

EVALUACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO EN TENERIFE, ISLAS CANARIAS. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD

- O. Cornella, Instituto Ciencias de la Tierra "Jaume Almera" (CSIC), Lluís Solé Sabarís s/n, 08028 Barcelona y Departamento de Ingeniería del terreno, cartográfica y geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña. C/ Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona
- N. Santacana¹, ¹Instituto Ciencias de la Tierra "Jaume Almera" (CSIC), Lluís Solé Sabarís s/n, 08028 Barcelona
- A. Felpeto, ¹Instituto Ciencias de la Tierra "Jaume Almera" (CSIC), Lluís Solé Sabarís s/n, 08028 Barcelona
- J. Martí¹, ¹Instituto Ciencias de la Tierra "Jaume Almera" (CSIC), Lluís Solé Sabarís s/n, 08028 Barcelona
- M. Hürlimann², ²Departamento de Ingeniería del terreno, cartográfica y geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. C/ Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona

RESUMEN

Los mapas de riesgo han demostrado ser una herramienta útil para poder pronosticar y disminuir el tiempo de respuesta respecto a los procesos naturales catastróficos. Las erupciones volcánicas representan para la sociedad actual un problema de gran envergadura, debido a la localización de áreas urbanas en zonas de riesgo. Esto se acentúa en la isla de Tenerife debido a la gran expansión urbanística que ha experimentado en las últimas décadas y al aumento significativo del turismo. En esta contribución se analiza una propuesta para la elaboración de un mapa de riesgo volcánico para Tenerife utilizando diferentes bases de datos en un entorno SIG.

El proyecto de construcción del mapa de riesgo volcánico de Tenerife incluye cuatro fases distintas. En la primera se han de realizar mapas de *susceptibilidad* para cada tipo de erupción. Posteriormente se aplicarán sobre ellos modelos físicos de simulación para diferentes tipos de erupciones, obteniendo así mapas de *peligrosidad*. Paralelamente se genera el mapa de *vulnerabilidad* con información socio-económica de la zona. El mapa de *riesgo*, en último lugar, se obtendrá a partir de los datos anteriores.

Como una primera aportación a este proyecto se presenta un mapa de susceptibilidad elaborado para erupciones basálticas. Este se realiza a partir de la superposición de diversas capas, en las cuales se representan los diferentes criterios que se tendrán en cuenta a la hora de evaluar una posible erupción. Se incluye información geológica (cartografía de localización y depósitos de los centros eruptivos existentes); información de deformación superficial (mediante datos tomados con interferometría SAR); información geoquímica (mapa de desgasificación difusa); datos sobre el campo de esfuerzos (mediante un modelo numérico y otro estructural de medidas de campo) e información sísmica (con la elaboración de un mapa de distribución de epicentros). La combinación de las diferentes capas de información permite la obtención del mapa de probabilidad espacial para erupciones basálticas basado en

criterios objetivos, constituyendo el primer paso necesario para la obtención de los mapas de peligrosidad y riesgo de Tenerife.

1. INTRODUCCIÓN

Las erupciones volcánicas representan, en la sociedad actual, un problema de preocupación creciente, especialmente debido a la progresiva densificación de áreas urbanas localizadas en zonas de alto riesgo volcánico. El riesgo volcánico se acentúa en la isla de Tenerife debido a la gran expansión urbanística de las últimas décadas y al aumento significativo del turismo, siendo la elaboración de mapas de riesgo volcánico, una herramienta útil para pronosticar el alcance de las erupciones y disminuir el tiempo de repuesta frente a estas crisis volcánicas.

Las Islas Canarias son la única región de España con vulcanismo activo, donde se han registrado erupciones recientes como por ejemplo el volcán Teneguía en 1971 en la isla de La Palma, o Chinyero en 1909 en Tenerife. De aquí la importancia de la elaboración de los mapas de riesgo volcánico de las islas

En la isla de Tenerife se observan dos tipos distintos de erupciones (Fúster y otros., 1968; Ablay y Martí, 2000): magmas basálticos y traquibasálticos que producen conos monogenéticos de lapili y flujos de lava, y otras erupciones de magmas de composición fonolítica, que producen depósitos plinianos, ignimbritas, oleadas piroclásticas, flujos de lava,... En las primeras, su origen se asocia a un ascenso mantélico siguiendo fracturas hasta la superficie, mientras que las segundas se asocian a la formación de cámaras magmáticas a unos 3-4 Km. de profundidad, donde el magma se acumula, cambia de composición y provoca el consiguiente cambio del estilo eruptivo.

En este trabajo se presentan los primeros resultados del análisis de susceptibilidad de erupciones basálticas, primer paso de la metodología SIG diseñada para la evaluación integral del riesgo volcánico en la isla de Tenerife.

2. CONCEPTO DE RIESGO

En 1972 el Grupo de Trabajo para el estudio estadístico de desastres Naturales (UNESCO, 1972) identificó el concepto de *riesgo* como la expectativa de que se produzca una pérdida, bien en forma de vidas humanas, o bienes naturales, o capacidad productiva, ...etc. El riesgo (R) se evalúa como producto de 3 factores: *valor*, *vulnerabilidad* y *peligrosidad*. (Fig. 1).

$$\text{Riesgo} = \text{valor} \times \text{vulnerabilidad} \times \text{peligrosidad}$$

Se entiende por *peligrosidad* $P(x, y, z, \Delta t)$ la probabilidad de que un punto (x, y, z) se vea afectado por el peligro considerado a lo largo de un intervalo de tiempo Δt . La *vulnerabilidad* $V(x, y, z)$ es la expectativa de daño o pérdida infligida a un elemento expuesto al peligro, y suele expresarse como porcentaje de daño referido a la pérdida total. El *valor* representa la cuantificación, en términos de vidas humanas, de coste, ... etc, de los elementos susceptibles de ser afectados por el peligro considerado (Felpeto, 1996).

Un paso previo al análisis de peligrosidad es el análisis de susceptibilidad, entendido como la predisposición del terreno a la ocurrencia de erupciones volcánicas. La susceptibilidad no implica el factor temporal y se considera en el presente trabajo como la probabilidad espacial de apertura de centros eruptivos. El concepto de susceptibilidad definido aquí tiene larga tradición en otros campos de los riesgos naturales, como en los deslizamientos de terreno, desde Brabb y otros (1972) hasta Santacana (2001), en este último caso mediante la aplicación de un SIG.

Los estudios anteriores de susceptibilidad de la isla de Tenerife se basan fundamentalmente en la distribución espacial de centros eruptivos observables en superficie, aplicando diversos métodos numéricos para obtener la probabilidad espacial de apertura de un nuevo centro de emisión, como son el método bivariante de Cox (Gómez-Fernández, 1997; Felpeto, 2002) o el método fractal (Felpeto, 2002).

3. DATOS ANALIZADOS

Para realizar este estudio, se ha aplicado un análisis multidisciplinar cualitativo, no estadístico. Se ha estimado una probabilidad de apertura de centros eruptivos, a partir de la coincidencia del valor máximo del análisis de estructuras geológicas, datos geofísicos y geoquímicos, que se han considerado que pueden favorecer o indicar una futura apertura de centro eruptivo [Figura 2]. Un estudio similar se ha realizado en Italia, para la evaluación del riesgo volcánico por flujos piroclásticos de Campi Flegrei (Alberico y otros, 2002).

El trabajo se ha realizado mediante el SIG Miramon v. 4.1, utilizando para el análisis de los datos una malla regular con un tamaño de celda de 50m.

3.1. Datos geológicos

En las Islas Canarias es bien conocida la existencia de líneas estructurales preferentes (Carracedo, 1994, Marinoni y Pasquarè, 1994), a lo largo de las cuales se han producido la erupción de importantes volúmenes de magmas basálticos. En Tenerife existen 3 líneas estructurales preferentes, que son la dorsal NW, la NE y otra con dirección NS. A lo largo de estas líneas estructurales se han concentrado la mayoría de erupciones basálticas desde el Plioceno, incluyendo erupciones históricas. Estas erupciones han dado lugar a la alineación de conos monogenéticos, como por ejemplo la erupción del volcán Fasnía, en 1705.

Se han cartografiado los conos monogenéticos de escoria y lapili correspondientes a erupciones basálticas y/o traquibasálticas de la isla de Tenerife, mediante el análisis de fotografías aéreas de escalas 1:50000 y 1:18000 y la realización de diversas campañas de campo.

Siguiendo la metodología de Tibaldi (1995), se ha elaborado un mapa de fracturas en base a los siguientes criterios:

- conos con elipticidad remarcable, ya sea en su base o en la morfología del cráter
- conos, que perteneciendo a la misma edad, se hallan alineados, y con una distancia inferior a 1350m. entre ellos.

Las fracturas cartografiadas y las alineaciones de conos (Fig. 3), coinciden a grandes rasgos con los ejes estructurales de Tenerife, sin embargo se observan muchos conos que no están alineados a favor de ningún eje estructural.

3.2. Datos geoquímicos

Las emisiones de gases desde zonas profundas de la corteza hacia la superficie terrestre se realiza a través de fracturas. La distribución de anomalías de desgasificación se ha usado como indicador geoquímico para la predicción de terremotos y erupciones (Irwin y Barnes, 1980; Satake y otros, 1984), estudiando la distribución de concentración de CO₂ y H₂ y flujo de CO₂.

El CO₂ es el gas más abundante, después del vapor de agua, en la fase volátil del magma. Las emisiones de CO₂ se producen en fumarolas de cráteres activos o emanaciones difusas del suelo en los flancos del volcán (Allard y otros, 1991; Hernández et al, 1998). Cabe destacar que las emanaciones de CO₂ también pueden tener un origen biogénico, debido a la oxidación de materia orgánica presente en suelos y rocas (Lowel y otros, 1980).

El Hidrógeno también es un componente importante de los gases volcánicos y se usa como herramienta para el monitoreo de volcanes activos (Sato y McGee, 1980). Debido a sus características físicas y químicas, se desplaza a la atmósfera fácilmente, siendo demasiado ligero para ser retenido en el campo gravitatorio terrestre (Hernández y otros, 2000). La concentración atmosférica es muy baja (0.5ppm), y el hecho que su solubilidad en aguas subterráneas también sea muy baja, preservan a este gas de contaminación debido a causas meteorológicas.

Los datos geoquímicos se han obtenido a partir de un estudio realizado en Tenerife para el estudio de la desgasificación difusa consistente en un muestreo de 1898 puntos repartidos a lo largo de las tres dorsales y en la parte central de la isla (Galindo y otros, 2000; Strunck y otros, 2001; Dionis y otros, 2002). En este estudio también se han analizado isótopos estables del carbono para discriminar el origen magmático o biogénico de este elemento. Este análisis revela que el carbono presente en el flujo de CO₂ de la dorsal NE tiene origen biogénico.

3.3. Datos geofísicos

Se han tenido en cuenta dos variables: la distribución de epicentros de terremotos, registrados por la red sísmica del Instituto Geográfico Nacional (IGN), y la deformación registrada con técnicas de interferometría SAR.

Para analizar la influencia de la distribución de epicentros, se ha partido de las localizaciones realizadas por el Instituto Geográfico Nacional para los eventos registrados entre 1993 y 2002, obtenidos de la página web del IGN (www.ign.es).

Para el análisis con interferometría SAR se han usado 20 imágenes adquiridas de los satélites ERS-1 y ERS-2 de la ESA entre 1992 y 2000 (Fernández y otros, 2002).

Otro parámetro que debería tenerse en cuenta, es el modelo estructural de la Isla de Tenerife, con el que se obtendría la concentración actual de esfuerzos, y por tanto sería uno de los parámetros más importantes para realizar este análisis. Actualmente se está trabajando en la obtención de dicho modelo.

4. METODOLOGÍA

4.1. Datos geológicos

La evaluación de los datos geológicos para realizar el análisis de susceptibilidad, se ha realizado partiendo de dos tipos de fuentes: primero las alineaciones de conos definidas anteriormente, y

luego cada cono individualmente, disponiendo así de dos fuentes distintas de información: puntos y líneas. Estos datos se han obtenido a partir del escaneo de mapas en papel que contenían dicha información, y digitalización posterior. A las dos fuentes de datos se les ha aplicado un análisis de áreas de influencia o “buffers”, reclasificando posteriormente y obteniendo así 4 zonas de 1500m a partir del dato central. Por último se han sumado los dos mapas, reclasificándolos en 4 clases, para poder hacer un análisis cualitativo de mayor probabilidad de apertura de centros eruptivos.

4.2. Datos geoquímicos

Se ha creado una tabla con información de cada punto: X_{UTM} , Y_{UTM} , fecha de medida, $[CO_2]$, $[H_2]$, flujo de CO_2 . Para cada anomalía se ha realizado un interpolación con el método de inverso a la distancia, se han reclasificado los valores y se han sumado las tres variables analizadas, reclasificando por último a un rango de 0 a 4, para poder comparar con las otras variables.

4.3. Datos geofísicos

Para el análisis de distribución de epicentros, se ha creado una tabla de datos con valores de X_{UTM} , Y_{UTM} , fecha de registro, magnitud y profundidad. Se han ponderado los valores según su magnitud, estableciendo un área de influencia de 1 Km. con 4 clases para una magnitud entre 1 y 2, un área de 2 Km. para una magnitud entre 2 y 3, y así sucesivamente. Por último se han sumado los respectivos mapas obtenidos, obteniendo un rango de valores que oscilan entre 0 y 4.

En el análisis de deformación registrado por interferometría SAR, se han obtenido 2 zonas con deformación subsidente, llamándolas Garachico y Chío (Fernández y otros, 2002). La deformación de Garachico tiene alrededor 10 cm entre 1993 y 2000, se extiende en un área de 15 Km², la de Chío tiene alrededor de 3 cm entre 1993 y 2000, se extiende en un área de 8 Km². Las posibles causas de ambas subsidencias pueden haberse debido a la compactación de lava emitida por el volcán Arenas Negras, y la de Chío por la extracción de agua del acuífero, bajando el nivel freático, provocando una compactación del terreno (Fernández y otros, 2002) Al ver que ninguna de las dos deformaciones se podían tener en cuenta como síntoma precursor de erupciones volcánicas, no se ha evaluado la influencia de esta anomalía en el análisis de susceptibilidad.

Para obtener el mapa de susceptibilidad de apertura de conos basálticos, se han sumado los mapas obtenidos con los datos de geología, geoquímica y geofísica, reclasificando por último a 3 valores de susceptibilidad: alta, media y baja.

5. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos con el análisis de las variables:

5.1. Datos geológicos

A partir de la superposición de los mapas de erupciones volcánicas (puntos) y alineaciones de volcanes (líneas) se ha obtenido el siguiente mapa (Fig 4), donde se observa que la mayor probabilidad se encuentra a lo largo de las tres dorsales presentes en Tenerife, la NE, NW y NS.

5.2. Datos geoquímicos

Las mayores concentraciones de CO_2 magmático se localizan en la dorsal NS, y valores menores en la dorsal NW y la zona de la caldera. Para el flujo de CO_2 , los mayores valores se encuentran

concentrados en la dorsal NE. La concentración de H₂ se encuentran los mayores valores en la parte Sur de la Isla. Con la suma de estos tres mapas (Fig. 5), reclasificando a cuatro valores, se observa que no hay ninguna zona en la isla donde haya una coincidencia de los valores de máxima susceptibilidad para cada gas. El valor máximo obtenido es 3, se sitúa en la dorsal NS, donde está la mayor probabilidad de apertura de centro eruptivo teniendo en cuenta este parámetro.

5.3. Datos geofísicos

En el mapa obtenido (Fig. 6) se observa una concentración de sismos a lo largo de una línea NW-SE que no se asocia a ninguna dorsal existente en la Isla de Tenerife.

En el mapa final de susceptibilidad (Fig. 7), se observan que las zonas que presentan mayor probabilidad (color rojo) se encuentran en la dorsal NS y NE. En la dorsal NS es causado principalmente a los elevados valores de desgasificación difusa y a la presencia de conos volcánicos, en cambio en la dorsal NE se debe a la existencia de sismos registrados en esa zona y conos volcánicos.

6. CONCLUSIONES

La metodología que se está desarrollando para establecer criterios en la definición de la susceptibilidad de erupciones basálticas en la isla de Tenerife se elabora a partir de datos de procedencia muy diversa y con significado distinto. Actualmente, la limitación impuesta por los datos disponibles para evaluar la susceptibilidad de Tenerife, acota en gran medida los resultados del mapa de susceptibilidad obtenida. En esta fase preliminar del proyecto se han establecido rangos cualitativos en el análisis mediante SIG, rangos que deberán modificarse mediante criterios cuantitativos en etapas posteriores.

A pesar de estas limitaciones, la metodología propuesta para el análisis de la susceptibilidad de erupciones basálticas de Tenerife mediante la aplicación de un SIG es acertada, y constituye el primer paso para la elaboración del mapa de riesgo volcánico de Tenerife.

Los resultados preliminares obtenidos con esta metodología indican elevadas susceptibilidades en las dorsales presentes en la isla: NE, NW, NS, localizándose los valores máximos principalmente en la dorsal NS y la NE, observándose diferencias significativas con los mapas de susceptibilidad realizados previamente por otros autores.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Ablay, G.J., Martí, J. (2000). *Stratigraphy, structure, and volcanic evolution of the Pico Teide-Pico Viejo formation, Tenerife, Canary Islands*. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, 103, pp. 161-173.
- Alberico, I., Lirer, L., Petrosino, P., Scandone, R. (2002). *A methodology for the evaluation of long-term volcanic risk from pyroclastic flows in Campi Flegrei (Italy)*. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, 116, pp 63-78.
- Brabb, E.E.; Pampeyan, E.H. y Bonilla, M.G. (1972). *Landslide susceptibility in San Mateo Country, California*. **US Geol. Surv. Misc. Field Studies Map MF 360** Scale 1:62.500.

- Dionis, S. M., de la Rosa, D., Galindo, I., Salazar, J. M. L., Hernández, P. A., Pérez, N. M. (2002). *Soil CO₂ and H₂ Efflux Distribution Along the North-South Rift Zone at Tenerife, Canary Islands, Spain*. **Abstract, Eos. Trans. AGU**, 83, 47, F1488.
- Felpeto, A. (1996). **Modelización física y simulación numérica de procesos eruptivos para la generación de mapas de peligrosidad volcánica**. Tesis Doctoral, Universidad de Madrid, Madrid. 250pp.
- Fernández, J., Romero, R., Carrasco, D., Luzón, F., Araña, v. (2002). *InSAR volcano and seismic monitoring in Spain. Results for the period 1992-2000 and possible interpretations*. **Optics and Lasers in Engineering**, 37, pp. 285-297.
- Fuster, J. M., Araña, V., Brandle, J.L., Navarro, M., Alonso, U., Aparicio, A. (1968). **Geología y volcanología de las islas Canarias: Tenerife**, Instituto Lucas Mallada, CSIC, Madrid, pp. 1-218.
- Galindo, I., Redondo, S., Salazar, J.M.L., Pérez, N.M., Hernández, P.A. (2000). *Diffuse degassing of CO₂ and H₂ in and around the NW volcanic rift-zone of Tenerife, Canary Islands, Spain*. **Abstract, Eos. Trans. AGU**, 81, 48, F1318.
- Gómez-Fernández, F. (1997). **Desarrollo de una Metodología para el análisis del Riesgo Volcánico en el marco de un Sistema de Información Geográfica**. Tesis Doctoral, Universidad Complutense, Madrid, 255pp.
- Hernández, P., Pérez, N., Salazar, J., Sato, M., Notsu, K., Wakita, H. (2000). *Soil gas CO₂, CH₄ and H₂ distribution in and around Las Cañadas caldera, Tenerife, Canary Islands, Spain*. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, 103, pp. 425-438.
- Irwin, W.P., Barnes, I. (1980). *Tectonic relations of carbon dioxide discharges and earthquakes*. **Journal of Geophysical Research**, 85, pp. 3115-3121.
- Lowell, J.S., Hale, M., Webb, J. (1980). *Vapour geochemistry in mineral exploration*. **Miner. Mag.**, 143, pp. 229-239.
- Marinoni, L.B., Pasquarè, G. (1994). *Tectonic evolution of the emergent part of a volcanic ocean island: Lanzarote, Canary Islands*. **Tectonophysics**, 239, pp. 111-135.
- Santacana, N. (2001). **Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfica. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat**. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya. 399pp. <http://www.tdcat.cesca.es/TDCat-0713101-113341/>
- Satake, H., Ohashi, M., Hayashi, Y. (1984). *Discharge of H₂ from the Atotsugawa and Ushikubi faults, Japan, and its relation to earthquakes*. **Pure Appl. Geophys.**, 122, pp. 185-193.
- Sato, M., McGee, F. (1980). *Continuous monitoring of hydrogen on the south flank of Mount St. Helens*. In: Lipman, P.W., Mullineaux, D.R. (eds.), **The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington**. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1250, pp. 209-219.
- Strunck, M., Galindo, I., Martínez, A., Salazar, J. M. L., Hernández, P. A., Pérez, N. M., Notsu, K., Martí, J. (2001). *Diffuse degassing of CO₂ and H₂ in and around the NE volcanic rift-zone of Tenerife, Canary Islands, Spain*. **Abstract, Eos. Trans. AGU**, 82, 50, F1331

Tibaldi, A. (1995). *Mophology of pyroclastic cones and tectonics*. **Journal of Geophysical Research**, 100, B12, pp. 521-535.