnologías aplicables a la investigación volcanológica que conduzcan a mitigar el riesgo volcánico. Para ello se han elegido seis volcanes laboratorio (Krafla, en Islandia, Furnas en Azores, Teide en Canarias, Pitón de la Fournaise en Reunión, Etna en Sicilia y Santorín en las Islas Egeas) que son objeto de un programa integrado de investigación. En este mismo programa se incluye el desarrollo de instrumentación y de metodología para la modelización de los fenómenos volcánicos. Asimismo, se espera que todos los volcanes calificados de alto riesgo, la mayoría en países en vías de desarrollo, cuenten lo antes posible con sistemas de vigilancia eficaces y con planes de emergencia específicos para la protección de la población civil en caso de crisis eruptivas.

De acuerdo con las resoluciones de diferentes congresos y conferencias, y en consonancia con las consideraciones anteriores, pueden aventurarse los derroteros que la Volcanología seguirá en este cambio de siglo, y que no difieren mucho de los que seguirán otras Ciencias de la Tierra con componentes socioeconómicos. Así, las nuevas tendencias metodológicas se dirigen hacia la mayor especialización, pero también a la sencillez en los métodos y a la valoración de las soluciones autóctonas y singulares. Por lo que respecta al tratamiento de datos se tiende, como en todas las Ciencias, a una mayor cuantificación en la elaboración de modelos. En lo referente a la política científica, se pretende compaginar el interés socio-político por un rápido desarrollo tecnológico de los sistemas de vigilancia, con el interés científico por la investigación básica a largo plazo. En esta última se cifran las esperanzas futuras para prevenir con eficacia el riesgo eruptivo, ya que el progreso puramente tecnológico alcanzado en los años ochenta se ha demostrado ineficaz a la hora de reducir los efectos catastróficos de erupciones como las de St. Helens (año 1980=60 víctimas), Chichón (1982=2000), Nevado del Ruiz (1985=22.000), Lago Nyos (1986=1.700) comparables a las de erupciones ocurridas a principios de siglo: Soufriere (1902=1.600), Mt. Pele (1902=29.000), Sta. María (1902=6.000), Taal (1911=1300).

Además, en estos últimos años hemos presenciado el fracaso estrepitoso de las técnicas de predicción de erupciones consagradas a partir de las experiencias de Hawaii o del Mont St. Helens: Campi Flegrei (Italia), con fuerte proceso bradisísmico entre 1983 y 1985; Long Valley (USA) donde se manifiestan todos los precursores y no se produce erupción alguna o Rabaul (Papua Nueva Guinea) con crisis en 1983 mientras que la erupción ocurre en 1994 con solo pequeños precursores. Finalmente la tragedias del Unzen (Japón 1991) con la muerte del matrimonio Kraft y otras 30 personas por un fallo de previsión y especialmente la del Galeras, en Colombia 1993, donde en un volcán en reposo, sin actividad sísmica ni emisiones

anómalas de gases, se produce una explosión con columna de 4 km, matando a seis volcanólogos que estaban mostrando las técnicas de predicción de erupciones hancuestionado aún más la infalibilidad de la vigilancia.

Hoy los volcanólogos ante una crisis se enfrentan a una serie de dilemas, como son el pronóstico de la actividad del volcán, la metodología de trabajo a elegir y la comunicación con los agentes sociales (Newhall, 1995). En cualquier caso, la implicación socio-económica del volcanismo impide que la futura investigación volcanológica pueda encerrarse en aspectos puramente académicos o elucubrativos, siendo imprescindible en cada país la existencia de una organización científica responsable del asesoramiento y coordinación con las autoridades de protección civil, especialmente en caso de crisis. En cuanto a la organización de la investigación, se tiende a potenciar la colaboración internacional en áreas de interés común y los cursos o seminarios de entrenamiento y especialización. Así han surgido núcleos de coordinación y grupos de trabajo específicos en el seno de la Asociación Internacional de Volcanología, o de otras Organizaciones como la Fundación Europea de las Ciencias con su Programa Europeo de Volcanología o bien con referencia al marco geográfico como el Grupo de Trabajo *ad hoc* para la mitigación del riesgo volcánico en el área del Océano Pacífico.

1.1.1. Historia eruptiva del area volcánica

El estudio de la historia eruptiva de un volcán no tiene otro objeto que modelizar las pasadas erupciones para prevenir el desarrollo de las futuras. Esta modelización requiere en primer lugar el conocimiento de las condiciones físicas del magma antes y durante la erupción. Tales condiciones están asociadas al marco geodinámico del area volcánica (Araña 1988) y se deducen principalmente mediante estudios petrológicos (texturales, mineralógicos, geoquímicos, isotópicos), siendo básico el conocimiento de los siguientes parámetros (Araña y Ortiz 1993):

- a) Profundidad, forma y dimensiones de la cámara magmática, si la hubiere.
- b) Distribución, densidad, forma y anchura de los conductos de emisión a niveles someros.
- c) Profundidad a la que se produce la vesiculación del magma y la posible interacción con acuíferos.
- d) Contenido en H₂O y temperatura del magma.

Las propias estructuras volcánicas nos proporcionan información sobre alguno de los parámetros que se acaban de mencionar. Así, la formación de calderas, tras la emisión de magmas ácidos, debe tomarse como una evidencia de la presencia de cámaras magmáticas someras. Por otra parte, en cada volcán hay que reconocer todos los mecanismos eruptivos que han actuado a lo largo de su historia, observando especialmente si hay alguna secuencia

o correlación entre ellos, dentro de una misma erupción en crisis sucesivas. De estos mecanismos, los más importantes son los explosivos, por lo que se dedica una mayor atención a los productos piroclásticos:

- a) Dispersión y volumen
- b) Tamaño de grano y porosidad
- c) Proporción y caracterización de lógicos (estratigrafía, hidrotermalismo)

El propio concepto de *historia eruptiva* requiere la participación del factor tiempo en cualquier modelo que se elabore. Interesa conocer cuando y por qué se inicia la actividad volcánica en una zona o en un punto determinado. Es prácticamente imposible disponer de un calendario con todas las erupciones de un volcán, pero debe intentarse al menos la identificación de los períodos de actividad que pueden asociarse con ciclos evolutivos de una cámara magmática. Cuando pueden caracterizarse estos ciclos, y especialmente el último de los acaecidos, se está en las mejores condiciones para elaborar modelos realmente útiles para la prevención del riesgo volcánico.

1.1.2. Condiciones magmáticas

Lo normal es que las condiciones magmáticas bajo un volcán varíen considerablemente a lo largo de su historia eruptiva, como se deduce de la variada composición química y mineralógica de los materiales emitidos. La expresión más significativa de esta variación es la que experimenta su contenido en SiO_2 y que se asocia normalmente a la evolución del propio magma en un sistema cerrado aunque también puede deberse a procesos de asimilación o mezcla de magmas. Los magmas no sólo evolucionan en las cámaras, sino que en los mismos conductos eruptivos puede desarrollarse una cristalización fraccionada, provocando importantes diferencias en la reología, el quimismo y mineralogía de las lavas emitidas a lo largo de la erupción. Por otra parte, casi siempre, la fase que precede inmediatamente a la erupción se desarrolla en un sistema abierto donde la influencia de agentes externos al magma puede ser importante (Araña y Ortiz, 1993).

Es evidente que la generación y ascenso de magma bajo una determinada zona, no implica necesariamente su erupción. En este sentido, juega un papel importante la evolución del magma retenido temporal o definitivamente en los conductos o cámaras magmáticas someras. En general, todas las lavas tienen menos de un 60% de fenocristales lo que implica que por encima de esta cristalinidad crítica son demasiado viscosas para alcanzar la superficie y se quedan formando plutones. La profundidad y dimensiones de las cámaras magmáticas someras puede determinarse por métodos geofísicos, pero tales parámetros, en ciclos eruptivos anteriores, deben obtenerse por minuciosos estudios petrológicos, basados generalmente en los desequilibrios radioactivos y en la estabilidad de determinados elementos químicos durante los procesos de cristalización fraccionada que tienen lugar en las cámaras.

Más simple parece el establecimiento de las condiciones del magma cuando éste accede directamente desde sus zonas de generación, sin detenerse en cámaras someras. En este caso, parece que la cristalización del fundido basáltico ocurre en el conducto, por encima del nivel de separación de la fase gaseosa. Esta cristalización está por lo tanto condicionada por la dinámica eruptiva y ha podido establecerse experimentalmente una estrecha correlación entre la textura de las rocas emitidas como lavas o escorias, y las condiciones magmáticas existentes durante la erupción.

Estas sencillas consideraciones petrológicas para deducir las condiciones del magma, son extrapolables a la generalidad de los volcanes basálticos, y proporcionan una buena herramienta para prevenir la evolución de futuras erupciones, comparando la textura de las rocas que se emiten sucesivamente. Sin embargo, también hay que tener en cuenta que, a veces, la separación de la fase gaseosa a mayor profundidad, o la interacción con acuíferos, o la cristalización fraccionada en el conducto, conducen no sólo a variaciones texturales en la roca sino a la aparición de distintas fases minerales con o sin variación en el quimismo total.

1.1.3. Mecanismos eruptivos

Cuando la actividad de un área volcánica está caracterizada por la efusión de coladas lávicas, la reconstrucción de su historia eruptiva debe incidir en la posible migración de sus bocas eruptivas y en el volumen de magma arrojado en sucesivas erupciones, que pueden o no referirse a ciclos o pulsos en el ascenso magmático y la actividad tectónica. En estos casos, es importante definir el marco geodinámico que condiciona las directrices volcano-tectónicas, asociadas generalmente a grandes fracturas por las que los magmas basálticos acceden a niveles superficiales. La geomorfología y las técnicas fotogramétricas son de gran utilidad tanto para correlacionar las secuencias eruptivas con la actividad tectónica regional, como para evaluar los volúmenes y dispersión del material lávico arrojado en sucesivos períodos de actividad.

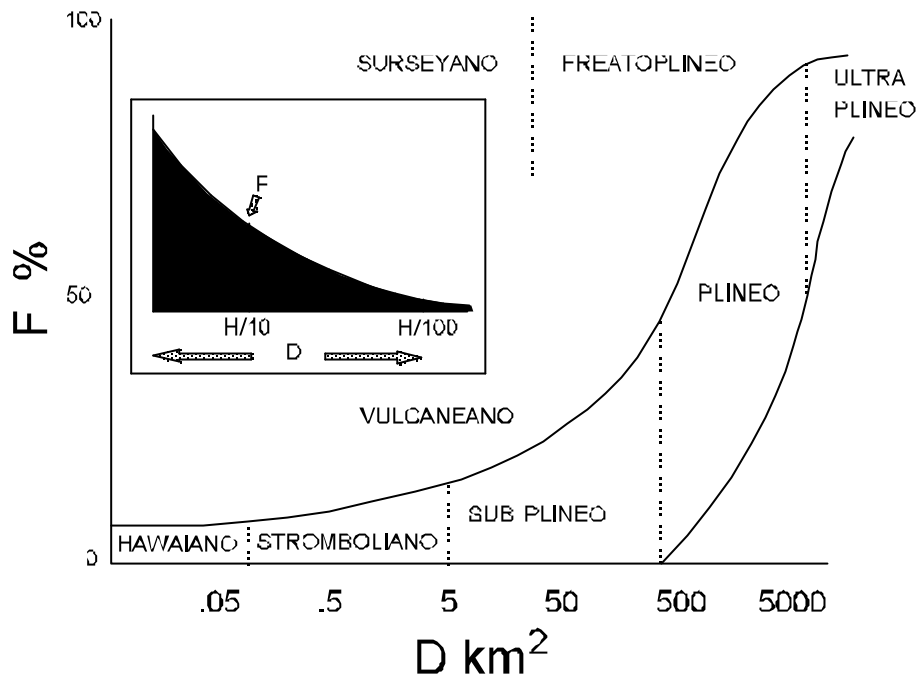


Figura 1-2 Clasificación de las erupciones explosivas basada en el área cubierta D (en km^2) encerrada por la isopaca 1/100 del espesor máximo y la fragmentación F definida como % de finos menores a 1 mm en cruce del eje de dispersión con la isopaca de 1/10 del espesor máximo. Adaptado de Walker (1981) en Araña y Ortiz (1984).

Actualmente se pone el mayor énfasis en la reconstrucción de las fases explosivas de la historia eruptiva de un volcán, dada su mayor peligrosidad al desprenderse grandes cantidades de energía en breves lapsos de tiempo. La característica fundamental de estas erupciones explosivas es la fragmentación de los materiales emitidos violentamente (piroclastos), en cuyos depósitos puede reconocerse la magnitud y el origen de las explosiones (Martí y Araña 1993).

El estudio de estos depósitos piroclásticos presenta dos tipos de dificultades. Por una parte la discontinuidad de los depósitos y su fácil deterioro erosivo impiden obtener buenas secuencias estratigráficas. Por otra parte, es muy similar el aspecto de depósitos formados por distintos procesos. Incluso puede ser difícil distinguir entre los depósitos piroclásticos de origen puramente magmático y los de origen hidromagmático. La identificación clara de estos últimos tiene el máximo interés, ya que representan fases de gran peligrosidad que pueden ser objeto de predicción en futuras erupciones que sigan pautas con antecedentes bien estudiados.

1.1.4. Ciclos magmáticos. Períodos de retorno. Aspectos probabilísticos

Cada tipo de volcán tiene una vida media estimada, pero en este parámetro es determinante

el origen del magmatismo y el marco geodinámico. En cualquier caso hay que distinguir entre los escudos basálticos alimentados casi directamente desde zonas muy profundas, y los estratovolcanes alimentados desde unas cámaras someras, que son periódicamente vaciadas por erupciones y rellenadas desde zonas profundas. Sin embargo, también aquí puede haber una transición ya que no es extraño que los escudos basálticos terminen convirtiéndose en estratovolcanes (Araña y Ortiz, 1993). La identificación de cambios regulares o secuencias en la actividad volcánica no tiene porque referirse exclusivamente a los grandes ciclos magmáticos, ya que hay otras pautas de menor entidad que, correctamente interpretadas, proporcionan importantes elementos de predicción.

La estimación de la probabilidad de que ocurra una erupción en uno cualquiera de los volcanes que existen en la Tierra debe hacerse a partir de los datos del catálogo (Simkim y Siebert 1994), el cual recoge unas 9.000 erupciones en 10.000 años, que es una muestra muy incompleta, mas aún si tenemos presente que la mayor parte de las erupciones catalogadas corresponde a los últimos 250 años. La muestra resulta todavía menos significativa si pretendemos estimar la probabilidad de que ocurra una erupción altamente explosiva en un determinado volcán. Si también consideramos que el sistema volcánico puede presentar largos períodos de reposo o responder a determinadas secuencias, todavía es más acusada la insuficiencia del tamaño de la muestra en relación con los períodos que pretendemos determinar. Todo ello, admitiendo que el volcán "juega a los dados" e ignorando que es un sistema que evoluciona de una determinada forma, con procesos de génesis y aporte de magma, ascenso de éste a través de la corteza, almacenamiento en cámaras, procesos de evolución magmática, interacción con el agua, etc.

A nivel mundial, es posible estudiar la distribución de los períodos de retorno para los distintos tipos de erupciones, basándonos en el catálogo de volcanes activos y ordenándolos según el índice de explosividad VEI (Newhall y Self 1982, vermas adelante 2.2.1, pag 39 de este volumen). El problema es que para las erupciones más catastróficas, las más interesantes a nivel de estudios de riesgo volcánico, la muestra es muy pequeña y por consiguiente su indeterminación es grande. Además, el catálogo es temporalmente incompleto, con muchos datos en los 200 últimos años, que evidentemente es un período de muestreo muy pequeño frente a los períodos de retorno que exhiben la mayor parte de los volcanes, especialmente para sus erupciones más violentas. Así, para erupciones con VEI 8 se obtiene un período de retorno de 100000 años para un intervalo de muestreo de 10000 años, pero si solo consideramos los últimos 300 años obtenemos un período de retorno de solo 4800 años, consecuencia de la ocurrencia de la violenta erupción del Tambora en 1751.

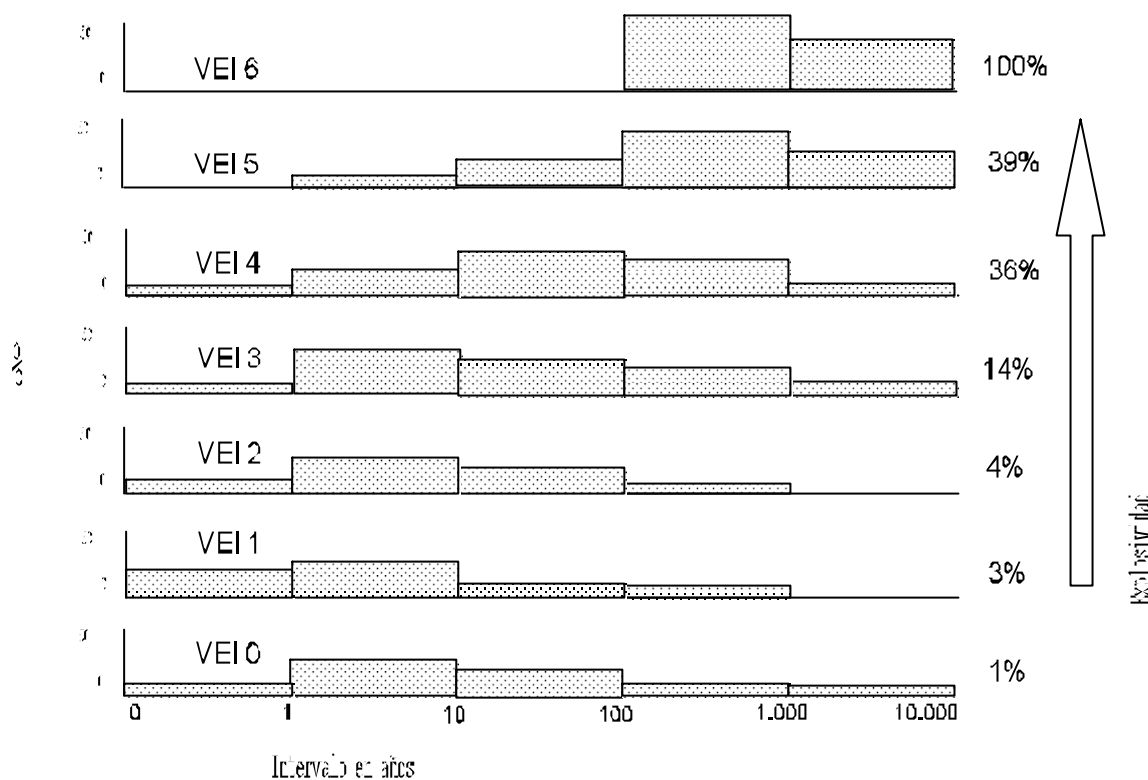


Figura 1-3 Índice de explosividad e intervalo entre erupciones (Simkin y Siebert 1994).

En general se observa que la pauta para el volcanismo explosivo es el presentar largos períodos de inactividad, siendo tanto mayor la violencia de la erupción cuanto mayor sea el período de reposo precedente. El escaso número de grandes erupciones explosivas bien estudiadas hace aventurada cualquier hipótesis. Siempre deberíamos tener presente que la descripción estadística simplemente suple nuestra falta de conocimiento de la física de los procesos volcánicos. Un sistema volcánico no es un sistema Poisson, ya que, de hecho, se produce en el volcán una serie de procesos encadenados, perfectamente claros: ascenso del magma, almacenamiento y evolución en cámaras magmáticas y erupción. Esto es especialmente importante para las grandes erupciones explosivas, en las que intervienen volúmenes de magma que superan el km^3 , es por ello que después de una gran erupción, este tipo de volcanes queda en reposo durante varios centenares de años y, en general, la magnitud de la erupción es tanto mayor cuanto más largo ha sido el período de reposo.

Una aproximación estadística que permite representar diversos estados de la actividad del volcán es la Cadena de Markov. Una cadena de Markov es una sucesión de estados en el tiempo (o espacio) cuya probabilidad de transición de un estado X_i al siguiente estado X_j depende únicamente del estado X_i . En una cadena de este tipo las probabilidades de transición entre los distintos estados dependen únicamente del estado precedente y no del

camino seguido para llegar a él. Se admite que el sistema es estacionario, es decir, la probabilidad de transición entre t y $t+dt$ depende únicamente de dt .

Un caso particular de cadenas de Markov, de gran interés práctico para la modelización de la actividad volcánica, es el que corresponde a un sistema de n estados discretos X_i conectados mediante transiciones cuya probabilidad de transición del estado X_i al X_j viene dada por λ_{ij} . El sistema se representa mediante una matriz de $n \times n$ elementos λ_{ij} . La condición de normalización exige:

$$\lambda_{ii} = 1 - (\lambda_{i1} + \lambda_{i2} + \lambda_{i3} + \dots)$$

La aplicación de las matrices de Markov al estudio de la actividad volcánica (Wickman, 1976) permite construir modelos complejos en los que se simulan los procesos de génesis y transporte de magma, la interacción con acuíferos, la alternancia de erupciones más o menos violentas, etc.

La aplicación práctica de estos modelos exige disponer de una excelente cronología de todos los eventos ocurridos en el volcán para poder calcular los distintos coeficientes de la matriz de Markov. Seguidamente, mediante un método de Montecarlo, se pueden generar distintas secuencias que después son comparadas con las obtenidas por el estudio en campo del volcán. Este proceso permite ir mejorando el ajuste de los distintos coeficientes que constituyen la matriz, así como poner de manifiesto la existencia de determinadas pautas en el comportamiento eruptivo del volcán. El modelo más elemental corresponde a un volcán en el que sólo se presentan dos estados: R , reposo y E , erupción. En este caso la matriz de Markov correspondiente sería:

$$\begin{pmatrix} 1 - \lambda_{RE} & \lambda_{RE} \\ \lambda_{ER} & 1 - \lambda_{ER} \end{pmatrix}$$

Un aparato volcánico que respondiera a este modelo presentaría una gran similitud en los intervalos entre erupciones, así como en la duración de las mismas.

El siguiente modelo corresponde a un sistema de tres estados: R reposo, E erupción y P actividad persistente. En este caso es preciso determinar 3x3 coeficientes, que se reducen a 6 al imponer la condición de normalización. Sin embargo, en muchos casos es posible definir transiciones prohibidas (que corresponden a un coeficiente nulo).

Para un volcán complejo, como puede ser el Vesuvio, el modelo se complica considerablemente: actividad persistente, erupciones efusivas, erupciones plineanas, largos

períodos de reposo, formación de calderas, etc, son algunos de los estados a representar.

La figura 1-4 muestra el modelo elemental, mientras que la figura 1-5 corresponde al modelo propuesto recientemente para el Vesuvio, donde, para facilitar su realización, se consideran dos grandes estados correspondientes a conducto abierto y conducto cerrado y en cada uno de ellos otros tres estados.

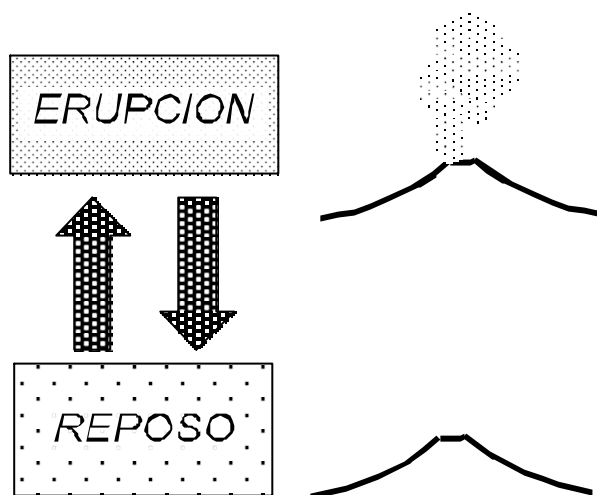


Figura 1-4 Modelo Markov de un volcán elemental (dos estados)

La determinación de los distintos parámetros que intervienen en un modelo de este tipo requiere disponer de una larga historia del volcán, con todos sus ciclos bien definidos, por ello estos modelos difícilmente pueden pasar de ser un ejercicio académico con escasa aplicación práctica. Pensemos que estamos tratando de conocer las constantes que rigen el comportamiento de las grandes erupciones plineanas, separadas por miles de años y con multitud de otras erupciones de menor entidad intercaladas entre ellas y de muy difícil identificación.

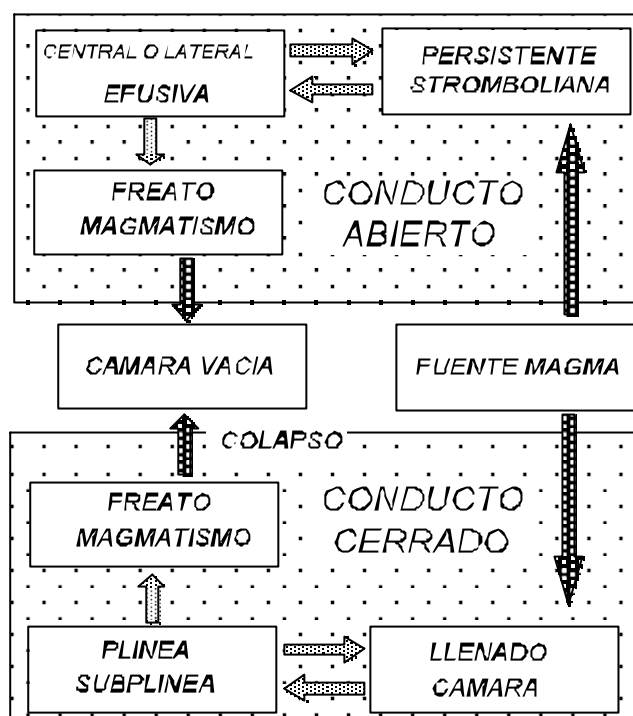


Figura 1-5 Modelo de cadena de Markov para la actividad del Vesuvio (Santacroce, 1995).

1.2. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO

La existencia y dimensión del riesgo volcánico es un concepto que gradualmente se está imponiendo en todo el mundo, a consecuencia de las últimas erupciones catastróficas y de su impacto, magnificado por medios de comunicación de masas y especialmente por la labor de concienciación y divulgación que se realiza con motivo de la Década para la Mitigación de los Desastres Naturales. Podemos decir que en estos últimos años se está impulsando una cultura para la mitigación de los desastres naturales, desarrollándose metodologías para la estimación objetiva del riesgo, teniendo presente que su análisis riguroso afecta a todos los estamentos de la estructura social y para varias categorías de elementos expuestos a riesgo.

Son numerosas las publicaciones recientes dedicadas al tratamiento unificado de los efectos negativos de los desastres naturales (Araña, 1995a). En todas ellas evidentemente presentan un peso importante los temas dedicados al riesgo sísmico, dado su gran impacto económico y el amplio desarrollo alcanzado por la ingeniería sísmica (Tiedemann, 1992).

Un error frecuente es asociar el riesgo volcánico y el riesgo sísmico. Ambos sólo tienen en común el ser los desastres naturales popularmente más espectaculares, quizá porque sólo muy de tarde en tarde producen un impacto lo suficientemente grande para saltar a la primera página de los medios de comunicación y por ser un reflejo de la actividad interna del planeta. Una diferencia esencial entre el tratamiento del riesgo sísmico y el volcánico radica que el peligro sísmico es único (el terremoto) y casi instantáneo, mientras que la erupción volcánica puede prolongarse durante meses y los factores de peligro son múltiples: coladas lávicas, flujos y caída de piroclastos, lahares y avalanchas, gases, sismos volcánicos, tsunamis,

anomalías térmicas, deformaciones del terreno, etc.

1.2.1. Definición del Riesgo

El riesgo podría definirse en términos abstractos como la expectativa de que ciertos eventos produzcan un impacto adverso sobre algunos elementos expuestos. Esta expectativa está basada en la racional proyección de experiencias, ocurridas en el pasado, al futuro inmediato.

Son los intereses económicos los que introducen en la Sociedad el concepto actual y la consiguiente cuantificación del Riesgo. Esto ocurre en épocas muy recientes, después de que el término *catástrofe natural* sustituye al de *castigo divino*, dándole así una opción a la Ciencia en el entendimiento de los fenómenos naturales.

De acuerdo con el nivel del conocimiento actual del problema del análisis del riesgo, una parte importante del mismo deberá enmarcarse en un ámbito probabilístico que deberá conjugarse con el conocimiento determinista que exista del fenómeno objeto de estudio. La adopción de este marco permite extraer, mediante el uso de modelos apropiados y datos reales, importantes conclusiones para la mitigación del impacto de las catástrofes naturales. Debemos tener siempre presente que la ocurrencia de un desastre es el resultado de la conjunción de múltiples elementos (cadena o árbol de sucesos en fig 1-6).

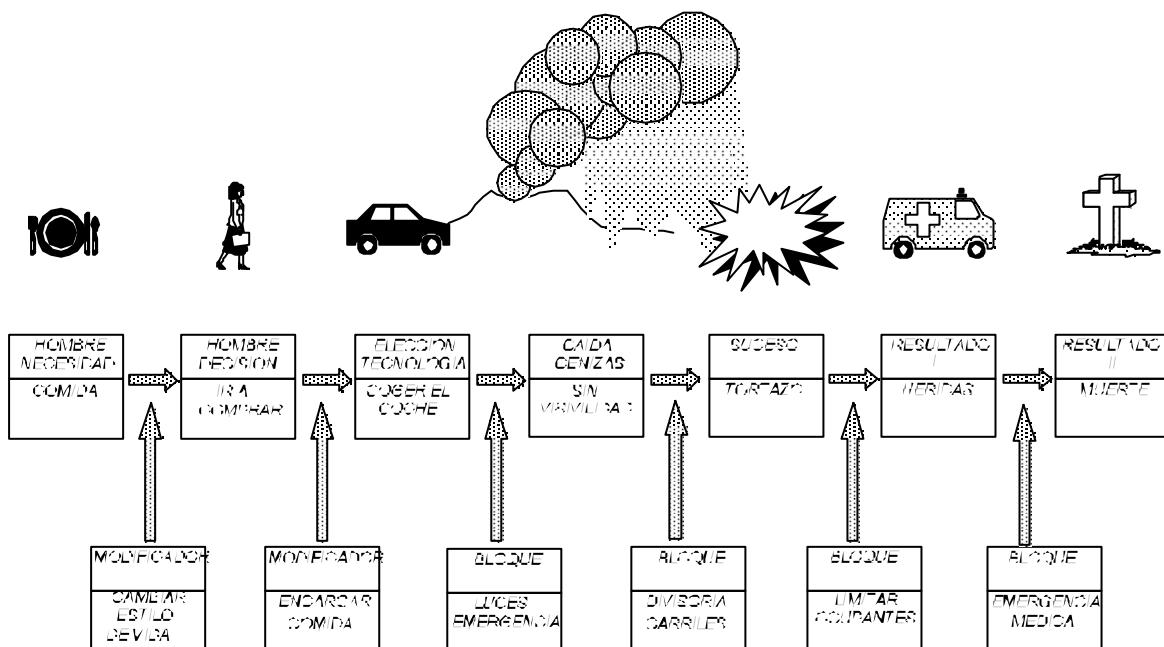


Figura 1-6 Cadena de sucesos y decisiones en un desastre

El establecimiento de un marco para el estudio de los riesgos asociados a los desastres naturales requiere la introducción de una serie de conceptos básicos que permitan relacionar de forma inequívoca los distintos desastres y sus efectos. La adopción de una metodología común a todos los desastres permite una mejor comprensión de la problemática de los distintos riesgos por parte de los estamentos sociales involucrados y un mejor aprovechamiento de los recursos empleados en su mitigación. Los conceptos básicos en su formulación para el análisis del riesgo volcánico son:

PELIGRO VOLCANICO

Expectación de la incidencia de un fenómeno ligado a la actividad volcánica. Se debe expresar como la probabilidad de que ocurra el fenómeno en un determinado período de tiempo.

VULNERABILIDAD

Expectativa de daño o pérdida infligida a un elemento expuesto y condicionada a la severidad de la acción del evento volcánico. Se expresa el porcentaje de daño referido a la pérdida total para la acción esperada.

ELEMENTO DE RIESGO

Cualquier valor que pueda resultar adversamente afectado como consecuencia de la incidencia de un evento volcánico

RIESGO ESPECIFICO

Expectación de daño o pérdida infligida a un elemento de riesgo, durante un cierto período de exposición

RIESGO

Riesgo específico referido a coste.

El concepto actual del Riesgo lleva implícita su "no eliminabilidad". Así, el Riesgo tendrá siempre un valor numérico (monetario o en número de víctimas), que podrá calcularse con algún tipo de fórmula. Todas estas fórmulas, en el caso del riesgo volcánico, incluyen el producto de la *peligrosidad* volcánica por la *vulnerabilidad* y por la *exposición*. Al ser las funciones de peligrosidad y vulnerabilidad, distribuciones definidas en un marco probabilístico, hay que entender este producto como un producto de convolución entre funciones.

$$\langle \text{RIESGO} \rangle = \langle \text{VULNERABILIDAD} \rangle * \langle \text{EXPOSICION} \rangle * \langle \text{PELIGRO} \rangle$$

Según esta expresión, para establecer el riesgo se debe obtener la peligrosidad y la vulnerabilidad para cada punto de la zona en estudio. La siguiente expresión nos permite relacionar la peligrosidad en un punto alejado con la peligrosidad en un punto próximo al volcán:

$$\langle P, X \rangle = \langle A, X \rangle * \langle P, 0 \rangle \quad (2)$$

P representa la peligrosidad para el fenómeno considerado, X el vector de posición del punto considerado. A es una función que representa la atenuación del fenómeno con la distancia a la fuente. Estas funciones de atenuación encierran la información correspondiente a topografía, tipo de terreno, etc.

Una relación parecida puede establecerse para la vulnerabilidad en función de la distancia al volcán:

$$\langle V, X \rangle = \langle A, X \rangle * \langle V, 0 \rangle \quad (3)$$

La peligrosidad y la vulnerabilidad pueden evaluarse siguiendo dos metodologías distintas: por una parte en base al estudio de los efectos de erupciones pasadas (métodos observacionales) y por otra partiendo de modelos teóricos de los fenómenos y sus efectos (métodos predictivos). En el estado actual del conocimiento del fenómeno volcánico se utiliza un método mixto, que conjuga la observación detallada de los efectos de las pasadas erupciones ocurridas en la zona y, mediante técnicas numéricas basadas en la física de los fenómenos volcánicos, modeliza los efectos de la erupción esperada (Barberi et al., 1989a; Dobran et al., 1990).

El carácter estadístico de los análisis de riesgo volcánico requiere que los trabajos de muestreo en campo satisfagan dos condiciones:

- a) suficientemente numerosos para que el resultado sea estadísticamente creíble.
- b) suficientemente homogéneos para ser significativos.

Estos dos requerimientos entran en ocasiones en conflicto, especialmente en el ámbito de las Ciencias de la Tierra donde no siempre es fácil muestrear adecuadamente o donde los intervalos temporales entre los fenómenos no permiten tener un conocimiento directo de los mismos.

Las vulnerabilidades pueden determinarse tanto para estructuras simples como para sistemas multicomponentes. La vulnerabilidad frente a la exposición a los diferentes peligros volcánicos es difícil de determinar experimentalmente, pues tenemos muy poca experiencia directa en erupciones catastróficas que hayan afectado un área urbana desarrollada. Por ello, debemos extrapolar la información obtenida de los efectos producidos sobre estructuras simples, generalmente rurales, a sistemas complejos. Esta extrapolación resulta muy difícil de realizar, por lo que hay que acudir a la utilización de métodos estadísticos como puede ser Montecarlo, considerando los efectos sobre las estructuras situadas en distintos escenarios (Sandi 1986, 1995). Esta metodología está ampliamente desarrollada para el caso de la determinación de las vulnerabilidades en el caso sísmico, donde terremotos destructores como el de Ciudad de México en 1995 o el ocurrido en Campania, Italia 1980, han aportado suficientes datos experimentales.

Lógicamente, las evaluaciones más precisas del Riesgo son las aplicadas por las compañías de Seguros que introducen factores como la "*percepción del fenómeno*" por parte de la población.

$$R = C \cdot P \cdot Ca \cdot P(E) \quad (4)$$

Siendo p la percepción, Ca las causas (erupciones en este caso) y $P(E)$ la probabilidad de que ocurra el evento en un lugar y un momento determinado. Lógicamente, la "*percepción*" es un valor tan manipulable como la "*peligrosidad*" o la "*vulnerabilidad*", de ahí que puedan añadirse al término Riesgo muchos adjetivos.

RIESGO	MAXIMO, MEDIO, MINIMO ESPECIFICO, TOTAL OBJETIVO, SUBJETIVO RELATIVO, COMPARABLE ASUMIBLE, ACEPTABLE CUANTIFICABLE PERCEPTIBLE ZONIFICADO -----
---------------	---

1.2.2. Impacto espacial de una catástrofe volcánica

Aparentemente, parece sencillo definir la extensión de la zona de influencia de un desastre como aquella donde se han producido los daños, pero esto no es tan simple. Si se analiza con detalle es fácil determinar una primera zona donde se ha producido el *impacto* directo y en la que generalmente se concentran los mayores daños; a su alrededor se extiende otra zona, mucho más extensa donde se han producido daños que se pueden calificar como *marginales*, pero la influencia del desastre va mucho más allá: en regiones próximas el desastre se deja sentir de forma muy acusada (familiares y conocidos fallecidos, pérdida de propiedades y la llegada masiva de evacuados) por lo que se conoce como zona de *filtración* del desastre. En general, toda la nación sufrirá de una u otra forma los efectos, aunque sólo sea en los impuestos necesarios para acometer la reconstrucción. Finalmente, y para los grandes desastres, la comunidad internacional también interviene aportando ayudas más o menos desinteresadas (Alexander, 1993).

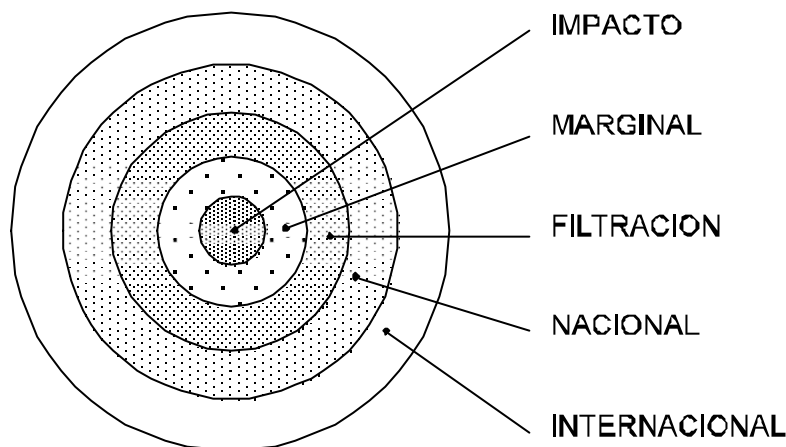


Figura 1-8 Zonas de influencia de un desastre volcánico. Basado en Alexander, 1993.

1.2.3. Protección y optimización del riesgo

Se pueden considerar dos situaciones: La primera reflejaría un área volcánica activa en la que se trata de establecer una *norma* semejante en ciertos aspectos a la normativa sismorresistente. La segunda situación se refiere a un volcán en crisis o cuando ya se ha iniciado una erupción. La mejor protección se consigue eligiendo cuidadosamente los emplazamientos e incorporando los adecuados elementos de seguridad en los edificios, factorías, plantas energéticas, infraestructuras, etc. Es evidente que tratar de minimizar las pérdidas causadas por una futura erupción gigantesca supone una fuerte carga económica para toda la región. Las medidas de protección hay que establecerlas de acuerdo con la vulnerabilidad que presenta cada elemento de riesgo frente a la exposición a cada suceso volcánico (lavas, caída de piroclastos, coladas y oleadas piroclásticas, lahares, etc). Las medidas de protección incluyen la situación de los emplazamientos en zonas alejadas del

volcán, en oposición a los vientos dominantes, protegidos por obstáculos orográficos, fuera de valles que conduzcan hasta las laderas del volcán y la construcción de grandes barreras para desviar o frenar las avalanchas y flujos lávicos o piroclásticos. Sin embargo, no debemos olvidar que el concepto de riesgo, además de la expectativa de daño, encierra una componente de probabilidad. La conjunción de ambas permitirá evaluar la rentabilidad de la inversión necesaria para proteger determinadas estructuras frente a la posibilidad de abandonarlas en caso de crisis. En el estado actual del conocimiento, cualquier pretensión de evaluar correctamente la exposición al peligro volcánico es pura fantasía. La mayor parte de los volcanes son impredecibles, salvo unos pocos sometidos a un intensivo seguimiento y que presentan erupciones casi continuas. Además, estos pocos volcanes exhiben un comportamiento que podríamos considerar como dócil.

VALORACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO (NLA 1992)	
Probabilidad de pérdidas o daños	
Distancia del elemento de riesgo al volcán o sistema volcánico	
Historia eruptiva en comparación con otros volcanes semejantes.	Período de retorno
	Tamaño de la erupción
Tipo de volcán referido a sus mecanismos eruptivos mas frecuentes. Características de los productos emitidos anteriormente.	Lava, bombas, lapilli, cenizas, avalanchas, flujos piroclásticos, lahares, gases
	Contenido en SiO₂
	Índice de Explosividad (VEI)
Tiempo-Historia de la actividad eruptiva.	Aparentemente dormido Período de reposo anormal
Elementos topográficos que pueden modificar la exposición.	Valles, canales, lagos, glaciares, obstáculos, domos, etc
Sismicidad asociada.	
Tsunamis de origen volcánico.	
Extensión del daño	
Distancia al centro de emisión.	
Vulnerabilidad del elemento de riesgo, considerando el tipo de mecanismo eruptivo	
Condiciones meteorológicas. Vientos predominantes.	

1.2.4. Volcanes de alto riesgo

Una cuestión habitual en toda zona donde haya existido actividad volcánica, aunque ésta sea ya muy remota, es saber si sus volcanes presentan algún riesgo potencial. Términos como volcán activo, dormido o muerto son habituales incluso entre profesionales de las Ciencias de la Tierra. Para poder cifrar de alguna manera cual es la posible actividad de un volcán en relación a su riesgo potencial, se ha establecido un sencillo cuestionario que refleja claramente el concepto de riesgo definido como producto de la peligrosidad del volcán por la vulnerabilidad de la actividad humana.

El cuestionario, preparado por la UNESCO está dividido en dos partes, la primera hace referencia al tipo de actividad que ha mostrado el volcán a lo largo de su historia, mientras que la segunda parte está dedicada exclusivamente a valorar la población existente en el entorno del volcán. Este tipo de cuestionarios refleja bien el modo de trabajo requerido en la valoración del riesgo volcánico: metodologías claramente establecidas y que permitan de un modo fácil asignar un bit (0-1) a cada uno de los elementos que intervengan.

Criterio UNESCO para la identificación de volcanes potencialmente peligrosos.	
CAPACIDAD DESTRUCTIVA DEL FENÓMENO	
Elevado contenido en sílice en los productos emitidos	
Actividad explosiva importante en los últimos 500 años	
Actividad explosiva importante en los últimos 5000 años	
Flujos piroclásticos en los últimos 500 años	
Lahares (flujos de fango) en los últimos 500 años	
Tsunamis (origen volcánico) en los últimos 500 años	
Area destruida > 10 km ² en los últimos 500 años	
Area destruida > 100 km ² en los últimos 5000 años	
Enjambres de sismos volcánicos en los últimos 50 años	
Deformación significativa del terreno en los últimos 50 años	
POBLACIÓN AFECTADA	
Población en peligro > 100	
Población en peligro > 1000	
Población en peligro > 10000	
Población en peligro > 100000	

Población en peligro > 1000000	
Muertes en período histórico	
Evacuación causada por erupción	
TOTAL (Alto riesgo > 10)	

(Yokoyama et al., 1984)

1.2.5. Seguimiento, pronóstico y predicción de erupciones

Al tratar el tema del riesgo volcánico, necesariamente debemos hacer hincapié en lo que la Volcanología, como disciplina científica puede realmente aportar a la mitigación de las catástrofes volcánicas. Está muy extendida la creencia de que con unos instrumentos dispuestos alrededor del volcán es posible conocer con suficiente antelación el inicio de una erupción. Esta idea esta apoyada incluso por organizaciones internacionales que con ello pretenden acallar la mala conciencia ante desastres ocurridos en el tercer mundo amparándose en que el volcán no estaba adecuadamente instrumentado y regalando después de la catástrofe una serie de instrumentos más o menos obsoletos. También un cierto colectivo de científicos pretende con ello obtener una financiación extraordinaria para desarrollar trabajos de índole académica y cuya proyección en cuanto a mitigación del riesgo es más bien remota. El problema radica en que se confunden, voluntaria o involuntariamente tres conceptos distintos que son básicos para el análisis del riesgo volcánico: seguimiento, pronóstico y predicción (Swanson et al, 1985):

Seguimiento

Permite conocer cual es la actividad del volcán en cada momento: donde está el magma, que temperatura tiene, cual es su contenido en gases, que actividad sísmica se desarrolla en él, y si está en erupción cuales son las características de la misma. Su finalidad es una descripción todo lo completa que se pueda de los fenómenos que ocurren en la erupción. Con el seguimiento somos capaces de describir la situación del volcán, pero sin aventurar nada sobre su comportamiento futuro. Esta información la podemos comparar con la obtenida en días anteriores y establecer cual ha sido la evolución del volcán.

Pronóstico

Se basa en inferir a partir del seguimiento de la actividad del volcán cual será su evolución en el futuro. Conocemos los distintos fenómenos que pueden ocurrir próximamente en el volcán, sin poder aventurar tiempos o secuencias. Esta proyección al futuro se basa en una extrapolación hacia adelante de la evolución del volcán y sabemos que esta extrapolación es tanto mas incierta cuanto mayor sea el intervalo de tiempo. Este concepto popularmente está muy extendido en otros campos como es

la medicina o la meteorología. A nadie le sorprende que un pronóstico del tiempo sea totalmente erróneo.

Predicción

Es poder afirmar cual será el comportamiento del volcán en el futuro inmediato. Intrínsecamente el concepto de predicción no está asociado a incertidumbre alguna. Solo a muy corto plazo, podemos describir de modo preciso la evolución del volcán y los efectos que van a producirse. La predicción implica afirmar ciertamente que el evento E se producirá en la localidad X en el día D.

El estado actual del conocimiento de la actividad volcánica permite realizar el seguimiento del volcán, aventurar un pronóstico y solo en casos muy concretos hacer una predicción inmediata de la evolución del volcán. La propia naturaleza de la física de los fenómenos volcánicos nos muestra que no va a ser posible nunca hacer una predicción a largo plazo.

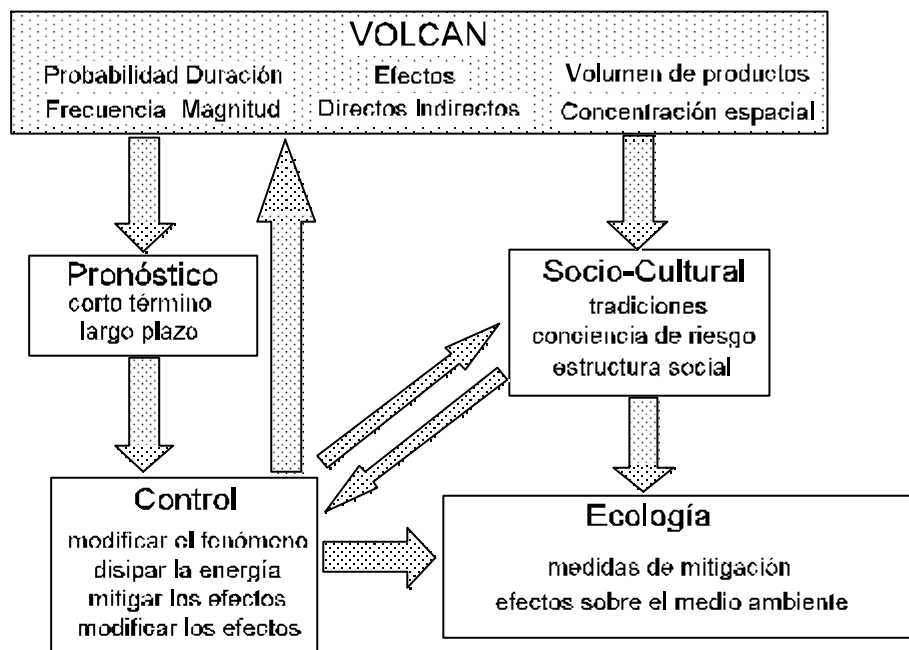


Figura 1-9 Elementos que intervienen en la gestión de una crisis volcánica

La figura 1-9 incide en estos tres conceptos, pero mas claramente en el pronóstico: está el volcán, que entrará en erupción en un momento dado; está la población expuesta que sufrirá su impacto y que lo asimilará de acuerdo con su cultura y tradición, exigiendo un tipo determinado de actuación y está el medio ambiente que es un factor que cada día cobra más importancia y que en algunos casos puede limitar seriamente las actuaciones.

1.3. ALGUNAS REFLEXIONES MÁS SOBRE EL RIESGO VOLCÁNICO Y SU

MITIGACIÓN

En este apartado pretendemos llamar la atención sobre algunos aspectos básicos, que afectan al Riesgo Volcánico y cuyo conocimiento parece elemental, pese a lo cual, no siempre se tienen en cuenta.

En primer lugar, hay que considerar como un todo el conjunto de elementos (instituciones, medios y personas) que intervienen en caso de ocurrencia de una erupción. Es absurdo que se potencie la estructura de la protección civil si simultáneamente no se refuerza el equipo científico, y poco se conseguirá, si esto no lleva acompañado un esfuerzo educacional a todos los niveles. El siguiente cuadro (UNDRO/DHA, 1991) muestra el conjunto de elementos a desarrollar para poder afrontar la ocurrencia un desastre.

MARCO DE PREPARATIVOS PARA CASOS DE DESASTRE		
Evaluación de vulnerabilidad	Planificación	Estructura Institucional
Sistemas de Información	Base de recursos	Sistemas de alerta
Mecanismos de respuesta	Educación y entrenamiento del público	Simulacros

1.3.1. Investigación, Vigilancia, Protección Civil

En la mitigación del riesgo volcánico intervienen básicamente tres elementos cuyas funciones y responsabilidades están claramente delimitadas, tanto en las crisis como en los períodos de tranquilidad.

Científicos / Volcanólogos	INVESTIGACIÓN
Técnicos / Especialistas	VIGILANCIA
Servicios Protección Civil	PLANIFICACIÓN/EJECUCIÓN de medidas para la mitigación del riesgo

Especialmente importante es que las redes de vigilancia de volcanes no se confundan con los instrumentos y equipos que coyunturalmente puede instalar un equipo científico en torno al volcán. En general, los Organismos de Investigación no tienen como objetivo, y carecen de

infraestructura, para el registro rutinario de datos (sísmicos, magnéticos, etc.) salvo que no existan organismos especializados en esta función. En regiones cuya tasa eruptiva no sea elevada, estos últimos organismos disponen de Redes de Vigilancia que también se ocupan de registrar parámetros de interés volcanológico para lo que basta con un equipamiento mínimo, pero cuyo mantenimiento esté asegurado. Esta vigilancia rutinaria² queda así garantizada independientemente de que los registros que se están obteniendo sean o no atractivos desde el punto de vista de un científico-investigador.

1.3.2. Volcanes y Sociedad

Los factores culturales modifican la aceptación del riesgo. Asimismo, la sensibilidad ante la catástrofe no es la misma entre los distintos sectores de la población, dividida según sus niveles culturales, intereses económicos, actividades, ideas religiosas, edad, etc. No obstante, y como regla general, el riesgo solo es aceptable en el ámbito de actividades que presenten beneficios.

La percepción del riesgo tampoco es homogénea, ni siquiera entre grupos científicos o políticos. Esto conduce en ocasiones a la manipulación del riesgo por parte de estos grupos, ya que no hay una "autoridad mundial" a la que recurrir.

Ante la necesidad de asumir algún riesgo, la sociedad debe elegir entre las siguientes estrategias:

No intervención
Procedimientos estandar
Procedimientos específicos (limitando actividades de alto riesgo)
Comparación con experiencias anteriores (para conocer las preferencias de la sociedad)
Análisis coste-beneficios (racionalizar el gasto)
Análisis de decisión (racionalizar los criterios)
Consenso por encuestas populares (para conocer preferencias)

Un esquema simplificado de estas opciones es el siguiente:

² El adjetivo "rutinaria" que aplicamos aquí a la vigilancia estática y permanente, no implica una minus-valoración de esta tarea que es básica en la prevención de erupciones/mitigación del riesgo. En este volumen no se desarrollan los temas específicamente relacionados con la Vigilancia, ya que estos aparecen muy ligados a la Instrumentación, que es el objeto de otros textos, como los que se utilizan en el Curso Internacional de Volcanología (Ortiz, 1994 a, b).

PASIVIDAD	Actitud fatalista en algunas culturas
	Elevado coste en países desarrollados
INTERVENCIÓN	CONTROL (defensa activa de los daños)
	PREVISIÓN (Predicción del evento-Prevención)
	Falla porque: <i>Falta memoria histórica</i> La Sociedad sólo se preocupa despues de la catástrofe (no se escarmienta en cabeza ajena)

Si bien el mundo occidental opta por la *previsión* dada la importancia que se da al análisis de la relación *riesgo/beneficio*, también vemos que la *no intervención* puede ser la opción en algunas zonas muy desarrolladas cuando el coste de las medidas para mitigar el riesgo es demasiado elevado o supone un freno al desarrollo económico. En la figura 1.10 se presenta un esquema del cálculo de vulnerabilidad e impacto neto del desastre.

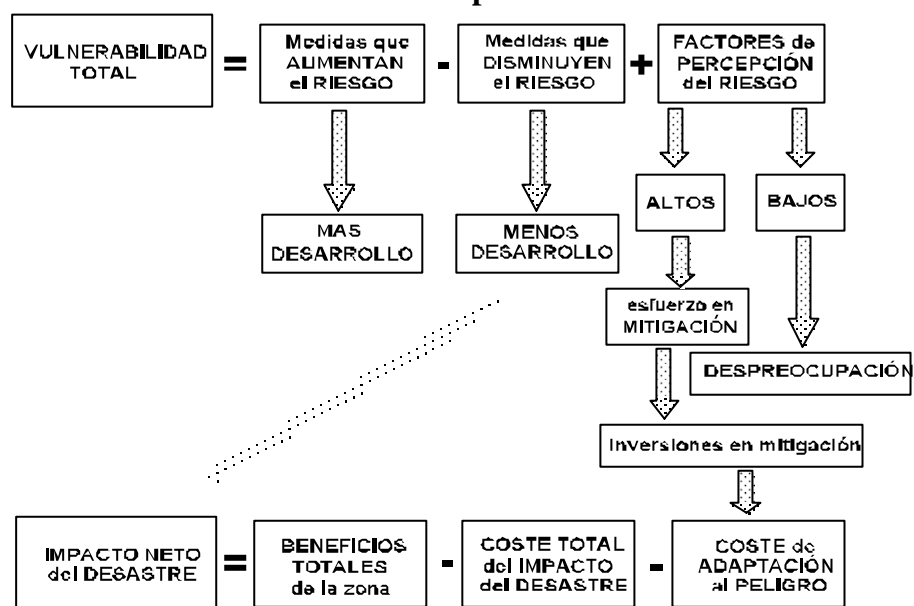
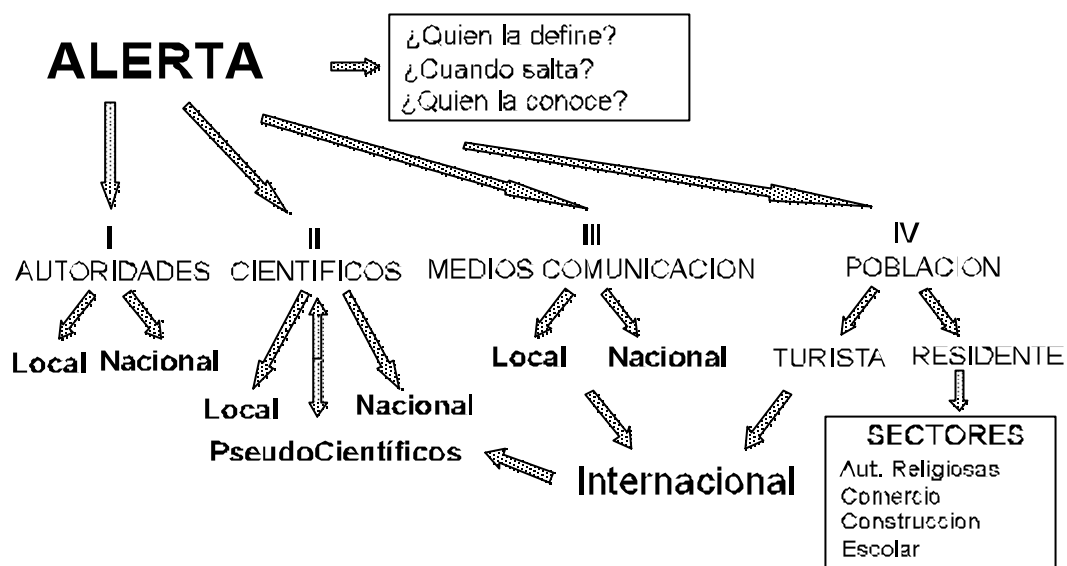


Figura 1-10 Relación coste/beneficio de las medidas de mitigación frente a desastres.

Claro está que hay un método para *reducir el riesgo a muy bajo coste* (por ejemplo prohibiendo el acceso a determinadas zonas), pero las decisiones administrativas que esto conlleva suelen ser contradictorias por su incidencia opuesta en los ámbitos de la *ordenación territorial, turismo, industria, comercio, agricultura...* Este tema es hoy objeto de profundo análisis en el marco del desarrollo sostenible, cuya planificación es necesariamente a largo plazo, comparable con los periodos de retorno de los grandes desastres y en él interviene de forma muy destacable las relaciones con el medio ambiente (ver 3.3).

previa, cuando la única media a tomar para evitar la catástrofe es la evacuación antes de que se produzca la erupción. A continuación se esquematiza las respuestas que deben analizarse en el ensayo de una supuesta crisis considerando especialmente la aparición de factores que complicarían la planificación.



respuestas

- I Tráfico aéreo, terrestre, sistemas comunicaciones.
Planes Protección Civil (hospitales, evacuación, defensa activa)...
- II Análisis de precursores y modelos predictivos.
Despliegue instrumentación específica.
Constitución equipo in situ..
- III Comunicaciones oficiales. Ruedas de prensa.
Designación portavoz del equipo científico.
- IV Experiencia de simulacros y crisis anteriores, o en países afines)....

factores que complican el plan

Nocturnidad, Lluvia-Tormenta, Niños-Ancianos
Conflictos sociales, Campaña prensa
Epocas escolares o de cosecha o de alto turismo

Ejercicio del Comité de Crisis

Generación del escenario

+
 *día-noche
 distinguir: 1laborable-festivo
 *temporada turística alta-baja
 *periodo lectivo-vacaciones escolares
 .
 +
 + *teléfono
 *pánico *radio
 *interrupción comunicaciones 1carreteras
 *corte suministro eléctrico*aeropuerto
 considerar: 1falta agua potable *puerto
 *terremotos moderados .
 *maremotos
 *incendios
 .

Cambio a otro estado de alarma tras 24 horas

Desarrollo del simulacro en cuatro fases:

- 0 Detección de un precursor sospechoso (fase previa)
 - + Si lo hay
- 1 Convocatoria del Comité de Crisis
 - ¿Quién lo compone?
 - . ¿Quién lo convoca?
- 2 Medidas preventivas antes de la erupción
- 3 Medidas después del inicio de la erupción
- 4 Evaluación del programa

Objetivos:

1.- Destacar los puntos débiles de la zona afectada

2.- Conocer los pros y contras de los factores sociales de la zona:

- Hombres en casa, edad, localización autoridades
- Coordinación entre diferentes competencias y medios
- Vulnerabilidad del sistema de tomas de decisión
- Reducir al mínimo la distancia entre la población y la administración.
- Evitar la sensación de abandono que sienten los ciudadanos durante el desarrollo de una crisis.

La realización de simulacros de emergencia está muy desarrollada en algunos campos (energía nuclear), donde existe una amplia bibliografía de como organizar y evaluar un simulacro (INPO 1983). La experiencia obtenida en el terremoto que afectó seriamente a la ciudad de México en 1985 puso de manifiesto la importancia de que la población sepa autoprotegerse, desarrollando planes familiares de protección civil que incluyen la realización de simulacros (CENAPRED 1994 a y b).

1.3.4. Iniciativas IAVCEI/IDNDR

La Década Internacional para la Mitigación de los Desastres Naturales (IDNDR) esta permitiendo crear una conciencia de como deben los distintos estamentos de la sociedad enfrentarse a un desastre, así es necesario aprender a convivir con un volcán activo.

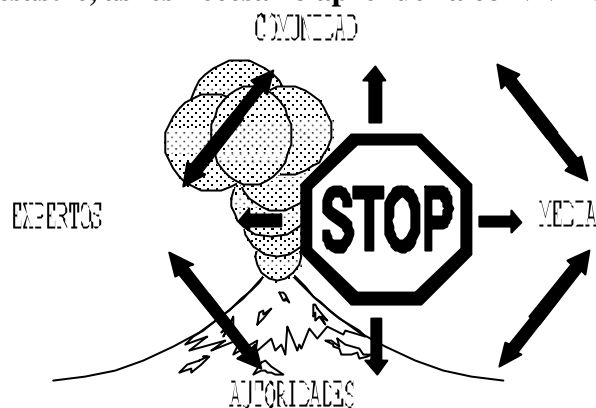


Figura 1-11 La mitigación de los desastres volcánicos exige la cooperación de todos los estamentos de la sociedad.

En el marco del IDNDR, diversas Organizaciones nacionales e internacionales están dedicando especial atención al Riesgo Volcánico. Concretamente, la Asociación Internacional de Volcanología (IAVCEI), está promoviendo una serie de iniciativas que esquemáticamente se resumen en la siguiente relación:

- ELABORACIÓN DE MAPAS DE PELIGROSIDAD Y RIESGO VOLCÁNICO
genéricos y específicos en todos los volcanes activos
- VIGILANCIA DE VOLCANES ACTIVOS
mínima, específica, con implicación de la población local
equipamiento de bajo coste
vigilancia por satélites
- EDUCACIÓN CIUDADANA
población, escuelas, voluntarios
hermanamiento de ciudades en ambiente volcánico activo
- DIÁLOGO AUTORIDADES/CIENTÍFICOS
planes emergencia, ordenación territorial, reducción riesgo
- VOLCANES DE LA DECADA
"proyectos demostración", comisión *ad hoc* de la IAVCEI
- IAVNET

comunicación-coordinación volcanólogos, archivo de datos de referencia

- ENTRENAMIENTO/CURSOS ESPECIALIZADOS
para científicos, técnicos, protección civil, etc.
- ASISTENCIA EN CASO DE CRISIS
 - suplementar (o completar) personal y tecnología local
 - asesoramiento (comité de expertos en la volcanología del área
 - colaboración (financiera, técnica, científica, etc.
- PUBLICACIONES
Difusión de las experiencias obtenidas en las crisis eruptivas
- PROTECCION A LOS VOLCANÓLOGOS
Medidas seguridad, precauciones, etc.
- ATENCIÓN A LOS PAISES MENOS DESARROLLADOS

1.4. TÉCNICAS PARA LA GESTIÓN DE LA CATÁSTROFE VOLCÁNICA

Las técnicas actuales de gestión de desastres se apoyan en el empleo de dos potentes herramientas: la modelización física y el sistema de información geográfica (GIS). Sólo la conjunción de estas dos herramientas permite manejar de una forma objetiva la gran cantidad de información y datos que intervienen en la prevención de un desastre. El establecer una determinada normativa encaminada a mitigar el impacto del desastre y la actuación cuando éste se produzca en una sociedad desarrollada, ya no puede dejarse a la improvisación o a la inspiración más o menos afortunada del funcionario de turno.

Las implicaciones económicas que se derivan del impacto de los desastres naturales hacen que este tipo de análisis haya trascendido del entorno estatal al de las grandes multinacionales, que valoran muy bien el riesgo que asumen al emplazar en un determinado punto una costosa planta industrial (Tiedemann, 1992). Zonas con ayudas oficiales para el desarrollo industrial, después se ven completamente abandonadas por ser demasiado alto el riesgo que se debe asumir ante un determinado tipo de desastre.

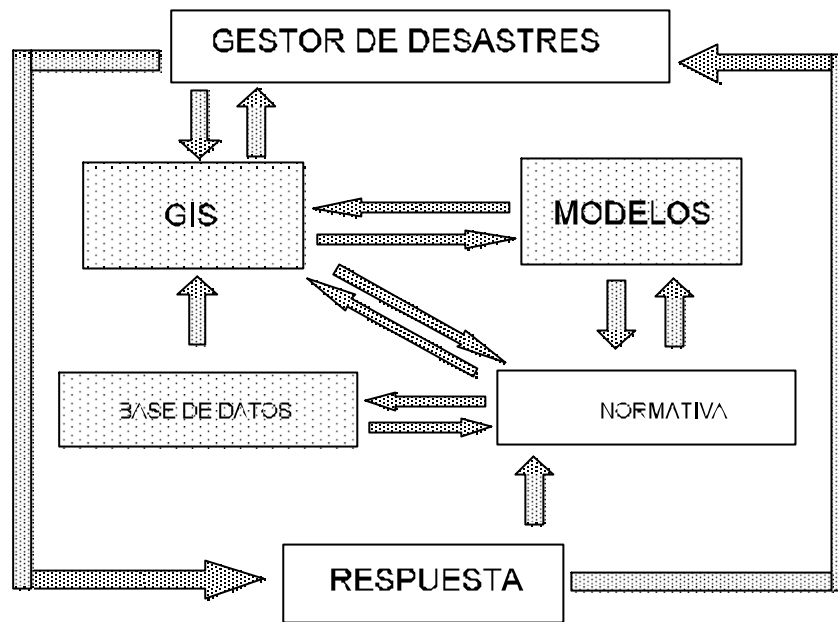


Figura 1-12 Sistema dedicado a la gestión del desastre volcánico

Un sistema dedicado a la gestión de desastres consta de dos elementos principales, que son la base de datos y los modelos, con un dispositivo integrador de ambos que es el *Sistema de Información Geográfica (GIS)*. A este conjunto deberemos añadir un mecanismo de entrada y actualización de los datos y una interfase de usuario que permita extraer la información adecuándola a las necesidades de cada usuario concreto. Toda la información disponible sobre el volcán y las posibles zonas afectadas debe incluirse en las bases de datos gestionadas por el sistema de información geográfica. Aunque la tecnología del GIS se aplica desde hace tiempo a la preparación de los mapas de riesgo volcánico (Barberi et al., 1990; Kauahikaua et al., 1995; Massone et al., 1996), es solo recientemente cuando empieza a utilizarse como elemento en línea para la gestión del riesgo volcánico (Gómez, 1995). Las tecnologías actuales permiten coordinar fácilmente las distintas fuentes de datos informatizados que poseen las instituciones públicas para otros objetivos. De esta forma es posible, teóricamente, que el sistema se actualice automáticamente y sea capaz de ofrecer una visión en tiempo real de la situación frente a un posible impacto. Sin embargo, la competencia entre las distintas instituciones y en ocasiones enfrentamientos personales, hace que llevar esto a la práctica sea poco menos que imposible, al menos por ahora, quedando en muchas ocasiones el desarrollo de estos sistemas expertos en objetos de simple interés académico.

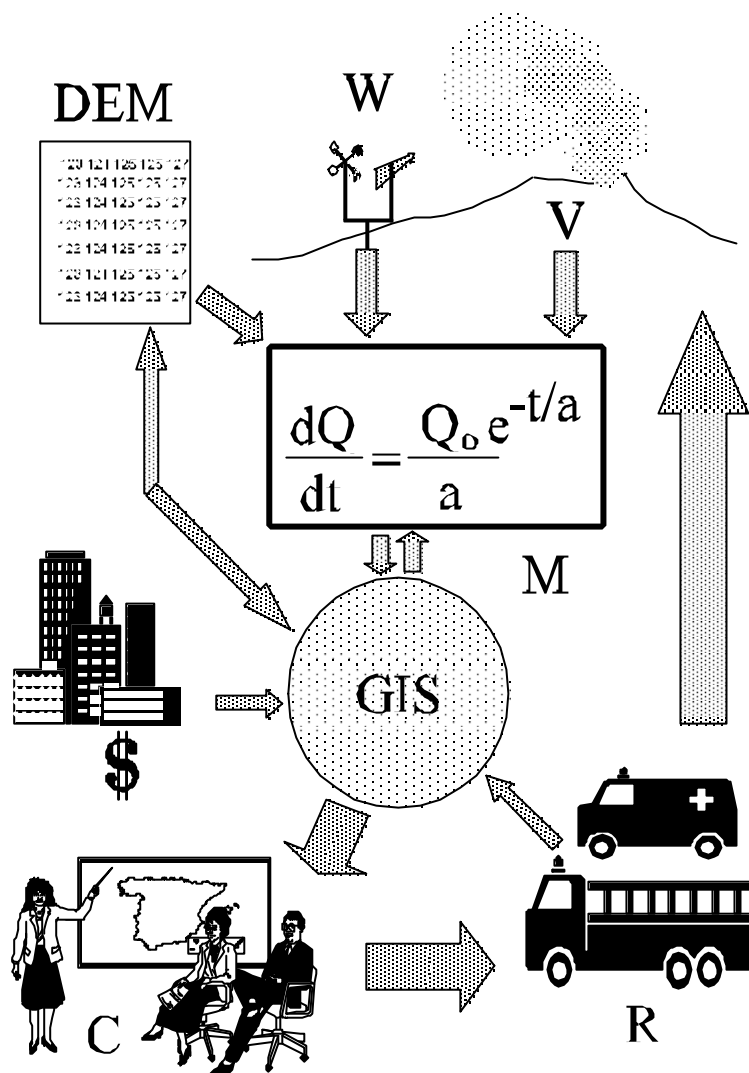


Figura 1-13 Elementos que intervienen en una crisis volcánica

- V Datos procedentes del seguimiento de la erupción esperada
- DEM Modelo digital del terreno referido a GIS
- W Condiciones meteorológicas esperadas
- M Modelo numérico: determinista y/o simulación
- GIS Sistema de Información Geográfica
- \$ Información social, económica y administrativa de la zona
- R Recursos disponibles en la zona. Actuación de los mismos
- C Responsables protección civil

1.4.1. Bases de datos

La base de datos y el sistema de entrada de datos que constituyen el núcleo del sistema de información geográfica (Fig. 1-14) deben recoger información detallada sobre los tres elementos que definen el riesgo (*Peligrosidad, Vulnerabilidad y Exposición*):

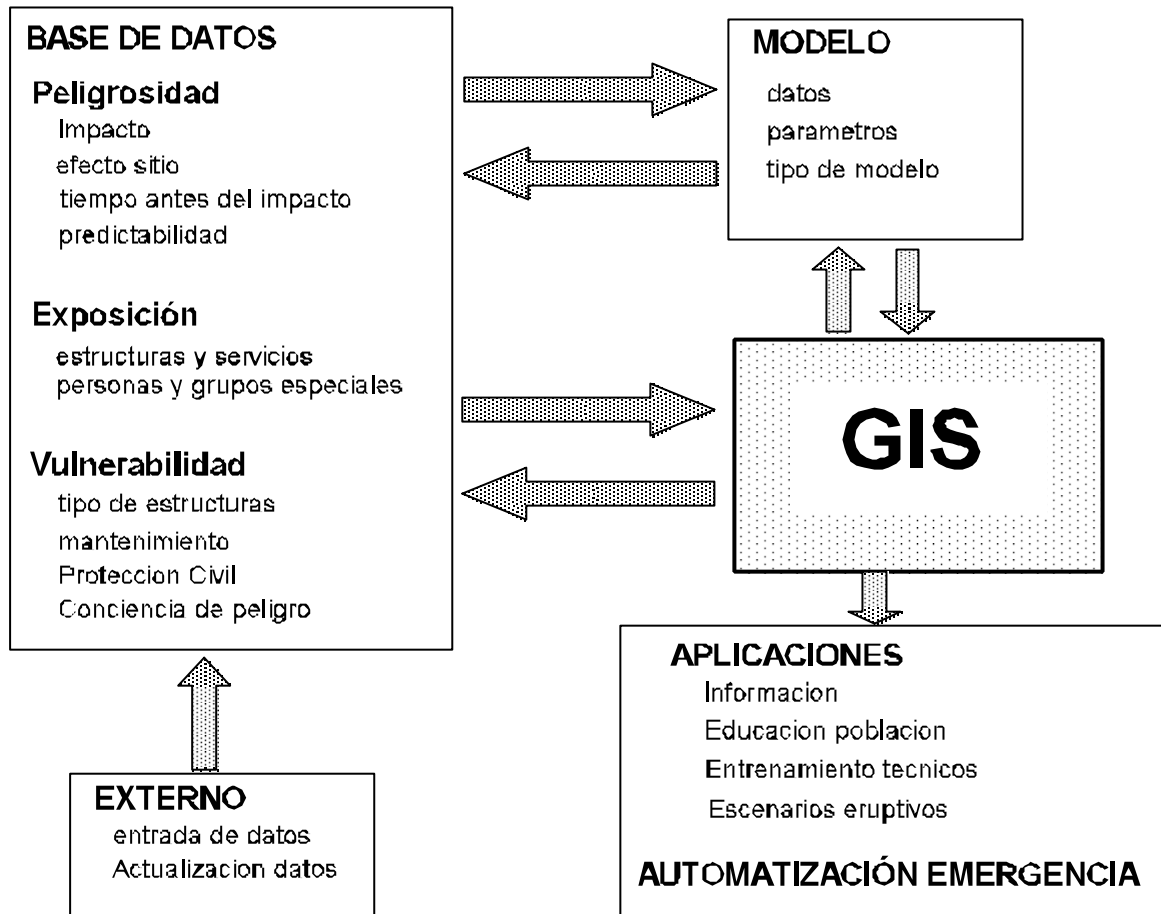


Figura 1-14 Sistema de información geográfica en prevención de desastres volcánicos

Peligrosidad

Cual es el efecto de cada uno de los peligros, sus posibles fuentes y los efectos ligados al sitio. Es importante saber de cuanto tiempo se dispone desde el momento en que se inicia la crisis volcánica hasta que ésta culmina. Otro aspecto importante es la predictabilidad del fenómeno, el sistema de detección de precursores (si es que existe) y su valoración.

Información encaminada a conocer el tipo de evento esperado y su posible punto de impacto. Información permanente aportada por los sistemas de vigilancia. Otras entradas que puedan inferir una mayor probabilidad de que se produzca el evento o varíen su peligrosidad (nivel de un lago, casquete de nieve, etc).

Vulnerabilidad

Cual es el nivel de resistencia de cada una de las estructuras y servicios de la zona, cual es el límite que puede soportar la población. Es importante conocer cuales son las defensas disponibles y su grado de mantenimiento, estructura de la Protección Civil y grado de percepción del peligro.

Información actualizada sobre nuevas construcciones, reforzamiento de estructuras, obras de defensa, degradación de las defensas, urbanización en zonas de alta peligrosidad.

Datos sobre personas, bienes y estructuras en la zona. Ocurrencias extraordinarias que modifiquen la exposición (un partido de fútbol, temporada turística, etc)

Exposición

Cuántas y que estructuras hay en la zona, cuántos habitantes, su distribución por edades, la presencia de grupos especiales que precisen algún tipo de tratamiento especial (niños, ancianos, enfermos, embarazadas, etc) y cuales son los servicios disponibles.

1.4.2. Modelos

Los modelos aportan otro grado de aproximación al fenómeno, por una parte nos permiten conocer *a priori* cuales serán los efectos del evento volcánico y por otra nos permiten evaluar cual es el grado de exposición que experimenta una determinada zona en un cierto tiempo. Además, los modelos deben analizar también los aspectos referentes a la exposición y a la vulnerabilidad, que en demasiadas ocasiones son dejados de lado por resultar académicamente poco brillantes. Los modelos, para que resulten eficaces deben satisfacer una serie de condiciones:

Fundamento

El modelo, tanto si es determinista como si es probabilístico, debe basarse en una fundamentación rigurosa de la física del fenómeno.

Información

El modelo debe tomar en consideración los datos disponibles en relación con el fenómeno a simular y sus resultados deben ser contrastados con la información que exista sobre el mismo.

Parámetros

El desconocimiento sobre muchos de los parámetros que rigen el fenómeno causante del desastre, o del comportamiento de las estructuras y de la población ante el mismo, hace que estos parámetros deban estimarse de forma subjetiva. Realizar distintos ensayos con todos los valores posibles es el proceder más correcto. Sin embargo es tan frecuente tratar de maximizar los efectos como de minimizarlos, siendo ambos procedimientos igualmente nefastos.

1.4.3. Aplicaciones

Las aplicaciones responden a la complejidad de la información a la que el usuario puede acceder:

Mapas

Esta es la información más genérica que se obtiene de un sistema de este tipo. Los distintos mapas nos informan de la zonas donde se van a producir los daños más graves o cual es la zona que primero hay que evacuar o que vías van a quedar colapsadas. Dentro de este apartado de mapas debemos considerar también la información referente a las primas del seguro a pagar si se desea proteger una determinada inversión en un punto concreto de la zona expuesta.

Test

El sistema permite comprobar el grado de ajuste de los distintos modelos, ya que permite la comparación directa de los modelos y los datos procedentes de la reconstrucción de eventos pasados.

Entrenamiento

Estos sistemas permiten el desarrollo de simulaciones para ejercitar a los técnicos y responsables de la gestión de desastres ante un determinado evento. Estas simulaciones ponen fácilmente en evidencia los puntos débiles de la estructura que debe actuar en caso de desastre.

Planificación de emergencias

Esta posibilidad es la más importante desde el punto de vista de la mitigación de desastres. Una vez iniciado el desastre, es posible conocer inmediatamente con que grado afecta a las distintas zonas y por consiguiente como deben actuar las contramedidas.

Educacional

La mejor respuesta frente a un desastre es la educación ciudadana. La información integrada que aportan estos sistemas permite la producción de material didáctico de distinto nivel, tanto para la ordenación del territorio como para la protección personal. Conferencias públicas, charlas en centros de enseñanza, material didáctico, carteles y folletos, son los medios habituales con los que cuentan los volcanólogos para comunicarse con la población sometida al riesgo volcánico. En caso de erupción es básico que la población conozca y confíe en los responsables de gestionar la crisis. Los conceptos básicos, por complejos que éstos puedan parecer siempre pueden exponerse en forma sencilla y asequible. La producción de todo tipo de material didáctico, especialmente aquel sustentado hoy por las más modernas tecnologías (CD-ROM, INTERNET, etc) es una labor primordial que debe desarrollar un centro de volcanología en una zona con actividad volcánica y cuya población, por distintos motivos ha perdido la conciencia histórica del riesgo volcánico. La Casa de los Volcanes de Lanzarote puede servir como modelo de centro dedicado íntegramente al mundo de los volcanes, cubriendo sus tres vertientes:

científica, educativa y turística (Araña, 1994).

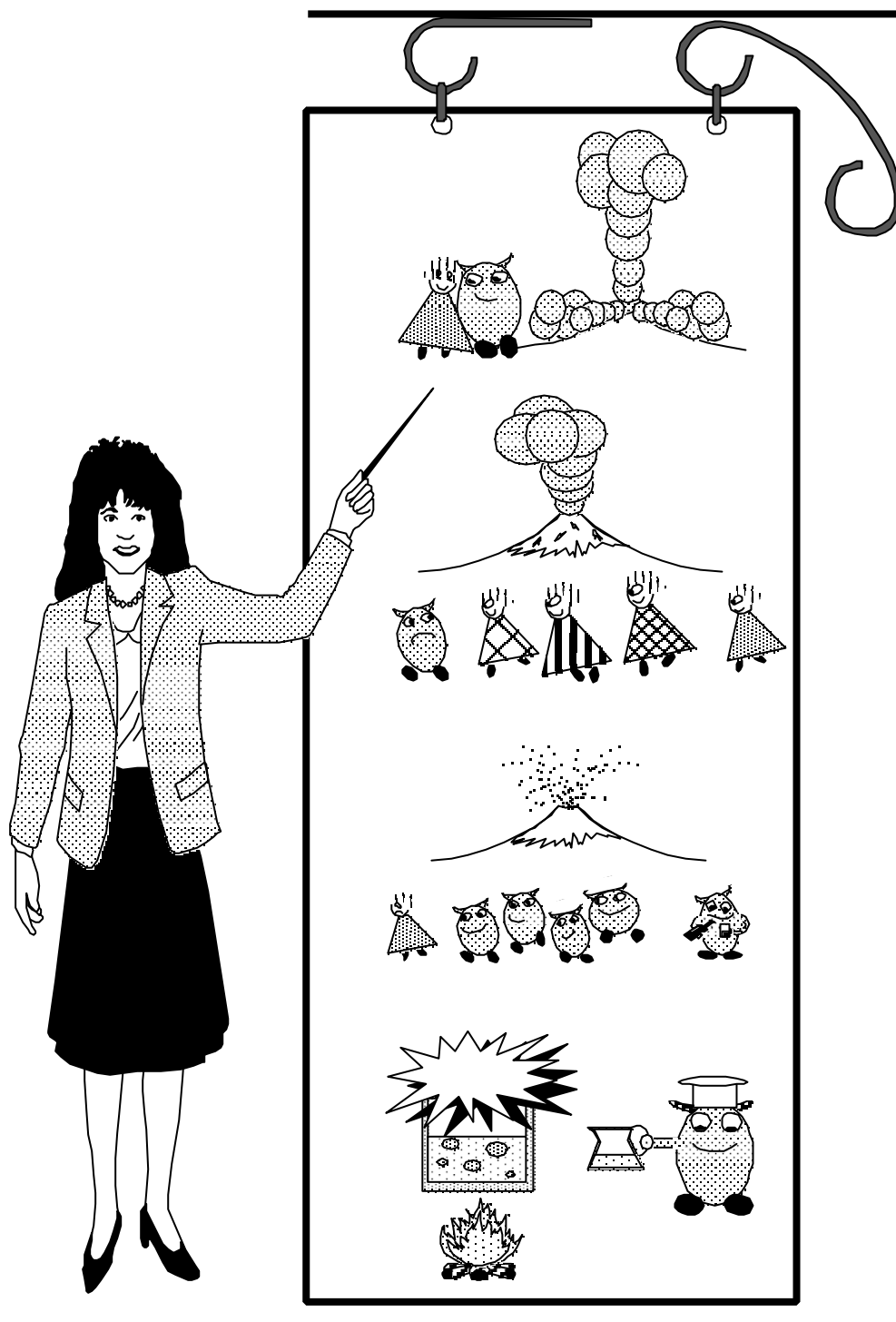


Figura 1-15 La educación de la población es la mejor contribución a la mitigación del riesgo volcánico. La figura representa un *auca* dedicada a la interacción agua-magma (material didáctico producido por la Casa de los Volcanes, Lanzarote)

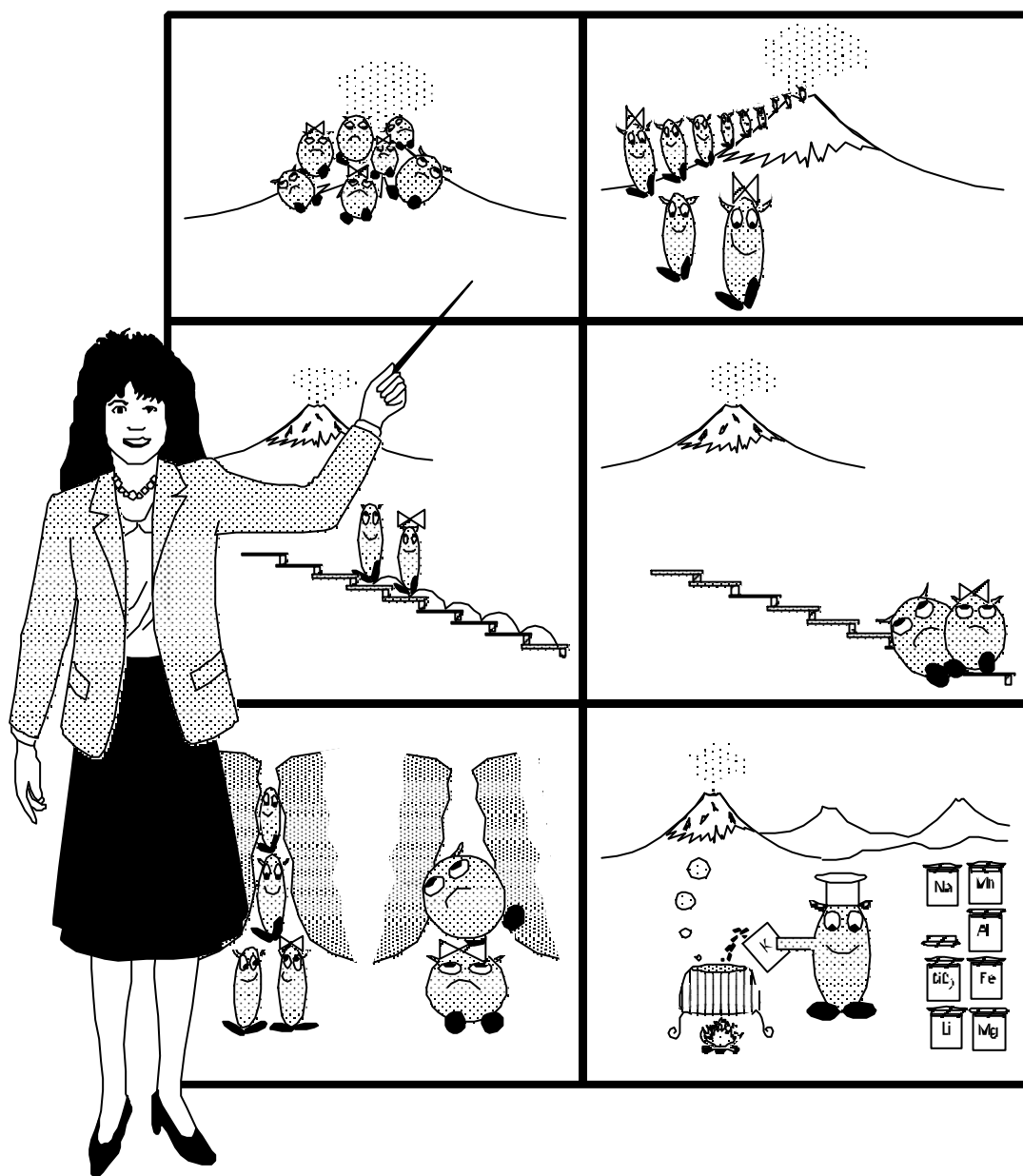


Figura 1-16 Composición química, viscosidad, velocidad de ascenso y descarga de magma se presentan aquí en forma fácilmente explicable (producción de la Casa de los Volcanes, Lanzarote)