



**INFORME DE PRÁCTICA EMPRESARIAL - CREACIÓN DE UNA BASE DE DATOS DE
INFRASONIDO VOLCÁNICO DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ EN EL PERIODO 2020 –
2022 Y A SU VEZ ACTUALIZAR LA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE VOLUMEN
DE CENIZA EMITIDA POR EL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ A PARTIR DE DATOS
SÍSMICOS Y DE ALTURA DE COLUMNA**

JUAN ANDRÉS CHAVARRO CASTAÑEDA

Informe de práctica para optar al título de Geólogo, modalidad práctica empresarial

Asesores

**Asesor externo Geóloga y MSc. BEATRIZ ELENA GALVIS ARENAS
Asesor interno Geólogo y MSc. JUAN PABLO MARÍN ARIAS**

**UNIVERSIDAD DE CALDAS
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
PROGRAMA DE GEOLOGÍA
MANIZALES - CALDAS
ABRIL 2023**



NOTA DE ACEPTACIÓN

Juan D. Mesa

Beatriz J.

Agradecimientos

A mi hermana, mamá y papá por siempre estar presente en cada paso que doy en mi vida y ser las personas más importantes y valiosas que tengo.

Al Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales por brindarme la oportunidad de pertenecer a su familia y adquirir todo el conocimiento en el monitoreo de los volcanes y por apoyar a los jóvenes que inician su carrera en la comunidad geocientífica.

A mis asesores de práctica, Beatriz Galvis por brindarme su disponibilidad, paciencia y enseñanza desde el principio y al Profesor Juan Pablo Marín por su tiempo y conocimiento brindado.

Al grupo de Geoamenaza del SGC a Lina Constanza García, Lina Marcela Castaño, Nancy Trujillo, Juan José Idárraga, Álvaro Acevedo y Oscar Sanabria por abrirme las puertas hacia la sismología y el monitoreo de los volcanes, por su apoyo e intercambio de conocimiento diariamente.

A Carlos Alberto Ospina por brindarme su amabilidad, paciencia y tiempo, compartiendo todo su conocimiento de infrasonido volcánico.

A mis amigos y compañeros de trabajo Laura Vélez y Sebastián Duque por sus consejos, tiempo de calidad y reflexiones de la vida.

A mis grandes amigos Laura González, Zharick Trujillo, Cristian Reinoso, Camila Bonilla y Juan Pablo Serna por acompañarme en la universidad y OVSM compartiendo nuestros logros y llenándonos cada vez de nuevas experiencias.

A cada uno de los Asistentes de monitoreo volcánico y Analistas en vigilancia volcánica por todo el tiempo y conocimiento compartido mientras vigilamos volcanes.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
2. Localización	4
3. Objetivos	5
3.1 Objetivo general	5
3.2 Objetivos específicos.....	5
4. Antecedentes	6
5. Marco Teórico	10
5.1 Infrasonido Volcánico	11
5.2 Infrasonido y Estilos Eruptivos.....	16
5.3 Correlograma	19
5.3.1 Método y Base Teórica de Correlación Cruzada VNR	21
5.4 Infrasonido Volcánico en el VNR	22
5.4.1 Red de Sensores infrasónicos en el VNR	22
5.4.2 Software VolcanStudio	24
5.4.3 Correlogramas Automáticos.....	25
5.5 Cálculo Parámetros Columnas Eruptivas.....	26
5.5.1 Método y Base Teórica	28
5.5.2 Parámetros de las Columnas Eruptivas	32
6. Metodología	33
6.1 Infrasonido Volcánico VNR 2020 – 2022	33
6.1.1 Parámetros	33
6.1.2 Software.....	34
6.1.3 Procesamiento	36
6.1.4 Tratamiento de Datos.....	39
6.2 Cálculo de Parámetros de Columnas	41
6.2.1 Parámetros	41
6.2.2 Obtención de Parámetros	42
6.2.3 Modo de Obtención de los Parámetros	42
6.2.4 Tratamiento de Datos.....	45
7. Resultados	46

7.1 Infrasonidos VNR	46
7.1.1 Catálogo de Infrasonido	46
7.1.2 Características Infrasonidos VNR 2020 – 2022	48
7.1.3 Forma de onda de señales infrasonido	52
7.1.4 Registro Señales Infrasonido	54
7.1.5 Señales Sísmicas.....	55
7.1.6 Representación Gráfica	55
7.2 Cálculo de Parámetros Columnas Eruptivas.....	61
8. Discusión	64
9. Conclusiones	71
10. Recomendaciones	73
11. Referencias.....	75

Lista de figuras

Figura 1. <i>Fotografía aérea del cráter Arenas del VNR, realizada en el año 2007 en un sobrevuelo realizado por el SGC - OVSM con apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC). Centro de la imagen el Cráter Arenas con su casquete glaciar y actividad fumarólica, parte centro inferior cabecera del Río Azufrado. Propiedad de la foto: SGC - OVSM, Tomada por Milton Ordoñez.</i>	3
Figura 2. <i>Localización de la zona de estudio. (A) Colombia y modelo de elevación digital de la PVTSC donde se destacan los volcanes que la conforman; se observa el VNR en la parte central de esta. (B) VNR y estaciones infrasónicas. Elaboración propia.</i>	4
Figura 3. <i>Señal infrasónica observada en el correlograma de la estación ACOLM de 28 de marzo de 2017, 12:15 UTC. Un pulso eruptivo se observó en la cámara Piraña Azufrado del OVSM. Tomado y adaptado de Castaño et al., 2020.</i>	7
Figura 4. <i>Ilustración de diferentes técnicas y equipos que se utilizan en el monitoreo y seguimiento de la actividad volcánica. Tomado de https://volcanochile.com/joomla30/index.php/9-volcanologia/23-monitoreo-volcanico.</i>	11
Figura 5. <i>Ilustración esquemática del comportamiento del infrasonido volcánico para una erupción vulcaniana del Volcán Sakurajima en Japón. (A) y (B) secciones correspondientes a X - X' y Y - Y' y la superficie de presión es mostrada en (C) donde las líneas rojas representan compresión y las líneas azules rarefacción, creando a lo largo de la topografía numerosas de estas. (D) representa el registro del infrasonido para las estaciones ubicadas en el volcán. Tomado y adaptado de Fee et al. 2017 y registro fotográfico tomado de http://www.photovolcanica.com/VolcanoInfo/Sakurajima/Sakurajima.html</i>	12
Figura 6. <i>Tres minutos de forma de onda de infrasonido, energía acumulada, espectrograma y espectro de poder para los volcanes Tungurahua y Santiaguito. Tomado y adaptado de Johnson y Ripepe, 2011.</i>	16
Figura 7. <i>Evento eruptivo para el Volcán Asama en Japón, 02 de febrero de 2009. (A) señal registrada un sensor acústico (MC) filtrada y sin filtrar (B) Componente vertical de un sismómetro de banda ancha (SU) filtrada y sin filtrar (C) amplitudes medias de las señales mostradas (D) función de la correlación cruzada normalizada de la señal sísmica e infrasónica que se calcula con una ventana móvil de 5 s. Tomado de Ichihara et al., 2012.</i>	19
Figura 8. <i>Obtención de un correlograma con explosión del 8 de enero de 2017 a las 12:45 UTC para el VNR. (A) Forma de onda de los sensores infrasonido, no se observa ninguna perturbación por el ruido del viento (B) función de correlación de una ventana de tiempo de 5 s, donde se observa la máxima correlación en 0 y (C y D) señal infrasonido observada en los correlogramas. Tomado de Ospina, 2019.</i>	20
Figura 9. <i>Mapa de localización de las estaciones infrasónicas y separación entre ellas. Tomado de Castaño et al., 2020.</i>	23
Figura 10. <i>Estación ACOLM-VNR, pares de sensores acústicos y caja con digitalizador. Tomado de Ospina, 2019.</i>	24
Figura 11. <i>Interfaz de la versión actualizada de la aplicación VolcanStudio donde se observa el panel de opciones (A), correlograma para ACOLM (B) y forma de onda para el par de sensores acústicos de la estación Olleta (C), además en la parte de abajo se observa los parámetros de energía, presión y azimut (D).</i>	25
Figura 12. <i>Gráfica automática de infrasonido de la tercera semana de enero de 2023, generada a partir del programa VolcanStudio en la estación de infrasonido ACOLM. La energía (MJ) en puntos rojos, las presiones máxima y reducida, puntos verdes y amarillos respectivamente y valores de back-azimut en puntos azules; en la parte superior se destaca la información de los sensores acústicos, la fecha y valores de la señal más energética de la semana.</i>	26

Figura 13. Interfaz de la versión actualizada de la aplicación <i>Infrasound_Analysis.exe</i> . Panel de opciones (A), correlograma (B), forma de onda para el par de sensores acústicos de la estación Olleta (C) y demás opciones de visualización que posee el programa.....	35
Figura 14. Interfaz de la aplicación <i>Infrasound_Analysis.exe</i> para los tres pares de sensores, (A) ACOLM (B) ACINM y (C) ACRUM. En los correlogramas de cada uno se identifica una señal infrasonido el 11 octubre de 2021 a las 15:02 UTC.	35
Figura 15. Interfaz de la aplicación <i>Infrasound_Analysis.exe</i> para realizar una clasificación de una señal infrasonido en la estación ACOLM (A) arribo (B) coda (C) energía y (D) recuadro para guardar la señal infrasonido.....	36
Figura 16. Interfaz de la aplicación <i>Infrasound_Analysis.exe</i> . (A) señales infrasonido clasificadas y (B) correlograma, máximos y formas de onda de una señal seleccionada que ya ha sido clasificada.....	37
Figura 17. Ubicación de archivo de salida de la aplicación <i>Infrasound_Analysis.exe</i> , los resultados se encuentran en una carpeta ubicada en los computadores del OVSM y el archivo se visualiza como un .txt “datos_procesados_out”.....	37
Figura 18. Ejemplo de rutina resumida para generar los correlogramas automáticos del día 30 de enero de 2023 que inicia desde la carpeta donde se encuentra el programa a ejecutar.	38
Figura 19. Interfaz de la plataforma web del departamento de ciencias atmosféricas de la Universidad de Wyoming, donde se observa las estaciones meteorológicas para Suramérica y la posibilidad de encontrar los datos filtrados por fecha y hora. Tomado de http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html	43
Figura 20. (A) Forma de onda para los dos sensores acústicos de la estación ACOLM, (B) correlograma obtenido por el método de correlación cruzada de los dos sensores que logra captar una señal infrasonido a las 08:51 UTC del 09 de septiembre de 2020 y (C) registro fotográfico de una cámara Olleta termográfica ubicada en el VNR.	49
Figura 21. Dos horas de registro de infrasonido continuo el 10 de noviembre de 2021 entre las 11:20 - 13:20 UTC. (A) forma de onda de los sensores acústicos, (B) correlograma calculado a partir de la función de correlación cruzada entre los dos sensores y (C) registro fotográfico de la cámara Piraña Azufrado, donde se observa emisión de ceniza continúa.....	50
Figura 22. (A) Forma de onda para los dos sensores acústicos de la estación ACOLM donde no se observa alguna manifestación o cambios en la amplitud aparte del ruido del viento, (B) correlograma obtenido por el método de correlación cruzada de los dos sensores que logra captar una señal infrasonido a las 12:39 UTC del 28 de noviembre de 2021 con un arribo impulsivo y amplia amplitud que atenúa minutos después y (C) registro fotográfico de la cámara Piraña Azufrado, se observa una explosión asociada a esta señal infrasonido, posterior a unos minutos esta cesa.....	51
Figura 23. (A) forma de onda para los dos sensores acústicos de la estación ACOLM, (B) correlograma obtenido por el método de correlación cruzada de los dos sensores que logra captar una señal infrasonido el 01 de enero de 2022, 10:39 UTC con un arribo impulsivo y amplia amplitud que atenúa pocos minutos después y (C) registro fotográfico de la cámara Gualí Ruiz, se observa una explosión asociada a esta señal infrasonido.....	52
Figura 24. (A) Forma de onda señal sísmica (LP+TR) que inicia a las 17:43:29 COT el 04/03/2022 (línea roja) (B y C) Forma de onda acústica en ACOLM1 y ACOLM2 de la señal infrasonido que inicia a las 17:44:11COT y (D) Espectro de poder para las estaciones ACOLM1 y ACOLM2 que muestra un pico frecuencia en 0.61 Hz y un ancho espectral hasta los 5.8 Hz. Información adquirida por medio del software Swarm 3.0.1, propiedad del SGC – OVSM.....	53
Figura 25. (A) 06/02/2022 forma de onda señal sísmica (LP+TR) que inicia a las 19:48:32 COT (línea roja) (B y C) Forma de onda acústica en ACOLM1 y ACOLM2 de la señal infrasonido que inicia a las 19:49:17 COT y (D) Espectro de poder para las estaciones ACOLM1 y ACOLM2 que muestra un pico frecuencia en 1.12 y 0.94 Hz con un ancho espectral hasta los 8.9 Hz. Información adquirida por medio del software Swarm 3.0.1, propiedad del SGC – OVSM.....	53

Figura 26. (A) 27/08/2022 forma de onda señal sísmica (LP+TR) que inicia a las 02:55:22 COT (línea roja) (B y C) Forma de onda acústica en ACOLM1 y ACOLM2 de la señal infrasonido que inicia a las 02:56:05 COT y (D) Espectro de poder para las estaciones ACOLM1 y ACOLM2 que muestra un pico frecuencia en 0.49 Hz y un ancho espectral hasta los 4.23 Hz. Información adquirida por medio del software Swarm 3.0.1, propiedad del SGC – OVSM.	54
Figura 27. Forma de onda de señal sísmica y tipo de envolvente. (A) forma de onda para señal sísmica del 15/03/2020 07:19 COT, (B) forma de onda para señal sísmica del 16/03/2020 04:53 COT, (C) forma de onda para señal sísmica del 28/12/2020 22:09 COT, (D) envolvente según forma de onda LP>TR, (E) envolvente según forma de onda LP≈TR y (F) envolvente según forma de onda LP<TR. Tomado de Serna y Castañeda (2021).....	55
Figura 28. EAR (MJ) de infrasonido volcánico VNR para el periodo 2020 – 2022.....	56
Figura 29. PRed (Pa) de infrasonido volcánico VNR para el periodo 2020 – 2022.....	57
Figura 30. PRed (Pa) y PMax (Pa) (líneas naranjas y azules respectivamente) de infrasonido volcánico VNR para el periodo 2020 – 2022.	58
Figura 31. Relación entre la PMax (Pa) y PRed (Pa).	58
Figura 32. Relación entre la PRed (Pa) y la EAR (MJ).	59
Figura 33. (A) Relación entre PRed (Pa) y DR (cm2) con respecto a las alturas de las columnas de gases. (B) relación entre PRed (Pa) y ESR (J) con respecto a las alturas de las columnas de gases.	60
Figura 34. Gráfico en función del tiempo del 2022 que relaciona el volumen de ceniza acumulado de las emisiones de ceniza más representativas con (a) DR y (b) ESR.....	63
Figura 35. Relación de PRed y EAR para las erupciones del volcán Erebus (1999), Karymsky (1998) y Karymsky (1999). Tomado de Johnson (2000).	66
Figura 36. Relación de PRed y DR para las erupciones del volcán Erebus (1999), Karymsky (1998) y Karymsky (1999). Tomado de Johnson (2000).	67
Figura 37. Gráfica que relaciona la serie de tiempo 2020 – 2022 y la PRed con la altura de las columnas eruptivas en el VNR del mismo periodo.	69
Figura 38. Gráfica que relaciona la serie de tiempo 2020 – 2022 y la PRed con parámetros de desgasificación en el VNR (Ton/día) del mismo periodo.	70

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Tabla que compila los parámetros calculados por los diferentes modelos y las erupciones del periodo comprendido entre 1985 a 2017 en el Volcán Nevado del Ruiz. Tomado de Londoño y Galvis, 2018.</i>	9
Tabla 2. <i>Estilos eruptivos y características infrasónicas asociadas y procesos de origen. Tomado y adaptado de Fee y Matoza, 2013.</i>	18
Tabla 3. <i>Factores para corrección de amplitud por efecto de sitio establecidos por Londoño et al. (2020) para el VNR. Tomado y modificado de Serna y Castañeda, 2021.</i>	40
Tabla 4. <i>Tabla que relaciona el parámetro, descripción y unidades de los parámetros que se generan a partir de la plataforma del departamento de ciencias atmosféricas de la Universidad de Wyoming.</i>	44
Tabla 5. <i>Ejemplo de parámetros atmosféricos para el día de 03 de abril de 2021 entre las 00:00 y las 12:00 UTC, obtenido por la estación meteorológica Bogotá/eldorado. Tomado de http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html.</i>	45
Tabla 6. <i>Señales escogidas para catálogo de infrasonido VNR, fecha y hora (UTC), estaciones donde se registra, duración, energía, PMax, PRed y figura.</i>	48
Tabla 7. <i>Base de datos con los parámetros sísmicos, atmosféricos y altura de columnas para el periodo 2020 – 2022.</i>	62

Resumen

El Nevado del Ruiz es un volcán compuesto que se ubica en la parte central de la cordillera Central de Colombia caracterizado por actividad vulcaniana con ocurrencia constante de pulsos eruptivos transitorios o continuos de emisión de ceniza a la atmósfera, afectando directamente a la comunidad y aeronavegación. En los últimos años se han adoptado nuevas técnicas al monitoreo multiparámetro que se realiza en el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, como el infrasonido volcánico y una metodología para calcular parámetros de las columnas eruptivas. El infrasonido volcánico se asocia a explosiones generadas por expansión rápida de gases y volátiles y es útil para detectar, localizar y cuantificar la actividad eruptiva. La fuente del infrasonido volcánico se asocia a actividad superficial con un modo de generación similar al de los eventos LP. En este trabajo se revisaron las señales infrasonido presentadas en el 2020 - 2022 asociadas a la actividad superficial con un software que utiliza la función de correlación cruzada entre dos sensores acústicos y de esta forma generando un correlograma. Se encontró una banda de presión reducida dominante entre 0 - 10 Pa a una distancia reducida de 1 km, con picos por aumento en la actividad volcánica y se establecen valores bajos o normales para el volcán teniendo en cuenta la actividad presentada y cambios significativos con presiones reducidas > 30 Pa a una distancia reducida de 1 km. La metodología utilizada para caracterizar los parámetros de las columnas eruptivas que tiene en cuenta datos sísmicos, atmosféricos y alturas de columna se adoptan al monitoreo del volcán con una base de datos para el periodo de tiempo estudiado.

Palabras clave: Infrasonido volcánico, columnas eruptivas, presión reducida, Nevado del Ruiz, correlación cruzada.

Abstract

The Nevado del Ruiz is a composite volcano that is located in the central part of the Central Cordillera of Colombia characterized by vulcanian activity with constant occurrence of transitory or continuous eruptive pulses of ash emission into the atmosphere, directly affecting the community and air navigation. In recent years, new techniques have been adopted for multiparameter monitoring realized at the Volcanological and Seismological Observatory of Manizales, such as volcanic infrasound and a methodology to calculate parameters of eruptive plumes. Volcanic infrasound is associated with explosions generated by rapid expansion of gases and volatiles and is useful for detecting, locating, and quantifying eruptive activity. The source of the volcanic infrasound is associated with surface activity with a mode of generation similar to that of LP events. In this work, the infrasound signals presented in 2020 - 2022 associated with surface activity are reviewed and classified with a software that uses the cross-correlation function between two acoustic sensors and thus generating a correlogram. A dominant reduced pressure band was found between 0 - 10 Pa at a reduced distance of 1 km, with pressure peaks through increased volcanic activity and low or normal values are established for the volcano according to the activity presented and important changes with reduced pressures >30 Pa at a reduced distance of 1 km. The methodology used to characterize the parameters of the eruptive plumes that uses seismic data, atmospheric data and column heights are adopted to multiparameter monitoring of volcano with a database for the period of time studied.

Keywords: Volcanic infrasound, eruptive plumes, reduced pressure, Nevado del Ruiz, cross-correlation.

1.Introducción

El estudio de los volcanes, su estructura interna y sus procesos en superficie han sido tema de interés científico por décadas. Diversas disciplinas tales como la geofísica, la vulcanología, la geoquímica, la geodesia, entre otras, han abordado su análisis y han realizado importantes aportes en el conocimiento de estos fenómenos geológicos. Los volcanes representan una amenaza directa e indirecta para la sociedad y son el resultado del reacondicionamiento interno de las placas tectónicas que da origen a sistemas montañosos como la Cordillera de los Andes, en Suramérica, donde se encuentra el sistema volcánico andino.

La Cordillera de los Andes inicia en el extremo sur del continente americano y se extiende por todo el margen del océano Pacífico, al llegar a Colombia se divide en tres cordilleras: La cordillera Occidental, la Central y la Oriental. La actividad volcánica reciente se concentra en la cordillera Central, y está compuesta por vulcanismo poligenético y monogenético. En esta cadena volcánica está el Complejo volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín (CVCBCM; Méndez y Patiño, 1994), también denominado Provincia Volcano Tectónica San Diego - Cerro Machín (PVTSC; Martínez *et al.*, 2014), ubicada en la región central de Colombia y comprende algunos de los volcanes más peligrosos del país como el volcán Nevado del Ruiz (VNR, Figura 1), volcán Cerro Bravo (VCB) y volcán Cerro Machín (VCM) según Méndez *et al.*, 2002.

El VNR es un volcán compuesto de composición andesítica, ubicado en el límite de los departamentos de Caldas y Tolima, en el eje central de la Cordillera Central y de la PVTSC (Figura 2), a 140 km al NW de Bogotá y a 28 km al SE de Manizales, y una altura de 5321 msnm. El VNR presenta actividad reciente de al menos 10000 años (Martínez *et al.*, 2014). La

erupción freatomagmática ocurrida el 13 de noviembre de 1985, catalogada en el límite inferior VEI: 4 del Índice de Explosividad Volcánica (Londoño y Galvis, 2018) produjo múltiples lahares y avalanchas a lo largo de ríos que nacen en este, como río Lagunillas y río Recio que ocasionó la tragedia de Armero.

El Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales (OVSM) creado en el año 1986 hace parte del Servicio Geológico Colombiano (SGC). Fue la primera institución a cargo de la vigilancia volcánica en Colombia y su labor comprende: gestión del riesgo volcánico, evaluación de las amenazas potenciales, evaluación de la actividad de los volcanes, seguimiento continuo y socialización de la información. Actualmente, el monitoreo de los volcanes del segmento norte del país es un monitoreo multiparámetro, es decir, se compone de múltiples técnicas para evaluar la actividad volcánica.

La geofísica estudia las propiedades físicas de la Tierra y su objetivo es comprender los fenómenos de esta. Los procesos que ocurren en un volcán son una fuente de generación de ondas, como en una erupción volcánica que produce ondas sísmicas y también ondas de baja frecuencias llamadas infrasonido. En el monitoreo volcánico se hace uso de sensores acústicos que registran una banda frecuencial baja (1 – 20 Hz), sonidos no percibidos al oído humano, y para volcanes activos es una técnica que aporta información acerca de procesos eruptivos y fenómenos generados superficialmente alrededor del cráter activo (Johnson y Ripepe, 2011).

El VNR ha experimentado cambios en la actividad volcánica en los últimos años, aproximadamente desde el 2007 cuando presentó un aumento en la actividad sísmica y fumarólica con pequeñas erupciones freáticas que emiten material piroclástico a la atmósfera y representan una amenaza para la población y la aeronavegación (Londoño, 2016). En la actualidad, continua el registro de estos pulsos eruptivos en el VNR. Por esta razón, es

necesario estudiar los parámetros de las columnas eruptivas, pues aportan información valiosa para describir la dinámica y el comportamiento de un volcán activo (Londoño y Galvis, 2018). En ese sentido, el presente trabajo presenta una metodología para el seguimiento de las columnas eruptivas del VNR mediante uso de mediciones atmosféricas, sísmicas y observaciones fotográficas o directas de las columnas, basadas en el trabajo de Londoño y Galvis, 2018.



Figura 1. Fotografía aérea del cráter Arenas del VNR, realizada en el año 2007 en un sobrevuelo realizado por el SGC - OVSM con apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC). Centro de la imagen el Cráter Arenas con su casquete glaciar y actividad fumarólica, parte centro inferior cabecera del Río Azufrado. Propiedad de la foto: SGC - OVSM, Tomada por Milton Ordoñez.

2. Localización

El VNR se encuentra ubicado en la región central de la PVTSC, en la cordillera Central de Colombia. Sus coordenadas son $4^{\circ} 53' 43''$ N, $75^{\circ} 19' 21''$ W (Martínez et al., 2014) y se encuentra a una altitud de 5321 m.s.n.m (Alarcón et al., 2000).

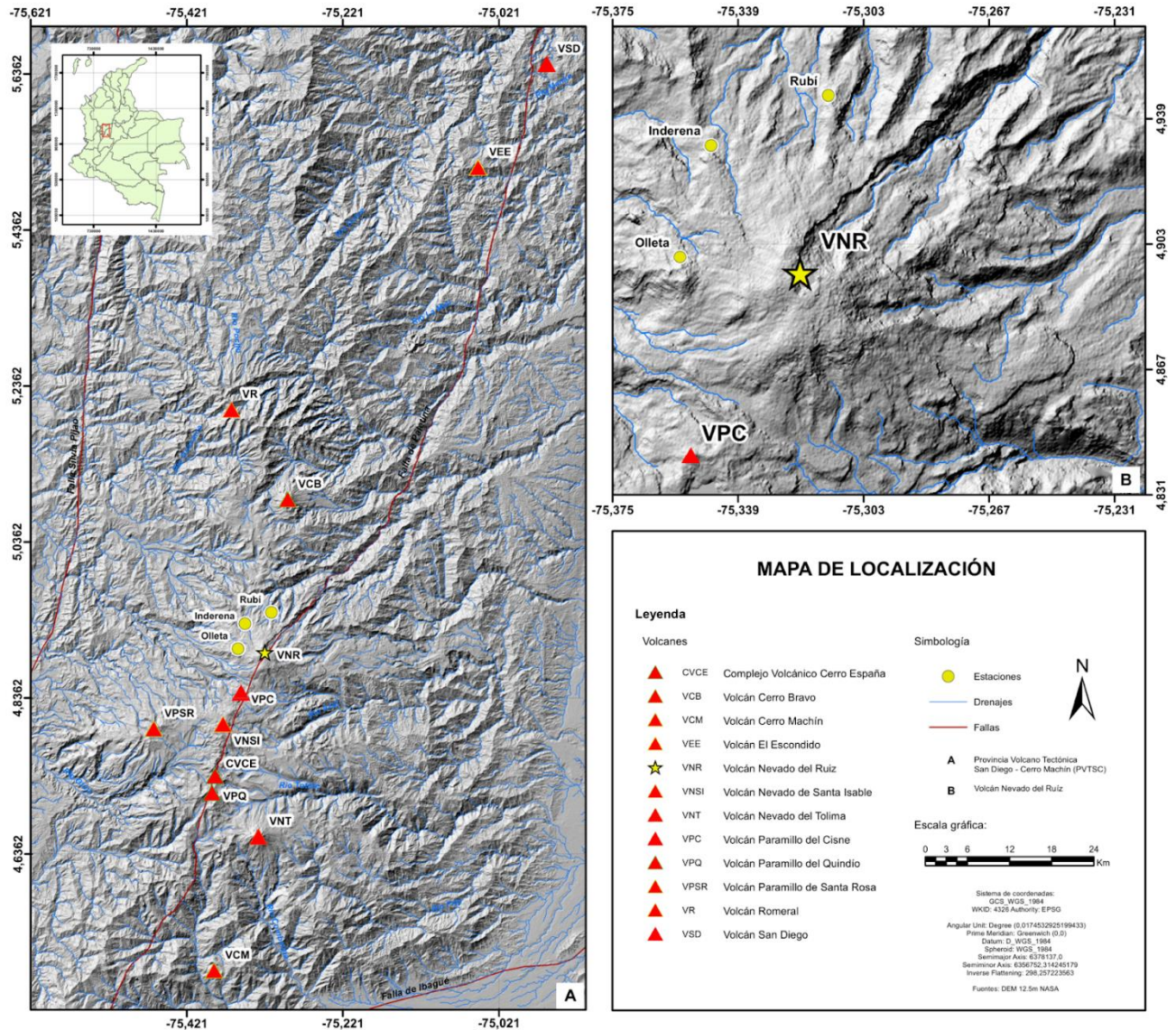


Figura 2. Localización de la zona de estudio. (A) Colombia y modelo de elevación digital de la PVTSC donde se destacan los volcanes que la conforman; se observa el VNR en la parte central de esta. (B) VNR y estaciones infrasónicas. Elaboración propia.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Realizar la práctica empresarial enfocada en el procesamiento de señales infrasonido para el periodo 2020 – 2022 y la obtención de datos para el cálculo de volumen de ceniza para el mismo periodo.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar, clasificar, procesar y analizar las señales de infrasonido registradas en el Volcán Nevado del Ruiz en el periodo 2020 – 2022.
- Compilar la información procesada de infrasonidos del volcán Nevado del Ruiz en un catálogo con las señales de infrasonido y correlacionar con las señales sísmicas y emisiones de ceniza en el periodo 2020 – 2022.
- Obtener y mostrar la forma de onda de las señales infrasonido del volcán Nevado del Ruiz más representativas del periodo 2020 – 2022.
- Generar y entregar semanalmente, la gráfica de infrasonidos y destacar señal más energética.
- Calcular la carga de ceniza de las emisiones más representativas con información de duración del evento, altura de la columna y velocidad del viento, en el periodo 2020 – 2022.
- Graficar los datos de infrasonidos del volcán Nevado del Ruiz para el periodo 2020 – 2022 y analizar resultados.

4. Antecedentes

La práctica y su desarrollo se fundamenta en dos estudios realizados por personal del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, infrasonidos volcánicos en el VNR y una nueva metodología para calcular parámetros de las columnas eruptivas en el VNR como masa, volumen, flujo masico de estas. Estos estudios abordan los temas del proyecto y aportan información nueva para mejorar el monitoreo volcánico. El resumen de cada uno de estos trabajos se presenta a continuación:

- **Castaño *et al.* (2020)** realizaron un estudio de viabilidad para reconocer anomalías térmicas y pequeñas erupciones utilizando la teledetección térmica por satélite y la técnica de infrasonidos volcánicos en el periodo de actividad entre el 2015 y 2018, tiempo de alta actividad eruptiva y posterior disminución de esta. Respecto a los infrasonidos ellos proponen una detección mejor de señales infrasónicas debido a factores como altitud, vientos fuertes, nubosidad y ubicación en una zona tropical a través de pares de sensores infrasónicos para el VNR. Este arreglo de estaciones fue útil, dado que en el periodo de estudio los sensores detectaron señales débiles que un solo sensor no hubiese podido grabar (Figura 3). La actividad volcánica de estos años que fue evaluada por el OVSM a partir de los datos obtenidos en el monitoreo multiparámetro arroja que es coherente con el registro de actividad infrasónica y anomalías térmicas estudiadas en este trabajo.

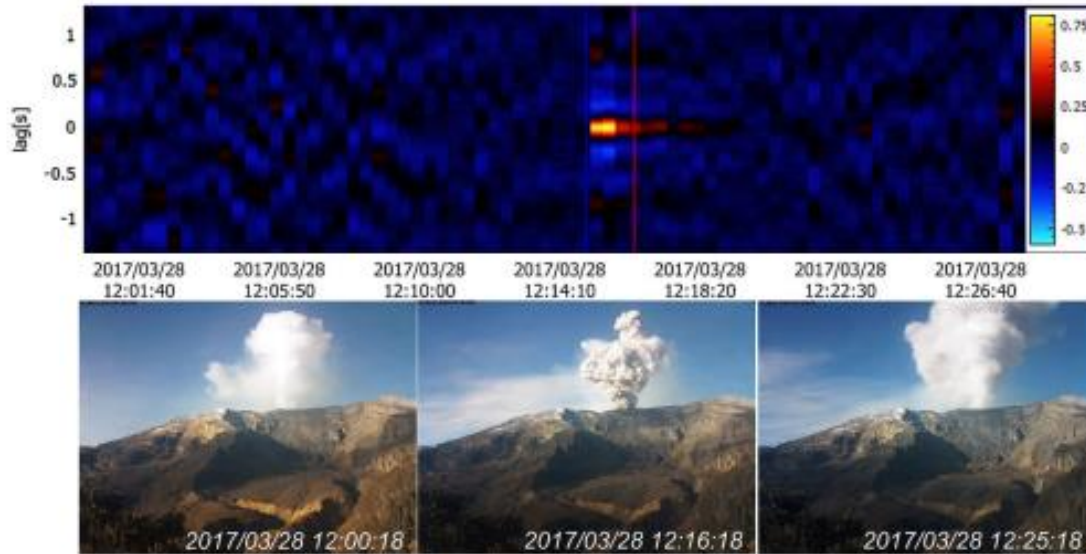


Figura 3. Señal infrasónica observada en el correlograma de la estación ACOLM de 28 de marzo de 2017, 12:15 UTC. Un pulso eruptivo se observó en la cámara Piraña Azufrado del OVSM. Tomado y adaptado de Castaño *et al.*, 2020.

- Londoño y Galvis (2018)** propusieron y probaron una nueva metodología para cuantificar los parámetros de las columnas eruptivas de acuerdo con los modelos planteados por autores como Mastin *et al.* (2009); Kaminski *et al.* (2011); Degruyter y Bonadonna (2012); Woodhouse *et al.* (2013). Londoño y Galvis, 2018, estudiaron el periodo entre 1985 y 2017 en el VNR para establecer una relación entre la sismicidad y las columnas o plumas eruptivas. Los parámetros propuestos a calcular para las columnas fueron la tasa de flujo, la masa emitida, el volumen emitido y la carga de ceniza; con el objetivo de determinar estos valores y compararlos con valores publicados. La determinación de estos factores tuvo en cuenta factores como condiciones atmosféricas, parámetros sísmicos, observaciones en tiempo real de las columnas o fotografías y leyes de escala propuestas. Londoño y Galvis (2018) enfatizaron que esta metodología aplica para erupciones donde la mayoría del material sea emitido a la atmósfera y no en forma de flujos que corren por la ladera del volcán.

Londoño y Galvis (2018) calcularon los valores de los parámetros de las erupciones en el periodo mencionado, destacando, entre 1985 y 2010, las dos erupciones freatomagmáticas del 13 de noviembre de 1985 y el 1 de septiembre de 1989; y entre el 2010 al 2017, las pequeñas erupciones tal como se muestra en la Tabla 1. Londoño y Galvis (2018), concluyen que la erupción del 13 de noviembre de 1985 tuvo un volumen de 0.12 km^3 de material emitido, volumen mayor al publicado inicialmente, una duración mayor calculada a partir de parámetros sísmicos y, por tanto, un VEI: 4 de Índice de Explosividad Volcánica clasificado en el límite inferior. Londoño y Galvis (2018) establecen como herramienta en la evaluación del riesgo volcánico, una relación entre la energía sísmica radiada (ESR) de los temblores volcánicos y la carga de ceniza en la parte superior de las columnas eruptivas.

Date	Plume model	Plume mass flow rate (kg/s)	Plume mass (kg)	Plume volume (m ³)	Ash volume (m ³)
13-Nov-85	Kaminski et al., 2011	6.69×10^7	3.61×10^{11}	1.09×10^{11}	3.55×10^8
		±	±	±	±
	Degruyter and Bonadonna, 2012	2.01×10^7	1.08×10^{11}	3.26×10^{10}	1.07×10^8
		±	±	±	±
	Woodhouse et al., 2013	5.49×10^7	2.96×10^{11}	8.90×10^{10}	1.20×10^8
		±	±	±	±
	Mastin et al., 2009	1.65×10^7	8.89×10^{10}	2.67×10^{10}	3.61×10^7
		±	±	±	±
		5.35×10^7	2.89×10^{11}	8.68×10^{10}	1.09×10^8
		±	±	±	±
	1.61×10^7	8.67×10^{10}	2.60×10^{10}	3.26×10^7	
	±	±	±	±	
	3.55×10^7	1.92×10^{11}	5.76×10^{10}	7.21×10^7	
	±	±	±	±	
	1.06×10^7	5.76×10^{10}	1.72×10^{10}	2.16×10^7	
	±	±	±	±	
01-Sep-89	Kaminski et al., 2011	5.06×10^5	2.73×10^9	8.20×10^8	1.09×10^6
		±	±	±	±
	Degruyter and Bonadonna, 2012	1.52×10^5	8.19×10^8	2.46×10^8	3.26×10^5
		±	±	±	±
	Woodhouse et al., 2013	7.07×10^5	3.82×10^9	1.15×10^9	1.44×10^6
		±	±	±	±
	Mastin et al., 2009	2.12×10^5	1.15×10^9	3.44×10^8	4.31×10^5
		±	±	±	±
		9.60×10^5	5.18×10^9	1.56×10^9	1.95×10^6
		±	±	±	±
	2.88×10^5	1.55×10^9	4.67×10^8	5.85×10^5	
	±	±	±	±	
	7.92×10^5	4.28×10^9	1.29×10^9	1.61×10^6	
	±	±	±	±	
	2.37×10^5	1.28×10^9	3.97×10^8	4.83×10^5	
	±	±	±	±	
2010-2017	Bonadonna et al., 2002a; Druitt et al., 2002	—	3.6×10^1	1.10×10^1	1.00×10^{-2}
		—	—	—	—
	Kaminski et al., 2011	1.00×10^{-2}	0.8×10^1	0.24×10^1	2.45×10^1
		—	—	—	—
	Degruyter and Bonadonna, 2012	1.08×10^4	2.87×10^6	8.64×10^5	1.08×10^3
		—	—	—	—
	Woodhouse et al., 2013	2.00×10^{-2}	1.32×10^1	0.39×10^1	4.51×10^2
		—	—	—	—
	Mastin et al., 2009	3.45×10^4	2.32×10^7	6.98×10^6	8.75×10^3
		—	—	—	—
	3.56×10^{-2}	2.35×10^1	0.70×10^1	5.06×10^2	
	—	—	—	—	
	2.81×10^3	8.68×10^6	2.6×10^6	7.93×10^3	
	—	—	—	—	
	1.00×10^{-2}	0.66×10^1	0.19×10^1	5.06×10^{-2}	
	—	—	—	—	
	2.56×10^4	2.11×10^7	6.33×10^6	7.93×10^3	
	—	—	—	—	

Tabla 1. Tabla que compila los parámetros calculados por los diferentes modelos y las erupciones del periodo comprendido entre 1985 a 2017 en el Volcán Nevado del Ruiz. Tomado de Londoño y Galvis, 2018.

5. Marco Teórico

El monitoreo volcánico se compone de técnicas científicas que aportan información importante sobre la estructura interna y externa de los volcanes, su dinámica, los posibles escenarios e información que contribuye a la mitigación del riesgo por erupción volcánica. Con el tiempo los observatorios vulcanológicos alrededor del mundo adoptan nuevas y mejores herramientas para el estudio de los volcanes teniendo en cuenta sus características y particularidades.

Las redes de monitoreo de los volcanes están compuestas por instrumentos que captan cambios en el comportamiento de estos, por ejemplo, sensores que registran información continua como los sismómetros, que captan las ondas sísmicas, sensores acústicos que perciben información infrasónica, inclinómetros para medir deformaciones, estaciones geoquímicas para calcular parámetros de desgasificación, cámaras instaladas cerca al volcán para observar fenómenos superficiales, etc, (Figura 4). Además de plataformas satelitales en línea que ofrecen información como dispersión de ceniza, anomalías térmicas e imágenes satelitales. El VNR presenta actualmente inestabilidad constante en procesos como emisiones de ceniza asociado a la dinámica de fluidos al interior de los conductos volcánicos y fracturamiento de roca, y posee la red de vigilancia más completa de los volcanes del segmento norte, con alrededor de 150 estaciones de diferente tipo.

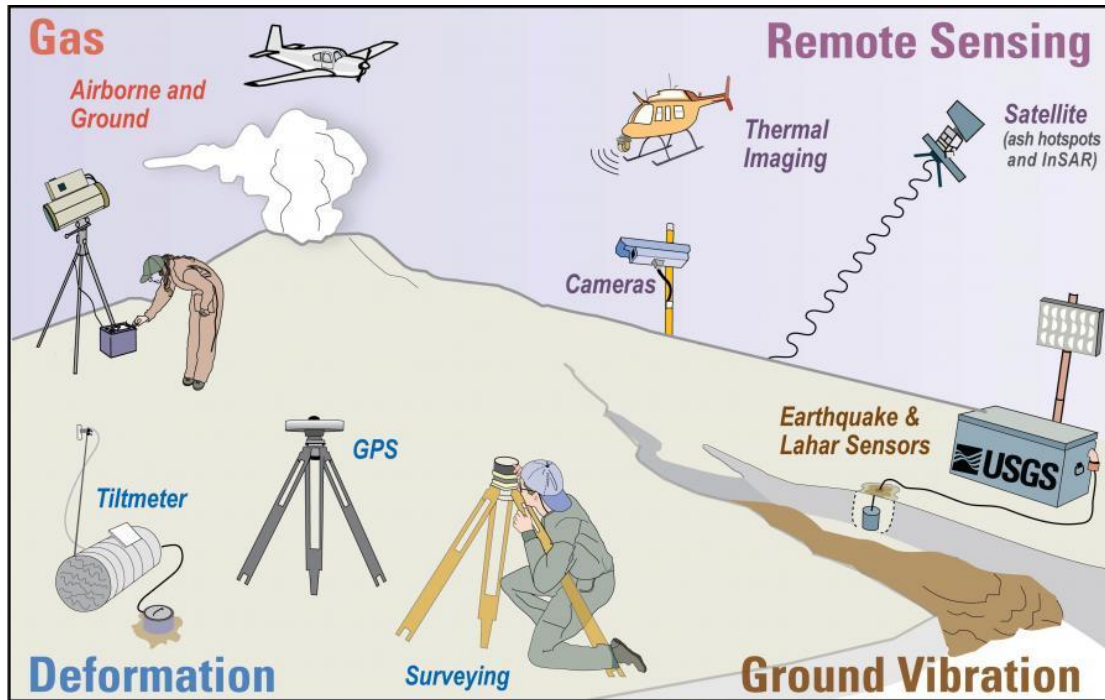


Figura 4. Ilustración de diferentes técnicas y equipos que se utilizan en el monitoreo y seguimiento de la actividad volcánica. Tomado de <https://volcanochile.com/joomla30/index.php/9-volcanologia/23-monitoreo-volcanico>.

A continuación, se hace una breve descripción del modo de generación, características y ventajas del infrasonido volcánico en el monitoreo de un volcán activo. Además, se presenta a modo de resumen la red y software para discriminar el infrasonido en el VNR.

5.1 Infrasonido Volcánico

Para generar infrasonido, al igual que cualquier otra onda acústica es necesario una fuente que aporte la energía y en volcanes un cráter o fuente activa posee la suficiente potencia acústica para generar infrasonido. Cuando un volcán entra en erupción libera energía en forma de ondas de presión o movimientos vibratoriales que pueden viajar a través

del suelo en forma de ondas sísmicas y en la atmósfera en forma de ondas acústicas que inician generalmente con un aumento de la presión (compresión) y posteriormente una disminución de esta (dilatación o rarefacción) según Fee *et al.* (2017) (Figura 5).

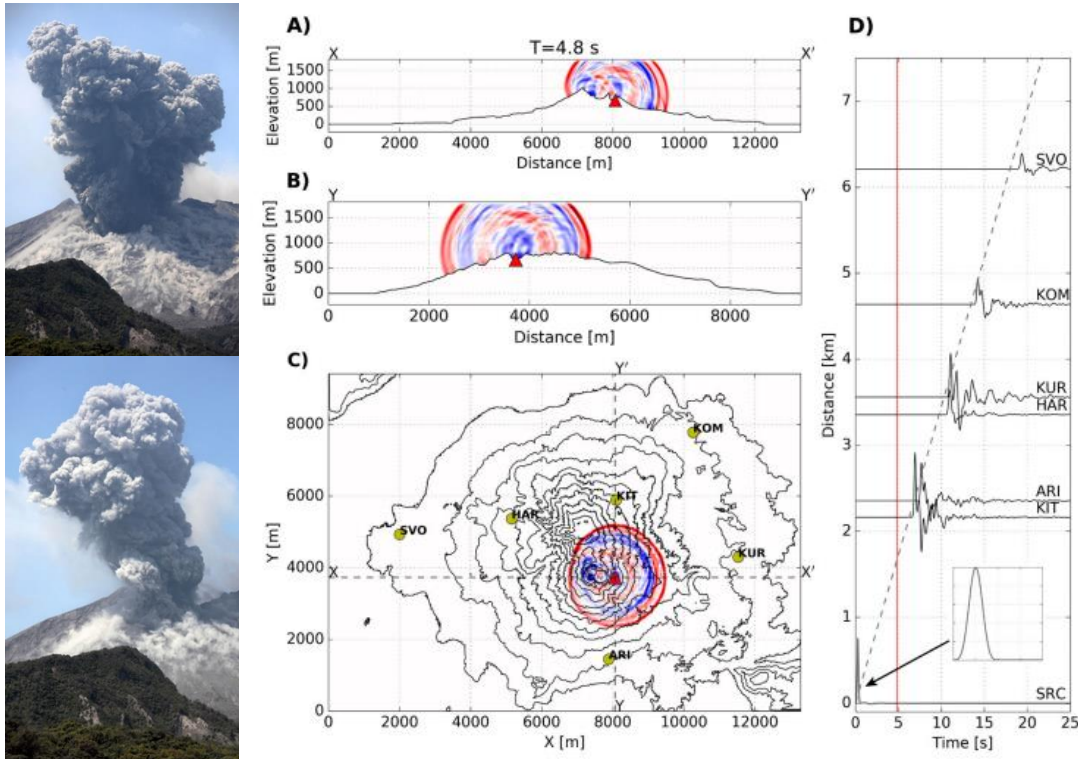


Figura 5. Ilustración esquemática del comportamiento del infrasonido volcánico para una erupción vulcaniana del Volcán Sakurajima en Japón. (A) y (B) secciones correspondientes a X-X' y Y-Y' y la superficie de presión es mostrada en (C) donde las líneas rojas representan compresión y las líneas azules rarefacción, creando a lo largo de la topografía numerosas de estas. (D) representa el registro del infrasonido para las estaciones ubicadas en el volcán. Tomado y adaptado de Fee *et al.* 2017 y registro fotográfico tomado de <http://www.photovolcanica.com/VolcanoInfo/Sakurajima/Sakurajima.html>

La longitud de onda de los infrasonidos es amplia comparada con el sonido percibido por el oído humano y va desde los 17 m para frecuencias de 20 Hz y puede superar los 30 km para frecuencia menores o iguales a 0.01 Hz, así que las fuentes de infrasonido deben tener las dimensiones comparables a estas longitudes (Muñoz, 2002).

Además de una fuente activa, en la generación del infrasonido se necesita un medio para propagar estas ondas y poder ser registradas por un receptor (sensor infrasónico). El medio más común para el transporte de estas ondas es la atmósfera. Esta es una capa compuesta por gases con la mayor concentración de nitrógeno y oxígeno, cuenta con una estructura definida y dividida según su altitud: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera. Dichas divisiones determinan variables físicas importantes para el transporte de las ondas infrasonicas como temperatura y velocidad del viento, por ejemplo, las ondas acústicas viajan a la velocidad del sonido y son diez veces más lentas que las ondas sísmicas (Muñoz, 2002).

Las ondas infrasónicas están asociadas con las explosiones generadas por la expansión rápida de la mezcla de gases y partículas dentro del conducto, y, por lo tanto, con la dinámica de volumen de salida y a la intensidad de una erupción (Ripepe *et al.*, 2013). El campo de presión infrasónico está directamente asociado con la velocidad de flujo del gas liberado en un centro de emisión, aportando un análisis de flujo de gases (Johnson *et al.*, 2004). El infrasonido volcánico se caracteriza por tener una banda frecuencial baja (< 20 Hz) y es utilizado para detectar, localizar, caracterizar y cuantificar la actividad eruptiva puesto que estas ondas generadas e irradiadas a pocos kilómetros tienden a mostrar una dispersión atmosférica baja y efectos predecibles como ecos o efectos de sitio (Johnson *et al.*, 2004; Fee y Matoza, 2013).

Los sensores de infrasonido registran las ondas acústicas o sonoras que se encuentran por debajo del espectro audible (< 20 Hz) y se encargan de registrar información superficial de una fuente eruptiva como cambios que representa una inestabilidad en el sistema magmático (Chouet *et al.*, 1994; Chouet, 1996; McNutt, 2002). En el monitoreo volcánico, esta técnica se utiliza para identificar signos de reactivación, hacer seguimiento en la evolución de la dinámica interna de un volcán, reconocer cambios en el comportamiento eruptivo de estos y definir un

estilo eruptivo (Johnson, 2004; Johnson y Ripepe, 2011; Fee y Matoza, 2013; Witsil y Johnson, 2020). El objetivo es contribuir en el análisis e interpretación de los fenómenos volcánicos que conlleven a un pronóstico más asertivo de la actividad volcánica.

Es claro que el infrasonido se asocia a una fuente superficial volcánica pero el modelo de generación se ha discutido a lo largo del tiempo. Matoza *et al.* (2009a) estudiaron los eventos sísmicos asociados a fluidos donde explican que los procesos de fuente son consistentes con el infrasonido volcánico, expresan que los sismos largo periodo (LP) presentados en el Monte Santa Helena durante 2004 – 2005 algunos iban acompañados de señales impulsivas de infrasonido de banda ancha y no podían explicarse por una simple conversión de ondas sísmicas - acústicas, así que propusieron expansiones rápidas de fluidos en capas de roca subsuperficiales poco consolidadas para explicar el origen del infrasonido (Matoza *et al.*, 2009; Chouet y Matoza, 2013).

El mecanismo propuesto por Waite *et al.* (2008) explica el modo de generación de los sismos LP y se acomoda a un posible origen del infrasonido volcánico donde una grieta en la inversión del tensor-momento del LP a $200 \text{ m} \pm 200 \text{ m}$ se encuentra llena de agua y vapor, se mantiene a alta temperatura y alta presión por actividad magmática es similar a los modelos propuestos por Nakano *et al.* (2003) donde por la rápida descarga de fluido provoca un colapso en una grieta y Ohminato (2006) que establece el modelo para sismos muy largo periodo (VLP) en lugar de eventos LP que se producen por una rápida de expansión en un grieta llena de agua y gases.

La presión en la grieta supera la presión de contención de una “válvula” que sella la grieta, lo que lleva al colapso repentino de esta, generando una “burbuja” (evento que desencadena al LP) y la resonancia del fluido restante (coda), esto puede explicar las señales

infrasonido impulsivas asociadas a eventos LP, donde el colapso de la “válvula” resulta de una rápida expansión del fluido propagando la señal de activación a la atmósfera a través de materiales erosionados porosos y permeables que se encuentran encima de la fuente (Matoza *et al.*, 2009a en Chouet y Matoza, 2013). Para este modelo el tiempo interevento entre los eventos LP individuales es el que corresponde al tiempo que toma la presión de fluidos y condiciones de temperatura en la grieta para recargar a las condiciones críticas para que falle la “válvula” de nuevo, según Chouet y Matoza (2013).

El registro de la señal infrasonido se realiza a partir de un arreglo de uno o varios sensores acústicos instalados en tierra, a través de telemetría la información se recibe y en el monitoreo continuo la identificación de alguna perturbación en el correlograma o forma de onda es la primera señal de alerta ante un proceso superficial. La interpretación de las señales de infrasonido volcánico para estudiar fuentes activas se complementa con otras mediciones y observaciones (Arrowsmith *et al.*, 2010; Johnson y Ripepe, 2011).

En la Figura 6 se observan 3 minutos de forma de onda de infrasonido y energía acumulada (filtrado entre 0.5 – 50 Hz), espectrograma y espectro de poder para el volcán Tungurahua ubicado en Ecuador y volcán Santiaguito en Guatemala. Para el primero que es un volcán con erupciones vulcanianas de grandes emisiones de ceniza a la atmósfera, una explosión genera una perturbación en la forma de onda del infrasonido volcánico de corta duración que alcanza los 400 Pa y una gran energía acumulada, para el volcán Santiaguito caracterizado por erupciones cargadas de piroclastos y destrucción de domos, por un evento eruptivo se observa en la forma de onda de infrasonido una perturbación que se sostiene medianamente en el tiempo y registra una máxima presión alrededor de los 4 Pa con una energía acumulada mucho menor que el anterior (Johnson y Ripepe, 2011).

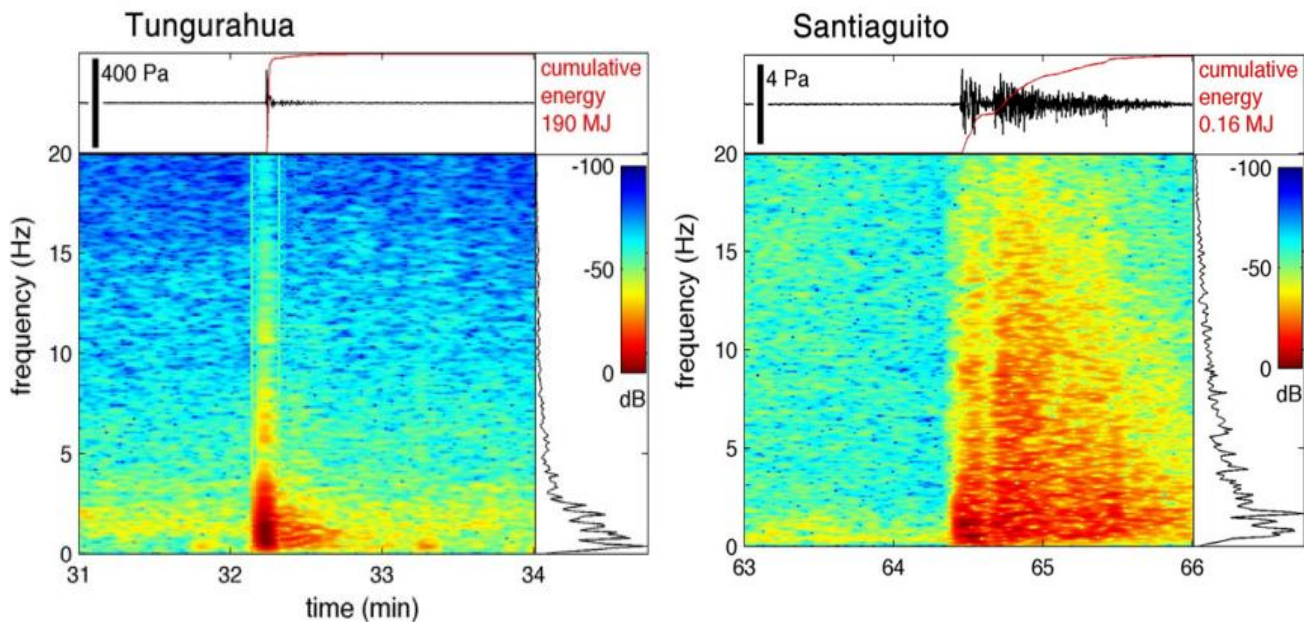


Figura 6. Tres minutos de forma de onda de infrasonido, energía acumulada, espectrograma y espectro de poder para los volcanes Tungurahua y Santiaguito. Tomado y adaptado de Johnson y Ripepe, 2011.

5.2 Infrasonido y Estilos Eruptivos

Las fuentes acústicas de los volcanes son poco profundas o aéreas, por lo que la información de los infrasonidos es útil para caracterizar la dinámica y estilo eruptivo de este, combinado con observaciones directas e indirectas de gas, ceniza y otros fenómenos eruptivos. En profundidad se presentan fluctuaciones e inestabilidad por el ascenso de magma, creando oscilaciones de presión a partir de procesos fluido-dinámicos, termodinámicos y elastodinámicos. Esta inestabilidad se acopla en el suelo en forma de energía sísmica, y la energía de fuentes poco profundas se propaga a la atmósfera en forma de energía acústica (Fee y Matoza, 2013).

Se ha demostrado que el vulcanismo activo produce una amplia variedad de registro infrasónico asociada a su actividad eruptiva, Fee y Matoza (2013) en su manuscrito “An

overview of volcano infrasound: From hawaiian to plinian, local to global”, recopilan información acerca de los procesos físicos, acústicos y registros de los diferentes estilos eruptivos de los volcanes y establecen las características específicas en el registro acústico asociado a los fenómenos que se presentan en estos, actividad tipo hawaiana, estromboliana, vulcaniana y subpliniana - pliniana. La Tabla 2 compila brevemente los diferentes estilos de erupción y características de las señales infrasonido que se presentan.

Las explosiones volcánicas se caracterizan por presentar una alta compresión que significa una gran y rápida expansión del volumen en la atmósfera seguida de una descompresión; puede presentar una duración de segundos a minutos y posee una amplia variedad en sus características dependiendo de la actividad volcánica. Estas características acústicas de las explosiones que son de corta duración, se presentan principalmente en actividad estromboliana y vulcaniana, sin embargo, pueden ocurrir en cualquier tipo de actividad (Fee y Matoza, 2013).

Actividad	Descripción	Características acústicas generalizadas de erupciones	Proceso de la fuente acústica
Hawaiana	Lava saliendo de fisuras o respiraderos eruptivos, a menudo tienen fases efusivas, no explosivas y de larga duración, explosiones ocasionales o explosiones de desgasificación.	Los flujos de lava continuas producen infrasonidos continuos y de banda ancha; la efusión produce variables tremores, desde armónicos a banda ancha; explosiones pueden tener características complejas	Fumarolas silbantes (audibles), flujos de gas de las fuentes: las fuentes de tremor incluyen 1)Oscilación de la nube de burbujas, 2)Resonancia helmholtz y otras resonancias de cavidades sobre superficies de desgasificación, 3)Oscilaciones generadas por la gravedad; el estallido de burbujas y acumulaciones de gas poco profundas pueden causar explosiones.
Estromboliana	De corta duración, explosiones recurrentes por burbujas de gas de alta presión (gas slugs), produciendo emisiones de gas y fragmentos de magma; frecuencia e intensidad variable.	Compresión y rarefacción de corta duración con codas menores a diez segundos; relativamente de baja amplitud; ocurrencia de tremor en episodios extensos de desgasificación.	Explosiones por cambios en las burbujas de gas de alta presión (gas slugs) que generan el estallido de estas seguidas por flujos de corta duración; la desgasificación a través de tapas selladas, genera explosiones amortiguadas con formas de onda mas compleja.
Vulcaniana	De corta duración, explosiones que puede producir altas nubes de ceniza y CDPs; el origen asociado a esta se debe a un conducto tapado (tapón de lava) o la interacción de magma y agua externa ; ocasionalmente asociado a destrucción de domos de lava	Compresión y rarefacción de corta duración y gran amplitud; a menudo codas largas con espectros armónicos; el tremor tipo "chugging" es audible con infrasonidos pulsátiles.	Explosión explosiva de lava viscosa en superficie, seguida de flujos y/o tremor y generación de chugging por repetitivos pulsos de presión.
Subpliniana-pliniana	Erupciones sostenidas de alta energía que producen nubes de erupción masiva que pueden extenderse alto en la atmosfera.	Infrasonido sostenido (minutos a horas) de gran amplitud, capaz de propagarse y registrarse globalmente; con características banda ancha y forma espectral característica de "jet noise".	Infrasonido asociado a la turbulencia del flujo volcánico "jet noise".
Corriente de densidad piroclástica (CDPs)	Flujos laterales de gas caliente y partículas del colapso de la fuente, domos de lava colapsados o explosiones laterales.	Fuente móvil con espectros de banda ancha	Relativamente desconocida, probablemente debido a procesos turbulentos dentro del flujo.

Tabla 2. Estilos eruptivos y características infrasónicas asociadas y procesos de origen. Tomado y adaptado de Fee y Matoza, 2013.

5.3 Correlograma

Para discriminar el infrasonido volcánico se debe tener en cuenta el ruido del viento, esta es una fuente de infrasonido que se presenta permanentemente y uno de los mayores problemas al abordar esta técnica en el monitoreo de los volcanes. Múltiples métodos han sido utilizados en volcanes para distinguir el infrasonido volcánico, como arreglos de sensores acústicos en matrices, filtros especiales y hasta una elección de un sitio que bloquee el ruido del viento (Ichiara *et al.*, 2012). Un solo sensor acústico es incapaz de distinguir entre una señal infrasonido del ruido del viento de una volcánica, por eso se hace uso de otro sensor, ya sea sísmico o acústico. Ichiara *et al.* (2012) en su trabajo explican y plantean un método para distinguir una señal infrasonido del ruido del viento utilizando una función de correlación cruzada entre dos sensores, uno acústico y otro sísmico (Figura 7).

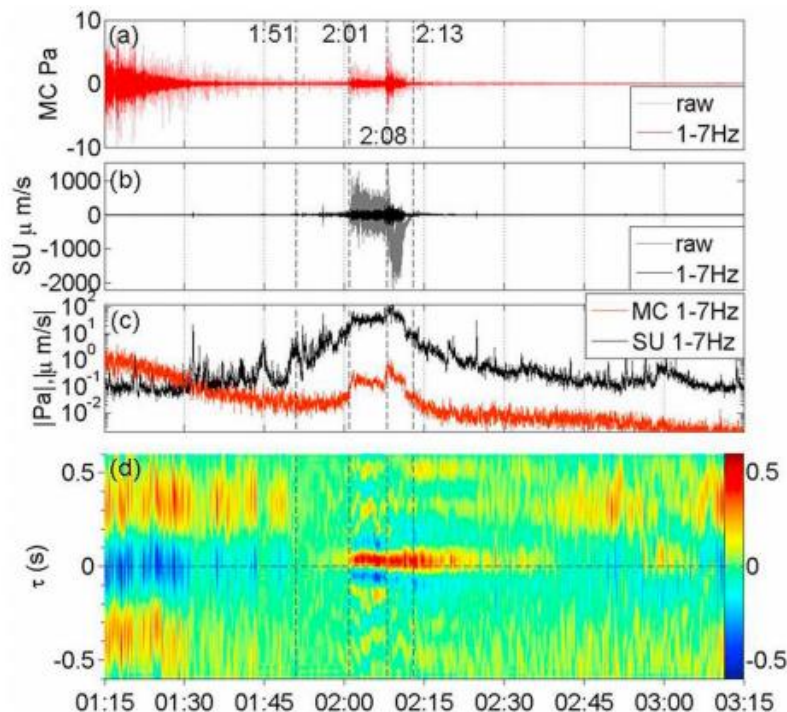


Figura 7. Evento eruptivo para el Volcán Asama en Japón, 02 de febrero de 2009. (A) señal registrada un sensor acústico (MC) filtrada y sin filtrar (B) Componente vertical de un sismómetro de banda ancha (SU) filtrada y sin filtrar (C) amplitudes medias de las señales mostradas (D) función de la correlación cruzada normalizada de la señal sísmica e infrasónica que se calcula con una ventana móvil de 5 s. Tomado de Ichiara *et al.*, 2012.

Específicamente para el VNR se utiliza el método de correlación cruzada para dos sensores acústicos, la metodología de Ichihara *et al.* (2012) no es aplicada cuando un volcán es muy sísmicamente activo. Así que por medio de rutina matemática de la función de correlación se obtienen los correlogramas utilizados en el OVSM como medio para identificar señales de infrasonido. Como se observa en la Figura 8, una explosión registrada en los sensores que solo por la forma de onda, no hubiese podido ser identificada y por medio de la correlación se filtra el ruido del viento y se identifica la señal.

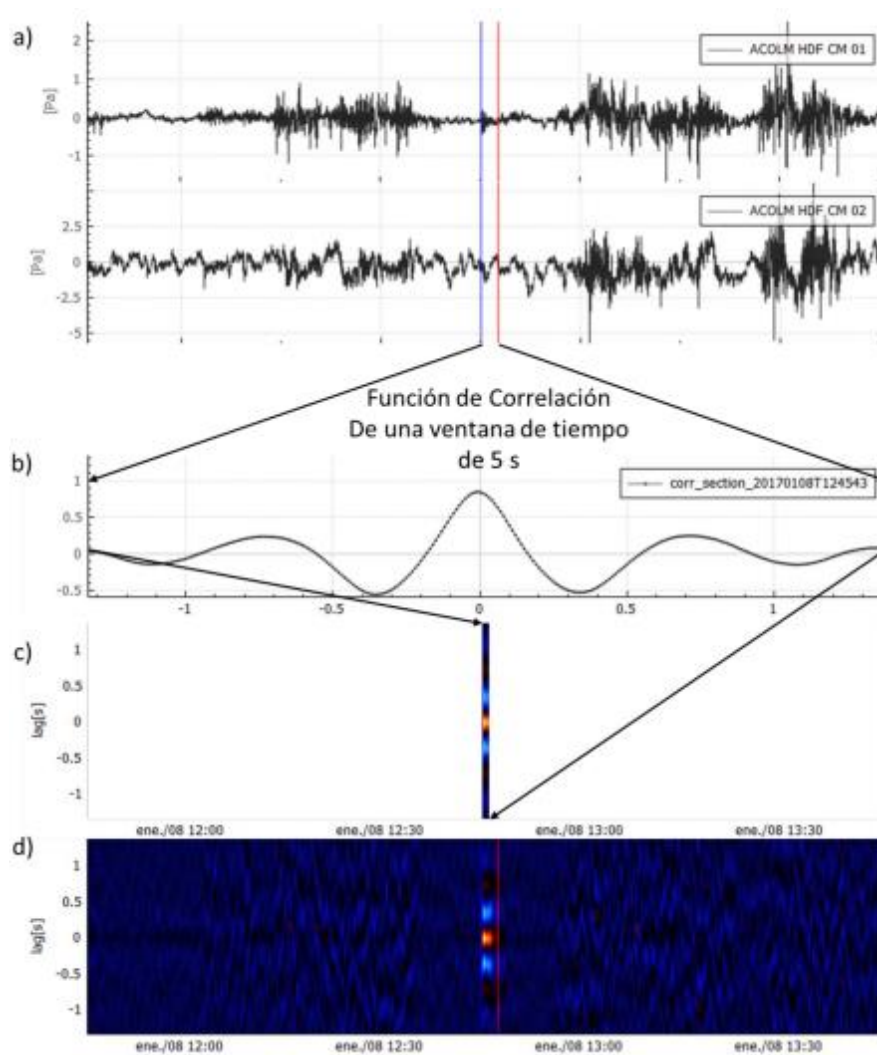


Figura 8. Obtención de un correlograma con explosión del 8 de enero de 2017 a las 12:45 UTC para el VNR. (A) Forma de onda de los sensores infrasonido, no se observa ninguna perturbación por el ruido del viento (B) función de correlación de una ventana de tiempo de 5 s, donde se observa la máxima correlación en 0 y (C y D) señal infrasonido observada en los correlogramas. Tomado de Ospina, 2019.

5.3.1 Método y Base Teórica de Correlación Cruzada VNR

A continuación, se explica el método de correlación usado especialmente para el VNR (Castaño *et al.*, 2020), función que se realizó con la ayuda de la profesora Mie Ichihara, quién en Ichihara *et al* (2012) proponen la metodología de la función de correlación para el uso de infrasonidos en volcanes, se destaca que este método que se usó para las señales estudiadas en ese periodo de tiempo es el que se usa actualmente para los correlogramas.

Se representa la función de correlación cruzada entre X_C y X_H por $R(X_C, X_H; \tau)$, donde X_C y X_H representan al par de sensores utilizados y τ es el tiempo de retraso o retardo entre los dos sensores de X_C a X_H . El coeficiente de correlación cruzada, $CC(X_C, X_H; \tau)$ es:

$$(1) CC(X_C, X_H; \tau) = \frac{R(X_C, X_H; \tau)}{\sqrt{P(X_C)} \sqrt{P(X_H)}}$$

Donde $P(X_n) = R(X_n, X_n; 0)$, el cuál es la potencia de X_n y es:

$$(2) X_n = A_n + S_n + W_n + N_n,$$

Donde A_n es la fluctuación de la presión de las señales infrasonido, S_n es la onda sísmica convertida a infrasónica (esta componente la omiten en el método, pues según demostraciones la velocidad respecto al suelo de las ondas sísmicas relacionadas con las erupciones del VNR es demasiado pequeña para ser registrada por los infrasonidos), W_n es el ruido del viento y N_n es el ruido instrumental; no hay correlación entre cada uno de estos parámetros y confirmaron que no existe correlación de ruido instrumental entre los dos sensores y es mínimo. El coeficiente de correlación cruzada queda:

$$(3) CC(X_C, X_H; \tau) = \frac{R(A_C, A_H; \tau) + R(W_C, W_H; \tau)}{\sqrt{P(A_C) + P(W_C) + P(N_C)} \sqrt{P(A_H) + P(W_H) + P(N_H)}},$$

Según la investigación de Shields (2005), la correlación del ruido del viento decae en una distancia x , de esta manera el coeficiente de correlación cruzada queda así:

$$(4) CC(X_C, X_H; \tau) = \frac{R(A_C, A_H; \tau) + \exp\left(-\frac{3.2 \cdot x \cdot f}{v}\right) P(W_C)}{\sqrt{P(A_C) + P(W_C) + P(N_C)} \sqrt{P(A_H) + P(W_H) + P(N_H)}},$$

Donde f es la frecuencia, v es la velocidad del viento y x es la distancia de separación entre los sensores. Encontraron y utilizaron un rango de frecuencias $1.5 > f < 8$ Hz y respecto al retardo τ encontraron que se espera que sea el mayor entre los dos sensores y sea cercano a 0, pues los pares de sensores se encuentran cerca y alineados respecto a la dirección del cráter, aunque la dirección dependa de las condiciones del viento y pueda cambiar, así que definieron $-0.02 < \tau < 0.02$ s.

5.4 Infrasonido Volcánico en el VNR

5.4.1 Red de Sensores infrasónicos en el VNR

Las estaciones infrasónicas del VNR están ubicadas sobre la superficie de este (Figura 9), los sensores acústicos en cada estación están separados de cinco a ocho metros cada uno y su ubicación se realizó estratégicamente teniendo en cuenta parámetros de distancia a la fuente. Se destaca que las ondas acústicas se propagan a grandes distancias debido a su amplia longitud de onda y pueden ser identificadas a cientos o miles de km de una fuente eruptiva, sin embargo, las erupciones que se desean estudiar no son de esas dimensiones,

sino aquellas registradas en un radio aproximado de 5 – 20 km (Simkin y Fiske, 1983).
Por esta razón, los sensores acústicos para el VNR se instalan a menos de 10 km del cráter Activo.

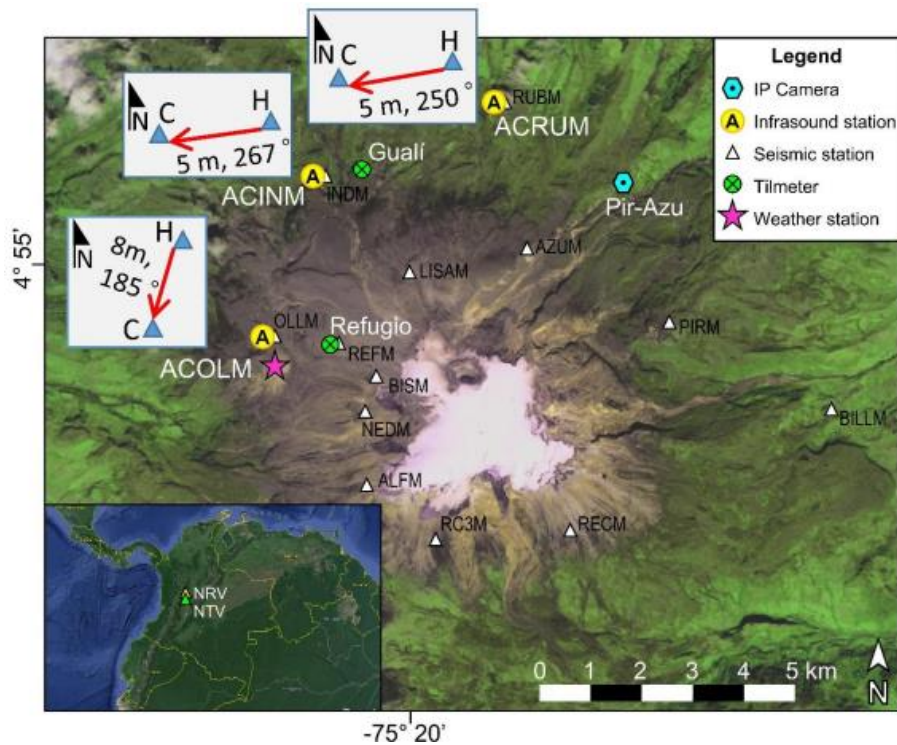


Figura 9. Mapa de localización de las estaciones infrasónicas y separación entre ellas. Tomado de Castaño *et al.*, 2020.

Los pares de sensores acústicos se ubican cercano a las estaciones sísmicas que llevan su mismo nombre, Olleta, Inderena y Rubí, se componen de un sensor Chaparral 60Vx con un rango frecuencial de 0.1 – 200 Hz, una escala completa de 720 Pa y un nivel de ruido de 2 mPa, el otro sensor, un Hakusan SI104 con un rango frecuencial entre 0.3 – 2000 Hz, una escala completa de 2 kPa y un nivel de ruido de 0.1 Pa, este posee una sensibilidad inferior a 0.1 Pa (Castaño *et al.*, 2020). Cada estación de infrasonido, además de poseer los pares de sensores acústicos, está conformada por digitalizadores, radios, baterías y otros equipos. En la Figura 10 se presenta la estación Olleta donde se resaltan los pares de sensores acústicos y la caja con el digitalizar.



Figura 10. Estación ACOLM-VNR, pares de sensores acústicos y caja con digitalizador. Tomado de Ospina, 2019.

5.4.2 Software VolcanStudio

La aplicación VolcanStudio (Figura 11) creada por el Ing. Carlos Alberto Ospina Caicedo en el SGC - Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVSP), desarrollado en Python y basada en librerías como ObsPy permite la visualización y procesamiento de infrasonido volcánico de dos sensores acústicos o uno acústico y otro sísmico (Ospina y Galvis, 2022). Sus funciones principales permiten la lectura de datos sísmicos, cálculo, visualización y grabación ordenadas de correlogramas y cálculo de presión máxima, presión reducida a 1 km, energía acústica radiada (EAR) y back-azimut (Ospina y Galvis, 2022). Esta aplicación hace parte del monitoreo en tiempo real y multiparámetro de los tres observatorios vulcanológicos establecidos en el país.

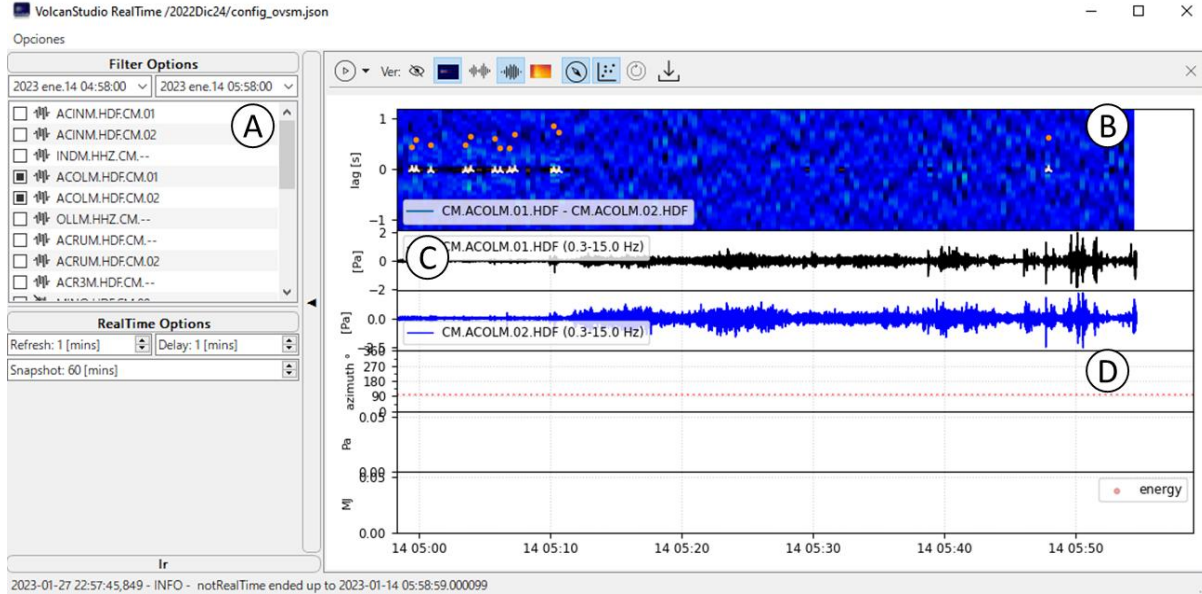


Figura 11. Interfaz de la versión actualizada de la aplicación VolcanStudio donde se observa el panel de opciones (A), correlograma para ACOLM (B) y forma de onda para el par de sensores acústicos de la estación Olleta (C), además en la parte de abajo se observa los parámetros de energía, presión y azimut (D).

5.4.3 Correlogramas Automáticos

Desde el año 2022 el Ing. Carlos Alberto Ospina Caicedo, creador del VolcanStudio, desarrolló para este, una detección automática de las señales infrasonido que se presentan en las estaciones ACOLM, ACINM y ACRUM con los pares de sensores acústicos que la componen, la detección automática de las señales se realiza a partir de una rutina de Python que con archivos de entrada como coordenadas de los infrasonidos, información de los sensores acústicos, bandas de frecuencia para filtrar el ruido del viento, bandas de presión, retardo entre los dos sensores acústicos y datos acerca de la fuente activa del VNR (cráter Arenas) calcula los parámetros. En la Figura 12 se presentan a manera de ejemplo una gráfica semanal donde se observan los parámetros de energía, presión y azimut de las señales

infrasonido, se destaca que los datos presentados para esta semana representan valores bajos o normales en el VNR.

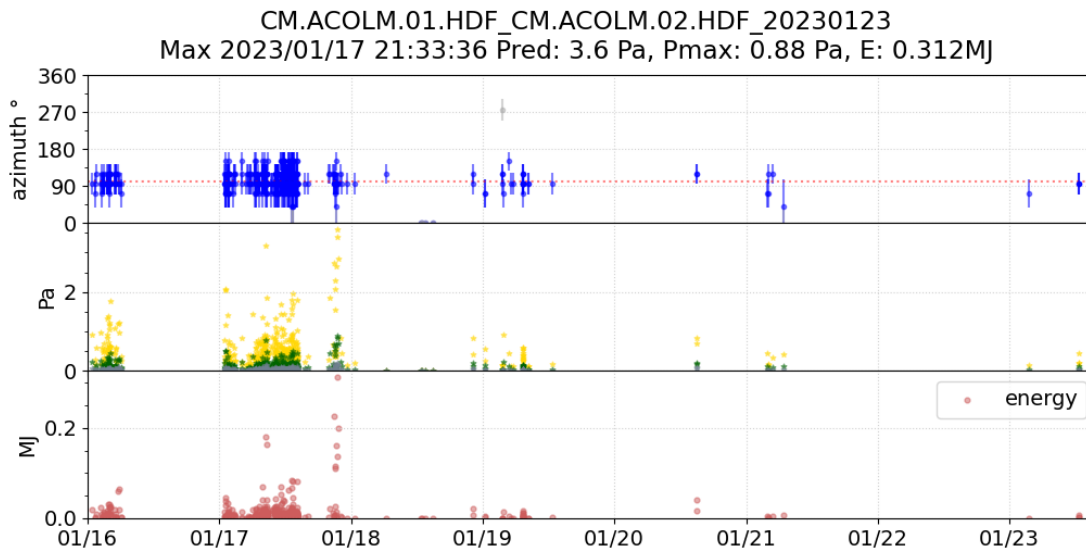


Figura 12. Gráfica automática de infrasonido de la tercera semana de enero de 2023, generada a partir del programa VolcanStudio en la estación de infrasonido ACOLM. La energía (MJ) en puntos rojos, las presiones máxima y reducida, puntos verdes y amarillos respectivamente y valores de back-azimut en puntos azules; en la parte superior se destaca la información de los sensores acústicos, la fecha y valores de la señal más energética de la semana.

5.5 Cálculo Parámetros Columnas Eruptivas

La actividad de un volcán activo está caracterizada principalmente por sus erupciones, sin embargo, estas representan sobre todo una alta amenaza para la población y la navegación aérea. Existen múltiples tipos de erupciones volcánicas, algunas que pueden durar días a meses, como ejemplo la erupción más reciente del volcán Fagradalsfjall cerca a la población de Reykjavík en Islandia donde lava corriendo por las laderas del volcán representaba el panorama sin afectar directamente a las poblaciones, por otro lado están aquellas cuyo estilo eruptivo es más explosivo y se caracterizan por la generación de flujos piroclásticos conformadas por volátiles y material piroclástico, que posiblemente puedan afectar más a las comunidades cercanas o desencadenar en lahares, avalanchas o flujo de escombros.

Las columnas eruptivas aportan información de la dinámica de un volcán y por consiguiente de su proceso eruptivo, así que su descripción, proceso de fuente y cuantificación de los parámetros que la componen sirven como herramientas para reducir el riesgo ante posibles escenarios, además que evidencia el comportamiento de un volcán activo (Londoño y Galvis, 2018).

Diferentes autores han aportado información y metodologías para calcular parámetros de las columnas eruptivas como Sparks (1986), que trabajó en un método para obtener información acerca de la altura de las columnas por medio de modelos unidimensionales sin poner en consideración características espaciales. Durig *et al.* (2015) estudiaron la erupción del volcán Eyjafjallajökull en Islandia utilizando datos de alturas de las columnas y descargas de masa para encontrar parámetros como flujo de masa y altura de la columna eruptiva. La densidad de las columnas eruptivas la trabajó De Angelis *et al.* (2016) utilizando parámetros sísmicos y registros fotográficos del volcán Santiaguito. Fee *et al.* (2017) estimaron la masa de la erupción del volcán Sakurajima en Japón mediante inversión de forma de onda de infrasonidos y Mastin *et al.* (2009) explican que la duración de una erupción volcánica es definida más exactamente por la atenuación de la señal sísmica asociada más que por observación directa.

La información y condiciones meteorológicas ahora son imprescindibles a la hora de realizar cálculos de parámetros de las columnas eruptivas, aportan mayor precisión en la determinación de estos; información como velocidades del viento, temperatura o perfiles atmosféricos no eran incluidos en la metodología de antiguos autores, pero en la actualidad es

obligatorio si se pretende encontrar valores reales (Kaminski *et al.*, 2011; Degruyter y Bonadonna, 2012).

5.5.1 Método y Base Teórica

Para contextualizar los métodos utilizados al realizar el cálculo de los diferentes parámetros de las plumas eruptivas con parámetros sísmicos y atmosféricos, a continuación, se resumen las metodologías utilizadas y explicadas por Londoño y Galvis (2018) en su trabajo. Se recomienda que, para mayor comprensión y conocimiento de datos utilizados, revisar el manuscrito.

Druitt *et al.* (2002) y Bonadonna *et al.* (2002a) consideran las columnas eruptivas de erupciones vulcanianas transitorias como una pluma volcánica nombrada “termal” donde la altura (H) puede ser calculada de la masa (M) emitida instantáneamente a la atmósfera. Para erupciones < 4 min se utiliza el método de estos autores, puesto que se establece una liberación instantánea de la masa y no existe o es mínimo el flujo de masa y definen la H por medio de la siguiente fórmula:

$$(1) H: 1.89 J^4 m (\varphi M c (T - T_o))^{0.25} ,$$

Donde M es la masa del material sólido, φ es la fracción de partículas que contribuyen a la masa termal de la pluma, $T - T_o$ es la diferencia de temperaturas entre la atmósfera en el cráter (T_o) y el sólido emitido (T), c es el calor específico de los sólidos y $J^4 m$ es (Joules elevado a la 4 por metro). A partir de la ecuación (1) se puede calcular H para una columna volcánica siguiendo:

$$(2) H: BM^{0.25} + Hv ,$$

Donde H_v es la altura del cráter del volcán y B es una constante que se calcula a partir de φ , c y $(T - T_o)$ con parámetros específicos para el VNR.

Para Kaminski *et al.* (2011) la altura de las columnas eruptivas para erupciones plinianas (sub a ultraplinianas) se puede calcular incluyendo condiciones atmosféricas, temperatura del magma, flujo de masa emitido y un coeficiente de arrastre. En este modelo, la altura de las plumas (H) es:

Para $H < 12000$ m:

$$(3) H: 300 m s^4 Kg^{-4} * Q_f^{\frac{1}{4}},$$

Y para $H > 12000$ m:

$$(4) H: 5530 m + 160 m s^4 kg^{-4} Q_f^{\frac{1}{4}},$$

Donde $Q_f^{\frac{1}{4}}$ es el flujo de masa de la pluma (ceniza emitida + gas), el cual está dado por:

$$(5) Q_f: \left[n_o + \frac{f_p}{100} (1 - n_o) \right] Q_o ,$$

Donde n_o es la fracción de gas en el magma, Q_o es el flujo de masa y f_p es el factor de partición, que depende de la fragmentación del magma (para el VNR en el trabajo establecieron un 100 % de factor de partición para todas las erupciones estudiadas en el periodo propuesto excepto para la erupción del 13 de noviembre de 1985, puesto que sólo para esta hay evidencia de flujos piroclásticos (Calvache, 1990) se establece un factor del 98 % para esta

última). Del flujo de masa efectivo (Q_f) se puede calcular el flujo de ceniza en la pluma (Q_{ceniza}), así:

$$(6) Q_{ceniza} : \frac{f_p}{100} (1 - n_0) Q_f ,$$

Donde Q_f se puede calcular por medio de modelos unidimensionales de plumas eruptivas, así:

$$(7) Q_f : aH^4 + b ,$$

Donde a y b son coeficientes que dependen de parámetros atmosféricos y se ajustaron de acuerdo al trabajo de Carazzo *et al.* (2008) donde exponen estos para zonas tropicales parecidas al VNR. Kaminski *et al.* (2011) propusieron un modelo funcional para flujos de ceniza $> 1 \times 10^5$ kg/s con el fin de determinar la carga de ceniza en la parte superior de la columna, puesto que para el VNR estos valores pueden ser menores, los autores realizaron un ajuste, quedando así:

$$(11) \text{Carga de ceniza: } 396,45 \text{ mg m}^{-3} X \ln\left(\frac{Q_{ceniza}}{Q_o}\right) - 1550,7 \text{ mg m}^{-3},$$

El método de Degruyter y Bonadonna (2012) para calcular el flujo de masa es aquel donde consideran las condiciones atmosféricas locales en lugar de un modelo atmosférico general para una región. Este considera las condiciones del viento en el momento de la erupción, de esta manera el flujo de masa se puede obtener de esta manera

$$(12) Q = \pi \frac{\rho_{a0}}{g'} \left(\frac{2^{5/2} \alpha^2 \bar{N}^3}{z_1^4} H^4 + \frac{\beta^2 \bar{N}^2 \bar{v}}{6} H^3 \right) ,$$

Donde ρ_{a0} es la densidad de referencia de la atmósfera, α es el coeficiente de arrastre radial, β es el coeficiente de arrastre del viento, g' depende de g que es la aceleración de la

gravedad, \bar{N} es la frecuencia de flotabilidad promedio de la atmósfera, \bar{v} es la velocidad del viento a través de la altura de la pluma y z_1 es la altura máxima unidimensional.

Un método similar al de Degruyter y Bonadonna (2012) lo plantean Woodhouse *et al.* (2013), en el cual la masa de flujo está dada por:

$$(13) Q_o: \left[\frac{H}{0,318 \left(\frac{1+1.373 \bar{W}_s}{1+4.266 \bar{W}_s + 0.3527 \bar{W}_s^2} \right)} \right]^{3.95},$$

Donde $\bar{W}_s = 1.44V_1/NH_1$, V_1 es la velocidad del viento en la tropopausa, H_1 es la altura local de la tropopausa y N es la frecuencia de flotabilidad de la atmósfera. Para el VNR se estableció la altura de la tropopausa y la estratosfera a 12 y 20 km respectivamente, según modelos atmosféricos y datos del NOAA.

Por último, el modelo unidimensional de Mastin *et al.* (2009) determinó la altura de la columna (H) en función de una tasa media de erupción y se definió como:

$$(14) H: 2 \times 10^3 V^{-0.241},$$

Donde V es la tasa de flujo volumétrico que equivale a m^3 de roca densa a ESR por segundo.

5.5.2 Parámetros de las Columnas Eruptivas

A continuación, se define los parámetros que se pueden calcular mediante las metodologías usadas en el manuscrito de Londoño y Galvis (2018), sin embargo, el único parámetro calculado en este trabajo fue el de volumen de ceniza:

- **Flujo másico de la pluma**

El flujo másico de la pluma o columna eruptiva es aquella medición que representa la masa que se mueve en una unidad de tiempo, así que se puede explicar para las plumas como el material expulsado de una erupción en un determinado tiempo, de esta forma presentar un concepto de la dinámica de la erupción, se expresa en unidades de kg/h.

- **Masa de la columna eruptiva**

La masa de la columna eruptiva se refiere a la masa total del material expulsado medido en la pluma eruptiva, esta se expresa en unidades de kg.

- **Volumen de la pluma**

El volumen de la pluma eruptiva se refiere al cálculo con todos los componentes que están presentes en ella, como la porción en estado gaseoso y sólido, este cálculo aporta información de magnitud o tamaño de las erupciones y se expresa en unidades de m^3 .

- **Volumen de ceniza**

El volumen de ceniza se calcula a partir de la columna eruptiva, pues hace parte de los componentes de esta. Se expresa en unidades de m^3 y específicamente para el VNR este parámetro ha ayudado a evaluar la actividad del volcán, pues observar el comportamiento de este parámetro junto con otros aporta información acerca de procesos y dinámica.

6. Metodología

Para llevar a cabo la práctica empresarial en el OVSM los temas se trabajaron de la siguiente manera:

6.1 Infrasonido Volcánico VNR 2020 – 2022

6.1.1 Parámetros

Para analizar el registro de infrasonido del VNR en el periodo 2020 – 2022 se hallan los siguientes parámetros de cada señal infrasonido que ayudan a caracterizar y abordar la dinámica de las erupciones volcánicas

- **Duración**

La duración de una señal infrasonido, al igual que en la sísmica, se obtiene por medio de la atenuación de la señal en curso. Esta puede ser relevante en la caracterización de las señales infrasonidos, según la actividad volcánica que presente un volcán va a tener señales características que pueden ser de corta duración como explosiones instantáneas o mantenerse en el tiempo como un tremor infrasónico continuo asociado a un sistema abierto con episodios de desgasificación continua. En el apartado 5.2 de infrasonido y estilos eruptivos se puede deducir que la duración es un aspecto importante a la hora de caracterizar una señal acústica.

- **Energía acústica radiada**

La EAR proporciona información acerca de la energía total irradiada de la señal infrasonido y a menudo se utiliza para cuantificar la magnitud de una explosión registrada en un infrasonido. Es útil calcular la energía en el transcurso de una duración especificada, como en una explosión (Johnson *et al.*, 2003; McNutt *et al.*, 2015).

- **Presión reducida (PRed)**

Esta presión se calcula para una distancia de referencia común, que se fija normalmente a 1 km (Johnson *et al.*, 2004) como es el caso del VNR, pues estaría por fuera de la región del cráter activo o “vent” y también más allá del rango elástico. Este parámetro es análogo al desplazamiento reducido (DR) medido en sismología volcánica (Aki y Koyanagi, 1981).

- **Presión Máxima (PMax)**

La PMax es aquella presión que se genera en la fuente de infrasonido y es registrado por el sensor acústico.

6.1.2 Software

La identificación, clasificación, procesamiento y análisis de las señales infrasonido del periodo 2020 – 2022 se realizó en una aplicación que va de la mano con el VolcanStudio, llamada Infrasonic_Analysis.exe (Figura 13), creada por el mismo que desarrolló la primera.

La identificación de señales de infrasonido provenientes de la actividad del VNR en el periodo 2020 – 2022 se distingue por medio de los correlogramas que utiliza la función de correlación para mostrar un retraso o “lag” producido por un fenómeno volcánico superficial, en la Figura 14 se muestra la interfaz de la aplicación Infrasonic_Analysis.exe y los 3 correlogramas pertenecientes a tres pares de sensores ubicados en el volcán con una señal infrasonido registrada el 11 de octubre de 2021 a las 15:02 UTC por los sensores ACOLM, ACINM y ACRUM.

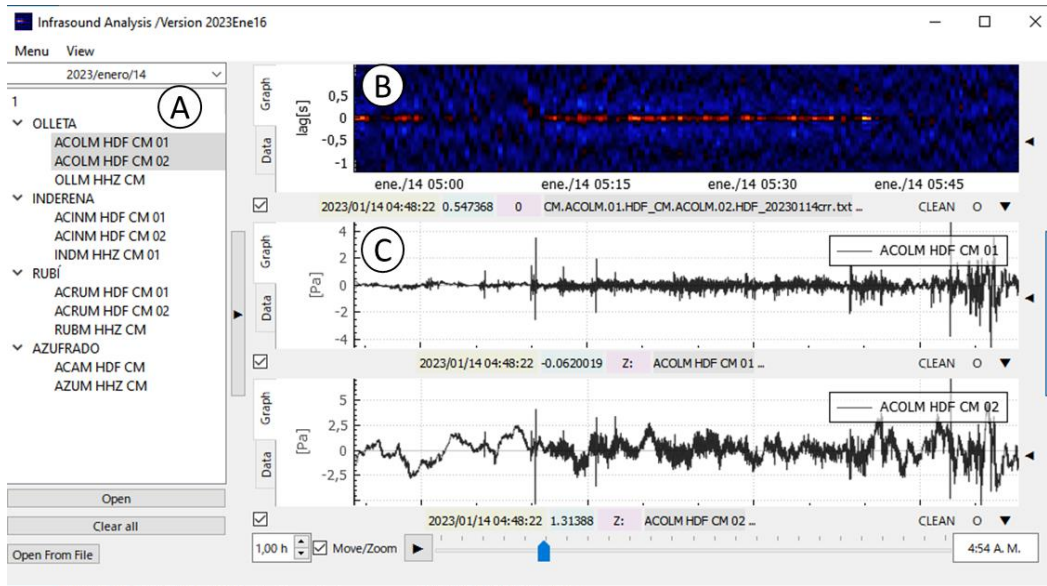


Figura 13. Interfaz de la versión actualizada de la aplicación *Infrasound_Analysis.exe*. Panel de opciones (A), correlograma (B), forma de onda para el par de sensores acústicos de la estación Olleta (C) y demás opciones de visualización que posee el programa.

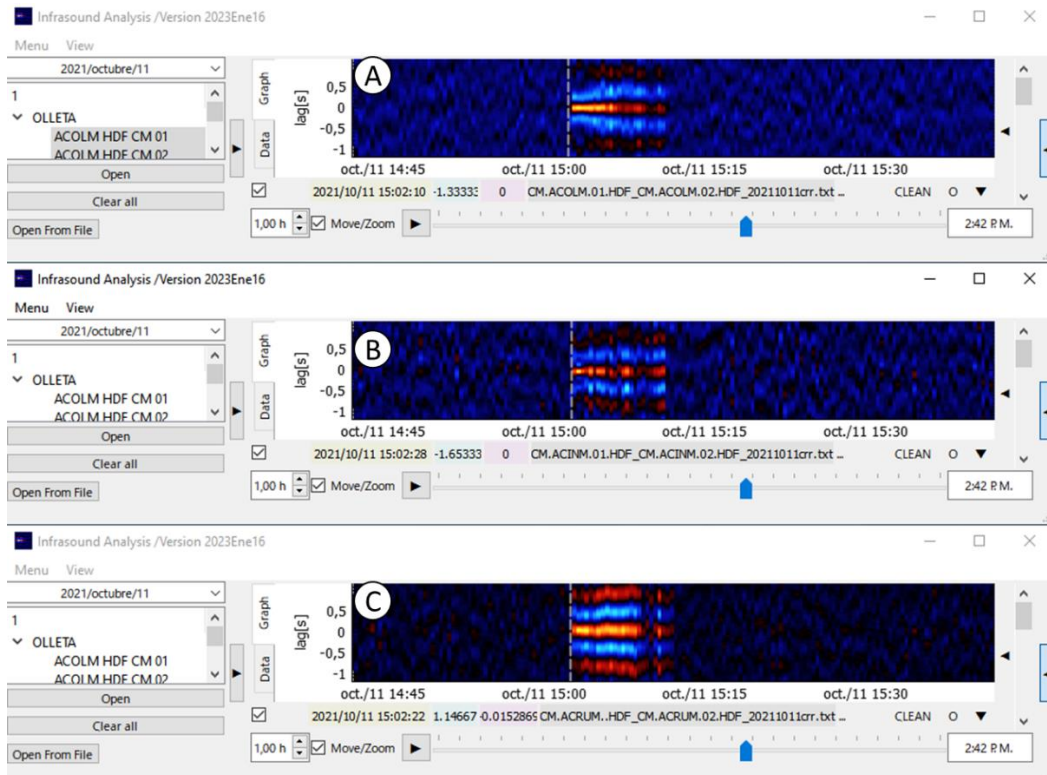


Figura 14. Interfaz de la aplicación *Infrasound_Analysis.exe* para los tres pares de sensores, (A) ACOLM (B) ACINM y (C) ACRUM. En los correlogramas de cada uno se identifica una señal infrasonido el 11 octubre de 2021 a las 15:02 UTC.

6.1.3 Procesamiento

Para la clasificación de las señales infrasonido se debía establecer arribo o inicio (tecla S), coda o duración (tecla E) y cálculo de energía (tecla C). La Figura 15 presenta un ejemplo de clasificación de una señal infrasonido, se destaca que este proceso se hizo para todos los correlogramas donde se observa la señal infrasonido.

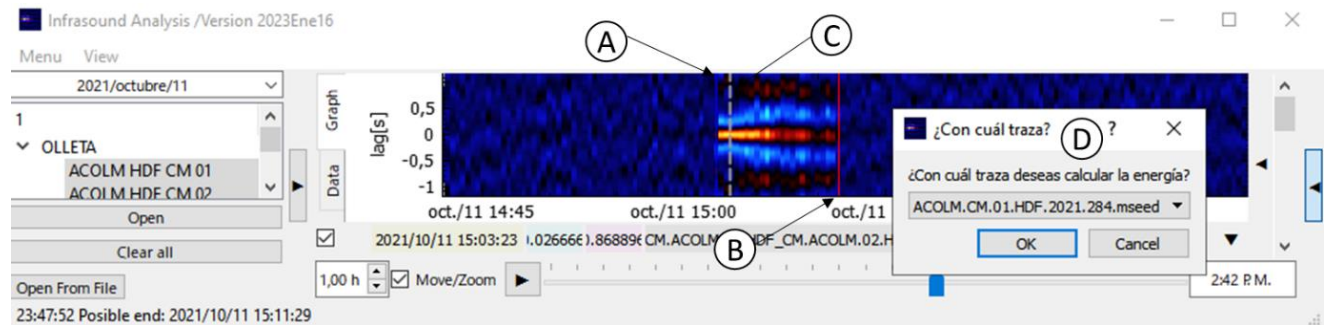


Figura 15. Interfaz de la aplicación *Infrasound_Analysis.exe* para realizar una clasificación de una señal infrasonido en la estación ACOLM (A) arribo (B) coda (C) energía y (D) recuadro para guardar la señal infrasonido.

Luego de realizar la identificación y clasificación de la señal infrasonido se guarda en un archivo de salida .txt y las señales clasificadas se pueden visualizar en la aplicación (Figura 16) y en una carpeta del escritorio de un computador destinado para los infrasonidos donde son guardadas estas señales (Figura 17). Mediante la clasificación en el software de las señales infrasonido se obtiene la siguiente información: fecha, duración, energía (MJ), PMax (Pa) y PRed (Pa).

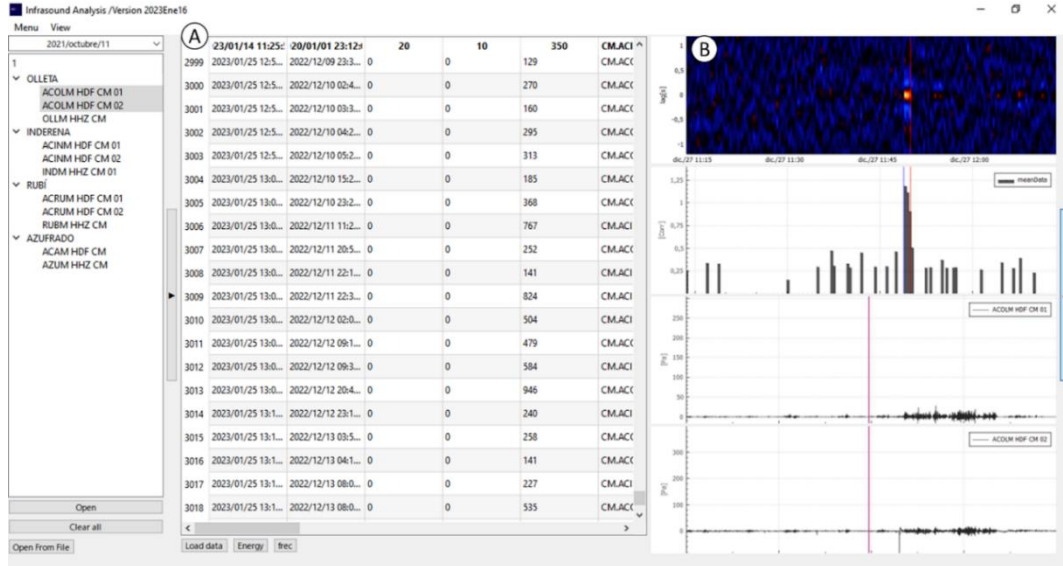


Figura 16. Interfaz de la aplicación *Infrasound_Analysis.exe*. (A) señales infrasonido clasificadas y (B) correlograma, máximos y formas de onda de una señal seleccionada que ya ha sido clasificada.

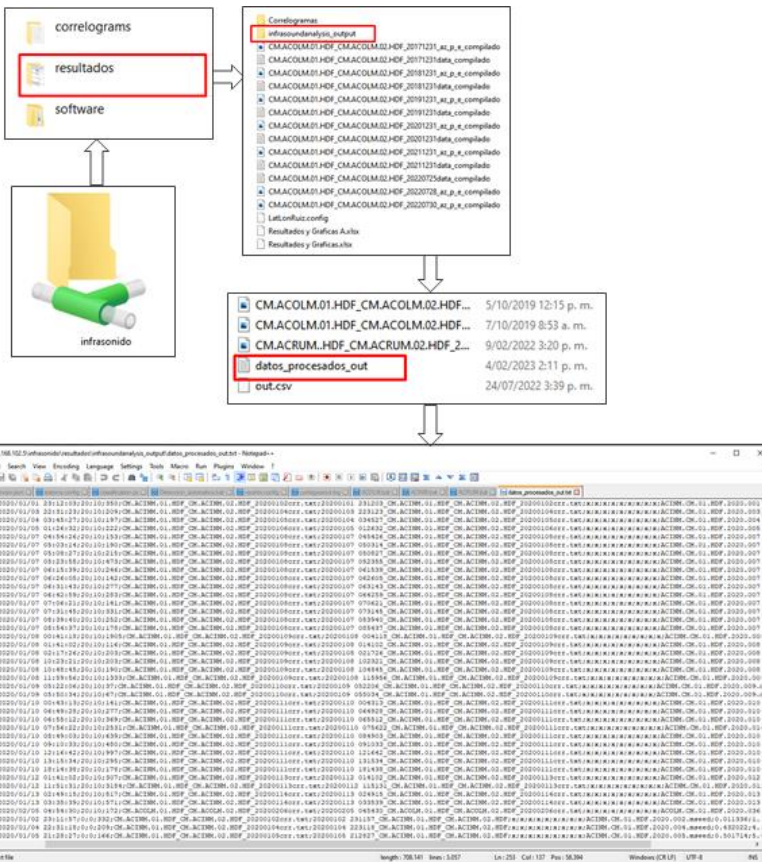


Figura 17. Ubicación de archivo de salida de la aplicación *Infrasound_Analysis_exe*, los resultados se encuentran en una carpeta ubicada en los computadores del OVSM y el archivo se visualiza como un *.txt* "datos_procesados_out".

El cálculo de los correlogramas automáticos se realizó en un equipo del OVSM destinado solamente para ejecutar los infrasonidos y todos los programas de este. Para el procesamiento de las gráficas de infrasonido automáticas se propuso semanalmente calcular y enviarle al asesor externo el reporte, se destaca que esta función que se realizó durante la práctica fue adicional a los objetivos específicos pactados en el convenio entre el SGC y la Universidad de Caldas.

Se calculaba diariamente los valores de infrasonido y posteriormente se compilaba la semana completa como se muestra en la Figura 18 que ilustra la rutina para generar estos correlogramas diarios, se destaca que de igual forma se verificaba los correlogramas desde el programa infrasound_Analysis.exe para confirmar que sea una señal infrasonido. Estas gráficas fueron presentadas en las reuniones técnicas semanales que se realiza el OVSM para evaluar la actividad de los volcanes del segmento norte de Colombia.

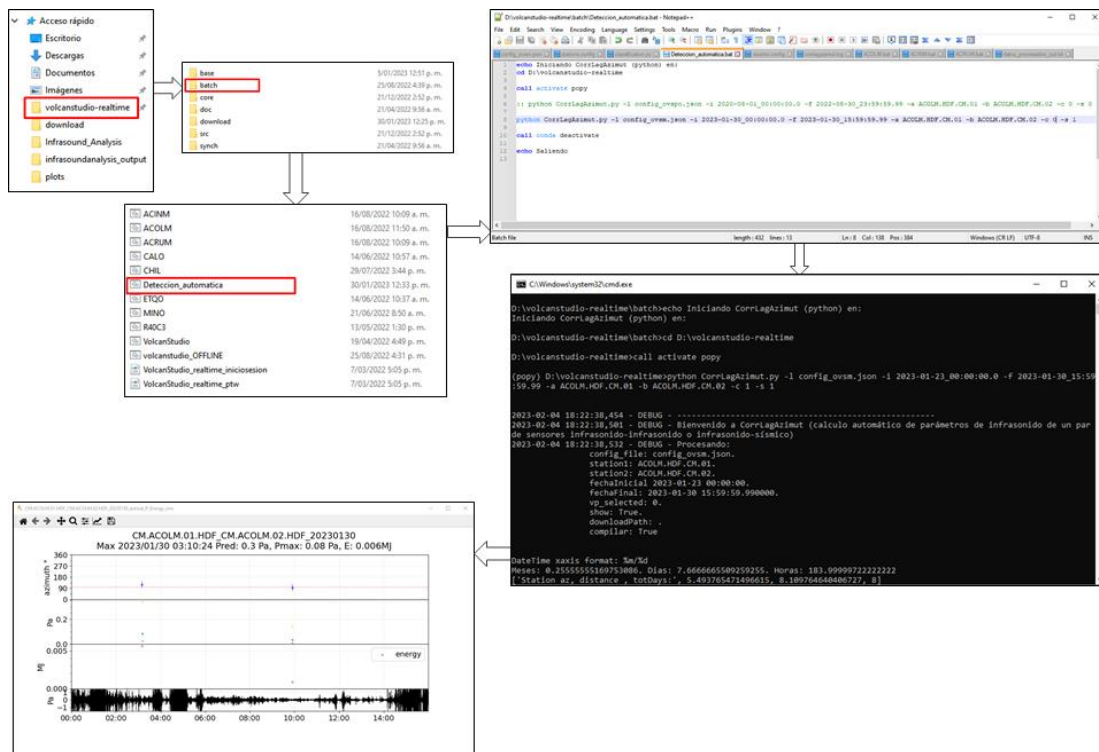


Figura 18. Ejemplo de rutina resumida para generar los correlogramas automáticos del día 30 de enero de 2023 que inicia desde la carpeta donde se encuentra el programa a ejecutar.

6.1.4 Tratamiento de Datos

Para el análisis de los datos se propuso crear una base de datos con las señales infrasonido más representativas del año 2020 – 2022 con la siguiente información:

- Fecha/hora UTC
- Señal infrasonido
- Señal sísmica
- Energía (MJ)
- Presión máxima (Pa)
- Presión reducida (Pa)
- Clasificación señal sísmica
- Desplazamiento reducido de la señal sísmica
- Amplitud de la señal sísmica (nm/s)
- Energía sísmica radiada (J)
- Frecuencia (Hz)
- Duración (s)
- Fenómeno superficial

Se escogieron 79 señales infrasonidos del periodo de tiempo y de ella se obtuvieron los parámetros acústicos calculados en el software VolcanStudio. La señal sísmica y parámetros asociados se midieron con el software SWARM 3.0.1, que es una aplicación Java, creada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Para el catálogo se tomó como referencia la estación Olleta, tanto infrasónica y sismológica por ser un sensor de banda ancha, cercanía a la fuente activa (cráter Arenas) y buen registro del infrasonido y sísmico. La amplitud (nm/s) medida de cresta a valle fue la máxima de la señal sísmica, la frecuencia (Hz) se midió por medio de análisis espectral que utiliza la transformada de Fourier con estaciones banda ancha y corto periodo y la duración (s)

de la señal se midió aproximadamente en el momento de la coda o atenuación de la señal sísmica.

Para el cálculo de la ESR se corrigieron las amplitudes (nm/s) por efecto de sitio para la estación Olleta. La corrección se realiza multiplicando la amplitud calculada o aparente por el valor de amplificación según la frecuencia de la señal (Londoño *et al.*, 2020). En la Tabla 3 se presentan los valores de corrección para la estación Olleta.

Valores establecidos para corrección efecto de sitio de la estación Olleta	
f(Hz)	Olleta
0	1.05
2	1.05
4	0.99
5	1.08
6	1.16
7	1.22
8	1.26
9	1.28
10	1.34

Tabla 3. Factores para corrección de amplitud por efecto de sitio establecidos por Londoño *et al.* (2020) para el VNR. Tomado y modificado de Serna y Castañeda, 2021.

Posterior a la corrección de amplitudes y encontrar la amplitud real se calculó la ESR por medio de la siguiente ecuación propuesta por Dibble (1974):

$$ESR = \pi \rho v (r * 0.01)^2 Amp^2 t$$

Donde ρ corresponde a la densidad de la parte superior del edificio volcánico (2.6 kg m^{-3} según Londoño *et al.*, 2014), v es la velocidad sísmica promedio de la capa más superficial de (v_p) ($2,5 \text{ m s}^{-1}$ según Londoño & Sudo, 2002), r es la distancia en cm entre la

fuerza activa y la estación sismológica (3.98 km) y t es la duración de la señal (Serna y Castañeda, 2021).

Por último, se verificó la manifestación de un fenómeno superficial como emisiones de ceniza, cambios en la densidad y altura de columna mediante cámaras IP y cambios en la paleta de colores de las columnas y de altura en cámaras termográficas que captan la temperatura mediante infrarrojos, instaladas en el VNR para el monitoreo continuo y confirmación de reportes de caída de ceniza en zonas aledañas y lejanas al volcán.

6.2 Cálculo de Parámetros de Columnas

Para la actualización de la metodología de calcular el volumen de ceniza del VNR se presenta el método expuesto en el manuscrito “*Seismic Data, Photographic Images and Physical Modeling of Volcanic Plumes as a Tool for Monitoring the Activity of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia*” por Londoño y Galvis (2018). El objetivo de esta metodología es obtener parámetros de las columnas eruptivas a través de datos sísmicos y atmosféricos y así dejar una base de datos en el monitoreo volcánico, para el cálculo de columnas por medio de datos sísmicos en caso de no tener una visual clara de una columna eruptiva y calcular los parámetros sísmicos a través de características de las columnas eruptivas.

6.2.1 Parámetros

Se recolectaron de las emisiones de ceniza del periodo 2020 – 2022 los siguientes datos:

- Altura de la columna de ceniza
- Duración total de la señal sísmica
- Desplazamiento reducido de la señal sísmica clasificación sísmica
- Amplitud pico a pico de la señal sísmica

- Velocidad del viento en el momento de la emisión de la ceniza a 5, 7 y 10 km msnm
- Temperatura en el momento de la emisión de ceniza a 5, 7 y 10 km msnm

6.2.2 Obtención de Parámetros

Para calcular los datos sísmicos (clasificación, duración y DR promedio del sismo) y altura de las columnas eruptivas del periodo 2020 – 2022 se hizo uso de los programas del SGC - OVSM como SWARM 3.0.1, Volcano y Provig. Para el cálculo de datos atmosféricos (velocidad del viento y temperatura en la atmosfera) se hizo uso de una plataforma web del departamento de ciencias atmosféricas de la Universidad de Wyoming.

6.2.3 Modo de Obtención de los Parámetros

Los datos obtenidos del SGC se adquirieron así: el listado de registro de emisiones de ceniza confirmada en el VNR del periodo propuesto se adquiere con ayuda del programa Volcano que lleva un registro asociado a la sismicidad de fluidos con sus características, se verifica las emisiones y se lista estas con información de altura de la columna y DR de la señal sísmica asociada. La duración completa de cada señal sísmica asociada a emisión de ceniza se mide con ayuda de los espectrogramas y forma de onda en el software SWARM 3.0.1.

Los parámetros atmosféricos se obtuvieron por la plataforma web del departamento de ciencias atmosféricas de la Universidad de Wyoming, a través de estaciones meteorológicas establecidas en el país que registran los datos necesarios; la estación de referencia para Colombia es la estación meteorológica del Aeropuerto internacional El Dorado ubicado en Bogotá, D.C. Se calculó para cada fecha de emisión de ceniza los dos parámetros: temperatura y velocidad del viento a 5, 7 y 10 km sobre el nivel del mar. En la Figura 19 se presenta la

página web del departamento de ciencias atmosféricas de la Universidad de Wyoming con la barra de opciones para cambiar la fecha, hora y las estaciones meteorológicas.

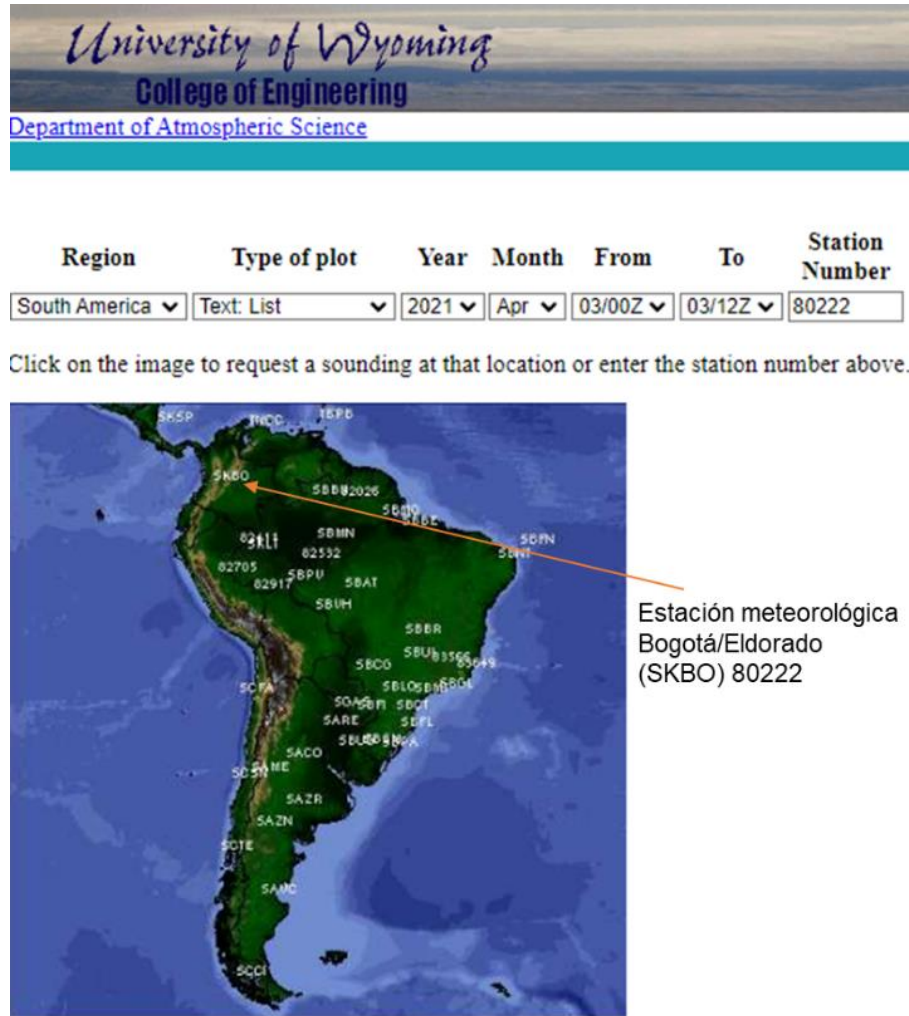


Figura 19. Interfaz de la plataforma web del departamento de ciencias atmosféricas de la Universidad de Wyoming, donde se observa las estaciones meteorológicas para Suramérica y la posibilidad de encontrar los datos filtrados por fecha y hora. Tomado de <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

La plataforma de la Universidad de Wyoming al seleccionar la fecha y la estación meteorológica, calcula los parámetros de la Tabla 4 (por ejemplo, Tabla 5).

Parámetro	Descripción	Unidades
PRES:	Presión atmosférica	hPa
HGHT:	Altura geopotencial	Metros
TEMP:	Temperatura	Celsius
DWPT:	Temperatura de derretimiento	Celsius
FRPT:	Temperatura punto de escarcha	Celsius
RELH:	Humedad relativa	%
RELI:	Humedad relativa respecto al hielo	%
MIXR:	Relación másica	gramo/kilogramo
DRCT:	Dirección del viento	Azimut
SKNT:	Velocidad del viento	Knot
THTA:	Temperatura potencial	Kelvin
THTE:	Temperatura potencial equivalente	Kelvin
THTV:	Temperatura potencial virtual	Kelvin

Tabla 4. Tabla que relaciona el parámetro, descripción y unidades de los parámetros que se generan a partir de la plataforma del departamento de ciencias atmosféricas de la Universidad de Wyoming.

80222 SKBO Bogota Observations at 12Z 03 Apr 2021

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
1000.0	62									
925.0	745									
850.0	1498									
752.0	2546	15.6	12.0	79	11.85	0	0	313.2	350.2	315.5
700.0	3152	9.0	8.1	94	9.77	35	2	312.4	342.9	314.3
698.0	3176	8.6	8.1	97	9.80	40	3	312.2	342.8	314.1
673.0	3476	6.7	6.3	98	9.00	105	10	313.4	341.6	315.1
646.0	3812	4.6	4.3	99	8.15	115	22	314.6	340.4	316.2
644.0	3838	4.4	4.2	99	8.09	116	22	314.7	340.3	316.3
635.0	3953	5.8	2.3	78	7.17	123	19	317.6	340.6	319.0
625.0	4080	5.0	1.7	79	6.98	130	17	318.2	340.7	319.5
603.0	4368	3.3	0.4	81	6.58	115	10	319.4	340.8	320.7
549.0	5120	-1.2	-3.1	87	5.60	0	0	322.8	341.3	323.9
500.0	5870	-5.7	-6.5	94	4.73	180	8	326.0	342.0	327.0
479.0	6205	-8.3	-8.5	99	4.22	160	10	326.8	341.2	327.6
473.0	6303	-9.1	-9.1	100	4.08	151	10	327.0	341.0	327.8
469.0	6369	-9.3	-9.5	99	3.98	145	10	327.5	341.1	328.3
444.0	6792	-10.9	-12.3	89	3.37	159	10	330.7	342.5	331.4
439.0	6880	-10.3	-16.3	61	2.45	162	10	332.6	341.3	333.1
426.0	7109	-12.0	-16.9	67	2.39	170	10	333.3	341.9	333.8
414.0	7327	-13.6	-17.6	72	2.34	160	11	333.9	342.4	334.4
401.0	7571	-15.4	-18.2	79	2.28	175	18	334.7	342.9	335.2
400.0	7590	-15.5	-18.3	79	2.27	175	18	334.8	343.0	335.2
396.0	7666	-16.1	-18.5	82	2.26	174	19	334.9	343.1	335.4
367.0	8234	-19.1	-26.0	55	1.26	170	23	338.3	343.0	338.5
360.0	8378	-19.9	-27.9	49	1.08	175	23	339.1	343.2	339.3
344.0	8713	-22.7	-33.7	36	0.65	188	22	339.7	342.3	339.9
342.0	8756	-23.3	-30.3	53	0.91	190	21	339.5	343.0	339.7
336.0	8884	-24.2	-33.6	42	0.67	195	21	339.9	342.6	340.1
327.0	9082	-25.7	-38.7	29	0.41	193	22	340.6	342.2	340.6
319.0	9261	-27.1	-34.1	51	0.67	190	24	341.0	343.7	341.2
305.0	9582	-29.5	-39.5	37	0.41	186	26	342.1	343.7	342.1
300.0	9700	-30.5	-38.5	45	0.46	185	27	342.3	344.1	342.4
288.0	9989	-32.9	-37.0	67	0.56	183	28	342.9	345.1	343.0
287.0	10014	-33.1	-40.1	49	0.41	182	29	342.9	344.6	343.0
273.0	10364	-36.3	-40.4	66	0.42	179	30	343.2	344.9	343.3
253.0	10888	-40.5	-44.7	63	0.28	175	33	344.6	345.8	344.7
250.0	10970	-41.1	-45.4	63	0.27	175	33	344.8	345.9	344.9
226.0	11645	-47.1	-51.6	60	0.15	182	26	345.7	346.4	345.8

Tabla 5. Ejemplo de parámetros atmosféricos para el día de 03 de abril de 2021 entre las 00:00 y las 12:00 UTC, obtenido por la estación meteorológica Bogotá/eldorado. Tomado de <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

6.2.4 Tratamiento de Datos

Los parámetros obtenidos de las columnas de ceniza del periodo 2020 – 2022 fueron utilizados para crear una base de datos que seguirá creciendo para el manejo de esta metodología en el monitoreo volcánico del VNR y se adoptará como técnica de evaluación de la actividad superficial. Con estos datos que fueron analizados y entregados a la asesora externa de la práctica empresarial, fortaleció los datos obtenidos anteriormente. Además, se calculó el volumen de ceniza de las emisiones más representativas del periodo 2020 – 2022.

7. Resultados

7.1 Infrasonidos VNR

A continuación, se presenta de forma organizada la información obtenida

7.1.1 Catálogo de Infrasonido

El catálogo de infrasonido propuesto se resume en la Tabla 6 que lista las señales infrasonido escogidas de todas las clasificadas, las estaciones donde se registraron, los parámetros acústicos resultantes procesados principalmente de la estación ACOLM, y ACINM en caso de no registrarse en la primera y algunas figuras de estas señales.

	Fecha / Hora UTC	ACOLM	ACINM	ACRUM	Duración (s)	Energía (MJ)	P Max (Pa)	P Red (Pa)	Figura
1	17/02/2020 11:16		x		645	0,197359	0,161147	0,660704	
2	18/02/2020 22:41		x		436	0,155178	0,190361	0,780478	
3	20/02/2020 11:55	x	x		166	0,190066	0,337192	1,38249	
4	15/03/2020 12:20	x	x		289	0,149429	0,177362	0,727184	
5	16/03/2020 9:54	x	x		393	0,381225	0,261476	1,07205	
6	16/03/2020 10:38	x	x		344	0,201922	0,269965	1,10686	
7	24/03/2020 14:03	x			350	0,0615916	0,0997691	0,409053	
8	1/04/2020 11:50	x			239	0,131418	0,201142	0,824683	
9	19/04/2020 5:32	x	x		411	0,606183	0,275148	1,12811	
10	20/04/2020 3:59	x			375	0,299816	0,325452	1,33435	
11	9/09/2020 8:51	x			172	0,114171	0,280972	1,15199	fig 20
12	12/09/2020 4:47	x			332	0,253882	0,225644	0,925139	
13	5/07/2021 6:45		x		448	0,152793	0,226028	0,926715	
14	25/07/2021 10:15	x	x	x	1247	0,84565	0,299417	1,22761	
15	29/07/2021 2:12	x	x	x	663	0,335781	0,296187	1,21437	
16	30/07/2021 4:41	x	x		239	0,373472	0,356857	1,46311	
17	30/07/2021 8:44	x	x	x	258	0,308315	0,341082	1,39844	
18	3/08/2021 12:15		x	x	43	0,0161684	0,120591	0,494423	
19	6/08/2021 7:23	x			288	0,239613	0,216076	0,885911	
20	10/08/2021 12:43		x		141	0,209347	0,499658	2,0486	
21	12/08/2021 14:15	x			160	4,44107	1,49602	6,13368	
22	13/08/2021 12:26	x	x	x	166	1,36574	0,67096	2,75094	
23	14/08/2021 11:50	x	x		111	0,132086	0,221745	0,909154	
24	15/08/2021 2:16	x	x		245	0,330785	0,386355	1,58406	

25	16/08/2021 11:58	x	x	x	142	0,500136	0,43415	1,78001	
26	30/08/2021 10:36	x	x	x	209	1,69294	1,06614	4,37116	
27	5/09/2021 5:57	x	x	x	387	2,86905	1,30399	5,34636	
28	5/09/2021 22:52	x	x	x	141	0,925575	1,07355	4,40157	
29	24/09/2021 3:31	x	x		74	0,161111	0,605199	2,48132	
30	25/09/2021 7:18		x		197	0,0311481	0,104323	0,427725	
31	30/09/2021 6:35	x		x	233	0,0625486	0,136102	0,55802	
32	4/10/2021 7:50	x	x	x	111	0,884656	0,713923	2,92709	
33	8/10/2021 6:36	x	x		369	0,0798922	0,142007	0,582229	
34	10/10/2021 9:18	x		x	842	5,05362	2,38191	9,76584	
35	10/10/2021 14:16	x		x	479	4,59744	1,22329	5,01548	
36	11/10/2021 15:02	x	x	x	535	3,17364	1,27125	5,21211	
37	11/10/2021 23:31	x			144	0,429013	0,532776	2,18438	
38	17/10/2021 3:27	x	x	x	1364	2,48014	0,755841	3,09895	
39	29/10/2021 10:15	x	x	x	522	7,99838	1,17615	4,82221	
40	28/11/2021 12:39	x			595	1,17174	0,698231	2,86275	fig 22
41	14/12/2021 7:44	x	x	x	258	0,419916	0,539166	2,21058	
42	21/12/2021 22:36	x	x	x	227	1,62143	1,16626	4,78166	
43	22/12/2021 0:15	x	x	x	215	0,564839	0,586116	2,40308	
44	29/12/2021 3:09	x	x	x	320	2,21566	1,34309	5,50665	
45	5/12/2021 5:05	x	x		559	1,06178	0,557546	2,28594	
46	1/01/2022 10:39	x	x	x	264	0,588153	0,662701	2,71707	fig 23
47	5/02/2022 22:10	x	x	x	86	2,70812	1,57201	6,44525	
48	27/02/2022 1:59	x	x	x	166	0,375275	0,489448	2,00674	
49	8/04/2022 7:05	x	x		129	1,92651	1,24414	5,10097	
50	14/04/2022 23:27	x	x		302	0,505515	0,583042	2,39047	
51	21/06/2022 11:48	x	x		111	0,480844	0,645456	2,64637	
52	27/06/2022 5:13	x	x		338	0,54851	0,562485	2,30619	
53	27/08/2022 10:06	x	x	x	338	0,584827	0,376314	1,54289	
54	28/08/2022 3:45	x	x	x	252	1,27296	1,08721	4,45755	
55	31/08/2022 3:12	x	x	x	196	0,471605	0,445515	1,82661	
56	14/09/2022 3:02	x	x	x	172	0,122102	0,229921	0,942678	
57	14/09/2022 6:40	x	x	x	209	0,267007	0,334559	1,37169	
58	19/09/2022 6:41	x	x	x	448	0,972395	0,512546	2,10144	
59	19/09/2022 8:05	x	x	x	233	0,217453	0,38319	1,57108	
60	29/09/2022 3:41	x		x	252	0,725923	0,49921	2,04676	
61	14/10/2022 4:48	x	x		485	0,17	0,251677	1,03187	
62	18/10/2022 6:39	x	x		190	0,0420947	0,219322	0,899222	
63	20/10/2022 4:30	x	x	x	234	0,246796	0,242752	0,995284	
64	20/10/2022 11:36	x	x		99	0,0431238	0,207152	0,849324	
65	22/10/2022 21:35	x	x	x	73	0,119719	0,229754	0,94199	

66	21/11/2022 13:55	x			110	0,146799	0,325186	1,33326
67	28/11/2022 20:03		x		240	0,207534	0,259028	1,06202
68	12/10/2021 10:49		x		116	0,0491208	0,267802	1,09799
69	12/10/2021 10:52	x	x	x	221	2,25958	0,895062	3,66975
70	11/10/2021 11:05	x		x	166	0,646122	0,507886	2,08233
71	7/10/2021 11:16		x		196	0,0111786	0,0416386	0,170718
72	28/02/2020 11:22	x	x		406	0,0887599	0,131685	0,539909
73	18/10/2020 10:48	x			762	0,324681	0,201192	0,824888
74	8/01/2022 3:18	x	x	x	111	0,434787	0,613171	2,514
75	14/01/2022 13:33	x	x		117	0,0562298	0,248043	1,01698
76	4/02/2022 11:31	x	x	x	252	0,0332167	0,116399	0,477237
77	7/04/2022 10:41		x		153	0,149217	0,429107	1,75934
78	13/05/2022 23:11	x	x		55	1,86566	1,56277	6,40734
79	27/06/2022 11:14	x	x		436	0,471896	0,379001	1,5539

Tabla 6. Señales escogidas para catálogo de infrasonido VNR, fecha y hora (UTC), estaciones donde se registra, duración, energía, PMax, PRed y figura.

7.1.2 Características Infrasonidos VNR 2020 – 2022

Para el registro de las señales infrasonido procesadas del VNR se caracterizaron por iniciar la mayoría con una onda de presión o compresión que se traduce en un arribo impulsivo con amplia amplitud, seguido a esta se presenta una atenuación con una duración variable que osciló entre 10 a 2700 s con hasta episodios de 3 horas de infrasonido asociado posiblemente a tremor continuo, sin embargo, dominaron las duraciones entre 50 a 500 s. Según lo expresado Fee & Matoza. (2013) en su trabajo de estilos eruptivos y señales infrasonido, estas características presentadas corresponden a un estilo eruptivo vulcaniano principalmente con leves características de estromboliano, la característica acústica suele consistir en una compresión de corta duración y amplia amplitud asociado a una expansión de volumen de gas y una posterior rarefacción, que puede tener mayor duración; esto desencadena en fenómenos superficiales como explosiones de corta duración o episodios continuos de desgasificación. En la Figura 20 se ilustra una señal infrasonido común de corta duración que presenta una

manifestación superficial observada en la cámara termográfica de Olleta, un aumento y cambio de densidad en la columna de gases.

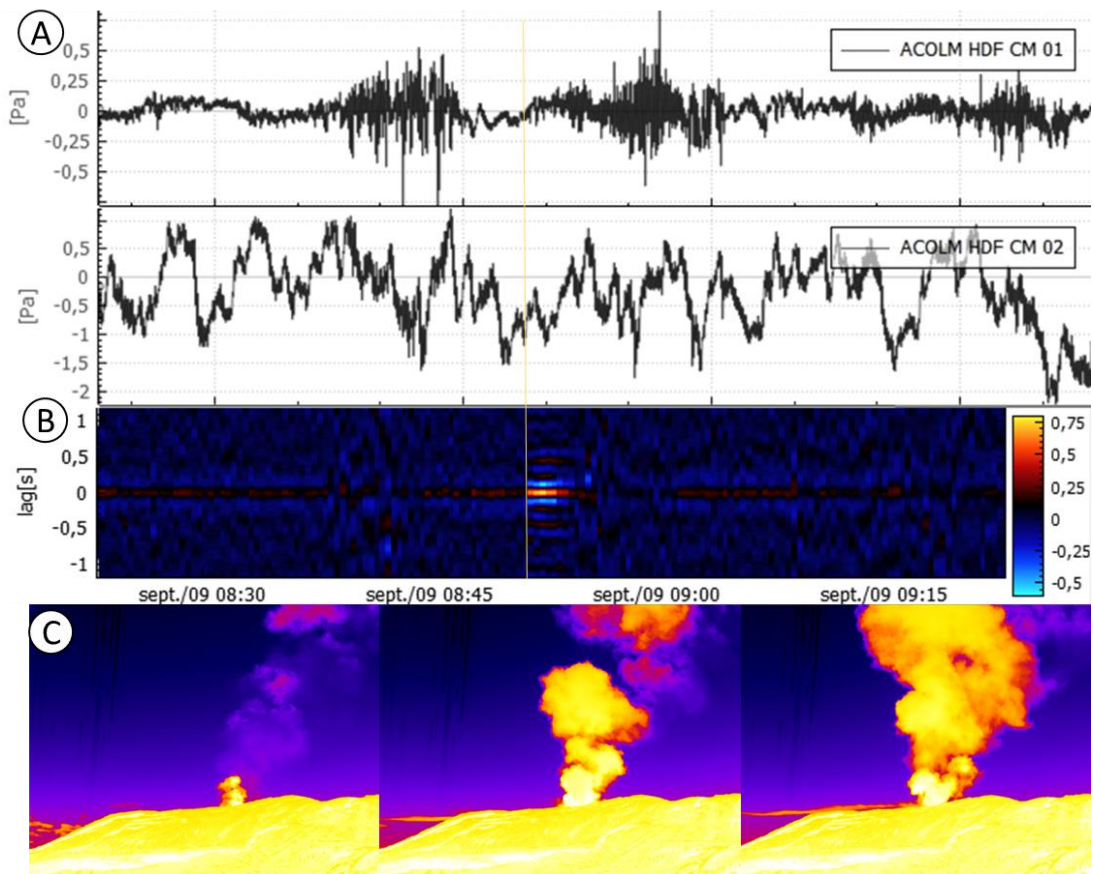


Figura 20. (A) Forma de onda para los dos sensores acústicos de la estación ACOLM, (B) correlograma obtenido por el método de correlación cruzada de los dos sensores que logra captar una señal infrasonido a las 08:51 UTC del 09 de septiembre de 2020 y (C) registro fotográfico de una cámara Olleta termográfica ubicada en el VNR.

Específicamente para el VNR las señales infrasonido estudiadas y utilizadas en el SGC - OVSM son aquellas de corta duración o explosiones que se registran y a los pocos minutos atenúan, éstas predominan en la actividad; sin embargo existe registro de infrasonido continuo que puede traducirse como tremor infrasónico continuo (duración de minutos a horas), para el VNR en el periodo estudiado se encontró episodios de este tipo hasta de 3 horas de registro, el modo de clasificación de estos no es claro aún, puesto que los

infrasonidos es una de las últimas técnicas adoptadas en el monitoreo del VNR y se sigue mejorando, se destaca que el mayor registro de este tipo de eventos se presentó en los meses noviembre y diciembre de 2021. En la Figura 21 se ilustra un ejemplo de dos horas de registro de infrasonido continuo con emisión de ceniza sostenida en el tiempo.

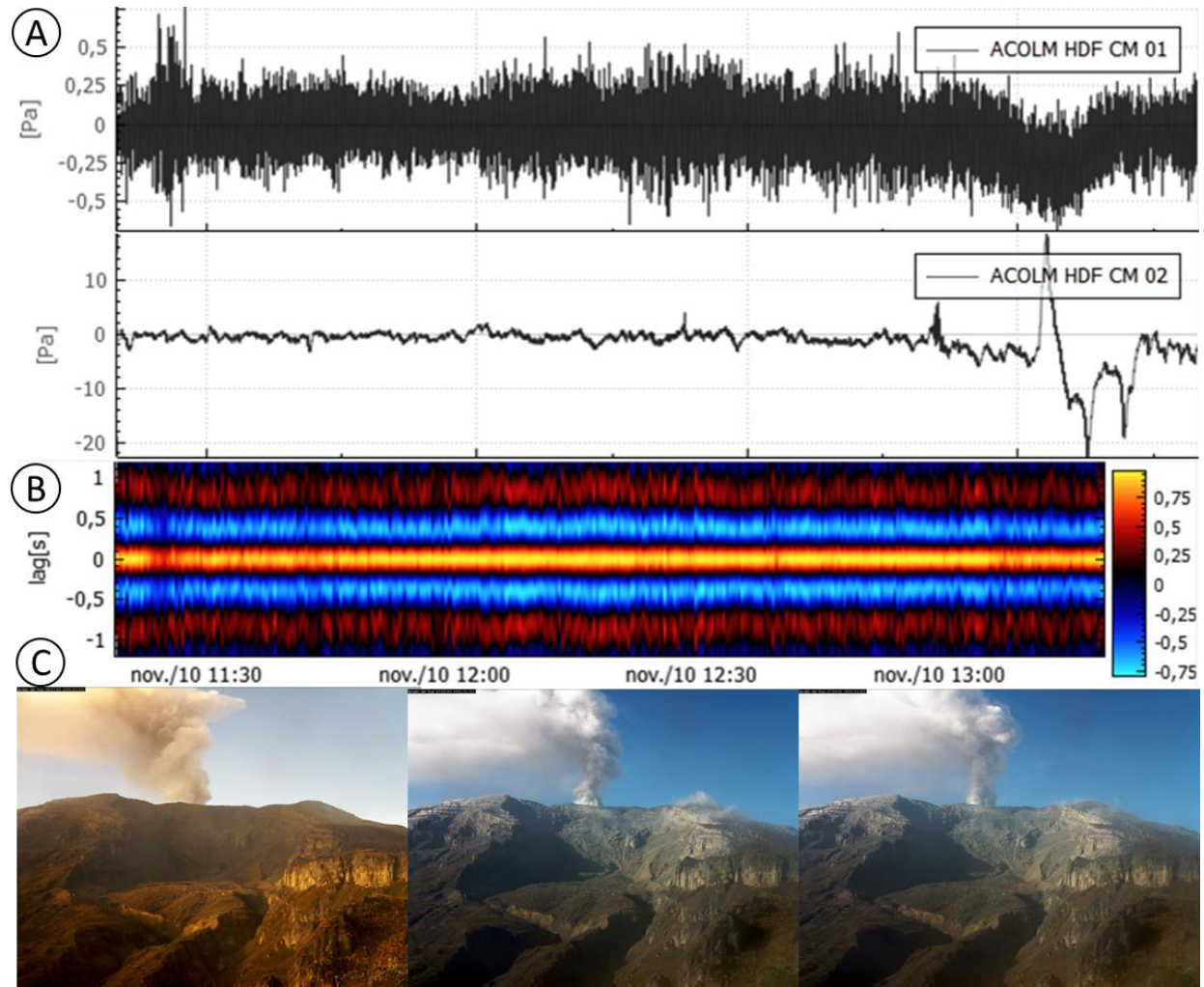


Figura 21. Dos horas de registro de infrasonido continuo el 10 de noviembre de 2021 entre las 11:20 - 13:20 UTC. (A) forma de onda de los sensores acústicos, (B) correlograma calculado a partir de la función de correlación cruzada entre los dos sensores y (C) registro fotográfico de la cámara Piraña Azufrado, donde se observa emisión de ceniza continúa.

Como se expresó al inicio del trabajo, el infrasonido volcánico se limita a procesos superficiales, por esta razón esta técnica se apoya de observaciones directas del volcán y específicamente para el VNR se encontró en la mayoría de las señales una manifestación superficial como pulsos eruptivos de corta duración traducidas en columnas de ceniza, aumentos en la densidad de la columna de gases, incandescencias y reportes de caída de material piroclástico en sectores cercanos y lejanos del volcán (Figura 22 y 23).

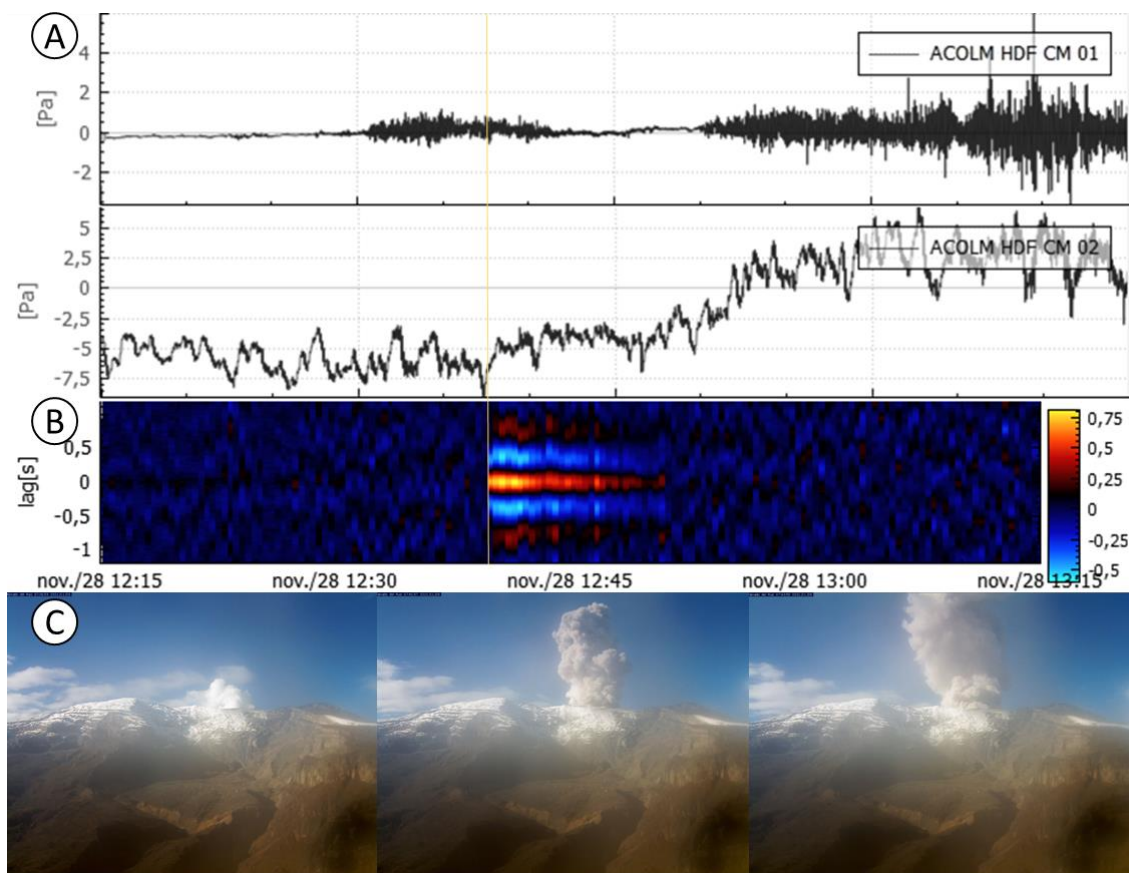


Figura 22. (A) Forma de onda para los dos sensores acústicos de la estación ACOLM donde no se observa alguna manifestación o cambios en la amplitud aparte del ruido del viento, (B) correlograma obtenido por el método de correlación cruzada de los dos sensores que logra captar una señal infrasonido a las 12:39 UTC del 28 de noviembre de 2021 con un arribo impulsivo y amplia amplitud que atenúa minutos después y (C) registro fotográfico de la cámara Piraña Azufrado, se observa una explosión asociada a esta señal infrasonido, posterior a unos minutos esta cesa.

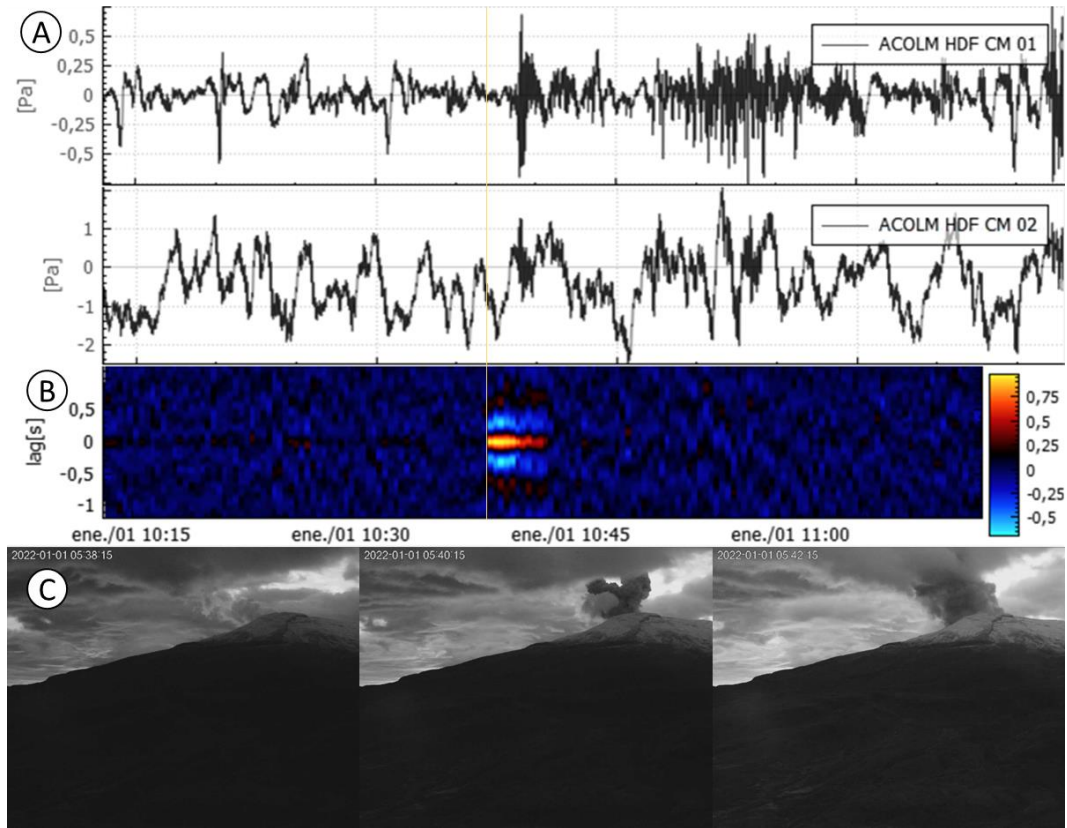


Figura 23. (A) forma de onda para los dos sensores acústicos de la estación ACOLM, (B) correlograma obtenido por el método de correlación cruzada de los dos sensores que logra captar una señal infrasonido el 01 de enero de 2022, 10:39 UTC con un arribo impulsivo y amplia amplitud que atenúa pocos minutos después y (C) registro fotográfico de la cámara Gualí Ruiz, se observa una explosión asociada a esta señal infrasonido.

7.1.3 Forma de onda de señales infrasonido

Dentro del registro de señales infrasonido del periodo estudiado se encontraron para el año 2022 unas pocas señales que se caracterizaban por tener un arribo impulsivo de la onda de presión acústica y una forma de onda en huso. Estas señales se estudiarán más a detalle por el grupo de sismología del OVSM para encontrar el origen de estas.

Por ahora se escogieron 3 señales de estas y se describieron en las Figuras 24, 25 y 26. De las tres se encontró una diferencia en la hora de inicio, duraciones variables, picos frecuenciales y ancho espectral variables.

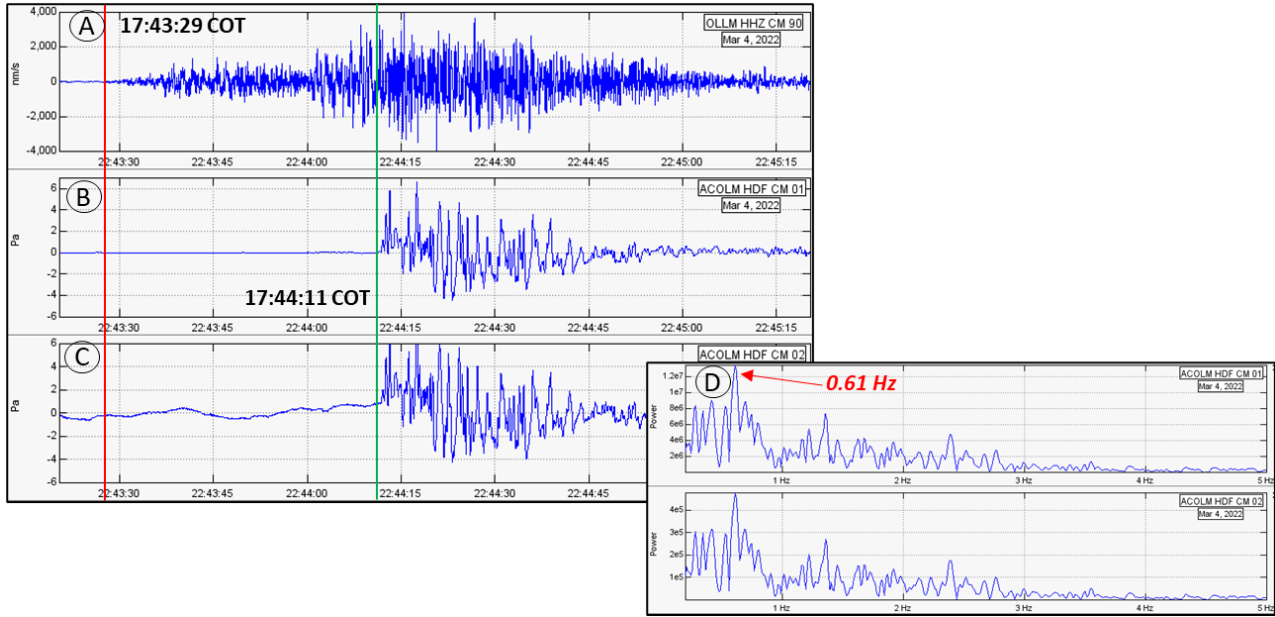


Figura 24. (A) Forma de onda señal sísmica (LP+TR) que inicia a las 17:43:29 COT el 04/03/2022 (línea roja) (B y C) Forma de onda acústica en ACOLM1 y ACOLM2 de la señal infrasonido que inicia a las 17:44:11COT y (D) Espectro de poder para las estaciones ACOLM1 y ACOLM2 que muestra un pico frecuencia en 0.61 Hz y un ancho espectral hasta los 5.8 Hz. Información adquirida por medio del software Swarm 3.0.1, propiedad del SGC – OVSM.

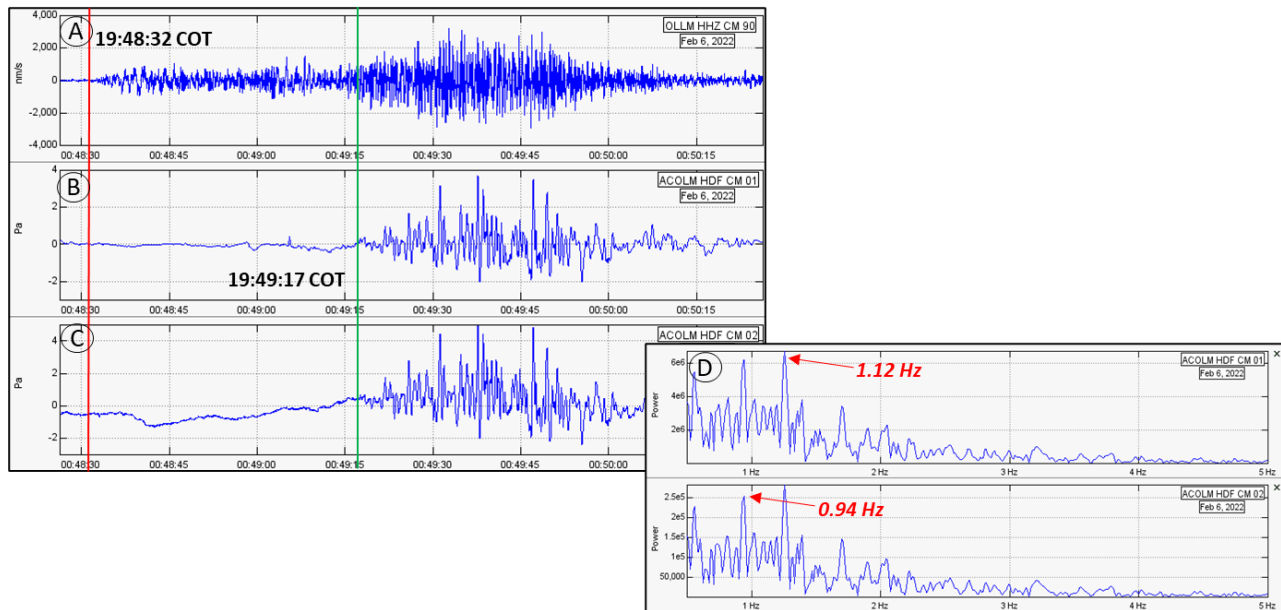


Figura 25. (A) 06/02/2022 forma de onda señal sísmica (LP+TR) que inicia a las 19:48:32 COT (línea roja) (B y C) Forma de onda acústica en ACOLM1 y ACOLM2 de la señal infrasonido que inicia a las 19:49:17 COT y (D) Espectro de poder para las estaciones ACOLM1 y ACOLM2 que muestra un pico frecuencia en 1.12 y 0.94 Hz con un ancho espectral hasta los 8.9 Hz. Información adquirida por medio del software Swarm 3.0.1, propiedad del SGC – OVSM.

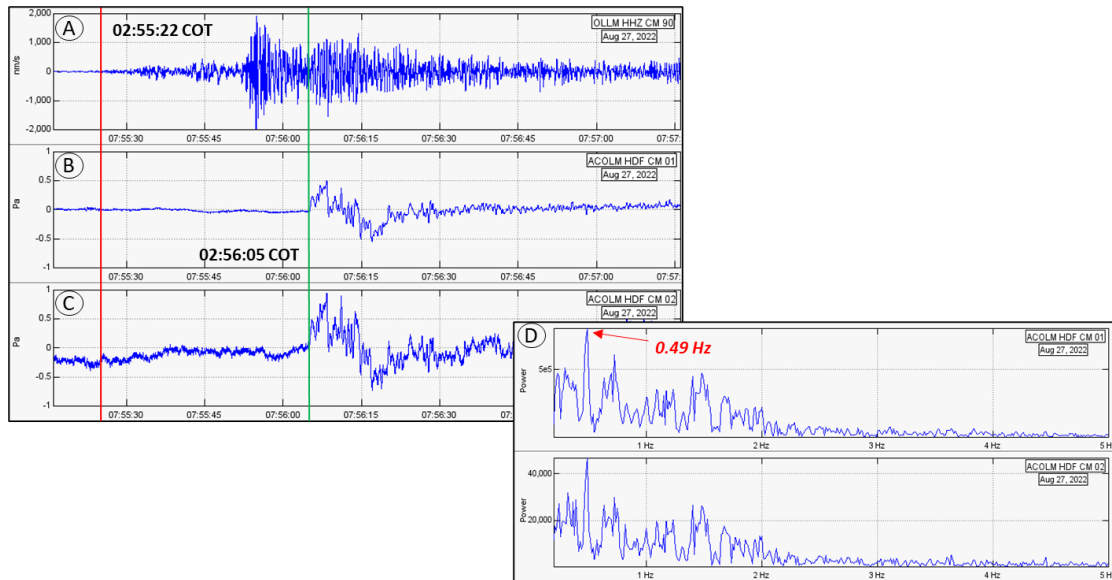


Figura 26. (A) 27/08/2022 forma de onda señal sísmica (LP+TR) que inicia a las 02:55:22 COT (línea roja) (B y C) Forma de onda acústica en ACOLM1 y ACOLM2 de la señal infrasonido que inicia a las 02:56:05 COT y (D) Espectro de poder para las estaciones ACOLM1 y ACOLM2 que muestra un pico frecuencia en 0.49 Hz y un ancho espectral hasta los 4.23 Hz. Información adquirida por medio del software Swarm 3.0.1, propiedad del SGC – OVSM.

7.1.4 Registro Señales Infrasonido

El registro de señales infrasonido fueron en total 2968 para las tres estaciones infrasónicas, se destaca que ACOLM registró 1652 señales, ACINM 1020 y ACRUM 296. La estación ACOLM presenta el mejor registro de las tres estaciones, que al igual que las otras se compone de un sensor acústico Chaparral y otro Hakusan, esta es la estación más cercana al cráter activo del volcán, aproximadamente a 4 km en línea recta. Para el trabajo de Castaño *et al.* (2020) que trabajaron con los mismos sensores, en un tiempo diferente de la actividad del VNR, expresan que la estación ACOLM presenta el mejor registro debido a la cercanía a la fuente activa y por encontrarse en dirección principal a cuesta abajo del viento. Por otra parte, el registro más bajo lo presenta la estación ACRUM esto debido a que es la estación más lejana del cráter Arenas, aproximadamente a 6 km en línea recta, y su ubicación es al norte del cráter, localización que no es favorecida en la dirección principal del viento.

7.1.5 Señales Sísmicas

Cada señal infrasonido escogida se relacionó con un evento sísmico de fluidos de muy largo periodo (VLP), largo periodo (LP) y pulsos de tremor (TR), la mayoría registrado como señal múltiple LP/VLP + TR, se encontró que según la morfología de las formas de ondas se acomodan a los tres tipos de envolventes definidas por Serna y Castañeda (2021) donde establecen la envolvente 1 para un evento donde la energía del LP es mayor que la del TR, la envolvente 2 la energía del LP es aproximadamente igual al TR y la última para una señal donde la energía del LP es menor que la del TR, así como se muestra en la Figura 27, a la izquierda hay tres ejemplos de forma de onda del catálogo y a la derecha los tres tipos de envolventes.

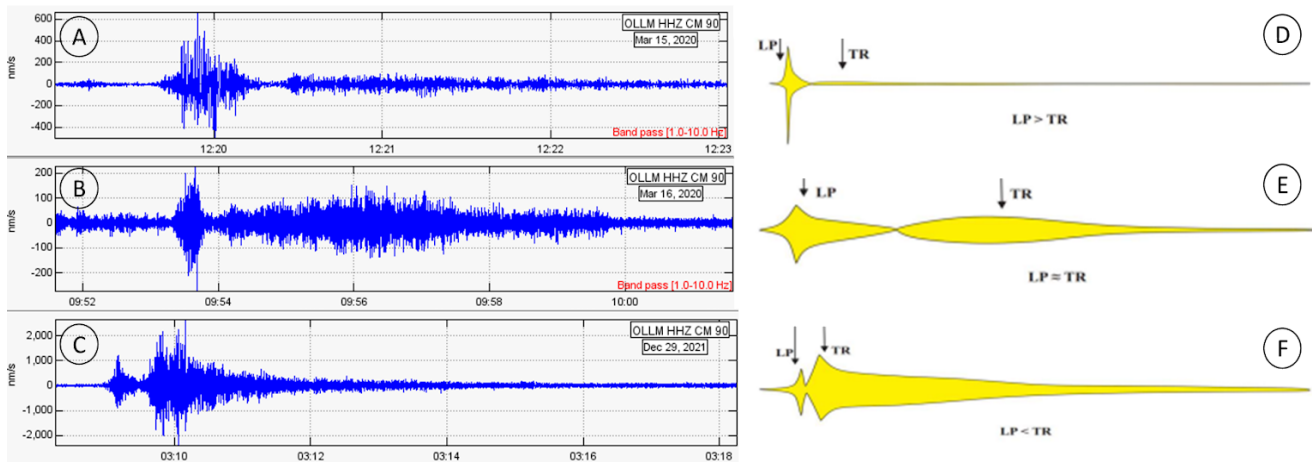


Figura 27. Forma de onda de señal sísmica y tipo de envolvente. (A) forma de onda para señal sísmica del 15/03/2020 07:19 COT, (B) forma de onda para señal sísmica del 16/03/2020 04:53 COT, (C) forma de onda para señal sísmica del 28/12/2020 22:09 COT, (D) envolvente según forma de onda $LP > TR$, (E) envolvente según forma de onda $LP \approx TR$ y (F) envolvente según forma de onda $LP < TR$. Tomado de Serna y Castañeda (2021).

7.1.6 Representación Gráfica

Los datos calculados se presentan gráficamente en las Figuras 28, 29 y 30, que representan la energía, PRed y PMax. De las tres gráficas se puede obtener y observar que el

año 2021 fue el que presentó mayor actividad en el infrasonido volcánico del VNR y el 2020 fue el año que menos hubo registro, destacando los meses de diciembre de 2020 a enero de 2021 donde no hay presencia de datos, para el mes de diciembre se presentaba problemas con la telemetría de las estaciones infrasónicas y para enero no hubo registro de infrasonido, pero si funcionaban las estaciones.

- **Energía**

La Figura 28 gráfica los datos de EAR en unidades de Megajulios (MJ), las señales infrasonido para este periodo de tiempo fueron mayores a 0.0 y menores a 19.9 MJ, sin embargo, para los tres años se observa que la mayoría de los datos se concentra entre 0.0 y 5.0 MJ, para el año 2020 la energía osciló entre 0.0 y 13.7 MJ, para el año 2021 entre 0.0 y 19.9 MJ y finalmente para el 2022 entre 0.0 y 17.3 MJ. En la actividad infrasónica del periodo de tiempo hay picos energéticos que sobresalen de la mayoría de los datos, por ejemplo, el pico del 6 de noviembre de 2021 con un valor de 19.9 MJ, estos picos no representan los valores normales de la EAR de la actividad infrasonido del VNR.

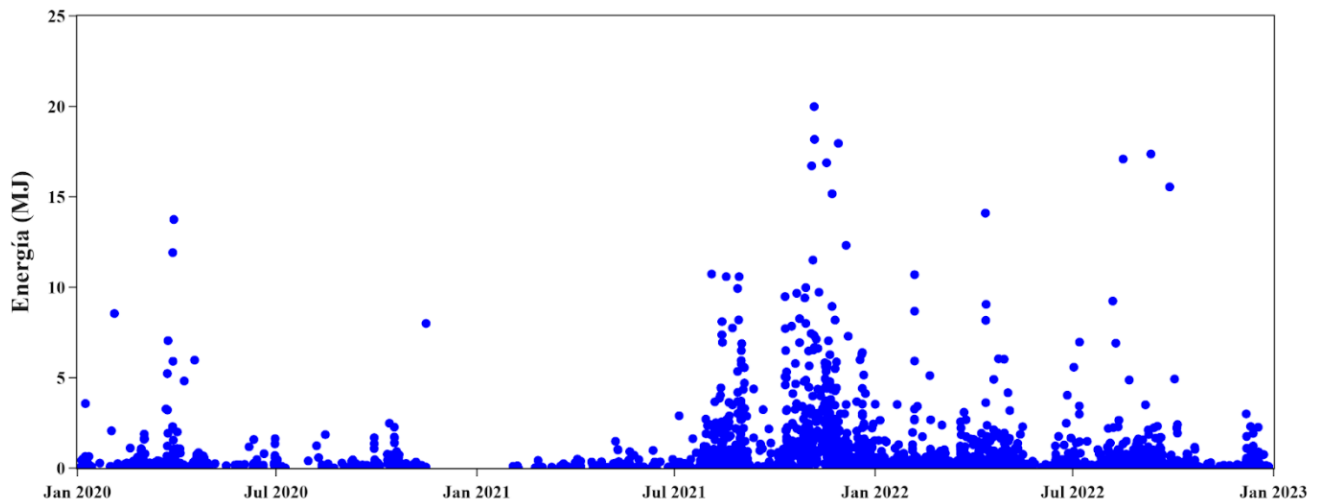


Figura 28. EAR (MJ) de infrasonido volcánico VNR para el periodo 2020 – 2022

- **Presión reducida**

La PRed graficada en la Figura 29 es una medida tomada en unidad Pascal (Pa) que mide el exceso de presión producida por una liberación de energía elástica a la atmósfera en forma de ondas acústicas a una distancia establecida a la fuente activa, para el VNR la distancia reducida establecida $r_0 = 1$ km. La PRed de la actividad infrasónica del periodo de tiempo escogido osciló entre 0.1 y 26.8 Pa. Para el año 2020 la PRed osciló entre 0.1 y 23.1 Pa, para el 2021 entre 0.1 y 24 Pa y finalmente para el 2022 entre 0.1 y 26.8 Pa. Al igual que la energía acústica, en la PRed se logra observar picos que sobresalen sobre todos los datos.

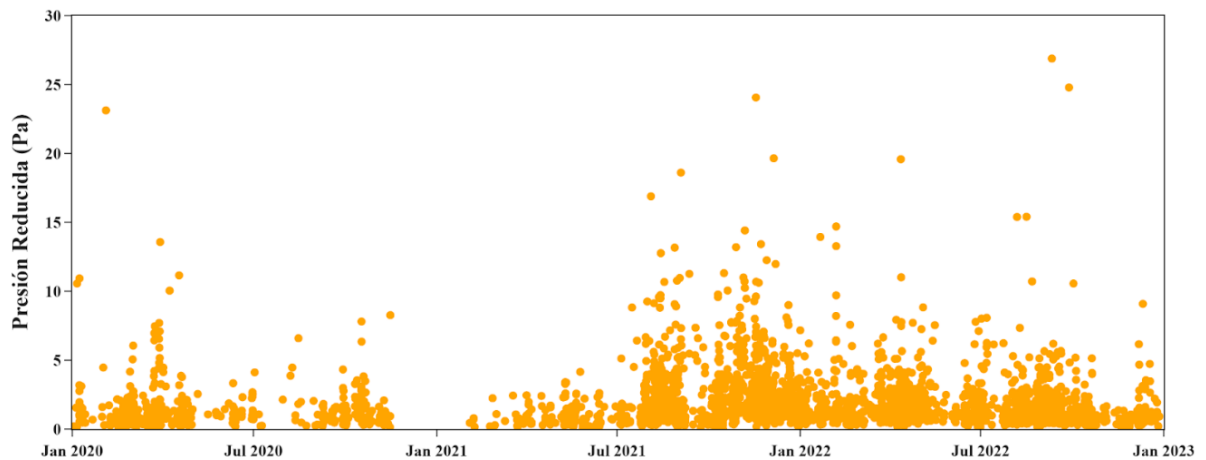


Figura 29. PRed (Pa) de infrasonido volcánico VNR para el periodo 2020 – 2022

La Figura 30 muestra los datos de presiones, se puede inferir que los datos de PMax son menor que los de PRed. En la Figura 31 se presenta la relación entre estas dos variables, determinando una correlación positiva en ambas, con mayor magnitud la PRed.

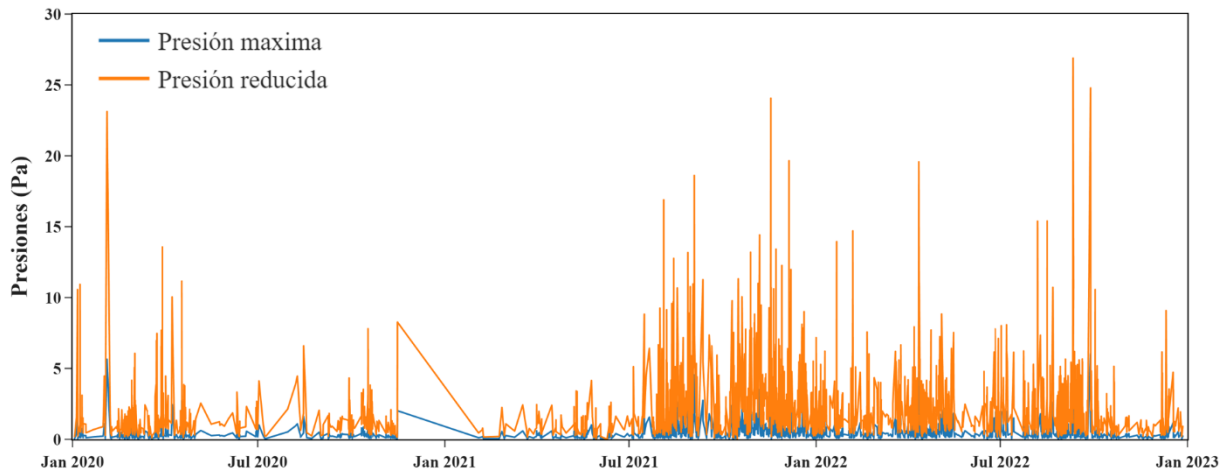


Figura 30. *PRed (Pa) y PMax (Pa) (líneas naranjas y azules respectivamente) de infrasonido volcánico VNR para el periodo 2020 – 2022.*

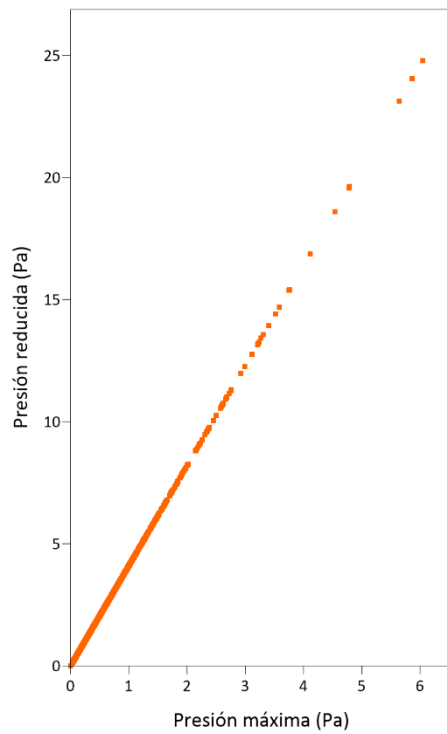


Figura 31. *Relación entre la PMax (Pa) y PRed (Pa).*

- **Relación presión reducida y energía acústica radiada**

La Figura 32 grafica la PRed y la EAR de todas las señales infrasonido y muestra una tendencia lineal creciente, se puede inferir que a medida que aumenta la energía, aumenta también la presión, sin embargo, la presión aumenta más que la energía, el recuadro resaltado en la gráfica representa la mayor densidad de señales infrasonido que se ubican en un rango de PRed entre 0 a 7 Pa y EAR de 0 a 4 Pa.

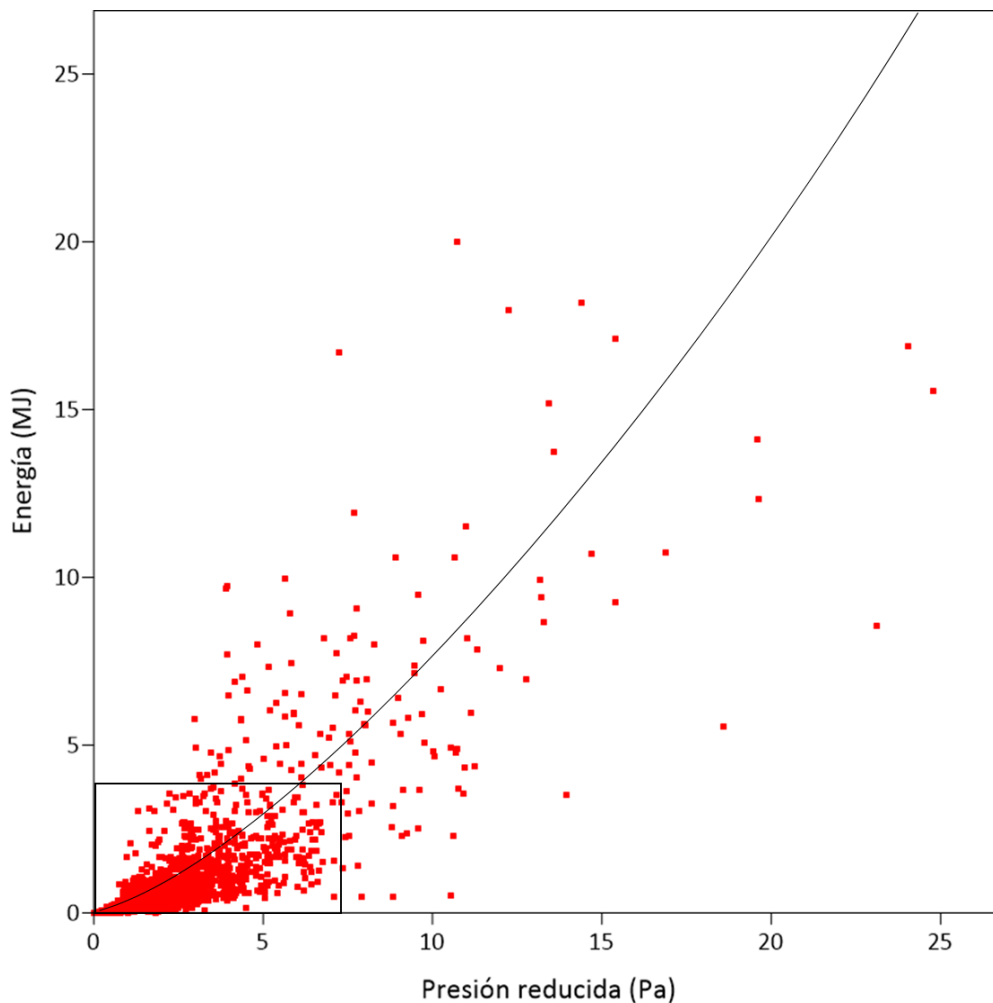


Figura 32. Relación entre la PRed (Pa) y la EAR (MJ).

- **Relación entre la presión reducida con desplazamiento reducido y energía sísmica radiada con altura de las columnas de gases**

En la Figura 33a se presenta la relación entre la PRed y el DR de 79 señales infrasonidos escogidas al azar con altura de las columnas de gases, se logra observar una leve tendencia lineal creciente entre los valores de ambos ejes, en general los valores de PRed oscilan entre 0 y 6 Pa y para el DR entre 0 y 8 cm². Respecto a la altura de la columna no se observa alguna tendencia, sin embargo, para valores bajo de DR entre 0 y 1 cm² y valores de presión entre 0 y 1.5 Pa no se presentan alturas de columnas > 600 m sobre la cima del volcán.

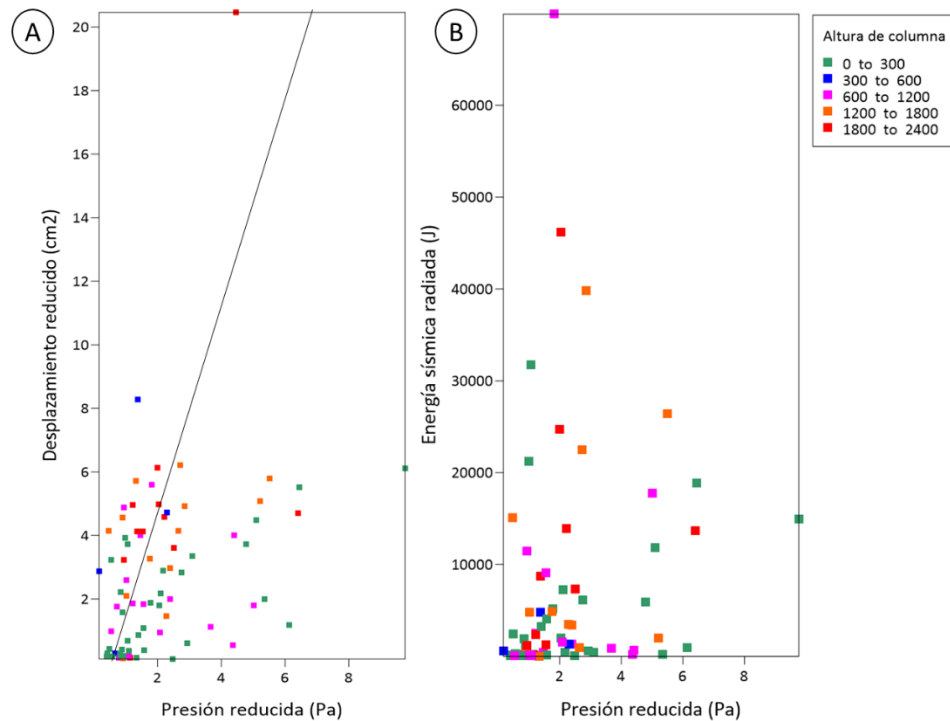


Figura 33. (A) Relación entre PRed (Pa) y DR (cm²) con respecto a las alturas de las columnas de gases. (B) relación entre PRed (Pa) y ESR (J) con respecto a las alturas de las columnas de gases.

En la Figura 33b se observa la relación entre la PRed y la ESR de 79 señales infrasonidos escogidas al azar con altura de las columnas de gases, se destaca que no se presenta alguna correlación entre los parámetros de ESR, PRed y altura de columna de gases, los datos por el contrario se presentan de forma independiente.

7.2 Cálculo de Parámetros Columnas Eruptivas

La base de datos sísmicos y atmosféricos creado por Londoño y Galvis (2018) para el trabajo “*Seismic Data, Photographic Images and Physical Modeling of Volcanic Plumes as a Tool for Monitoring the Activity of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia*” se adoptará al monitoreo multiparámetro del VNR que se lleva a cabo en el OVSM para el cálculo rápido de parámetros de las columnas eruptivas. En este trabajo se obtuvieron los parámetros descritos en la metodología para emisiones de ceniza del periodo entre el 2020 - 2022.

La interfaz de la base de datos se presenta en la Tabla 7 que muestra la información sísmica y atmosférica obtenida a manera de ejemplo, esta será usada para calcular todos los parámetros de las columnas eruptivas como flujo de masa de la pluma, flujo de ceniza, masa de la pluma, masa de ceniza, volumen de la pluma y volumen de ceniza; la información obtenida en este trabajo será utilizada por los creadores de la base de datos para el cálculo de estos parámetros y correlacionarse con la actividad del VNR.

Por ahora para este trabajo solamente se calculó un solo parámetro de estos, el volumen o carga de ceniza de las emisiones más representativas de los 3 años (las emisiones representativas se establecieron para emisiones de ceniza mayores o iguales a 2000 m), para el año 2020 y 2021 no se contó en su mayoría con emisiones de ceniza con estas características, mientras que para el año 2022, si, así que los datos graficados son para el año 2022, puesto que son muy pocos los datos de los otros años.

codigo fecha jul	fecha_jul	Fecha	SO2 (Ton/día)	SO2 (kg/día)	Altura Col. Correc. (km)	Vel viento promedio (m/s)	Vel viento (m/s) h=10km	Vel viento (m/s) h=7km	Vel viento (m/s) h=5.5km	Altura Col. (km)	Altura Col. Correc. (km)	Durac emis (s)	Tono_col umna	Dr OR (cm2)	Dr acum (cm2)	Durac/DR	Frecuencia (Hz)	Coda Tr (s)	Max. Amp (cm/s)
2020-01-04 10:17:26	04/ene/2020	04/ene/2020 10:17	5273	527254	0,70	20,67	9	31	22	0,348	0,70	51		0,3530769	0,35307692	143,623094			39
2020-01-04 17:31:21	04/ene/2020	04/ene/2020 17:31	5273	527254	0,94	20,67	9	31	22	0,472	0,94	228		0,3227273	0,6758042	707,284507			188
2020-01-06 14:42:27	06/ene/2020	06/ene/2020 10:17	3748	374787	1,00	18,00	25	11	18	0,5	1,00	222		1,0792308	1,75503497	205,729865			14
2020-01-06 15:59:38	06/ene/2020	06/ene/2020 15:59	3748	374787	0,45	18,00	25	11	18	0,2285	0,45	188		1,2630769	3,0181189	148,700365			36
2020-01-07 13:13:15	07/ene/2020	07/ene/2020 13:13	3920	392000	1,00	14,67	9	14	21	0,5	1,00	199		0,3046154	3,32272727	653,578283			61
2020-01-07 14:51:41	07/ene/2020	07/ene/2020 14:51	3920	392000	0,70	14,67	9	14	21	0,35	0,70	636		0,3727692	3,6954965	1706,57862			494
2020-01-07 16:43:09	07/ene/2020	07/ene/2020 16:43	3920	392000	0,70	14,67	9	14	21	0,35	0,70	45		0,3023077	3,9978042	148,854962			36
2020-01-07 17:23:00	07/ene/2020	07/ene/2020 17:23	3920	392000	1,10	14,67	9	14	21	0,55	1,10	415		0,3584615	4,35626573	1156,38627			360
2020-01-07 21:07:05	07/ene/2020	07/ene/2020 21:07	3920	392000	0,90	23,33	20	13	37	0,45	0,90	52		0,4823077	4,83857343	107,814992			21
2020-01-08 0:41:25	08/ene/2020	08/ene/2020 00:41	7114	711400	1,80	23,33	20	13	37	0,9	1,80	32		0,1253846	4,86395804	254,337423			33
2020-01-11 6:59:39	11/ene/2020	11/ene/2020 06:59	6334	633400	0,30	22,33	33	10	24	0,15	0,30	333		0,0907692	5,05472727	3667,10169			24
2020-01-11 8:13:55	11/ene/2020	11/ene/2020 08:13	6334	633400	0,30	22,33	33	10	24	0,15	0,30	368		0,0838462	5,13857343	4387,20183			27
2020-01-11 11:55:25	11/ene/2020	11/ene/2020 11:55	6334	633400	0,70	22,33	33	10	24	0,35	0,70	248		2,6561538	7,79472727	93,4019893			43
2020-01-15 9:04:46	15/ene/2020	15/ene/2020 09:04	2547	254700	1,80	27,33	47	24	11	0,9	1,80	285		0,0825	7,87722727	3214,54545			194
2020-01-19 13:58:02	19/ene/2020	19/ene/2020 13:58	5376	537600	0,71	16,67	33	10	7	0,357	0,71	514		1,3016395	9,17876573	394,363357			49
2020-01-20 14:30:12	20/ene/2020	20/ene/2020 05:49	1601,61	160161	1,00	14,67	22	15	7	0,5	1,00	417		1,5436384	10,7224021	270,94417			23
2020-01-20 8:26:00	20/ene/2020	20/ene/2020 08:26	1601,61	160161	1,10	14,67	22	15	7	0,55	1,10	456		0,1123077	10,6247098	4097,9589			647
2020-01-20 9:16:49	20/ene/2020	20/ene/2020 09:16	1601,61	160161	0,90	14,67	22	15	7	0,45	0,90	607		0,1369231	10,9716329	4435,39438			668
2020-01-20 10:29:08	20/ene/2020	20/ene/2020 10:29	3074,12	307412	0,80	14,67	22	15	7	0,402	0,80	229		0,1615385	11,131713	1415,45238			229
2020-01-21 8:05:26	21/ene/2020	21/ene/2020 08:05	1012,22	101222	1,23	18,00	35	6	13	0,616	1,23	242		0,1369231	11,2700944	1766,46629			611
2020-01-25 6:42:45	25/ene/2020	25/ene/2020 06:42	3074,12	307412	1,43	12,00	6	17	13	0,713	1,43	315		1,8338462	13,1039406	171,753775			58
2020-01-26 6:34:03	26/ene/2020	26/ene/2020 06:34	4329,26	432926	0,30	14,00	3	26	13	0,15	0,30	537		0,0507692	13,1547098	10569,7879			335
2020-01-26 7:28:34	26/ene/2020	26/ene/2020 07:28	4329,26	432926	0,63	14,00	3	26	13	0,165	0,63	329		0,1084615	13,2631713	3033,05674			46
2020-01-29 17:51:18	29/ene/2020	29/ene/2020 17:51	3279	327900	1,60	22,67	40	17	11	0,8	1,60	347		0,41	13,6731713	846			44

Tabla 7. Base de datos con los parámetros sísmicos, atmosféricos y altura de columnas para el periodo 2020 – 2022.

En la Figura 34 se presenta el gráfico en función del tiempo para el periodo 2022 que relaciona el volumen de ceniza acumulado con el DR y la ESR. De estas gráficas se puede obtener que un aproximado de carga o volumen de ceniza para el año 2022 se encuentra aproximadamente del orden de $4 \times 10^8 \text{ m}^3$ (por términos de confidencialidad no es posible dar un dato exacto) y se logra observar un incremento significativo en el volumen de ceniza entre los meses de febrero y junio de ese año.

Respecto a la relación entre el volumen de ceniza y el DR y la ESR se puede establecer una correlación positiva, a medida que aumente el acumulado de carga de ceniza, aumenta igualmente los dos parámetros.

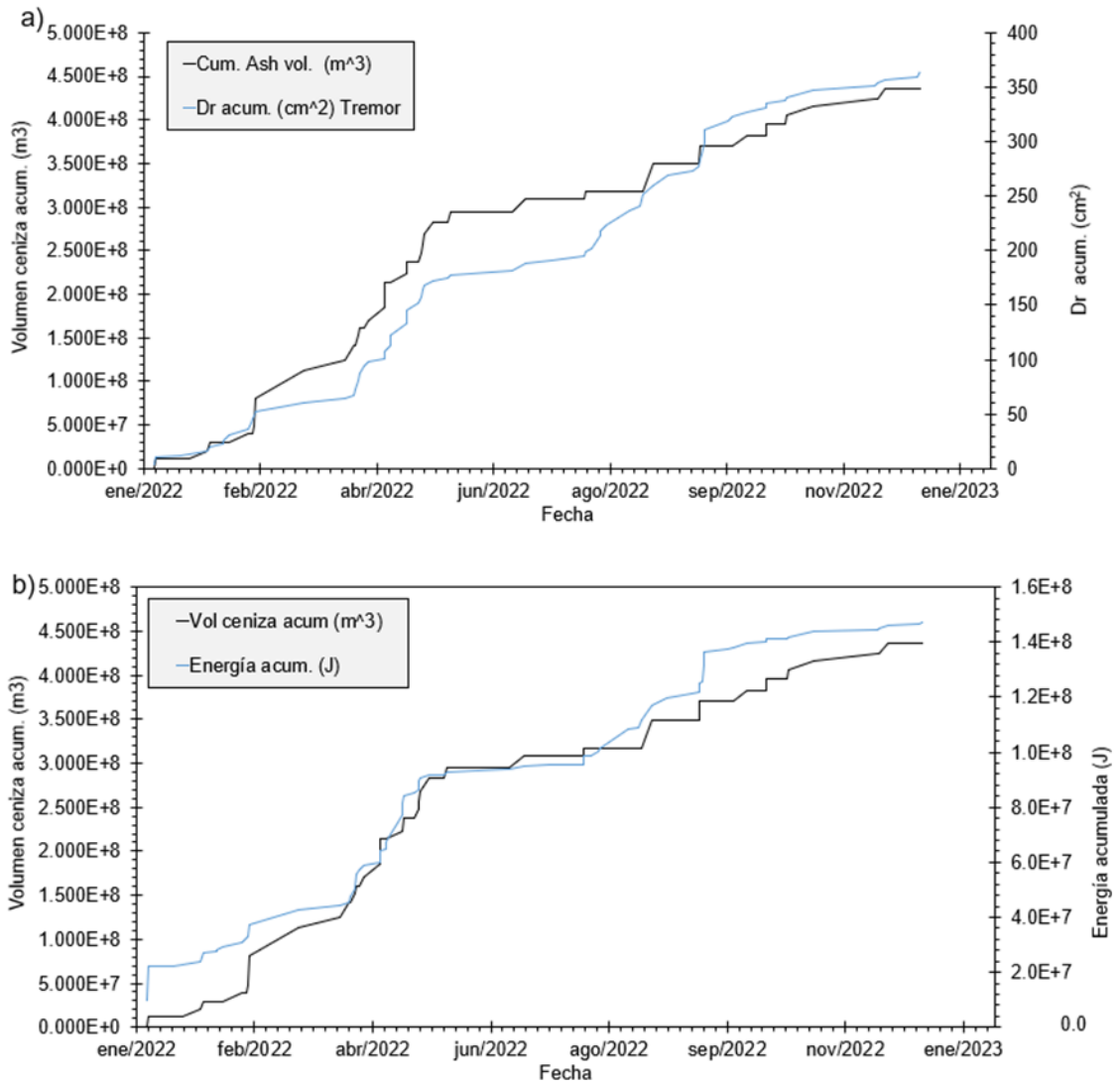


Figura 34. Gráfico en función del tiempo del 2022 que relaciona el volumen de ceniza acumulado de las emisiones de ceniza más representativas con (a) DR y (b) ESR.

8. Discusión

Por el registro de los infrasonidos es clara la ocurrencia de procesos asociados a movimiento y liberación de gases y partículas en el sistema hidrotermal del VNR con la alta actividad fumarólica que presenta permanentemente. En el monitoreo multiparámetro del VNR que se realiza en el OVSM es importante cuantificar la actividad superficial presentada por el volcán, que por condiciones atmosféricas no es posible confirmarlas la mayoría de veces. El infrasonido procesado en este trabajo del periodo 2020 – 2022 evidencia que hubo mayor actividad superficial de la cuantificada, en este periodo se identificaron 1498 emisiones de ceniza por observaciones directas o reportes de caída de material piroclástico y en el mismo periodo de tiempo se registraron 2968 señales infrasonido.

La actividad acústica de los estilos eruptivos vulcaniana y estromboliana tiene características similares y no hay una línea divisoria clara entre las dos, como se mostró en la Tabla 2. El VNR es caracterizado por tener actividad vulcaniana, sin embargo, según las señales registradas en el periodo estudiado podría presentar actividad vulcaniana/estromboliana, esto debido a que se presentan características acústicas de las dos, como es el registro de tremor infrasónico continuo que pueda deberse a la liberación de gas en la interfaz lava/aire (Ripepe *et al.*, 1996; Fee y Matoza, 2013) asociado a actividad estromboliana y señales de corta duración y posteriormente una atenuación característicos de actividad vulcaniana. Se destaca que los volcanes son sistemas dinámicos y pueden presentar cambios en sus procesos.

Johnson (2000) define que para actividad estromboliana/vulcaniana las erupciones más “ruidosas” o “grandes” no superan los 100 Pa a una distancia reducida de 1 km y se encuentran por debajo de esta. La PRed encontrada para estos tres años se concentra en una banda de

presión entre los 0.0 y 10 Pa, en Ospina (2019) los valores de PRed de infrasonido entre diciembre de 2016 y diciembre de 2018 en el VNR oscilaron entre 0.24 y 10.1 Pa con una distancia reducida de 1 km. Siendo el VNR un volcán con actividad superficial y caracterizado por presentar recurrentemente emisiones de ceniza a la atmosfera, estos valores de PRed se consideran muy bajos, así que se podría confirmarse en conjunto con otras técnicas si este puede presentar una actividad mucho mayor y seguir presentando valores normales según su estilo eruptivo.

Por encima del comportamiento de la mayoría de los datos hay presencia de infrasonido y se evidencia más a partir del año 2021 cuando aumenta la actividad acústica, se debe posiblemente a cambios significativos en la dinámica eruptiva, es posible que se esté presentando una sobrepresión del sistema por una mayor y rápida expansión de gases que se encuentran dentro de los conductos. Para noviembre de 2021 hay mayor ocurrencia de infrasonido que supera la PRed normal, durante este mes según informe técnico operativo del SGC se presentó un aumento en la energía sísmica asociada a la dinámica de fluidos como LP, VLP, TR y Tremor volcánico continuo (TC) que superan los umbrales normales de este, además aumentó la actividad fumarólica respecto a otros meses del año, con emisiones de ceniza cortas o constantes asociadas a aumento en la energía del TC con episodios tipo burst y espasmódicos de energía variables (Ramirez *et al.*, 2021).

El VNR presenta episodios de desgasificación y emisión de ceniza continúa asociado a registro de tremor volcánico continuo y tremor infrasónico continuo encontrado en el periodo de tiempo estudiado, esta señal acústica la define McNutt *et al.* (2015) y dice que su proceso de fuente puede estar asociado a cambios en la dinámica del sistema o un sistema abierto o “open vent” con desgasificación continua. Ripepe *et al.* (2010) definen la presencia de tremor infrasónico como una fuente de “ventilación abierta”, que puede estar estable o fluctuar en

intensidad y comparan los registros con la actividad sísmica, encontrando tremor volcánico en el momento, indican que esta correlación de las dos se traduce en un proceso sostenido o continuo relacionado a la dinámica de la columna de burbujas impulsada por la gravedad responsable de la convección del conducto.

Respecto a la relación de PRed y EAR la define Jonson (2000), por medio de una curva parabólica con una constante (k), a través de la siguiente ecuación:

$$E_A = kP_R^2$$

Donde la constante (k) depende de los datos particularmente, Johnson (2000) estudió tres erupciones en particular, la primera del volcán Erebus 1999, volcán Karymsky 1998 y por último Karymsky 1999, en la Figura 34 se puede observar la relación que encontró Johnson (2000) para estas tres erupciones respecto a la presión y energía acústica. Se destaca que los datos del presente trabajo pertenecen a 3 años de una erupción volcánica que se está presentando en el VNR y se ha presentado a lo largo del tiempo pulsos eruptivos de energía variable, la mayoría de los datos se ajustan a esta correlación comportándose de manera creciente con una curva parabólica (Figura 32).

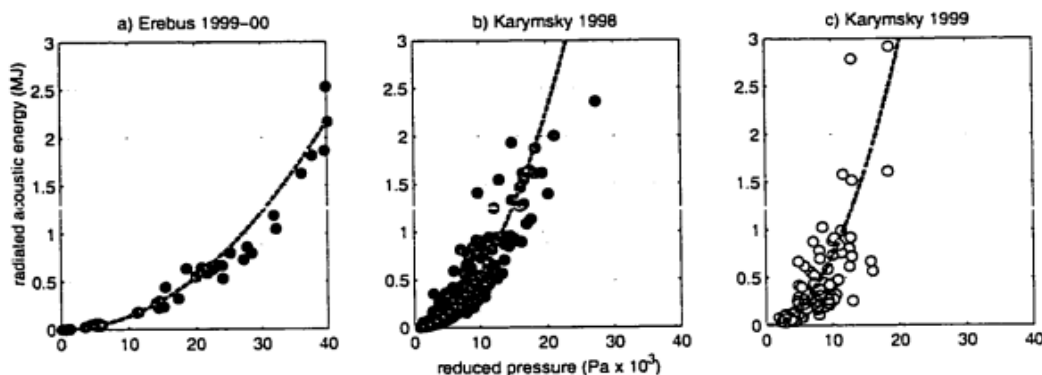


Figura 35. Relación de PRed y EAR para las erupciones del volcán Erebus (1999), Karymsky (1998) y Karymsky (1999). Tomado de Johnson (2000).

La relación entre la PRed y DR la define Aki y Koyanagi (1981) como análoga con una correlación positiva y utilizada para cuantificar la intensidad de una explosión, la relación entre estas puede cuantificar la eficiencia acústica mediante la siguiente ecuación, según Johnson (2000):

$$D_R = kP_R^2$$

Donde la constante (k) depende de los datos particularmente, en la Figura 35 se presenta la relación de estos dos parámetros para las erupciones trabajadas por Johnson (2000) y nombradas anteriormente. Se destaca que para el set de señales infrasonido escogidas para el periodo de tiempo estudiado no se observa una relación positiva completa entre las dos, sin embargo, es evidente una leve tendencia lineal creciente entre los dos parámetros, como se observa en la Figura 33a. Hay que tener en cuenta que posiblemente con una mayor densidad de datos se pueda observar una mejor correlación entre estas dos.

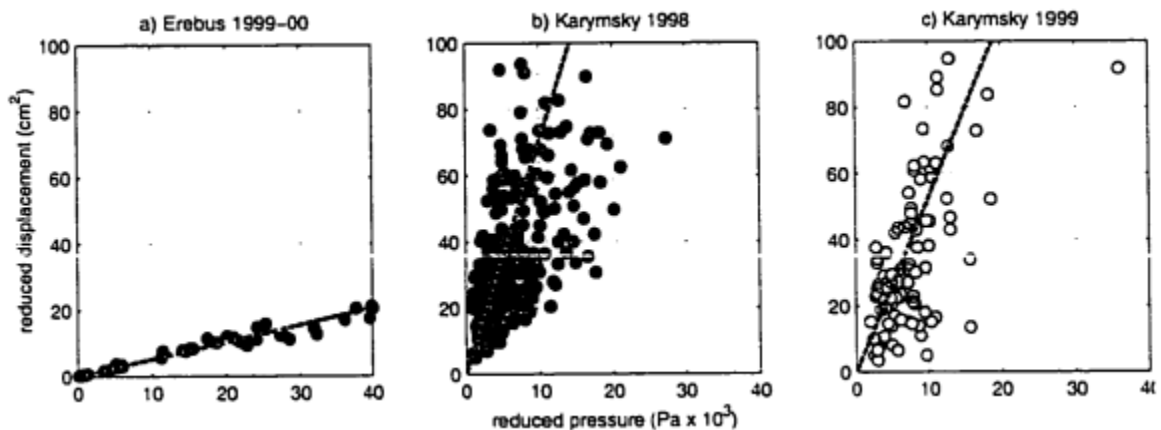


Figura 36. Relación de PRed y DR para las erupciones del volcán Erebus (1999), Karymsky (1998) y Karymsky (1999). Tomado de Johnson (2000).

El comportamiento de los datos de presión y energía son similares, sin embargo, estos dos no son iguales, la PRed que representa y sirve como indicador de exceso de presión cerca de la fuente explosiva para señales infrasonido donde el arribo impulsivo de la onda de presión

y posteriormente una rarefacción identificable, se puede definir por la siguiente fórmula según Johnson (2000), así

$$P_R = (P_{max})\left(\frac{r}{r_o}\right)$$

Donde P_{max} es la presión en la fuente, $\left(\frac{r}{r_o}\right)$ es la distancia radial, r es la distancia de la fuente a la estación infrasónica y r_o es la distancia reducida (distancia establecida para cada volcán), se puede deducir que la P_{max} medida en la fuente del infrasonido siempre es menor que la P_R que es la que se mide a una distancia del registro del infrasonido de la fuente, puesto que a 1 km de la fuente la presión será mucho mayor que a la distancia donde se encuentra el sensor infrasónico.

McNutt *et al.* (2013) estudiaron la erupción explosiva del volcán Redoubt en Alaska del 2009 con datos sísmicos locales y observaciones de infrasonidos, este volcán es uno de los que posee las presiones más altas que se conocen a nivel mundial hasta 250 Pa a 12 km de la fuente activa (Fee y Matoza, 2013) y establecen una relación entre los datos sísmicos e infrasónicos con otros parámetros como la altura de las columnas eruptivas y DR. Demuestran y explican una relación entre la presión de los infrasonidos con las alturas de las columnas, a medida que aumenta la presión, mayor va a ser la altura de las columnas y explican que para el volcán en estudio para presiones > 38 Pa la altura de las columnas > 10 km de altura.

Para observar el comportamiento de la presión de los infrasonidos del periodo de tiempo estudiado del VNR con las alturas de las plumas eruptivas en los tres años, se grafican en la Figura 36 para observar la serie de tiempo. De esta gráfica se puede obtener que hay una relación entre estos dos parámetros, la mayor densidad de puntos de columnas eruptivas

mayores a 2000 m se concentra en los años 2021 y 2022 cuando presentó mayor actividad los infrasonidos, comparado con el 2020 que corresponde al año que menos actividad tuvo con plumas eruptivas concentradas por debajo de los 2000 m. Así que esta relación comprobada por McNutt *et al.* (2013) se cumple para la serie de tiempo estudiada en el VNR.

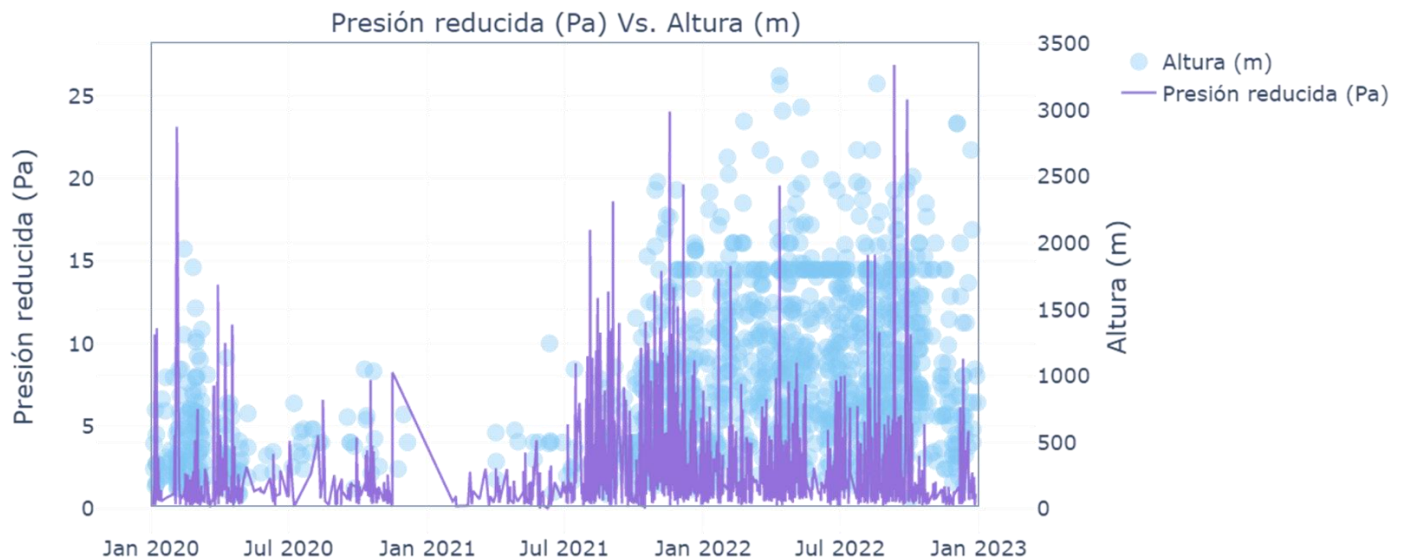


Figura 37. Gráfica que relaciona la serie de tiempo 2020 – 2022 y la PRed con la altura de las columnas eruptivas en el VNR del mismo periodo.

La correlación entre el infrasonido y la desgasificación de SO₂ en una erupción volcánica la establece Goitom *et al.* (2015) estudiando la erupción de 2011 del volcán Nabro en Eritrea, comparando datos de desgasificación, parámetros sísmicos e infrasónicos de este.

Demuestran y expresan que hay una leve correlación entre las tendencias temporales en la sismicidad registrada, la desgasificación y las señales infrasonido.

Para comprobar la relación entre el infrasonido y la desgasificación de SO₂ del VNR, se grafican los datos en la Figura 37, esta muestra las presiones reducidas del periodo de tiempo estudiado y los datos de desgasificación de SO₂ para el VNR. No se observa una relación clara

entre estos dos parámetros para esta serie de tiempo y los valores más altos de desgasificación se ubican donde menos hubo registro de infrasonido. Sin embargo, a partir del 2021 el comportamiento de los dos datos se comportan levemente de la misma manera. Así que la relación explicada por Gotiom *et al.* (2015) no se aplica para la serie de tiempo estudiado en el VNR.

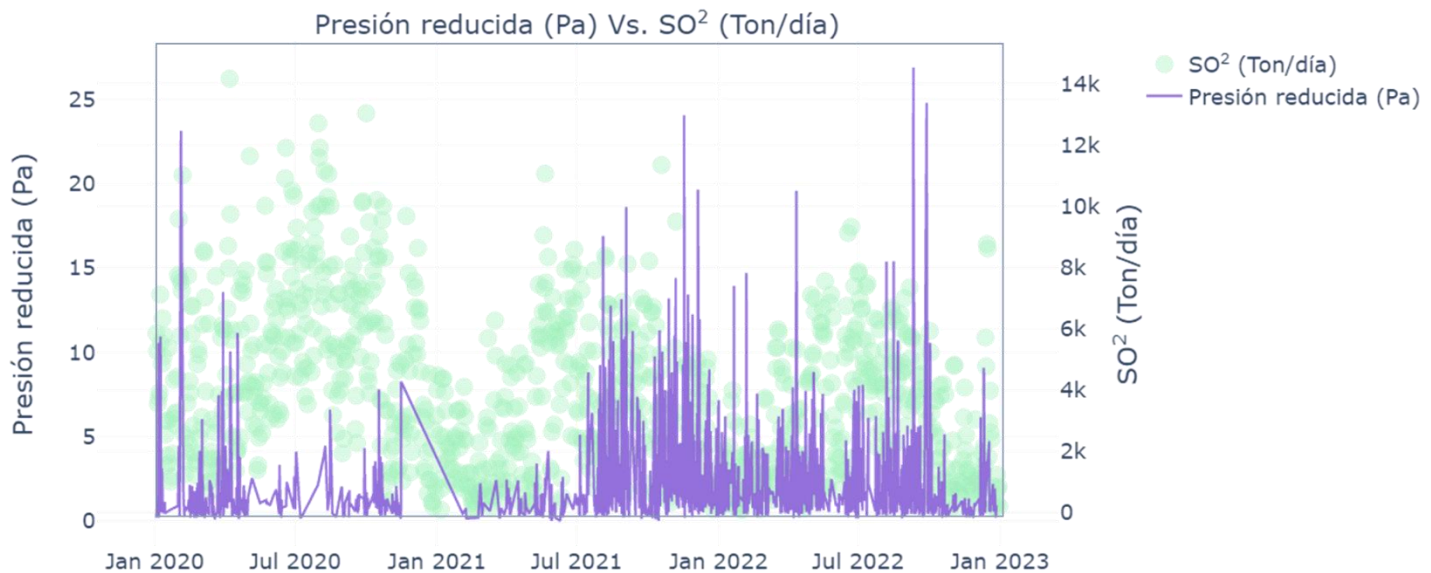


Figura 38. Gráfica que relaciona la serie de tiempo 2020 – 2022 y la PRed con parámetros de desgasificación en el VNR (Ton/día) del mismo periodo.

9. Conclusiones

El monitoreo de los volcanes activos continuo e integrado con diferentes técnicas aporta datos relevantes y más aquellos que registren información asociadas a procesos superficiales que sirvan para la evaluación de la amenaza y riesgo que representan para las comunidades que se ubican cerca de la estructura volcánica como es el VNR que actualmente es el volcán más inestable y presenta mayor actividad en la PVTSC.

El monitoreo acústico de baja frecuencia o infrasonido volcánico en los volcanes explosivos es una técnica valiosa para evaluar su actividad respecto a sus procesos y así mismo evaluar los peligros existentes ante actividad eruptiva y distinguir entre dinámica superficial y actividad más profunda. Algunas erupciones irradian mayor energía a la atmósfera que al suelo y es evidencia de movimiento de gases y partículas en los conductos, que perfectamente ayudará a reconstruir una historia de liberación de gases y material particulado en un cráter activo, como el cráter Arenas en el VNR.

En el monitoreo multiparámetro del VNR se hace uso del DR sísmico para describir la energía de un sismo asociado a movimiento de fluidos dentro de los conductos volcánicos, utilizando la mayor amplitud registrada. Aki y Koyanagi (1981) establecen que el DR y la PRed medida de los infrasonidos son análogas, porque las dos son el cálculo de la máxima amplitud medida a una distancia fija y miden la intensidad de una explosión. Así que la PRed medida a $r_0: 1 \text{ km}$ puede adoptarse en el monitoreo multiparámetro como herramienta para evaluar la actividad eruptiva del VNR.

Para el periodo de tiempo del procesado del infrasonido volcánico del VNR se evidencio una banda de PRed a una distancia reducida de 1 km donde la mayoría de los datos se

concentra entre 0 y 10 Pa, sin embargo, hay registro mayor a este con hasta alrededor de los 26 Pa. Teniendo en cuenta estos valores, aquellos obtenidos en otros años y el valor aproximado para volcanes con actividad estromboliana/vulcaniana, se puede establecer un umbral para cambios acústicos significativos en el VNR, con $P_R > 30 Pa$ a $r_0: 1 km$, teniendo en cuenta que la dinámica del volcán puede cambiar por sus procesos en el sistema magmático.

Las columnas eruptivas del periodo estudiado en el VNR se asocian a pulsos eruptivos principalmente de corta duración y el contenido mayor de material piroclástico es ceniza volcánica, el seguimiento de estas columnas es importante para reducir los riesgos volcánicos que afectan directamente a las comunidades y a la navegación aérea. Así que la metodología planteada por Londoño y Galvis (2018) y explicada en este trabajo que tiene en cuenta parámetros sísmicos, atmosféricos y alturas de columnas se adoptará al monitoreo multiparámetro del VNR para evaluar la actividad volcánica en tiempo real, anteriormente no se tenía establecido el cálculo de carga de ceniza en el monitoreo.

10. Recomendaciones

Los infrasonidos volcánicos son importantes en la evaluación del seguimiento de la dinámica de los volcanes y ubicación de fuentes superficiales. Por esta razón, se sugiere seguir utilizando esta técnica en el monitoreo volcánico y compartirla con el personal del OVSM, el modo de generación del infrasonido, las ventajas que tiene el uso de estos, los parámetros y cómo interpretarlos, para que de esta forma se junte correctamente con las demás técnicas y así evaluar en conjunto la actividad de los volcanes; además se aconseja estudiar los episodios de tremor de infrasonido continuo, puesto que se ha evidenciado el registro de este en el VNR y para el volcán la fuente acústica y procesos asociados a esos episodios no se encuentran definidos.

Aumentar la densidad de señales infrasonido con las respectivas señales sísmicas asociadas, para así observar mejor los patrones de relación entre parámetros como el DR, EAR, ESR, alturas de las columnas eruptivas y entre otros.

Alimentar constantemente la base de datos de infrasonido con la correspondiente señal sísmica con el propósito de comparar y definir patrones de correlación entre parámetros como el DR, EAR, ESR, alturas de las columnas eruptivas y entre otros.

La actual red de infrasonidos del VNR cumple las necesidades y los objetivos con los que se estableció, sin embargo, han nacido nuevas necesidades para que sean más efectivos, como la localización exacta de las señales infrasonido que se lograría reorganizando los pares de sensores, aumentando la distancia entre estos dos o implementar el monitoreo de lahares, avalanchas o flujos de escombros que pueden ser originados por actividad volcánica.

La base de datos de cálculo de parámetros de las columnas eruptivas se recomienda utilizarla diariamente en el monitoreo multiparámetro del VNR cuando se presenten pulsos eruptivos para así fortalecerla y crear una base más voluminosa para evaluar un periodo de tiempo más extenso.

11. Referencias

Aki, K., & Koyanagi, R. (1981). Deep volcanic tremor and magma ascent mechanism under Kilauea, Hawaii. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B8), 7095-7109.

Arrowsmith, S. J., Johnson, J. B., Drob, D. P., & Hedlin, M. A. (2010). The seismoacoustic wavefield: A new paradigm in studying geophysical phenomena. *Reviews of Geophysics*, 48(4).

Calvache V, M. L. (1990). Geology and volcanology of the recent evolution of Galeras volcano, Colombia (Master's thesis, Louisiana State University, Baton Rouge).

Castaño, L. M., Ospina, C. A., Cadena, O. E., Galvis-Arenas, B., Londoño, 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*, 72(1), 1-18.

Carazzo, G., Kaminski, E., & Tait, S. (2008). On the dynamics of volcanic columns: A comparison of field data with a new model of negatively buoyant jets. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(1), 94-103.

Chouet, B. A., Page, R. A., Stephens, C. D., Lahr, J. C., & Power, J. A. (1994). Precursory swarms of long-period events at Redoubt Volcano (1989–1990), Alaska: their origin and use as a forecasting tool. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62(1-4), 95-135.

Chouet, B. A. (1996). Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. *Nature*, 380(6572), 309-316.

De Angelis, S., Lamb, O. D., Lamur, A., Hornby, A. J., Aulock, F. W., von., Chigna, G., et al. (2016). Characterization of moderate ash-and-gas explosions at Santiaguito volcano, Guatemala, from infrasound waveform inversion and thermal infrared measurements. *Geophys. Res. Lett.* 43, 6220–6227. doi: 10.1002/2016GL069098

Degruyter, W., & Bonadonna, C. (2012). Improving on mass flow rate estimates of volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters*, 39(16).

Di-Parodi, J. C. M. (2002). Introducción a los Infrasonidos y su Recepción (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE).

Dibble, R. R. (1974). Volcanic seismology and accompanying activity of Ruapehu Volcano, New Zealand. In *Developments in solid earth geophysics* (Vol. 6, pp. 49-85). Elsevier.

Dürrig, T., Gudmundsson, M. T., Karmann, S., Zimanowski, B., Dellino, P., Rietze, M., & Büttner, R. (2015). Mass eruption rates in pulsating eruptions estimated from video analysis of the gas thrust-buoyancy transition—a case study of the 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland. *Earth, Planets and Space*, 67(1), 1-17.

Druitt, T. H., Young, S. R., Baptie, B., Bonadonna, C., Calder, E. S., Clarke, A. B., ... & Voight, B. (2002). Episodes of cyclic Vulcanian explosive activity with fountain collapse at Soufrière Hills Volcano, Montserrat.

Fee, D., Matoza, R.S. (2013). An overview of volcano infrasound: From Hawaiian to Plinian, local to global. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 249, 123–139.

Fee, D., Izbekov, P., Kim, K., Yokoo, A., Lopez, T., Prata, F., ... & Iguchi, M. (2017). Eruption mass estimation using infrasound waveform inversion and ash and gas measurements: Evaluation at Sakurajima Volcano, Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 480, 42-52.

Goitom, B., Oppenheimer, C., Hammond, J. O., Grandin, R., Barnie, T., Donovan, A., ... & Berhe, S. (2015). First recorded eruption of Nabro volcano, Eritrea, 2011. *Bulletin of Volcanology*, 77, 1-21.

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).

Johnson, J. B. (2000). Interpretation of infrasound generated by erupting volcanoes and seismic-acoustic energy partitioning during Strombolian explosions. University of Washington.

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.

Johnson, J.B. (2004). Source location variability and volcanic vent mapping with a small-aperture infrasound array at Stromboli volcano, Italy. *Bull. Volcanol.* 67 (1), 1–14.

Johnson, J. B., Aster, R. C., & Kyle, P. R. (2004). Volcanic eruptions observed with infrasound. *Geophysical Research Letters*, 31(14).

Johnson, J. B., & Ripepe, M. (2011). Volcano infrasound: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 206(3-4), 61-69.

Kaminski, E., Tait, S., Ferrucci, F., Martet, M., Hirn, B., & Husson, P. (2011). Estimation of ash injection in the atmosphere by basaltic volcanic plumes: The case of the Eyjafjallajökull 2010 eruption. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B9).

Londoño, J. M., and Sudo, Y. (2002). Velocity structure and a seismic model for Nevado del Ruiz Volcano (Colombia). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 119, 61–87. doi: 10.1016/S0377-0273(02)00306-2

Londoño, J. M. (2016). Evidence of recent deep magmatic activity at Cerro Bravo-Cerro Machín volcanic complex, central Colombia. Implications for future volcanic activity at Nevado del Ruiz, Cerro Machín and other volcanoes. *Journal of volcanology and Geothermal Research*, 324, 156-168.

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, 162.

Londoño, JM; Raigosa, J., Galvis, BE. (2020). Determinación del efecto de sitio de las estaciones sísmicas de banda ancha pertenecientes a la red de monitoreo del Volcán Nevado del Ruiz. Informe interno. Servicio Geológico Coombiano. 15 p.

Mastin, L. G., Guffanti, M., Servranckx, R., Webley, P., Barsotti, S., Dean, K., ... & Waythomas, C. F. (2009). A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of

volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186(1-2), 10-21.

Matoza, R.S., Garcés, M.A., Chouet, B.A., D'Auria, L., Hedlin, M.A.H., De Groot-Hedlin, C., Waite, G.P. (2009a). The source of infrasound associated with long-period events at Mount St. Helens. *Journal of Geophysical Research* 114, B04305.

Méndez, R.A., Patiño, J. de J. (1994). Estudio tefroestratigráfico de los volcanes del Complejo Machín - Cerro Bravo. Proyecto P93F02. Ingeominas, Informe interno, Manizales, 19p.

Méndez, R.A., Cortés, G.P., Cepeda, H. (2002). Evaluación de la Amenaza Potencial del volcán Cerro Machín. Memoria Explicativa INGEOMINAS (10 pp.).

Martínez, L., Valencia R., Ceballos, J., Narváez, L., Pulgarín, B., Correa, A., Navarro, S., Murcia, H., Zuluaga, I., Rueda, G. & Pardo, N. (2014). Geología y estratigrafía del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz. Informe final, Bogotá – Manizales – Popayán. Servicio Geológico Colombiano. 853 pp.

McNutt, S. R., Thompson, G., Johnson, J., De Angelis, S., & Fee, D. (2015). Seismic and infrasonic monitoring. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 1071-1099). Academic Press.

Nakano, M., Kumagai, H., & Chouet, B. A. (2003). Source mechanism of long-period events at Kusatsu–Shirane Volcano, Japan, inferred from waveform inversion of the effective excitation functions. *Journal of volcanology and geothermal research*, 122(3-4), 149-164.

Ohminato, T. (2006). Characteristics and source modeling of broadband seismic signals associated with the hydrothermal system at Satsuma–Iwojima volcano, Japan. *Journal of volcanology and geothermal research*, 158(3-4), 467-490.

Ospina, C. A & Galvis, B. (2022). Monitoreo volcánico a través de infrasonidos en volcanes de Colombia. IX Foro Internacional de Peligros Volcánicos “Volcanes y Sociedad: Riesgo y prevención”. Arequipa, Perú.

Ospina, C. A. (2019). Monitoreo volcánico con infrasonido – Metodología SGC. Popayán: Servicio Geológico Colombiano.

Ramírez, J., Álvarez, C.P., Idárraga, J.J., Peña, J., Ordoñez, M., Méndez, R., & Vega, C.A. (2021). Informe técnico – operativo de la actividad volcánica, Segmento Volcánico Norte de Colombia – noviembre de 2021. Manizales, Servicio Geológico Colombiano.

Ripepe, M., Poggi, P., Braun, T., & Gordeev, E. (1996). Infrasonic waves and volcanic tremor at Stromboli. *Geophysical research letters*, 23(2), 181-184.

Ripepe, M., Marchetti, E., Bonadonna, C., Harris, A. J. L., Pioli, L., & Ulivieri, G. (2010). Monochromatic infrasonic tremor driven by persistent degassing and convection at Villarrica Volcano, Chile. *Geophysical research letters*, 37(15).

Ripepe, M., Bonadonna, C., Folch, A., Delle Donne, D., Lacanna, G., Marchetti, E., & Höskuldsson, A. (2013). Ash-plume dynamics and eruption source parameters by infrasound and thermal imagery: The 2010 Eyjafjallajökull eruption. *Earth and Planetary Science Letters*, 366, 112-121.

Serna López, J y Castañeda Castaño, J. (2021). Caracterización de señales sísmicas asociadas a pulsos de tremor volcánico, precedidos por eventos de largo período, provenientes del Volcán Nevado del Ruíz en el período 2018 - 2020.

Simkin, T., & Fiske, R. S. (1983). Krakatau 1883. Earthquake Information Bulletin (USGS), 15(4), 128-133.

Sparks, R. (1986). The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns. Bulletin of Volcanology, 48, 3-15.

Waite, G. P., Chouet, B. A., & Dawson, P. B. (2008). Eruption dynamics at Mount St. Helens imaged from broadband seismic waveforms: Interaction of the shallow magmatic and hydrothermal systems. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 113(B2).

Witsil, A. J., & Johnson, J. B. (2020). Analyzing continuous infrasound from Stromboli volcano, Italy using unsupervised machine learning. Computers & Geosciences, 140, 104494.

Woodhouse, M. J., Hogg, A. J., Phillips, J. C., & Sparks, R. S. J. (2013). Interaction between volcanic plumes and wind during the 2010 Eyjafjallajökull eruption, Iceland. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(1), 92-109.