

Estimación probabilística de la amenaza por onda de choque para el volcán Galeras

Carlos A. Patiño¹, Gustavo Cordoba¹ y Alejandra Guerrero¹

¹ Universidad de Nariño, Torobajo, Ciudad Universitaria, Pasto, Colombia - andrespatino.1216@gmail.com

1. Introducción

En las erupciones volcánicas explosivas (vulcanianas a plinianas) se generan ondas de choque debido a la descompresión súbita de los sistemas volcánicos, estas ondas de aire comprimido se propagan a través de la atmósfera y pueden viajar kilómetros de distancia a velocidades superiores a la del sonido, los impactos de esta amenaza dependen de la cercanía a la fuente y a la presión con la que se produce la explosión.

Las ondas de choque son fenómenos que a diferencia de otras amenazas volcánicas, no dejan un registro geológico después de su ocurrencia, por lo tanto, para determinar su comportamiento se recurre a modelamientos numéricos computacionales que basados en las leyes fisicomatemáticas que gobiernan este tipo de ondas permiten determinar la intensidad y forma de su propagación. Los modelamientos deben calibrarse con el registro histórico de acuerdo a los impactos que han tenido las ondas de choque tanto en personas como en estructuras civiles en erupciones pasadas.

Se tienen registros históricos que indican que erupciones del volcán Galeras han generado ondas de choque que han llegado a Pasto y Consacá situadas a 9 y 13 kilómetros de distancia respectivamente del cráter. Según Espinosa (1988) en dichos centros poblados los principales daños causados por este fenómeno son la ruptura de ventanas, apertura de candados y puertas y conmoción en personas.

La última versión del mapa de peligros de Galeras cuenta con un mapa realizado por Córdoba y Del Risco (1998) en el que se hace la zonificación para las ondas de choque producidas por explosiones en el volcán Galeras (figura 1). Este mapa fue elaborado mediante simulaciones computacionales usando las ecuaciones Prandtl-Meyer en dos dimensiones que permiten tener en cuenta el efecto de algunas barreras topográficas en la propagación de las ondas, en el mapa se delimitan tres zonas de amenaza (alta, media y baja) de acuerdo a la sobrepresión con la que llega la onda de choque.

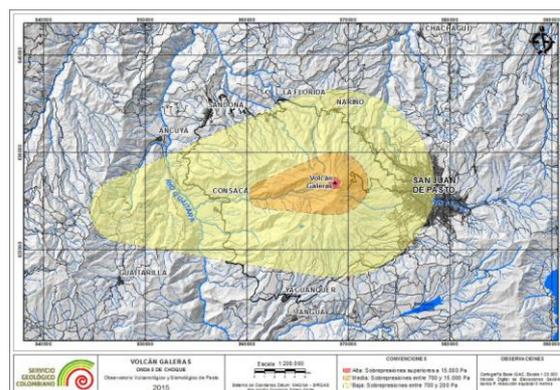


Fig. 1 Actual mapa de zonificación de la amenaza por onda de choque para el volcán Galeras

En este estudio se propone una zonificación de la amenaza por onda de choque para el volcán Galeras mediante simulaciones numéricas usando el programa de modelamiento OpenFoam el cual permite simular fluidos supersónicos en medios compresibles por el método de volúmenes finitos (Zikanov, 2015), las simulaciones fueron hechas en una malla tridimensional sobre un modelo de elevación digital de la superficie del volcán. Con el fin de determinar todos los escenarios posibles se realizaron modelamientos con diferentes valores de presión inicial de explosión.

A partir de los modelamientos se elaboró un mapa en el cual se determinaron las tres zonas de amenaza.

2. Modelo físico y matemático

Desde el punto de vista físico una onda de choque es una onda de compresión que se propaga a través de un medio fluido a velocidades superiores al sonido, las ondas de choque se reflejan y difractan cuando interactúan con barreras sólidas. El comportamiento de este fenómeno está gobernado por las leyes de conservación de masa, momento (ecuaciones de Navier-Stokes) y energía.

- Conservación de masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (u\rho) = 0$$

- Conservación de momento (despreciando fuerzas de cuerpo)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (u(u\rho)) + \nabla p + T = 0$$

- Conservación de energía total

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (u(E\rho)) + \nabla \cdot (up) + \nabla \cdot (T.u) + \nabla j = 0$$

Donde ρ es la densidad de masa, \mathbf{u} es el campo de velocidades, p es la presión, T es el tensor de esfuerzos viscosos, $E = e + |\mathbf{u}|^2/2$ la energía total con e la energía interna, \mathbf{j} el flujo de calor por difusión que puede ser representado por la ley de Fourier.

$$j = -k\nabla T$$

Donde T es la temperatura y k la conductividad. Además el aire, donde se va a propagar la onda, se considera un gas calóricamente ideal, por lo tanto:

$$p = \rho RT$$

$$e = c_v T$$

Donde R es la constante de los gases ideales, y c_v es el calor específico a volumen constante.

3. Procedimiento numérico

Una vez determinado el sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que gobiernan este tipo de flujo se usó el programa OpenFoam tanto para la generación de la malla como para resolver el sistema de forma numérica mediante su solucionador rhoCentralFoam (Greenshields et al. 2009).

3.1 Generación de la malla

La malla fue creada con las herramientas blockMesh y snappyHexMesh de openFoam (Greenshields, 2017), el dominio computacional tiene 300x300x100 elementos que corresponde a un área de 23 km x 22 km y una altura aproximada de 5 km a partir del punto más bajo de la superficie (figura 2). La parte baja de la malla representa la topografía alrededor del volcán Galeras, esta se obtuvo a partir de un modelo de elevación digital de 3 metros de resolución con el uso del sistema de información geográfica Grass-GIS.

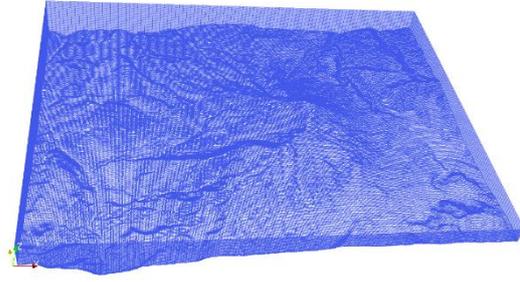


Fig. 2 Dominio computacional del problema en el que la parte baja de la malla se ajusta a la topografía del volcán.

3.2 Modelo de explosión

Existen dos tipos de modelo para la simulación de ondas de choque (figura 3), el modelo de fuente puntual (Saito et al. 2000; Saito y Takayama 2005) y el modelo de tubo de choque (Saito et al. 1997, Saito y Takayama 2005; Voinovich et al. 1998). En el modelo de fuente puntual en el tiempo cero de la simulación, un solo elemento de la malla computacional ubicado sobre el cráter volcánico posee una alta energía respecto del resto de elementos, una vez se inicia la simulación la energía del elemento es súbitamente liberada y el efecto de choque se produce. En el caso del modelo de tubo de choque, un tubo es ubicado dentro del cráter volcánico, el interior del tubo se pone a una mayor presión que el resto de los elementos de la grilla, se corre la simulación y se genera la onda de choque. Según Saito et al. (2000) el modelo de tubo de choque reproduce el fenómeno de una forma más cercana a como se da en una explosión volcánica real, por lo tanto este es el modelo que usamos en este trabajo.

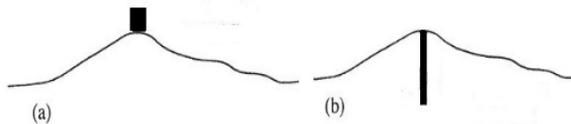


Fig. 3 Modelos de explosiones volcánicas: (a) Modelo de fuente puntual y (b) Modelo de tubo de choque.

3.3 Condiciones de borde

En la superficie y bordes del tubo se establecieron condiciones de frontera de Dirichlet de velocidad igual a cero, o condición sin deslizamiento. Para las variables de presión y temperatura se establecen condiciones de frontera natural o de Newman de flujo cero. Para los bordes del dominio computacional que representan la atmósfera se establecieron condiciones de borde de gradiente igual cero para las variables

temperatura y velocidad, para la presión se utilizó la condición de borde ‘wave transmissive’ que amortigua la onda de choque y evita que esta refleje con los límites del dominio (Richards et al. 2004).

3.4 Condiciones iniciales

Los modelamientos numéricos requieren una serie de valores iniciales para cada una de las variables involucradas, para este caso fue necesario establecer estas condiciones iniciales para la temperatura, velocidad y presión.

Existe una variación de la temperatura y presión atmosférica con la altitud por lo que las condiciones atmosféricas son diferentes en el lugar de la explosión a aproximadamente 4100 m.s.n.m respecto de las ciudades donde se tiene el registro histórico a aproximadamente 2500 m.s.n.m., sin embargo, esas variaciones no son tomadas en cuenta en este estudio y se escoge como valores iniciales la presión atmosférica a 3000 m.s.n.m y una temperatura del aire de 9°C.

También es necesario determinar la presión inicial de explosión, para ello es necesario tener en cuenta los efectos de las ondas de choque en erupciones pasadas. El registro histórico de Galeras indica que en la ciudad de Pasto ha llegado a romper ventanas, según Córdoba y Del risco (1997) la sobrepresión mínima para producir este efecto debe ser de 0.1 kPa. Teniendo en cuenta lo anterior se hacen simulaciones para calibrar el modelo garantizando que la onda llegue con esa sobrepresión a la ciudad de Pasto. El hecho de que la onda de choque rompa las ventanas no necesariamente indica que la onda llegue con 0.1kPa de sobrepresión por lo que se deben evaluar escenarios con presiones de explosión mayores.

Otro factor a tener en cuenta es la profundidad del tubo de choque, no se tiene información sobre cuál podría ser la profundidad a la cual se dé la explosión en caso de una erupción de Galeras, por lo anterior se hicieron pruebas con profundidad de tubo entre 500 m como se hace para el volcán Sakurajima (Saito et al. 1999) y 1500 m como se hace para el Monte Fuji en Saito y Takayama (2005). En este estudio se encontró que para una misma presión de explosión la sobrepresión medida en un lugar determinado varía en menos del 5% en la explosión con tubo de 500 m con respecto a la que se dio con el tubo de 1500 m, por lo tanto las demás simulaciones se llevaron a cabo con la malla que tiene el tubo de 500 m de profundidad.

4. Resultados y discusión

De las simulaciones se obtiene principalmente información acerca de la distribución de sobrepresiones en la superficie producidas por las ondas de choque generadas en cada modelamiento.

La distribución de presiones en superficie no es uniforme, esto se debe a las diferentes condiciones topográficas del terreno con las cuales la onda de choque interactúa, haciendo que esta se refleje y refracte. En la figura 4 se puede observar este fenómeno, cuando el frente de onda principal se encuentra con el borde del anfiteatro del volcán (figura 4 (a)), parte de la onda se refleja, esto hace que este frente pierda energía, la onda reflejada o secundaria empieza a viajar en sentido contrario (figura 4 (b)) llegando a alcanzar eventualmente el frente opuesto de la onda principal proporcionándole energía.

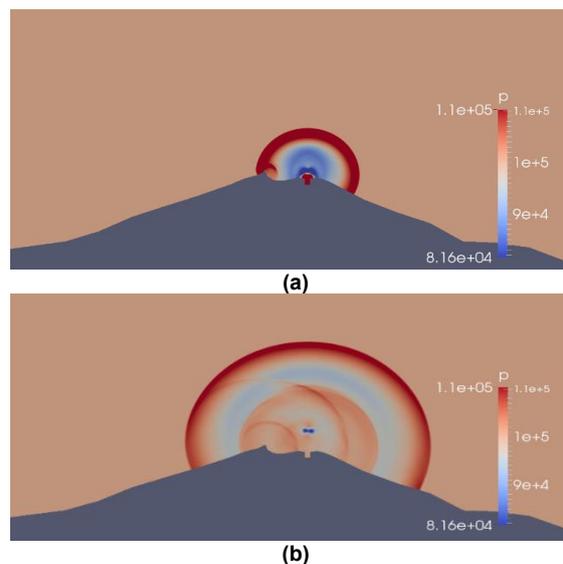


Fig. 4 Sección transversal este-oeste del volcán Galeras donde se puede observar la reflexión de la onda de choque (a) Reflexión frente de onda primaria (b) propagación de onda secundaria.

Para la obtención de la presión inicial de explosión necesaria para que la onda llegue con 100 pascuales de presión a Pasto, se realizaron pruebas con diferentes presiones iniciales. Esto se logró utilizando una presión de 3 MPa al interior del tubo de choque. La sobrepresión pico calculada para la onda de choque a 9 km de distancia es de aproximadamente 79 Pa (figura 5). La sobrepresión es aproximada a 100 Pa que es la mínima para romper vidrios en la ciudad de Pasto (Córdoba y Del Risco 1997), por lo tanto, se tomó 2 MPa como el valor mínimo del intervalo para presiones de explosión. En base a Saito et al. (2001) se determinó como valor máximo del rango de presiones de explosión de 5 MPa, esto debido a que en el trabajo en mención se usa un valor de 6 MPa, sin embargo, las simulaciones en este se llevan a cabo con el modelo de explosión de fuente puntual, con el cual según los autores la energía con la que se propaga la onda se disipa de forma más rápida con respecto al modelo de tubo de choque.

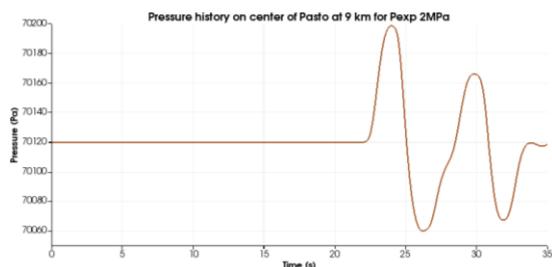


Fig. 5. Onda de presión en un elemento localizado en la ciudad de Pasto a 9 km de distancia del lugar de la explosión para una Pexp = 2MPa.

Con el rango de presiones definido se realizaron 30 modelamientos con presiones entre 2MPa y 5MPa, con cada simulación se obtienen mapas en los que se definieron tres zonas de amenaza. La zona de amenaza baja para zonas en las que la sobrepresión se encuentra entre 100 Pa y 700 Pa, dentro de esta zona los vidrios de las ventanas pueden vibrar hasta romperse y las puertas se pueden abrir súbitamente (Cordoba y Del Risco, 1997), en la zona de amenaza intermedia las sobrepresiones están entre 700 y 10.000 Pa, bajo estos niveles de sobrepresión los edificios pueden sufrir daños leves y las personas pueden ser empujadas bruscamente al suelo, la zona de amenaza alta se define para lugares donde las sobrepresiones sean mayores a 10.000 Pa, bajo esta intensidad de la onda de presión las estructuras de los edificios pueden ser dañadas y es mortal para la vida humana.

En la figura 6 se observa la zonificación de las zonas de amenaza alta, delimitada por color rojo, y de amenaza media, delimitada con color naranja para una presión de explosión de 3Mpa, la zona de amenaza baja no se encuentra delimitada. Es posible apreciar la influencia de la topografía en la distribución de las diferentes zonas de presión. La zona de amenaza alta se restringe al área que corresponde al cráter del volcán, mientras que la amenaza media alcanza lugares más lejanos en los que eventualmente pudieran encontrarse personas y algunos animales domésticos.

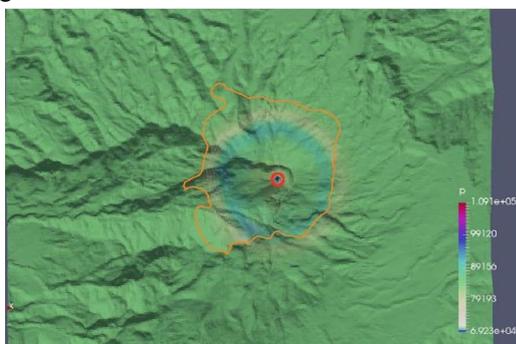


Fig. 6 Mapa preliminar de la zonificación de amenaza por onda de choque para presión de explosión de 2 MPa

Referencias

- Córdoba, G., Del Risco, E., 1997. Shock wave hazard map of Galeras volcano, Colombia. Memorias de la Asamblea General del IAVCEI, 1997. Puerto Vallarta. P. 54.
- Córdoba, G., Del Risco, E., 1998. An approach to the volcanic risk assessment due to shock wave hazard at Galeras volcano influenced area. Presentación para “Cities on Volcanoes I”, Roma y Nápoles. 25 p.
- Greenshields, C., 2017, OpenFoam user guide, pp 1-215.
- Greenshields, C., Weller, H., Gasparini, L., Reese, J., 2009. Implementation of semi-discrete, non-staggered central schemes in a collocated, polyhedral, finite volume framework, for high-speed viscous flows. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 63, 1–21.
- Richards, S., Zhang, X., Chen, X., Nelson, P., 2004, The evaluation of non-reflecting boundary conditions for duct acoustic computation, *Journal of Sound and Vibration*, 270, 539-557.
- Saito, T., Takayama, K., 2005, Applying shock-wave research to volcanology, *Comput. Sci. Eng.* 7, 30-35.
- Saito, T., Eguchi, T., Takayama, K., Taniguchi, H., 2001, Hazard predictions for volcanic explosions, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 106, 35–51.
- Saito, T., Kitamura, T., Takayama, K., Fujii, H., Taniguchi, H., 1994. Numerical simulation of blast wave propagation induced by eruptions of volcanoes. *Shock Waves. Proceedings of the 19 ISSW vol. III*, pp. 385-390.
- Voinovich, P., Timofeev, E., Takayama, K., Saito, T., Galyukov, A., 1998. 3-DUnstructured adaptive supercomputing for transient problems of volcanic blast waves, *AIAA paper 98-0540*.
- Zicanov, O., 2015. *Essential computational fluid dynamics*. John Wiley & Sons, New Jersey, pp 1–295.