

Modelización del flujo de lava del volcán Pico de Bandama (Gran Canaria, Islas Canarias)

Lava flow modelling of Pico de Bandama volcano (Gran Canaria, Canary Islands)

Alejandro Rodríguez-González¹, Meritxell Aulinas², Sophie Mossoux³, Francisco José Pérez-Torrado¹, José Luis Fernández-Turiel⁴ y Claudio Moreno-Medina⁵

¹Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (i-UNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), 35017 Las Palmas de Gran Canaria, Spain
alejandro.rodriguezgonzalez@ulpgc.es; franciscojose.perez@ulpgc.es

²Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, Universitat de Barcelona, Martí i Franqués s/n 08028-Barcelona. meritxellaulinas@ub.edu

³Cartography and GIS research group - Physical Geography, Vrije Universiteit Brussel, 1050 Bruselas, Bélgica. Sophie.Mossoux@vub.be

⁴Institute of Earth Sciences Jaume Almera, ICTJA-CSIC, Sole i Sabaris s/n, 08028 Barcelona, Spain. jlfernandez@ictja.csic.es

⁵Departamento de Geografía, Grupo de Investigación Sociedades y Espacios Atlánticos (SEA), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), 35004 Las Palmas de Gran Canaria, Spain.
claudio.moreno@ulpgc.es

ABSTRACT

Lava flow emplacement modelling provides about possible future eruptions in a given area and helps, consequently, to better design volcanic hazards zonation maps. The open access plugin Quantum-Lava Hazard Assessment (Q-LavHA), integrated into a Geographic Information System (GIS), includes three different models, two probabilistic and one deterministic, for the simulation of lava flow emplacement and establishes the overlap degree with actual flows. Pico de Bandama volcano lava flow (1970 ± 70 AP) was modelled with Q-LavHA. A high degree of reliability between the model and the reality is obtained, even with the simplest probabilistic models. For a high degree of reliability in modelling ancient eruptions, a detailed palaeogeomorphological reconstruction of the relief prior to the eruption is essential.

Key-words: modelling, lava flow, volcanic eruption, Gran Canaria, Canary Islands.

RESUMEN

La modelización de la inundación por flujos de lava permite un mejor conocimiento sobre posibles futuras erupciones en un área determinada y ayuda, en consecuencia, a un mejor diseño de los mapas de zonificación de los peligros volcánicos. La aplicación Quantum-Lava Hazard Assessment (Q-LavHA), de acceso abierto e integrada en un entorno de Sistema de Información Geográfica (SIG), incluye tres modelos diferentes, dos probabilísticos y uno determinístico, para la simulación de la inundación por flujos de lava y el establecimiento del grado de solapamiento con los flujos reales. El flujo de lava del volcán Pico de Bandama (1970 ± 70 AP) se ha modelado con Q-LavHA, obteniendo un alto grado de concordancia entre el modelo y la realidad, incluso en los modelos probabilísticos más simples. Para un alto grado de fiabilidad en la modelización de erupciones antiguas, resulta clave una detallada reconstrucción paleogeomorfológica del relieve previo a la erupción.

Palabras clave: modelado, lava, erupción volcánica, Gran Canaria, Islas Canarias.

Geogaceta, 65 (2019), 19-22
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Revisión: 27 de junio de 2018
Revisión: 23 de octubre de 2018
Aceptación: 23 de noviembre de 2018

Introducción

El gran desarrollo que ha tenido lugar en los últimos años la modelización y simulación de procesos eruptivos permite una mejor aproximación al comportamiento de futuras erupciones, describiendo con mayor realismo qué zonas serán afectadas. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en volcanología representan una verdadera revolución en el manejo y análisis de esta in-

formación 4D, permitiendo una rápida respuesta por parte de los técnicos y autoridades en casos de crisis volcánicas (Fra-Paleo y Trusdell, 2000; Felpeto *et al.*, 2001; Carracedo *et al.*, 2004; Rodríguez-González *et al.*, 2009).

Este trabajo se centra en la modelización del flujo de lava de la erupción más reciente ocurrida en Gran Canaria, la del Complejo Volcánico de Bandama, datada en 1970±70 AP (Antes del Presente) me-

dante ¹⁴C (Hansen *et al.*, 2008; Rodríguez-González *et al.*, 2009). Esta erupción holocena generó dos edificios volcánicos con estilos eruptivos diferenciados: el Pico y la Caldera de Bandama. El Pico de Bandama, típicamente estromboliano, está formado por un cono de tefra de 214 m de altura, desde cuya base se emitió la colada de lava objeto del presente trabajo (Fig. 1). Por su parte, la Caldera de Bandama es un *maar* (Hansen *et al.*, 2008).

Para llevar a cabo la simulación del flujo de lava del Pico de Bandama se utilizó la aplicación denominada "Quantum-Lava Hazard Assessment" (*Q-LavHA*; Mossoux *et al.*, 2016) que es de acceso abierto y se integra en el software QGIS, también de código abierto. Esta aplicación simula la probabilidad de inundación de flujos de lava de uno o varios centros de emisión distribuidos espacialmente en un Modelo Digital de Elevación (MDE). Combina el uso de modelos probabilísticos y determinísticos para calcular la propagación espacial y la longitud final de los flujos de lava simulados. La interfaz de *Q-LavHA* se convierte, por tanto, en una herramienta aplicable a la evaluación del riesgo volcánico por inundación de flujos de lava.

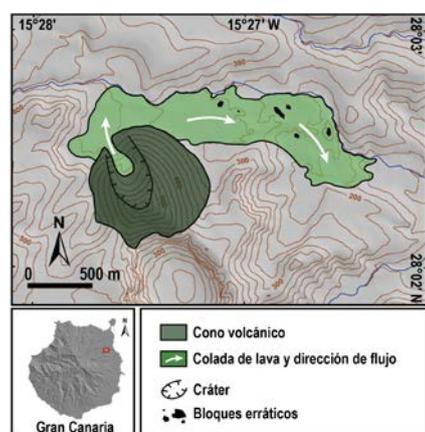


Fig. 1.-Localización del volcán Pico de Bandama. Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- Location of the Pico de Bandama volcano. See color figure in the web.

Materiales y métodos

Morfología volcánica: reconstrucción paleogeomorfológica

Este estudio se inicia con un intenso trabajo de campo de reconocimiento cartográfico (a escala 1:5000), estratigráfico, petrográfico y geomorfológico de las principales unidades volcánicas (cono volcánico y colada de lava) que componen el Pico de Bandama, así como también del tipo de relieve sobre el cual se depositan estos materiales (Fig. 1). A partir de estos datos, y con el auxilio de múltiples cortes geológicos, se lleva a cabo una cuidadosa reconstrucción paleogeomorfológica tridimensional de ambas unidades volcánicas, lo que permite obtener tres MDE de los momentos temporales pre-erupción (antes de que la erupción modificara el relieve), post-erupción (justo al finalizar la erupción, por tanto, sin ser afectado por la erosión) y actual (que ya refleja la acción de los agentes erosivos en los materia-

les de la erupción y en el sustrato; Rodríguez-González, 2009; Rodríguez-González *et al.*, 2010, 2012). Comparando los tres MDE (pre, post y actual) se obtienen una gran variedad de parámetros morfométricos, tanto lineales como tridimensionales, que son imprescindibles para la correcta evaluación de la peligrosidad volcánica. Hay que destacar que los MDE (25 m) deben tener una resolución acorde a la escala de trabajo y que permitan ejecutar las diferentes simulaciones de flujos de lava en óptimas condiciones.

En el presente trabajo cobran especial importancia los datos morfométricos asociados a la colada de lava y las reconstrucciones paleogeomorfológicas del relieve afectado por la misma. Estos datos e interpretaciones deben garantizar que al ejecutar y procesar los modelos de flujos de lava en la aplicación *Q-LavHA* se consiga que se asemejen lo más posible a la realidad.

Modelos de simulación de *Q-LavHA*

En general, los modelos de simulación de flujos de lava pueden dividirse en modelos determinísticos, basados en la resolución de las ecuaciones de transporte, y en modelos probabilísticos, donde la topografía juega el papel principal en la determinación del camino seguido por la colada de lava. Estos últimos modelos son los más apropiados en el caso de una crisis volcánica, puesto que no requieren el concurso de muchos parámetros físicos que difícilmente pueden ser determinados en este tipo de situación (Macedonio, 1996; Felpeto *et al.*, 2001).

En todos los modelos que se describen a continuación, incluidos en la aplicación *Q-LavHA*, lo que determinará la propagación del flujo y, por tanto, permitirá a la lava superar pequeños obstáculos topográficos o rellenar depresiones, son contemplados unos factores de corrección (H_c : potencia mínima, H_p : potencia máxima) y una longitud máxima (L_{max}). También es fundamental definir el número de interacciones necesarias para obtener un buen ajuste entre simulaciones y el flujo real.

- Modelo probabilístico de Longitud máxima (L_{max}): Define una longitud máxima (expresada en metros) hasta donde puede fluir la lava. *Q-LavHA* considera la longitud máxima como la distancia recorrida por la línea de flujo de lava y no la distancia en línea recta. El flujo se propaga a lo largo de trayectorias aleatorias desde un punto de emisión sobre un MDE siguiendo unas reglas de propagación y cada ite-

ración se detiene cuando la línea de flujo alcanza una longitud máxima especificada. (Mossoux *et al.*, 2016).

- Modelo probabilístico de probabilidad decreciente: Esta segunda opción permite ponderar la probabilidad de inundación de lava de cada píxel a lo largo de una línea de flujo de lava basada en una función de densidad acumulativa decreciente. Para usar esta ecuación, se define la longitud media ($Media_{Holoceno}$) y la desviación estándar ($DesvEst_{Holoceno}$) de los flujos de lava previas o del mismo periodo (en este caso del Holoceno) para poder ponderar. Teniendo en cuenta que las longitudes de las lavas holocenas en Gran Canaria varían desde 107 m, en el volcán de Montaña Negra de Jíñamar, hasta 10 352 m en el volcán de Fagagesto (Rodríguez-González, 2009), los cambios más destacados de inundación en las simulaciones se notarán en las lavas holocenas de menor recorrido. Esto mejorará la previsibilidad de futuros flujos de lava en los que, al inicio, se desconocerán sus tasas eruptivas. Este método se puede utilizar para pronósticos a corto plazo si suponemos que el flujo de lava en curso tiene las mismas características que los que ya se han asentado. Al igual que con L_{max} los píxeles con mayores probabilidades se encuentran en el canal principal y los patrones observados en el flujo de lava real están bien representados. Incluso si se sobrestimara la longitud, los píxeles situados más lejos del frente de flujo de lava real tienen probabilidades más bajas de ser inundados (Mossoux *et al.*, 2016).

- Modelo determinístico *FLOWGO*: Requiere la entrada de muchos parámetros físico-reológicos que influyen en la evolución del flujo de lava sobre la topografía y que, debido a la limitación de esta publicación, no se reflejarán en el presente trabajo. Se recomienda utilizar este modelo si hay un control de las propiedades físico-reológicas de las coladas de lava y estas no muestran una gran dispersión. Los parámetros principales son la tasa de efusión (que puede variar a lo largo de la erupción), la viscosidad inicial de la lava, el contenido de fenocristales y la proporción de canales, además de unas constantes establecidas en este tipo de modelos. El flujo de lava se detiene cuando al menos una de las siguientes condiciones se cumple: (1) su velocidad es cero, (2) la temperatura del núcleo de lava alcanza el *solidus* o (3) la resistencia a la deformación en la base del canal es mayor que la tensión del descenso. Con el método de *FLOWGO* la pendiente es de gran importancia, ya que influye en la velocidad del flujo

de lava y la velocidad de enfriamiento, que son parámetros claves que controlan la longitud alcanzada por la lava antes de que esta se detenga. Además, se plantea la problemática sobre la importancia de poder determinar de manera precisa que porción de minerales cristalizaron mientras el flujo se encontraba en movimiento (Mossoux *et al.*, 2016).

Para evaluar la exactitud del flujo de lava simulado se calcula un índice de adecuación. Este índice permite comparar el flujo de lava simulado con el flujo de lava real (Favalli *et al.*, 2009; Mossoux *et al.*, 2016). El área de solapamiento entre el flujo real y el flujo de lava simulado se divide por el área total cubierta por los dos flujos. El valor de adecuación varía entre 0 y 1, cuanto más cerca se encuentre de 1, más importante es la superposición y mejor es la correspondencia entre el flujo de lava simulado y el flujo de lava real. Sin embargo, para interpretar adecuadamente el resultado de la simulación y para su uso efectivo en la gestión de riesgos, es importante evaluar si el desajuste entre el flujo simulado y el flujo real se debe principalmente a una sobreestimación o subestimación del área inundada por la simulación.

Resultados

Los parámetros morfométricos específicos de la colada de lava del Pico de Bandama contemplados en las simulaciones de

Parámetros	Pico de Bandama
Tipo de lava	a'a
UTM (X, Y)	(454 614, 3 101 837)
Resolución MDE	25 x 25 m
L_{max} (m)	2 585 ^(a) * 1,24 = 3 205
Área (m ²)	881 819
Volumen (m ³)	10 679 042
H _c (m)	2
H _p (m)	14
Pendiente media (°)	6
Media _{Holoceno} (m)	3 793
DesvEst _{Holoceno} (m)	2 702
Interacciones	1 500

^(a) longitud real de la colada de lava

Tabla 1.- Parámetros morfométricos y estándares usados en las simulaciones probabilísticas L_{max} y de probabilidad decreciente para el volcán del Pico de Bandama.

Table 1.- Morphometric and standard parameters used for the probabilistic simulations of Pico de Bandama volcano using L_{max} and the decreasing probability stopping constraints.

los dos modelos probabilísticos de la aplicación *Q-LavHA* se enumeran en la Tabla 1.

- Simulación con modelo probabilístico de longitud máxima (L_{max}): Las mayores probabilidades para el paso del flujo de lava se observan en el canal principal del flujo y el patrón del flujo queda bien representado (Fig. 2). Las probabilidades más bajas (zonas subestimadas) se observan en dos zonas: en el extremo norte cercano al centro de emisión y en el

borde sur del último tercio del recorrido del flujo de lava simulado. Las probabilidades sobreestimadas se observan, principalmente, en tres zonas. La primera se localiza cercana a la fuente de emisión, en el borde sur del flujo, en una zona llana y sobre la que se apoya el flanco NE del cono volcánico. Si se hubiese generado la simulación de la colada de lava en un relieve con el flanco del cono ya construido, la simulación no la hubiera inundado. Como se parte de un paleorelieve pre-erupción (sin el obstáculo que supone el flanco del cono) es lógico que la simulación inunde esta zona. Las otras dos zonas se localizan a mitad de recorrido del flujo de lava, con similares pendientes a la zona anterior, pero aquí los obstáculos lo forman un barranco tributario y una cárcava (al sur y norte respectivamente) que confluyen en el barranco principal. Tomando la longitud del flujo de lava real (2 585 m) como valor de L_{max} , el resultado de la simulación no permite simular el flujo hasta el frente de la colada de lava real y, por tanto, el índice de adecuación es muy variable, principalmente debido a la superficie de lava subestimada en la simulación. El incremento de la longitud máxima (L_{max}) por un factor de 1,24 consigue que la distancia media alcanzada por las líneas de flujo y, por tanto, el grado de solapamiento del flujo simulado alcancen un 68%, del que un 17% es sobreestimado y un 15% es subestimado respecto al flujo real.

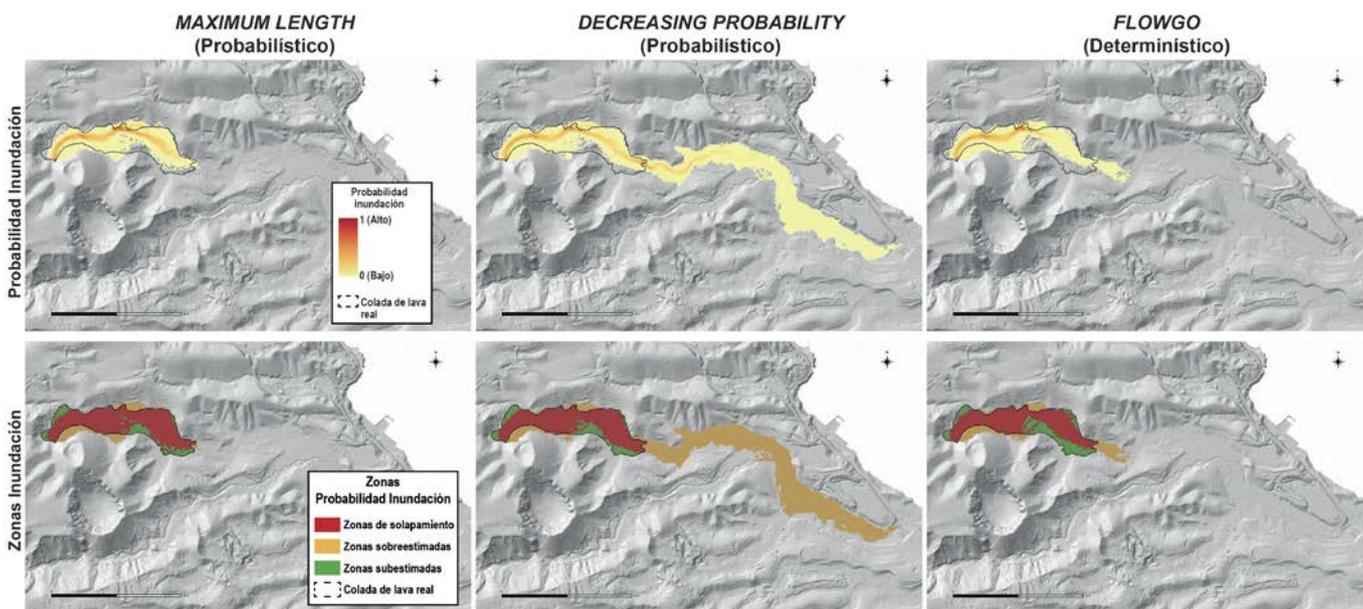


Fig. 2.- En la fila superior de imágenes se presenta la probabilidad de inundación del flujo de lava simulado con los modelos de longitud máxima, probabilidad decreciente y FLOWGO, tomando de referencia el flujo real de la colada de lava del volcán del Pico de Bandama. La fila inferior de imágenes presenta las zonas de inundación del flujo de lava simulado. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Top row figures: lava flow inundation probability simulations using as stopping constraints: the Maximum Length, the Decreasing Probability and FLOWGO models. The real lava flow extent of Pico de Bandama is represented with the black solid line. Bottom row figures: inundation zones of the simulated lava flows. See color figure in the web.

- Simulación con el modelo de probabilidad decreciente: La probabilidad de inundación más elevada se localiza en el canal principal del flujo, quedando bien representado el patrón del flujo. Sin embargo, este método contribuye a un aumento en las áreas sobreestimadas (Fig. 2). Las probabilidades bajas se observan, principalmente, en zonas similares al modelo de simulación anterior. Además, a las probabilidades sobreestimadas hay que añadir otra zona a partir del frente de flujo original, que se corresponde con el fondo de barranco y donde se puede observar que la simulación finaliza muy cercana a la línea de costa, aunque con una probabilidad muy baja. Tomando la longitud media de las lavas holocenas como el valor de la desviación estándar, el resultado de la simulación sobrepasa el frente de la colada de lava real y, por tanto, el índice de adecuación es muy variable, principalmente en la superficie de lava sobreestimada. Por tanto, el grado de solapamiento del flujo simulado con el real es de un 29%, con un 64% sobreestimado y un 7% subestimado.

- Simulación con modelo determinístico FLOWGO: Las mayores probabilidades se localizan en el canal principal del flujo y el patrón del flujo está bien representado (Fig. 2). Asimismo, las probabilidades bajas se observan en zonas similares a las de los modelos probabilísticos anteriormente comentados, aunque con un aumento de áreas subestimadas en el último tramo del flujo de lava simulado, condicionando que la simulación se concentre hacia la zona central del flujo. Las probabilidades sobreestimadas a partir del frente del flujo original determinan que la simulación finaliza muy cerca de dicho frente, por tanto, el índice de adecuación es poco variable. En este caso, el grado de solapamiento del flujo simulado con el flujo real es de un 57%, con un 22% sobreestimado y un 21% subestimado.

Conclusiones

Aunque los modelos probabilísticos para la simulación del flujo de lava se basan en suposiciones simples, se ha comprobado que los factores de corrección en *Q-LavHA* permiten simular de forma realista el emplazamiento de la lava. La calibración de los parámetros H_c y H_p ha sido basada, respectivamente, en el espesor de lava mínimo y la máxima calculada para toda la colada de lava real observada.

Por otro lado, la selección más apropiada de la longitud de flujo de lava está basada en los datos disponibles y el conocimiento sobre los flujos de lava a ser modelados. Es por eso que el mapa de flujo de lava probabilístico producido por *Q-LavHA* debe ser adecuadamente interpretado, en el sentido de que la inundación de una zona concreta significa en realidad la mayor o menor oportunidad de acabar siendo inundada.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Cabildo de Gran Canaria, programa de Becas de Investigación Simón Benítez Padilla-2016 (referencia CPH249/16). Este estudio se realizó en el marco de los Grupos de Investigación Consolidados GEOVOL (Gobierno de Canarias, ULPGC) y GEOPAM (Generalitat de Catalunya, 2017 SGR 1494). Agradecemos a J.C Carracedo y un revisor anónimo por sus comentarios para mejorar el artículo.

Bibliografía

Carracedo, J.C., Guillou, H., Paterne, M., Scaillet, S., Rodríguez Badiola, E., Paris, R., Pérez-Torrado, F.J. y Hansen Machín, A. (2004). *Estudios Geológicos* 60(3-6), 63-93.

Favalli, M., Mazzarini, F., Pareschi, M.T. y Boschi, E. (2009). *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 114, F01019, doi: 10.1029/2007JF000918.

Felpeto, A., Araña, V., Ortiz, R., Astiz, M. y García, A. (2001). *Natural Hazards* 23(2), 247-257.

Fra-Paleo, U. y Trusdell, F. (2000). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 30, 181-192.

Hansen, A., Pérez-Torrado, F.J., Benjumea, A. y Rodríguez-González, A. (2008). En: *El Gran Volcán. La Caldera y El Pico de Bandama* (A. Hansen y C. Moreno, Eds). Cabildo de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, 37-68.

Macedonio, G. (1996). En: *The mitigation of volcanic hazards* (F. Barberi y R. Casale, Eds.). Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburgo, 89-95.

Mossoux, S., Saey, M., Bartolini, S., Poppe, S., Canters F. y Kervyn, M. (2016). *Computers & Geosciences* 97, 98-109.

Rodríguez-González, A. (2009). *El Vulcanismo Holoceno de Gran Canaria: Aplicación de un Sistema de Información Geográfica*. Tesis Doctoral, Univ. de Las Palmas de Gran Canaria, 424 p.

Rodríguez-González, A., Fernández-Turiel, J.L., Pérez-Torrado, F.J., Hansen, A., Aulinas, M., Carracedo, J.C., Gimeno, D., Guillou, H., Paris R. y Paterne, M. (2009). *Journal of Quaternary Science* 24(7), 697-709.

Rodríguez-González, A., Fernández-Turiel, J.L., Pérez-Torrado, F.J., Gimeno, D. y Aulinas, M. (2010). *International Journal of Earth Sciences* 99, 645-660.

Rodríguez-González, A., Fernández-Turiel, J.L., Pérez-Torrado, F.J., Paris, R., Gimeno, D., Carracedo, J.C. y Aulinas, M. (2012). *Geomorphology* 136, 31-44.