

## Análisis de la amenaza por proyectiles balísticos en el área de influencia del volcán Galeras

Diana Rodríguez <sup>1</sup>, Gustavo Córdoba <sup>1</sup>, Antonio Costa<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Universidad de Nariño, Colombia – drodriguez@udenar.edu.co

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología, Italia.

**Palabras clave:** volcán Galeras, proyectil balístico, amenaza probabilística.

### RESUMEN

El presente trabajo propone una metodología para la evaluación probabilística de la amenaza por proyectiles balísticos de origen volcánico en el área de influencia del volcán Galeras, en ella se parte de la información geológica para determinar las condiciones físicas de los proyectiles y el modelamiento de los diferentes escenarios hipotéticos. De igual manera, se tienen en cuenta las características topográficas del cráter las cuales inciden en el ángulo de lanzamiento de los proyectiles.

Finalmente se espera tener una distribución probabilística en términos de punto de colisión y fuerza de impacto, lo cual se pueda utilizar posteriormente para la interacción con los elementos expuestos tanto edificaciones como recursos naturales de importancia que están dentro del área de influencia de Galeras, como lo es el Santuario de Flora y Fauna.

### INTRODUCCIÓN

Los proyectiles balísticos se definen como partículas de un diámetro generalmente mayor a 0.1 m que en las erupciones volcánicas son expulsadas del cráter, siguiendo una trayectoria parabólica y generando impactos sobre la superficie (Konstantinou, 2015). El conocimiento de esta amenaza resulta importante puesto que su potencial daño se debe a la fuerza de impacto y a las altas temperaturas que los caracterizan, generando incendios forestales, pérdidas de estructuras y en los seres vivos daños severos y hasta pérdidas fatales.

En el volcán Galeras la actividad del reciente periodo eruptivo ha traído consigo expulsión de proyectiles y representa el evento con mayor probabilidad en las erupciones volcánicas de tipo explosivo (SGC, 2015), generando incendios forestales, como los ocurridos en las erupciones del 24 de abril de 2009 y el 2 de enero de 2010 (Figura 1) (Acosta y Muñoz, 2012; INGEOMINAS, 2010).



Fig. 1 – Fotografía que evidencia el impacto de proyectiles balísticos y los incendios forestales generados el 3 de enero de 2010.

Fuente: Alberto Quijano Vodniza, Observatorio Astronómico de la Universidad de Nariño.

A continuación se indica la distribución de proyectiles definida por SGC (Ingeominas, 1997; SGC, 2015), resultado de la información histórica analizada y el modelamiento numérico. De ello se tienen las dimensiones de los mismos y el máximo alcance esperado.

Tamaño diámetro (m)	Alcance (km)	Nivel de amenaza	Fuente
3.5 (max)	1	Alta	INGEOMINAS (1997) 3a Versión del Mapa de Amenazas
1.5 (max)	1-2.5	Media	
< 1	5	Baja	
< 1	4.4 - 5.3	Alta	SGC (2015) 4a Versión del Mapa de Amenazas
> 1	1.6 -2.3	Media	

Tabla 1: Características de los proyectiles balísticos en el volcán Galeras.

Como se puede ver en la Tabla 1, la actual versión del Mapa de Amenazas (4ta) no contempla un nivel de amenaza bajo respecto a este fenómeno, debido a la peligrosidad del impacto directo de los proyectiles (SGC, 2015), lo cual hace necesario buscar

metodologías que nos permitan tener un mejor conocimiento de esta amenaza.

## CONOCIMIENTO DEL FENÓMENO

Pese a que en Galeras se tienen registros históricos de algunos de los balísticos expulsados, también existe incertidumbre al asociarlo con un evento eruptivo determinado, por lo cual se conoce parcialmente su distribución (SGC, 2015). Sin embargo, el conocimiento de la física del fenómeno presente en muchos volcanes del mundo, permiten dar pautas para realizar su evaluación.

Los proyectiles balísticos (Figura 2) al ser expulsados siguen trayectorias parabólicas que dependen del ángulo, tamaño, densidad y velocidad inicial de los mismos. Las trayectorias se ven afectadas principalmente por el coeficiente de arrastre de la atmósfera, mas no por condiciones de viento (Alatorre et al 2006).

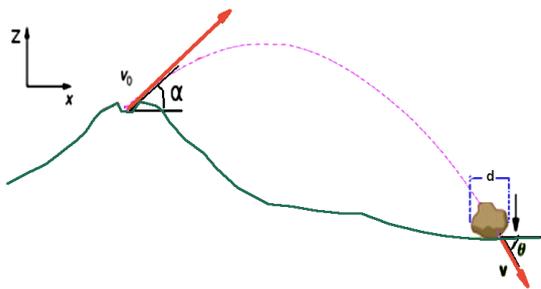


Fig. 2 – Esquema de comportamiento de proyectil balístico, en donde  $\alpha$ , es el ángulo de lanzamiento,  $v_0$  la velocidad inicial,  $d$  el diámetro de la partícula y  $v$  la velocidad de llegada.

## METODOLOGÍA

### ANÁLISIS COMPUTACIONAL

Computacionalmente, existen diferentes herramientas que permiten calcular la trayectoria de los balísticos, los cuales en complemento con modelos analíticos nos ayudan a conocer características físicas del impacto de los proyectiles, para este caso, se utilizó la rutina de programación definida por Connor (2015) y sobre ella se realizaron ajustes que permiten la evaluación probabilística a partir de centenares de escenarios hipotéticos.

Las rutinas fueron modificadas para tener en cuenta la variabilidad de la densidad del aire con relación a la altitud, así mismo la distribución de la trayectoria para distintos ángulos horizontales, de tal manera que se pudiesen realizar lanzamientos en diferentes direcciones.

El modelo requiere como parámetros de entrada:

- Radio del piroclasto
- Densidad del piroclasto
- Velocidad inicial
- Ángulo de lanzamiento

Una vez ejecutadas las rutinas, se obtiene el punto de colisión y la fuerza del impacto, dependiendo si se tiene una colisión elástica o inelástica, ésta se define por Connor (2015):

$$\text{Ec. 1} \quad F_1 = mv_f \frac{\sigma}{L}$$

En donde,

$F_1$ : fuerza del impacto en caso de una colisión elástica.

$m$ : masa del piroclasto.

$v_f$ : velocidad del proyectil en el momento inmediatamente anterior al impacto.

$\sigma$ : velocidad del sonido en el proyectil.

$L$ : diámetro del proyectil.

$$\text{Ec. 2} \quad F_2 = \frac{1}{2}mv_f^2 \frac{\sigma}{d}$$

En donde,

$F_2$ : fuerza del impacto en caso de una colisión inelástica.

$m$ : masa del piroclasto.

$v_f$ : velocidad del proyectil en el momento inmediatamente anterior al impacto.

$\sigma$ : velocidad del sonido en el proyectil.

$d$ : distancia a la cual se detiene el proyectil.

### CONDICIONES INICIALES

Con el fin de presentar una evaluación probabilística de este peligro, se propone realizar la simulación de los distintos escenarios hipotéticos, resultantes de las combinaciones de los parámetros de inicio, generando así más de 200 escenarios cada 5 grados. De tal manera que sea cubierta el área de influencia de Galeras. Estas combinaciones se realizan usando la técnica del Muestreo Hipercúbico Latino Óptimo (OLHS) (Dalbey, 2006).

Para ello se requiere determinar rangos de las condiciones iniciales. Para este caso el radio del piroclasto está dado por los registros históricos de las erupciones de Galeras (SGC, 2015), la densidad del piroclasto es tomada a partir de los valores encontrados por estudios previos y por lo aportado desde investigaciones que permiten conocer las

características de este tipo de volcanes (andesíticos). Los ángulos de lanzamiento, en general se toman entre 10 a 70° (Alatorre-Ibargüengoitia et al., 2006). Las velocidades iniciales para distintos volcanes, se encuentran cercanas a los 300m/s, sin embargo, con el fin de conocer un rango de velocidades iniciales y alcance potencial, se realizan distintas pruebas para los casos extremos dados de las combinaciones de las condiciones de inicio.

A manera de ejemplo se indica en la Figura 3 las posibles trayectorias de los balísticos con una variación de 30° en la horizontal. En la Figura 4 se presentan los distintos perfiles del DEM de una resolución de 3m en donde puede observarse la asimetría del cráter, por lo cual se decidió sectorizar de acuerdo al ángulo mínimo de lanzamiento dado por la topografía.

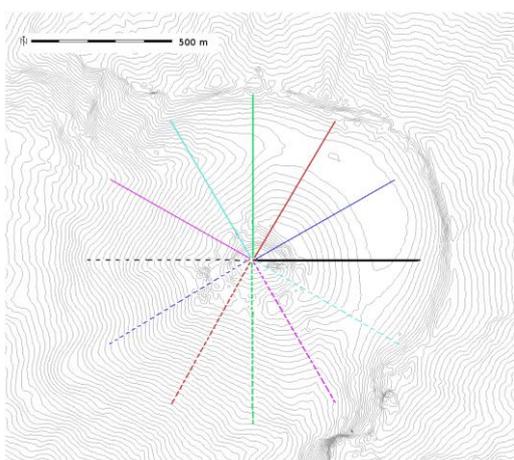


Fig. 3 – Trayectorias de los balísticos, con una variación de 30° en la horizontal y un alcance de 500 m.

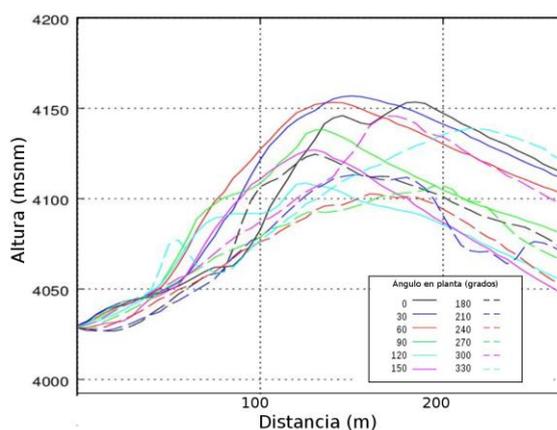


Fig. 4 – Perfiles topográficos del cono volcánico a partir del DEM de 3m de resolución, para cada una de las trayectorias indicadas en la Figura 3.

Finalmente, los parámetros iniciales para el modelo, se resumen en la Tabla 2.

Parámetro	Mínimo	Máximo
Angulo	*25°/ 30° /40°/45°	70°
Diámetro	0.06 m	3.5 m
Densidad	2300 kg/m3	2800 kg/m3
Velocidad inicial	300 m/s	

Tabla 2: Rangos de parámetros iniciales para el modelamiento.

\*Dependen de las características definidas por el perfil topográfico.

## RESULTADOS ESPERADOS

Finalmente, se espera obtener la distribución probabilística de los potenciales impactos generados en cada uno de los balísticos modelados, en términos de fuerza de impacto (Ecuaciones 1 y 2), lo cual resulta útil al cruzar dicha información con los elementos expuestos en el área de influencia, de tal manera que permita llegar a una estimación del riesgo por impacto de proyectiles balísticos de origen volcánico.

Uno de los efectos de los proyectiles, es que debido a su temperatura, al tener contacto con la vegetación, se generan incendios forestales, lo cual representa un alto impacto en la flora y la fauna de la zona, para Galeras es de gran importancia, puesto que el área es considerada como Santuario de Flora y Fauna debido a los servicios ambientales que brinda a la región, como el abastecimiento de recurso hídrico y su riqueza en cuanto a biodiversidad.(Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2005).

Si bien es cierto, el modelo no considera la temperatura, claramente es posible relacionar su lugar de impacto como un potencial detonador de incendios y evaluar posteriormente la dispersión de los mismos en caso de que las partículas lleven una temperatura superior al punto de inflamación forestal (273°-600°). Por tanto, un resultado adicional de este trabajo es el mapa de dispersión de incendios forestales de origen volcánico en el área del Santuario de Flora y Fauna Galeras.

## Referencias

Acosta Moncayo, Luis Alberto; Muñoz Muñoz, M. M. (2012). Percepción y prevención del riesgo volcánico Galeras en el corregimiento de Mapachico municipio de Pasto. Biblioteca Virtual Universidad de Nariño, 115. Retrieved from <http://biblioteca.udenar.edu.co:8085/bibliotecavirtual/viewer.aspx?&var=85750>

Alatorre-Ibargüengoitia, M. A., Farraz-montes, I. A., & Delgado Granados, H. (2006). at Volcán de Fuego de Colima (México), 2402(9), 195–202. [https://doi.org/10.1130/2006.2402\(09\)](https://doi.org/10.1130/2006.2402(09)).

- Connor, C. B. (2015). PERL script for motion projectile motion with drag. Retrieved from [http://131.247.211.166/tiki/tiki-index\\_raw.php?page=Ballistics](http://131.247.211.166/tiki/tiki-index_raw.php?page=Ballistics)
- Dalbey, K., Patra, A. K., Pitman, E. B., Bursik, M. I., & Sheridan, M. F. (2006). Input uncertainty propagation methods and hazard mapping of geophysical mass flows. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B5).
- Ingeominas. (1997). Mapa de Amenaza Volcánica del Galeras (Tercera Versión). Bogotá, D.C; Colombia.
- INGEOMINAS, I. colombiano de geología y minería. (2010). Resumen de actividad del volcán Galeras del 29 de diciembre de 2009 al 4 de enero de 2010.
- Konstantinou, K. I. (2015). Maximum horizontal range of volcanic ballistic projectiles ejected during explosive eruptions at Santorini caldera. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 301, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.05.012>
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2005). Plan De Manejo 2006-2010 Santuario De Flora Y Fauna Galeras.
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). Actualización Del Mapa De Amenaza Volcánica Del Volcán Galeras – Colombia. Pasto, Colombia. Retrieved from [https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras/PDF/Memoria\\_Actualizacion\\_Mapa\\_Amenaza\\_Volcanic\\_a\\_Volcan\\_Galeras\\_2015.pdf](https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras/PDF/Memoria_Actualizacion_Mapa_Amenaza_Volcanic_a_Volcan_Galeras_2015.pdf)