

Modelo de erupciones explosivas como herramienta para la divulgación

Edwin Santiago Villamil Guevara, Luisa Daniela Acosta Agudelo, Andrés Felipe Laverde Martínez, María Alejandra Arias Jaimes y Mariana Gutiérrez Gómez

Estudiantes del Departamento de Geociencias, Universidad de los Andes Los geocientíficos tienen la responsabilidad de optimizar la divulgación de procesos naturales peligrosos, como las erupciones volcánicas explosivas. Por eso, estudiantes de Geociencias de la Universidad de los Andes diseñaron un modelo análogo de fácil construcción, capaz de simular estos fenómenos. El modelo ha sido una herramienta en espacios de divulgación y ha mejorado la comprensión del público, lo que fomenta su participación e interés en las erupciones explosivas y sus fenómenos.

En el marco de los esfuerzos internacionales orientados hacia la mitigación del riesgo de desastre, la educación ha sido reconocida como una herramienta clave en la reducción de la vulnerabilidad social frente a peligros naturales [1]. Un mayor conocimiento de las amenazas naturales permite un acercamiento más efectivo a la percepción del riesgo y a la toma de decisiones preventivas, correctivas y resilientes [2]. Ejercicios fundamentales como la evaluación de las amenazas y el establecimiento de redes robustas de vigilancia de procesos naturales son las principales tareas en las que se centran los servicios geológicos e hidrometeorológicos, así como los observatorios sismológicos, vulcanológicos, atmosféricos y oceanográficos. Sin embargo, la mitigación del riesgo es tarea de todos y es indispensable mantener una comunicación efectiva, que posibilite la participación de las comunidades expuestas [3, 4].

En este contexto, los geocientíficos tienen la responsabilidad social de ejecutar y optimizar las estrategias de divulgación del conocimiento técnico, tanto con tomadores de decisiones como con el público general [4]. Esta tarea es un gran reto sobre todo cuando se trata de aquellos procesos naturales que son difíciles de observar por su peligrosidad y por su baja frecuencia, pero que de todas formas son potencialmente devastadores, como las erupciones volcánicas explosivas. El conocimiento básico de los procesos que rigen la variabilidad de erupciones y productos volcánicos pueden resultar familiares para las poblaciones que viven en áreas volcánicas con actividad eruptiva recurrente; sin embargo, dichos conocimientos son más ajenos a las personas que habitan áreas volcánicas de actividad poco frecuente, así como a aquellas que viven lejos de estas regiones, pero que pueden sufrir impactos



indirectos [5], como es el caso de las personas que habitan en ciudades como Bogotá. Si bien las erupciones volcánicas están comúnmente asociadas a flujos de lava y otros fenómenos incandescentes que han sido capturados en películas, ilustraciones y fotografías, y que forman parte del imaginario común relacionado con estos sucesos. Las erupciones explosivas y las amenazas resultantes suelen ser menos familiares. En Colombia, a pesar de que tenemos una historia marcada por desastres asociados a volcanes [6], la desconexión generalizada del público con los fenómenos volcánicos puede estar demarcada no solamente por factores espacio-temporales, sino también por la carencia de contenidos relacionados con las ciencias de la Tierra dentro de los programas educativos de educación básica y secundaria [7].

En aras de buscar estrategias pedagógicas que permitieran ilustrar fácilmente los fenómenos volcánicos explosivos, también conocidos como piroclásticos (del griego, 'fragmentos de fuego'), un grupo de estudiantes de Geociencias de la Universidad de los Andes conformamos un semillero de investigación sobre vulcanología en 2019. Juntos desarrollamos un modelo análogo para familiarizar a distintas audiencias, particularmente las no científicas, con dichos fenómenos

Los modelos análogos han sido ampliamente usados en ciencias de la Tierra [8 y referencias allí citadas] para la divulgación y el estudio de procesos sedimentarios, estructurales, geodinámicos y geoambientales. En vulcanología, los modelos físicos han sido principalmente desarrollados para

investigar procesos en cámaras magmáticas, durante la inyección de magmas, dinámicas eruptivas [9], así como el transporte y acumulación del material piroclástico —una extensa revisión del uso de modelos análogos en investigación vulcanológica puede encontrarse en [10]—. Sin embargo, pocas son las referencias sobre el uso de dichos modelos en ambientes divulgativos y docentes para audiencias no académicas [11].

Algunas de las dificultades de la adaptación de modelos de investigación al aula y otros entornos educativos son el costo, la movilidad y la necesidad de materiales de difícil acceso (por ejemplo, nitrógeno, entre otros). En particular, el modelo presentado por Mana —en el que busca replicar colapsos de columnas eruptivas presentado en [12]— resulta ser de fácil elaboración y útil para la representación de fenómenos explosivos. En este trabajo, adaptamos dicho experimento para mostrar un espectro más amplio de fenómenos piroclásticos y discutir, con distintas audiencias, sus causas, los procesos que generan y los peligros implicados.



Humo proveniente del volcán Foto: Freepik



Fundamentos conceptuales

Las erupciones volcánicas explosivas son uno de los fenómenos más fascinantes de la naturaleza, con capacidad de dictar la evolución del paisaje, impactar la dinámica hidrogeológica y afectar los sistemas socioecológicos locales. Las grandes erupciones tienen la capacidad de inyectar metales pesados y no-metales en la estratósfera, y pueden inducir la formación de aerosoles, lo que, incluso, puede llegar a repercutir en el clima a escala global [13]. Además, bajo ciertas condiciones, la acumulación de cenizas volcánicas también puede incidir en la productividad de suelos [14].

Aunque hay varios factores detonantes de erupciones explosivas, aquí nos enfocaremos en aquellos casos en los que la detonación principal es la descompresión repentina de sustancias volátiles, es decir, de los gases disueltos en el magma. La expansión y la despresurización de tales gases logra transformar el fundido magmático en partículas sólidas de distintos tamaños (por ejemplo, piroclastos) que son expulsados hacia la atmósfera [15]. Las columnas piroclásticas son mezclas calientes (~500-1200 °C) de gases y piroclastos que se inyectan en la tropósfera a gran velocidad, jincluso a velocidades supersónicas! Aquellas columnas que alcanzan altos niveles en la tropósfera (> 15 km) e incluso en la estratósfera (> 25 km) son las de mayor energía eruptiva y tienden a ser estables por algunas horas, lo que permite el transporte eficiente de materia y energía desde el interior de la Tierra hacia la atmósfera [16].



Paisaje volcánico. Fotografía por: Freepik.

La altura que alcanza una columna piroclástica sobre el cráter de un volcán depende de una combinación de factores físicos, como la velocidad de salida, la cantidad de gases, la tasa de descarga de la mezcla piroclástica, el radio de la fuente de emisión y la capacidad de transformación de la energía térmica en energía potencial y cinética [17].

Una columna estable se subdivide en tres regiones principales que parten desde el cráter volcánico (figura 1): (i) la zona de *jet* o gas-thrust, (ii) la zona convectiva y (iii) la zona de sombrilla [18]. La (i) zona de jet abarca los primeros cientos de metros desde el cráter. Allí, la mezcla piroclástica es generalmente más densa que la atmósfera (10-100 kg/m³) y asciende con una velocidad inicial que depende de la violencia de la erupción [19]. La violencia eruptiva está relacionada con la energía de fragmentación; es decir, la energía liberada cuando el magma se rompe mientras pasa de ser una mezcla de fundido con pocas burbujas y cristales a una mezcla mayoritariamente de gas, con algunas gotas de fundido y partículas sólidas [15]. Además, depende del contenido total de gases en expansión, mientras que el impulso de la mezcla y, por tanto, la altura total del jet, dependen de la cantidad de masa en movimiento (momento) [20].

A medida que la mezcla asciende, pierde partículas sólidas e incorpora aire más frío desde la atmósfera, el cual puede calentarse; ambos factores inducen una pérdida de densidad en la mezcla. Este contraste de densidades asociado principalmente al intercambio de energía térmica favorece la flotabilidad de la mezcla y determina su



Figura 1. Estructura básica de una columna eruptiva generalizada con el desarrollo de las tres regiones de (i) jet, (ii) convectiva y (iii) sombrilla (modificado de [28]).

empuje, desarrollándose así la (ii) zona convectiva [21]. En esta zona, los materiales ascienden hasta que el intercambio térmico deja de ser eficiente y se vuelve a reducir el contraste de densidades entre la mezcla y la atmósfera (nivel de flotabilidad neutra; ver figura 1). A partir de allí, la mezcla solamente asciende por momento (alcanzando la altura total de la columna) y el viento se convierte en el agente principal de transporte horizontal de las partículas; así se desarrolla la (iii) zona de sombrilla (figura 1.) [22].



Humo que emite un volcán. Fotografía por: Freepik.

Dependiendo del tamaño, la forma y la densidad de las partículas sólidas, estas se segregan dentro de la zona de sombrilla y se precipitan sobre la superficie terrestre, cubriendo el paisaje. Este proceso se conoce como caída piroclástica [23]. Dependiendo de su volumen y el área cubierta, las caídas piroclásticas pueden enterrar suelos, cultivos, generar colapso de infraestructura, impactar las redes eléctricas, la calidad del agua y causar problemas respiratorios, además de representar una grave amenaza para la industria aeronáutica [24].

Enaquellos escenarios en que la mezcla piroclástica sea demasiado densa o fría y no se desarrolle la zona convectiva, o si durante la erupción ocurren procesos tales como (i) la pérdida de gases, (ii) la ampliación del conducto volcánico o del cráter, o (iii) la interacción de magma con agua externa, las columnas pierden energía, se desestabilizan y pueden colapsar [25]. Como resultado, se producen las corrientes de densidad piroclástica (CDP), uno de los fenómenos más peligrosos de las erupciones volcánicas [26]. Las CDP son mezclas piroclásticas que viajan a ras del terreno, a más de 100 km/h y con temperaturas mayores a los 700 °C, controladas por su diferencia de densidad respecto a la atmósfera, por la gravedad y por la interacción con la topografía [26].





Por tanto, arrasan, entierran y queman todo a su paso, siendo uno de los fenómenos explosivos más peligrosos [27].

Las CDP también pueden generarse por otros mecanismos [26], incluyendo el colapso gravitacional de domos de lava o por la interacción del magma con agua externa, pero estos no se discutirán en este trabajo. Aquí, la intención será demostrar, mediante un modelo análogo, la formación de: (i) *jets*, (ii) columnas eruptivas, (iii) caídas piroclásticas y (iv) corrientes piroclásticas (CP) por colapso de *jets* y de columnas.

Metodología

El modelo propuesto requiere (i) un pequeño tanque de vidrio (tabla 1), (ii) un medio fluido con diferentes densidades que simulará la atmósfera (agua salada con una concentración de 300g/L y agua corriente) y (iii) sedimentos que representen el material piroclástico. Se sugiere utilizar una mezcla de sedimento suelto (preferiblemente material piroclástico real) en una proporción de 1/4 de sedimento tamaño arena fina (0,250 mm – 0,180 mm) y 3/4 de sedimento tamaño limo o inferior (<0,180mm); esta mezcla se introduce en una jeringa que simula el conducto volcánico, 40 % de la jeringa se llena con el sedimento y 60 % con agua corriente. Estas relaciones se determinaron de manera empírica y se buscaba que el material introducido en el tanque fuera capaz de reproducir la mayor cantidad de fenómenos posibles.

Material	Dimensiones
2 Láminas de vidrio	40 x 50 x 0,5 cm
Manguera de PVC	120 cm x 1,58 cm (5/8 pulgadas)
	35 cm x 0,9 cm (3/8 pulgadas)
6 Abrazaderas	Recomendación: prensa en C
Modelo de espuma del volcán	25 cm x 8 cm
Jeringa	50 mL, se sugiere agrandar el diámetro de la salida de la jeringa
Agua	2,1 L de agua salada (concentración 200 g/L a 300 g/L)
	0,7 L de agua
Sedimento	Fracción fina: <180 μm, fracción gruesa: 180-250 μm, en una proporción
	de 3:1



Una vez montado el tanque, tal como se muestra en la figura 2, se llenan 3/4 partes con agua salada y, con cuidado, se completa el llenado del tanque con agua para buscar crear una interfaz de densidades. Finalmente, se conecta la jeringa al extremo de la manguera y se empuja el émbolo de la jeringa con firmeza, para presionar la mayor cantidad de agua y sedimento al interior del tanque. El tutorial para la construcción del modelo y desarrollo del experimento puede encontrarse en el QR más adelante.

Resultados

El modelo reproduce con éxito los fenómenos esperados en la erupción explosiva análoga. Por una parte, el uso de agua salada y agua permite lograr el contraste de densidades entre el material piroclástico inyectado y el medio circundante, lo que garantiza el empuje necesario para generar la zona de *jet* (figura 3a).

Caso 1 (columna estable): para lograr representar este caso se sugiere usar una relación del material fino respecto al grueso de 3:1 y procurar inyectar el material a una tasa rápida y constante dentro del tanque. La zona convectiva (figura 3b) se logra por el contraste de densidades entre la mezcla piroclástica análoga y el agua salada. Por otra parte, la interfaz de densidad generada entre los dos tipos de agua en el tanque permite el desarrollo del nivel de flotabilidad neutra de la mezcla piroclástica análoga que se explaya lateralmente formando así una zona de sombrilla (figura 3c). Allí se reproduce, incluso, la segregación de partículas por densidades, tal como sucede en el volcán Pinatubo, Filipinas. Al generarse la zona de sombrilla, también ocurre



Figura 2. Montaje del tanque de agua para modelo. a) Láminas de vidrio. b) Manguera de PVC 5/8". c) Manguera de 3/8" para entrada del material. d) Abrazaderas. e) Modelo del volcán.

la precipitación del material a modo de caídas piroclásticas (figura 3d).

Caso 2 (colapso de columna): para lograr representar este caso se pueden alterar dos factores: (i) mantener la proporción 3:1 de material fino con respecto al grueso, pero se debe disminuir la velocidad de la inyección (por ejemplo, equivalente a quitarle energía a la erupción) o (ii) reducir la proporción de material fino en relación al grueso 2:1 y así garantizar un aumento relativo de la densidad de la mezcla. Ambas modalidades generan CDP análogas (figura 3e) en las que se observa el desacoplamiento de la fracción fina durante el transporte del material. Esto sucede generalmente en casos de erupciones plinianas en las que la descarga de material se da en pulsos y la columna colapsa, como ha sido observado en los volcanes Tambora, en Indonesia, o El Chichón, en México.



Figura 3. Resultado del modelo de erupciones explosivas. a) Detalle de la zona jet. b) Formación de columna eruptiva, en la que se observa la zona de convección. c) Formación de la zona de sombrilla en la interfaz de densidad. d) Precipitación del material a modo de caída piroclástica. e) Formación de la CDP en la ladera del modelo. f) Acumulación de estratos y construcción del edificio volcánico.

• Caso 3 (colapso de *jet*): la representación análoga del colapso directo de la zona de *jet* se obtiene (i) al disminuir la proporción de material fino respecto al grueso (1:1) o (ii) al disminuir la tasa de inyección, lo que reduce drásticamente la energía de la erupción. Al inyectar lentamente el material grueso se logra simular erupciones tipo rebosamiento o *boiling over* [29] en las que no hay desarrollo de una columna eruptiva. Casos semejantes se aprecian en los volcanes Cotopaxi y Tungurahua en Ecuador [29].

Por último, si se tiene la oportunidad de ejecutar el modelo múltiples veces se acumularán diversos estratos que permiten mostrar el proceso de construcción de los edificios volcánicos compuestos o estratovolcanes, a medida que se acumulan capas o estratos piroclásticos (figura 3f).



Vista aérea del cráter de un volcán Fotografía por: Freepik.



Persona observando un volcán. Fotografía por: Freepik

Discusión y conclusiones

modelo representa una herramienta Este versátil, que puede ser fácilmente transportada y construida en ambientes escolares y no escolares con materiales económicos, sin comprometer la capacidad de producir demostraciones representativas de ciertos fenómenos asociados las erupciones explosivas magmáticas. а Adicionalmente, el modelo es adaptable ya que no está limitado al uso de materiales expuestos en este trabajo. Por ejemplo, el material inyectado puede reemplazarse por implementos de uso cotidiano como arena de río o de construcción para simular los fragmentos gruesos, y cacao en polvo para simular el material fino. Para ampliar el espectro de procesos a ilustrar, es posible realizar variaciones en las condiciones del experimento para modelar flujos sobre obstáculos en la topografía al igual que simular otro tipo de erupciones volcánicas. También, se podrían usar mangueras de distintos diámetros para simular la influencia del tamaño del cráter en la generación y estabilidad de las columnas eruptivas.

Como ejercicio preliminar en el terreno, se tuvo la oportunidad de presentar este modelo análogo a distintas audiencias con un amplio rango de edades y trasfondos educativos, incluyendo clases introductorias a las Geociencias en la Universidad de los Andes, un stand en la Ciclovía de Bogotá dentro del marco de divulgación científica de la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo (ACGGP), así como en múltiples escenarios con comunidades del municipio de La Cruz, Nariño, con niños, niñas y adultos que viven y conviven en zonas proximales a los complejos volcánicos Las Ánimas y Doña Juana. Aunque aún deben hacerse ejercicios con grupos focales y una rigurosa evaluación de resultados, percibimos que el uso del modelo permitió una mejor comprensión de los fenómenos, lo que llevó a una mayor intención de participar, interactuar con el modelo y hacer preguntas acerca de los fenómenos expuestos y sus posibles consecuencias.

Este modelo análogo tiene el potencial de hacer parte de los esfuerzos en la disminución del riesgo, ampliando la percepción del público nocientífico acerca de los fenómenos asociados a erupciones volcánicas explosivas. Finalmente, con el propósito de cumplir uno de los objetivos por el cual se construyó este experimento, se invita a que este se replique, para emplearse como instrumento en labores educativas o de divulgación de los fenómenos volcánicos y que se evalúe su eficacia¹.

Agradecimientos

Queremos agradecerle a la profesora Natalia Pardo del Departamento de Geociencias de la Universidad de los Andes por su conocimiento, apovo y contribuciones durante el desarrollo de este proyecto, su guía y revisión fueron de gran importancia para que este artículo viera la luz. A Sofia Salamanca, responsable del laboratorio de Geociencias por una y otra vez recibirnos allí, sin cita previa, para probar nuestro modelo, poder hacer mejoras y conseguir que funcionara como queríamos. También a David Laverde y a Laura Forero de la Facultad de Ciencias de La Universidad de los Andes por apoyarnos en la elaboración y edición del video. Por último, a la ACGGP, a la Universidad de los Andes y al Servicio Geológico Colombiano por proporcionarnos espacios para usarlo como una herramienta de divulgación y exponerlo a distintos tipos de público.

Comparte este artículo:

Tutorial:



¹ Link para el formulario «Encuesta modelo de erupciones volcánicas»: https://docs.google.com/forms/ d/1xqLfS9f57IUC_ljsy_X66WnanGap4ybHe9r81e2NxuY/ edit

Referencias

[1] Sakurai A, Sato T. Promoting Education for Disaster Resilience and the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction. J Disaster Res. 2016;11(3):402-12. http:// dx.doi.org/10.20965/jdr.2016.p0402

[2] Muttarak R, Lutz W. Is Education a Key to Reducing Vulnerability to Natural Disasters and Hence Unavoidable Climate Change? Ecol Soc. 2014; 19(1):42. http://dx.doi. org/10.5751/ES-06476-190142

[3] Leonard GS, Johnston DM, Paton D, Christianson A, Becker J, Keys H. Developing Effective Warning Systems: Ongoing Research at Ruapehu Volcano, New Zealand.
J Volcanol Geotherm Res. 2008 may. 20; 172(3-4):199-215. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.12.008
[4] Barclay J, Haynes K, Mitchell T, Solana C, Teeuw R, Darnell A, *et al.* Framing Volcanic Risk Communication Within Disaster Risk Reduction: Finding Ways for the Social and Physical Sciences to Work Together. Geol Soc Lond Spec Publ. 2008; 305(1):163-177. https://doi. org/10.1144/SP305.14

[5] Gaillard JC, Dibben CJ. Volcanic Risk Perception and Beyond. J Volcanol Geotherm Res. 2008; 172(3-4):163-169. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.12.015

 [6] Espinosa-Baquero A. Documentos para la historia de los volcanes colombianos. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales;
 2012. 165 p.

[7] Zambrano Alfonso C, Robinson Viafara LW, Uribe C, Juan AD, Castillo Camila Cabezas CP. Formación docente y las tecnologías de información y comunicación. Rev Educ Super Soc (ESS). 2019; 30(30):17-39.

[8] Deus HM, Bolacha E, Vasconcelos C, Fonseca PE. Analogue Modelling to Understand Geological Phenomena. In: Proceedings of the GeoSciEd VI; 2011. https://doi.org/10.13140/2.1.4544.3845

[9] Roche O, Carazzo G. The Contribution of Experimental Volcanology to the Study of the Physics of Eruptive Processes, and Related Scaling Issues: A Review. J Volcanol Geotherm Res. 2019; 384:103-150.

https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.07.011

[10] Poppe S, Gilchrist JT, Breard ECP, Graettinger A, Pansino S. Analog Experiments in Volcanology: Towards Multimethod, Upscaled, and Integrated Models. Bull Volcanol. 2022; 84(5):1-19. https://doi.org/10.1007/ s00445-022-01543-x

[11] Harpp KS, Koleszar AM, Geist DJ. Volcanoes in the Classroom: A Simulation of an Eruption Column.J Geosci Educ. 2005;53(2):173-175. https://doi. org/10.5408/1089-9995-53.2.173

[12] Mana S. Pyroclastic Flow - Column Collapse [Video].2017. Disponible en: https://www.youtube.com/ watch?v=O5ScugScChw

[13] Schneider DP, Ammann CM, Otto-Bliesner BL, Kaufman DS. Climate Response to Large, High-Latitude and Low-Latitude Volcanic Eruptions in the Community Climate System Model. J Geophys Res Atmos. 2009; 114(D15). https://doi.org/10.1029/2008JD011222

[14] Delmelle P, Opfergelt S, Cornelis JT, Ping CL. Volcanic soils. En: Sigurdsson H, editor. The Encyclopedia of Volcanoes. 2.^a ed. Estados Unidos: Academic Press; 2015. p. 1253-1264.

[15] Cashman KV, Scheu B. Magmatic Fragmentation. En: Sigurdsson H, editor. The Encyclopedia of Volcanoes. 2.^a ed. Estados Unidos: Academic Press; 2015. p. 459-71.

[16] Oppenheimer C, Fischer TP, Scaillet B. Volcanic Degassing: Process and Impact. Treatise Geochem.2014; 4:111-179. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-095975-7.00304-1

[17] Wilson L, Sparks RSJ, Huang TC, Watkins ND.
The Control of Volcanic Column Heights by Eruption
Energetics and Dynamics. J Geophys Res Solid Earth.
1978; 83(B4):1829-1836. https://doi.org/10.1029/
JB083iB04p01829

[18] Houghton B. Part IV Explosive Volcanism. En:
Sigurdsson H, editor. The Encyclopedia of Volcanoes. 2.^a
ed. Estados Unidos: Academic Press; 2015. p. 457-458.
[19] Woods AW, Bower SM. The Decompression of
Volcanic Jets in a Crater during Explosive Volcanic
Eruptions. Earth Planet Sci Lett. 1995; 131(3-4):189-

205. https://doi.org/10.1016/0012-821X(95)00012-2

[20] Wilson L. Explosive Volcanic Eruptions—III. Plinian Eruption Columns. Geophys J Int. 1976; 45(3):543-556. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1976.tb06909.x
[21] Sparks R. The Dimensions and Dynamics of Volcanic Eruption Columns. Bull Volcanol. 1986;48(1):3-15. https://doi.org/10.1007/BF01073509

[22] Koyaguchi T, Ochiai K, Suzuki YJ. The Effect of Intensity of Turbulence in Umbrella Cloud on Tephra Dispersion During Explosive Volcanic Eruptions: Experimental and Numerical Approaches. J Volcanol Geotherm Res. 2009; 186(1-2):68-78. https://doi.org/10.1016/j. jvolgeores.2009.01.014

[23] Cas RAF, Wright JV. Volcanic successions, modern and ancient. Londres: Allen and Unwin; 1987.

[24] Wilson TM, Jenkins SF, Stewart C. Volcanic Ash Fall impacts. En: Loughlin SC, Sparks S, Brown SK, Jenkins SF, Vye-Brown C, editores. Global Volcanic Hazards and Risk. Cambridge: Cambridge University Press; 2015. p. 281-288.

[25] Shea T, Gurioli L, Houghton BF, Cioni R, Cashman KV. Column Collapse and Generation of Pyroclastic Density Currents During the AD 79 Eruption of Vesuvius: The Role of Pyroclast Density. Geology. 2011; 39(7):695-698. https://doi.org/10.1130/G32092.1

[26] Sulpizio R, Dellino P, Doronzo DM, Sarocchi D. Pyroclastic Density Currents: State of the Art and Perspectives. J Volcanol Geotherm Res. 2014; 283:36-65. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.06.014

[27] Cole PD, Neri A, Baxter PJ. Hazards From Pyroclastic Density Currents. En: Sigurdsson H, editor. The Encyclopedia of Volcanoes. 2.^a ed. Estados Unidos: Academic Press; 2015. p. 943-956.

[28] Blackburn EA, Wilson L, Sparks RJ. Mechanisms and Dynamics of Strombolian Activity. J Geol Soc. 1976;132(4):429-440. http://dx.doi.org/10.1144/ gsjgs.132.4.0429

[29] Hall M, Mothes P. The Rhyolitic–andesitic Eruptive History of Cotopaxi Volcano, Ecuador. Bull Volcanol. 2008; 70(6):675-702.https://doi.org/10.1007/s00445-007-0161-2

vista aérea del cráter de un volcán. Fotografía por: Freep

W.s