

Monitoreo volcánico a través de infrasonido en volcanes de Colombia

Carlos Ospina¹, Beatriz Galvis Arenas²

¹ Servicio Geológico Colombiano - cospina@sgc.gov.co

² Servicio Geológico Colombiano - bgalvis@sgc.gov.co

Palabras clave: Infrasonido volcánico, volcán Nevado del Ruiz, Cadena volcánica de los Coconucos, volcán Puracé, monitoreo volcánico.

INTRODUCCIÓN

Los volcanes producen una gran variedad de fenómenos con señales de infrasonido entre los que se cuentan aquellos ocurridos durante las erupciones como las explosiones (J. B. Johnson et al., 2003; Jeffrey Bruce Johnson & Ripepe, 2011), columnas eruptivas (McKee, Fee, Yokoo, Matoza, & Kim, 2017), lahares (Jeffrey B. Johnson & Palma, 2015) así como la salida de gases por cráteres y/o fumarolas. Por medio de las diferentes técnicas de monitoreo, como sismología, sensores remotos, mediciones de gases, etcétera, es posible detectar actividad superficial en un volcán y hacer junto a la técnica de infrasonido estudios detallados de esta actividad como los trabajos de Jeff B. Johnson & Aster (2005) y Sciotto et al. (2011), o cámaras de espectro visible, como en los casos de M. Ichihara, Takeo, Yokoo, Oikawa, & Ohminato (2012), y Lopez, Fee, & Dehn (2013). Sin embargo, en ocasiones, las condiciones de visibilidad no permiten corroborar esta actividad por medio de cámaras de espectro visible (IR o UV) o imágenes satelitales.

En Colombia, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) realiza el monitoreo de la actividad de volcanes activos en el país, utilizando varias metodologías de monitoreo, entre ellas la técnica de infrasonido desde hace más de 10 años, logrando así experiencia en el análisis y procesamiento de los datos obtenidos por medio de estos equipos.

En este trabajo se resumen algunas de las experiencias logradas en el uso del infrasonido para monitoreo volcánico en Colombia, desde la instalación de equipos hasta el procesamiento y análisis de la información por parte del equipo de trabajo. Para el volcán Nevado del Ruiz (VNR), se analizó el registro de múltiples erupciones desde el año 2016 (Castaño et

al., 2020) y para el caso de la cadena volcánica de los Coconucos (CVC), se consideró una erupción hidrotermal, registrada en marzo de 2022, en su volcán Curiqinga.

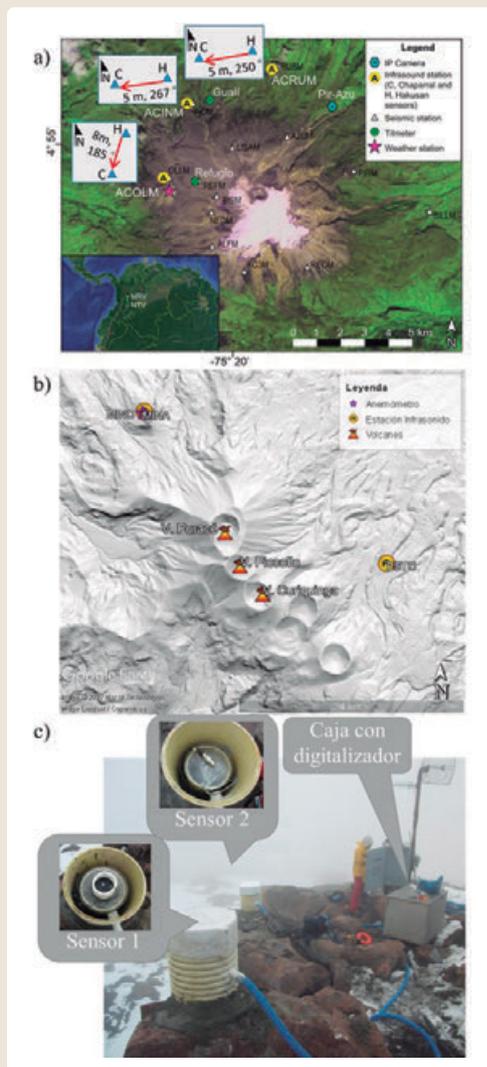
También se presenta la manera como se ha venido adelantando el monitoreo volcánico con esta técnica de infrasonido, teniendo en cuenta las dificultades en volcanes de gran altitud, las limitaciones en la cantidad de sensores y los retos en el procesamiento y análisis de datos dadas las anteriores condiciones. Así mismo, se presenta el programa denominado VolcanStudio que se ha venido desarrollando para afrontar estos retos, permitiendo procesar estos datos en tiempo casi real, por medio del uso de correlogramas y la estimación de parámetros como el back-azimut y energía en las señales detectadas.

Equipos y red de estaciones

La instalación de estos equipos se ha realizado considerando la metodología aplicada por M. Ichihara et al. (2012), por medio de la correlación cruzada de datos entre un par de sensores de infrasonido o un par infrasonido-sísmico, instalados a una distancia mayor a la longitud de correlación del ruido por viento. Los equipos usados son Chaparral 60 Vx, 25 Vx y Hakusan SI104 digitalizados a 100 Hz.

Para el VNR, antes de 2016 se contaba con tres estaciones, cada una con un solo sensor de infrasonido. Sin embargo, desde diciembre de 2016 se cuenta con tres estaciones, cada una con dos sensores de infrasonido y un sensor sísmico; denominadas ACOM, ACINM y ARUM, instaladas entre 4 y 6 km de distancia del cráter como se puede apreciar en la Fig. 1a. La Fig. 1c muestra una fotografía de la estación ACOLM del VNR donde los equipos están a una distancia de 8 metros.

En el caso de la CVC (Fig. 1b), desde 2016, la estación MINO cuenta con un sensor de infrasonido y uno sísmico. En abril de 2022 se adicionó un sensor de infrasonido en la misma estación. Finalmente, desde junio de 2022 se cuenta en la estación ETQO, con un sensor de infrasonido y uno sísmico.



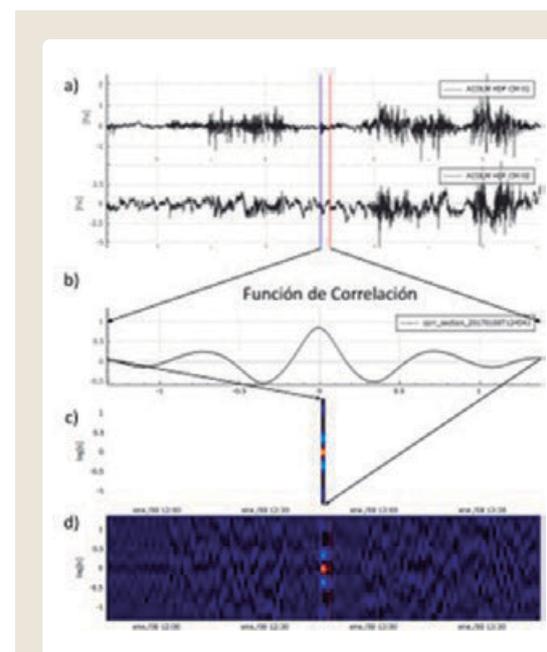
► Fig. 1 Red de sensores para monitoreo infrasónico para los volcanes CVC y VNR a) VNR, b) CVC destacando el volcán Puracé y el volcán Curiqinga y c) Fotografía de la estación ACOLM en el VNR.

Método y procesamiento de datos

El nivel de ruido, producto de los fuertes vientos imperantes en las áreas volcánicas antes mencionadas, no permite hacer una detección confiable de señales de infrasonido volcánico solo con

la interpretación directa de los datos. Sin embargo, el uso de correlogramas entre los pares de sensores de infrasonido, metodología descrita en M. Ichihara et al. (2012) y en Castaño et al. (2020), permite distinguir señales provenientes de fuentes relativamente puntuales, como lo son los cráteres de estos volcanes respecto del ruido producto del viento.

En la Fig. 2, se muestra un ejemplo de detección de señales de infrasonido con este método para el par de sensores en ACOLM del VNR. Como se puede apreciar en la Fig. 2 a, la amplitud del ruido en varias ocasiones es mucho mayor que la señal de infrasonido detectada entre las líneas azul y roja. Las Figuras 2 b), 2c) y 2d) muestra un ejemplo de la obtención del correlograma a partir de la correlación de las señales de los sensores de infrasonido en ACOLM, en ventanas de tiempo de 5 segundos cada 1.12 s y luego promediadas a ventanas de 22.4 s.



► Fig. 2 a) Registro de infrasonido en la estación ACOLM del VNR el 8 de enero de 2017. b) y c). Función de correlación promediada en una ventana de tiempo de 22.4 s. d) Correlograma logrado. Las líneas azul y roja resaltan el inicio y fin de la señal de infrasonido producto de una erupción.

A cada señal detectada se le calcula los siguientes parámetros: presión máxima, presión reducida a 1km (Jeffrey Bruce Johnson & Ripepe, 2011), energía (J.B. Johnson, 2003) y estimación del back-azimut.

En la actualidad, la detección y medición de los parámetros antes mencionados, se puede realizar de forma automática y en tiempo casi real por medio de software que se viene desarrollando en el SGC, el cual se describirá más adelante bajo el nombre de VolcanStudio, mismo que se ha venido implementando para el VNR y la CVC.

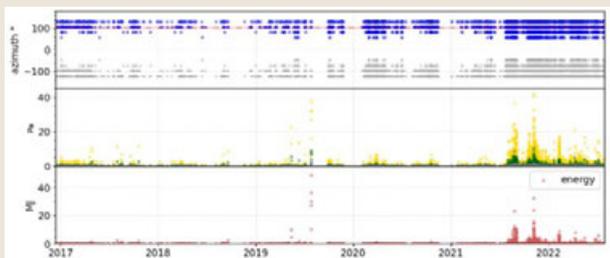
VolcanStudio

Se trata de una herramienta software desarrollada a medida para el monitoreo del infrasonido volcánico, desarrollada en Python y basada en librerías como ObsPy. Este software permite el procesamiento y visualización de datos, en tiempo casi real y no real; de infrasonido volcánico en el caso de estaciones con arreglos de pares de sensores de infrasonido o un sensor de infrasonido y uno sísmico. Dentro de sus características se resumen:

- ▶ Lectura de datos sísmicos: Winston y archivos mseed y uso de base de datos PostgreSQL
- ▶ Cálculo, visualización y grabación ordenada de correlogramas de pares de sensores: infrasonido-infrasonido o infrasonido-sísmico.
- ▶ Cálculo de presión máxima, presión reducida a 1km, energía y back-azimut a señales detectadas automáticamente.

Ejemplos de infrasonido por erupciones volcánicas.

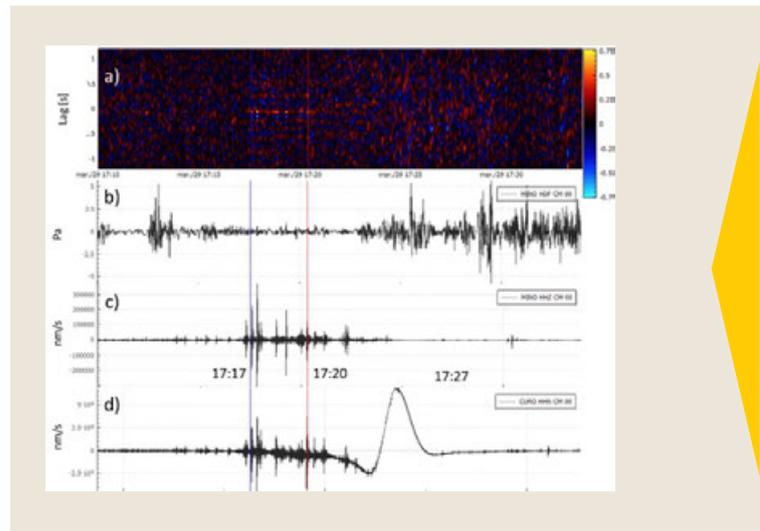
La actividad eruptiva del VNR se ha caracterizado por ser de tipo vulcaniano, con volúmenes de pluma de hasta $6.98 \cdot 10^6$ m³ para el periodo entre 2010 y 2017



▶ Fig. 3 –Gráficos de presión reducida y energía de eventos detectados entre diciembre de 2016 y 2022 para el VNR. La línea roja punteada en la primera gráfica corresponde al azimut del cráter Arenas del VNR.

(Londoño & Galvis, 2018). El registro de estos eventos usando infrasonido entre 2016 y 2022, ha permitido detectar más de 500 señales similares a la presentada en la Fig. 2, con presiones reducidas entre 0.12 y 25.4 Pa y energía de hasta 20 MJ en señales de menos de 300 segundos (ver Fig. 3).

En el caso del volcán Curiqinga, tercero en dirección NW-SE de la CVC, el 28 de marzo de 2022 se presentó una erupción hidrotermal que generó infrasonido con presiones de hasta 1.3 Pa, registrado con el par de sensores infrasonido-sísmico en la estación MINO como se puede apreciar en la Fig. 4. Señal asociada con la salida de ceniza previa a la apertura de dos nuevos cráteres internos en este volcán (Santacoloma et al., 2022).



▶ Fig. 4 –Registro de infrasonido entre un par de sensores infrasonido (MINO HDF) y sísmico (MINO HHZ), detectado durante la erupción del 28 de marzo de 2022 del volcán Curiqinga (en la CVC). a) correlograma en ventanas de tiempo de 1.12 s. b) y c) señal de sensores infrasonido (MINO HDF) y sísmico (MINO HHZ) respectivamente. d) Registro de la estación CURO HHN a menos de 100 metros del borde del cráter del volcán Curiqinga.

Al realizar una revisión detallada de los arribos de las señales, fue posible apreciar el retraso entre las señales sísmicas (señales de fractura) y las señales de infrasonido según un correlograma. Asumiendo que, la fuente de infrasonido es la superficie del cráter de Curiqinga, los retrasos esperados son entre 7 y 10 s, sin embargo, los retrasos observados son entre 13.4 y 14 s, lo que podría ser explicado, si se asume una fuente de infrasonido entre 900 y 1600 m de

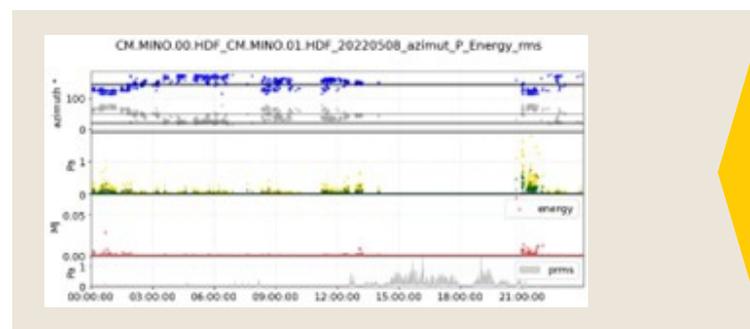
profundidad bajo el cráter de Curiquinga; lo que indica un caso similar al registrado en Yukutake, Ichihara, & Honda (2018); además de que no es la primera vez que se asocian los cambios en el retraso de señales a cambios en la profundidad de la fuente de infrasonido como en el trabajo de Iezzi et al. (2020).

Ruido y detección

Si bien, al contar con pares de sensores y el uso de los correlogramas mejora la detección de señales de infrasonido volcánico, esta técnica también tiene límites, ya que dependen del nivel de ruido y de la intensidad de la actividad volcánica

Entre diciembre 2016 y 2018, en el VNR las señales detectadas alcanzaron presiones máximas de hasta 2.46 Pa y un promedio de 0.45 Pa. Sin embargo, hubo erupciones apreciadas con cámaras de vigilancia y/o testigos, que no fueron detectadas con esta metodología, quizá porque su aporte energético en infrasonido fue pobre o porque el nivel de ruido del momento no lo permitió (ver Fig. 5).

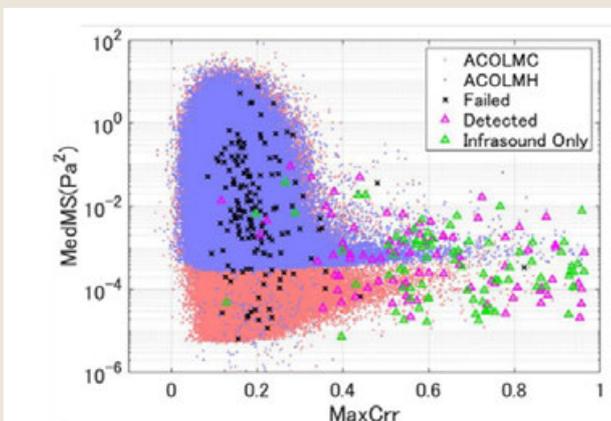
Para la CVC, la fumarola lateral de su volcán más activo, el volcán Puracé, es fuente continua de infrasonido con señales de hasta 2 Pa a 2.4 km de distancia de la fuente. Se ha observado que la detección de la misma es posible cuando el valor RMS de la señal en ventanas de 22.4 s es inferior a ~ 0.2 Pa. La Fig. 6 presenta el registro de infrasonido proveniente de la fumarola lateral, con una presión máxima de 0.7 Pa, en la que, adicionalmente, se observan cambios en el back-azimut, probablemente producto de los cambios en la dirección del viento de la zona y/o a una barrera topográfica cercana.



► Fig. 6 –Detección de infrasonido en la estación MINO del volcán Puracé y su nivel de ruido el día 8 de mayo de 2022. Cada punto corresponde a una ventana de tiempo de 22.4 s en la que el máximo de correlación fue mayor a 0.4. Los puntos azules y grises corresponden a los dos ángulos de back-azimut posibles para la señal detectada. Los puntos amarillos y verdes corresponden a las presiones reducida y máxima. Los puntos rojos corresponden a la energía. La gráfica sombreada en gris corresponde al valor RMS cada 22.4 s durante todo el día.

Finalmente es importante destacar que, aún existen áreas de oportunidad en las que queda trabajar, tales como:

- Caracterización de señales de infrasonido con nuevos parámetros, como la eficiencia de acoplamiento aire-tierra (Mie Ichihara, Yamakawa, & Muramatsu, 2021) y con ello encontrar diferencias o familias de señales que permitan un análisis detallado de la actividad del volcán.
- Localización de señales: si bien en algunos volcanes podemos asumir que existe una única fuente o cráter, esto puede cambiar como en el caso de la CVC, o incluso se deben considerar variaciones en la profundidad de la fuente.
- Mejorar la detección de señales con pares de sensores infrasonido-sísmico para ampliar la cobertura en cada volcán.



► Fig. 5 –Máximo coeficiente de correlación (MaxCrr) y el valor medio del promedio cuadrado (MedMS) en ventanas de 200 s. Los puntos rosados (coral) y morados corresponden a los datos de los sensores Chaparral (C) y Hakusan (H) de la estación ACOLM del VNR. Sobre los valores de los sensores de Chaparral en las ventanas de tiempo correspondientes a los momentos de ocurrencia de erupciones reportadas, si la detección de infrasonidos falla o es exitosa mediante las cruces negras (fallido) y los triángulos magenta (detectado), respectivamente. Los triángulos verdes indican las erupciones confirmadas por cámaras o reportes. Tomado de la figura 6 de (Castaño et al., 2020)

AGRADECIMIENTOS

Al Servicio Geológico Colombiano, gran institución en la que ha sido posible aprender y ampliar mis horizontes hacia el monitoreo volcánico.

Al grupo de trabajo de los Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos de Manizales, Pasto y Popayán (mi ciudad) quienes han apoyado todos estos trabajos y un agradecimiento especial a Alejandro Collazos por su apoyo en la codificación de muchas líneas de código de VolcanStudio.

Finalmente, a la PhD Mie Ichihara quien por medio del proyecto SATREPS nos impulsó en el conocimiento y uso del infrasonido para el monitoreo volcánico.

REFERENCIAS

- ▶ Castaño, L. M., Ospina, C. A., Cadena, O. E., Arenas, B. G., Londono, J. M., Laverde, C. A., ... Ichihara, M. (2020). Continuous monitoring of the 2015 – 2018 Nevado del Ruiz activity, Colombia, using satellite infrared images and local infrasound records. *Earth, Planets and Space*, 18. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01197-z>
- ▶ Ichihara, M., Takeo, M., Yokoo, A., Oikawa, J., & Ohminato, T. (2012). Monitoring volcanic activity using correlation patterns between infrasound and ground motion. *Geophysical Research Letters*, 39(4), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2011GL050542>
- ▶ Ichihara, Mie, Yamakawa, K., & Muramatsu, D. (2021). A simple method to evaluate the air-to-ground coupling efficiency: a tool helping the assessment of seismic/infrasound energy partitioning during an eruption. *Earth, Planets and Space*, 73(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01510-4>
- ▶ Iezzi, A. M., Fee, D., Haney, M. M., Lyons, J. J., Johnson, J. H., De Angelis, S., & McNutt, S. R. (2020). Seismo-Acoustic Characterization of Mount Cleveland Volcano Explosions, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.573368>
- ▶ Johnson, J. B., Aster, R. C., Ruiz, M. C., Malone, S. D., McChesney, P. J., Lees, J. M., & Kyle, P. R. (2003). Interpretation and utility of infrasonic records from erupting volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(1–2), 15–63. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00409-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00409-2)
- ▶ Johnson, J.B. (2003). Generation and propagation of infrasonic airwaves from volcanic explosions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00408-0](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00408-0)
- ▶ Johnson, Jeff B., & Aster, R. C. (2005). Relative partitioning of acoustic and seismic energy during Strombolian eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148(3–4), 334–354. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.05.002>
- ▶ Johnson, Jeffrey B., & Palma, J. L. (2015). Lahar infrasound associated with Volcán Villarrica's 3 March 2015 eruption. *Geophysical Research Letters*, 42(15), 6324–6331. <https://doi.org/10.1002/2015GL065024>
- ▶ Johnson, Jeffrey Bruce, & Ripepe, M. (2011). Volcano infrasound: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 206(3), 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.06.006>
- ▶ Londoño, J. M., & Galvis, B. (2018). Seismic data, photographic images and physical modeling of volcanic plumes as a tool for monitoring the activity of Nevado del Ruiz volcano, Colombia. *Frontiers in Earth Science*, 6(November). <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00162>

- ▶ Lopez, T., Fee, D., & Dehn, J. (2013). Characterization and interpretation of volcanic activity at Karymsky Volcano, Kamchatka, Russia, using observations of infrasound, volcanic emissions, and thermal imagery, 14(12). <https://doi.org/10.1002/2013GC004817>
- ▶ McKee, K., Fee, D., Yokoo, A., Matoza, R. S., & Kim, K. (2017). Analysis of gas jetting and fumarole acoustics at Aso Volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 340, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.03.029>
- ▶ Sciotto, M., Cannata, A., Di Grazia, G., Gresta, S., Privitera, E., & Spina, L. (2011). Seismoacoustic investigations of paroxysmal activity at Mt. Etna volcano: New insights into the 16 November 2006 eruption. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(9). <https://doi.org/10.1029/2010JB008138>
- ▶ Yukutake, Y., Ichihara, M., & Honda, R. (2018). Infrasonic wave accompanying a crack opening during the 2015 Hakone eruption. *Earth, Planets and Space*, 70(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0820-x>
- ▶ Santacoloma, C., Narváez, A., Ospina, C., Quintero, D., Raigosa, J., Cerón, D., ... Alpala, T. (2022).
- ▶ Informe mensual de actividad de los volcanes Nevado del Huila, Puracé, Sotaráy y Sucubún. Marzo de 2022. Popayán. Retrieved from https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Informes_tcnicos/Informe_actividad_volcanica_segmento_central_marzo_2022.pdf