

**IMPLEMENTACION DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA LOCALIZACIÓN DE
EVENTOS VOLCÁNICOS A PARTIR DEL ANALISIS DE SEÑALES INFRASÓNICAS
REGISTRADAS POR LOS OBSERVATORIOS VULCANOLÓGICOS Y SISMOLÓGICOS DE
COLOMBIA.**



JOSÉ SEBASTIÁN OJEDA OSORIO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POPAYÁN
2023

**IMPLEMENTACION DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA LOCALIZACIÓN DE
EVENTOS VOLCÁNICOS A PARTIR DEL ANALISIS DE SEÑALES INFRASÓNICAS
REGISTRADAS POR LOS OBSERVATORIOS VULCANOLÓGICOS Y SISMOLÓGICOS DE
COLOMBIA.**

José Sebastián Ojeda Osorio

**Trabajo de grado en modalidad de práctica presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Físico.**

Director

Dr. Diego Fernando Coral Coral

Departamento de Física

Codirector

Ing. Carlos Alberto Ospina Caicedo

Servicio Geológico Colombiano

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

POPAYÁN

2023

Nota de aceptación

Dr. Diego Fernando Coral Coral
Director

Jurado

Jurado

Popayán, de noviembre de 2023

Dedicatoria

Este trabajo es dedicado principalmente a mi familia. A mi mamá, Liliana, mi papá, José y mi hermano, Alejo, por sus palabras de aliento, su constante apoyo y toda la confianza e incondicionalidad durante cada etapa de este proceso.

José Sebastian Ojeda Osorio.

Agradecimientos

A Dios y a la Virgen María, por su constante compañía y ayuda, especialmente en los momentos de angustia e incertidumbre.

A mi familia, a quienes expreso mi infinita gratitud por su apoyo inquebrantable y generosidad a lo largo del tiempo.

Al Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán, por abrirme sus puertas, acogerme y brindarme la oportunidad para realizar este trabajo.

Al Dr. Diego Fernando Coral y al Ing. Carlos Alberto Ospina, quienes no solo depositaron su confianza en mí, sino que también me brindaron su ayuda incondicional y compartieron valiosos conocimientos para mi desarrollo personal y profesional.

A las mejores amigas y compañeras: Luisa Muñoz, María Mercedes y Sofía Muñoz, por acompañarme a lo largo de la carrera, por sus consejos, risas y buenos momentos.

Por último, me permito reconocer y agradecer mi propia dedicación y disciplina para enfrentar cada desafío con determinación.

1 Tabla de contenido

2	Introducción	17
3	Objetivos	19
3.1	Objetivo General.	19
3.2	Objetivos Específicos.	19
4	Antecedentes	21
5	Marco Teórico	25
5.1	Monitoreo volcánico	25
5.2	Señales de Infrasonido	26
5.3	Tipos de Fuentes	28
5.3.1	Fuentes Naturales de Infrasonido	28
5.3.2	Fuentes Artificiales de Infrasonido	28
5.4	Medio de Propagación y Trayectoria	29
5.4.1	Atmosfera	29
5.5	Velocidad del sonido	31
5.6	Método de detección.	32
5.7	Viento y longitud de correlación	32
5.8	Señal residual o retraso	32
5.9	Base teórica de correlación cruzada implementada	33
5.10	Correlogramas	36
5.11	Arreglo y disposición de los sensores	37
5.12	Instalación de las estaciones	37
5.13	Instrumentación y equipos	39
5.13.1	Hakusan Corporation, modelo Hakusan SI104:	39
5.13.2	Chaparral Model 60 Vx Infrasound Sensor:	39
5.13.3	Hyperion Technology Group, Hyperion 511/A infrasound Sensor:	40
5.13.4	InfraBSU, InfraBSU sensors	41
5.13.5	Martec, MB2005	41

5.14	Software usado.....	42
5.15	Técnicas de localización	42
5.15.1	Técnicas geométricas	42
6	Metodología implementada en el proceso de localización.....	47
6.1	Datos obtenidos por el software VolcanStudio.....	47
6.2	Implementación del sistema de triangulación multi estación	48
6.3	Cuadrantes y condicionales.....	49
6.3.1	Pendiente Positiva – Positiva.....	50
6.3.2	Pendiente Positiva – Negativa.....	50
6.3.3	Pendiente Negativa – Positiva.....	50
6.3.4	Pendiente Negativa – Positiva.....	51
6.4	Superposición de áreas y formación de polígono principal.	51
7	Resultados.....	53
7.1	Análisis exploratorio de datos y consideraciones de preprocesamiento.....	53
7.2	Herramienta Software.....	53
7.3	Flujo del programa	59
7.4	Registros localizados	62
7.5	Validación del software	64
8	Alcances y limitaciones	68
9	Recomendaciones	69
10	Conclusiones	71
11	Referencias	74

Resumen

El desarrollo de herramientas en el monitoreo volcánico es uno de los principales retos que existen para los investigadores, geólogos y geofísicos. Las técnicas que se utilizan para detectar y caracterizar el comportamiento interno de un volcán permiten obtener información sobre su actividad y posible riesgo para las comunidades. Una de las técnicas utilizadas para esta tarea es el seguimiento de la actividad infrasónica volcánica; teniendo en cuenta que los volcanes producen una serie de fenómenos que emiten señales de infrasonido como los ocurridos durante las erupciones, ocasionando: explosiones, columnas eruptivas, flujos de lodo, lahares y salida de gases.

Existen diferentes métodos para detectar las señales infrasónicas, y para cada uno se deben tener en cuenta consideraciones específicas que permitan el desarrollo de la técnica. En el Servicio Geológico Colombiano, se desarrolló un software que, mediante el uso de la función de correlación cruzada entre un par de sensores acústicos, permite detectar las señales de infrasonido producidas por los volcanes, generando un correlograma donde se pueden visualizar los eventos detectados. Así mismo, el software permite calcular parámetros asociados con este tipo de ondas como los azimuts o ángulos de incidencia de la fuente emisora y sus incertidumbres.

En este trabajo se analizaron los ángulos de incidencia para implementar una técnica de localización de los eventos mediante el desarrollo de una herramienta software que permita automatizar el proceso que determina la ubicación del evento. Sin embargo, muchos de estos datos se pueden ver afectados porque las ondas de infrasonido son perturbadas por factores ambientales, como los fuertes vientos, las variaciones de los gradientes de temperatura en el medio y la dependencia de la dinámica atmosférica, afectando la trayectoria de las ondas. Otro factor que considerar son los fenómenos antrópicos que pueden ser capturados por los sensores y catalogados como una detección de un evento volcánico. Además, se deben tener en cuenta las incertidumbres de estos ángulos ya que los arreglos infrasónicos con distancias de separación cortas entre los sensores ocasionan que el retardo sea cercano a cero, lo cual implica una mayor incertidumbre en el cálculo de los datos. Para encontrar la ubicación de las fuentes, se utilizan técnicas como búsqueda en cuadrícula, técnicas basadas en redes, localización inversa, modelos de tiempo inverso, entre otras. En este sistema, la metodología de localización se basó en la triangulación de los ángulos inversos (*back azimuth*) y el cálculo del área formada por los interceptos entre los ángulos inversos proyectados, utilizando técnicas como la localización multi estación, la posición media ponderada y el tiempo de diferencia de arribo (TDOA).

Implementar estas técnicas permitió obtener las posiciones aproximadas de los eventos infrasónicos detectados por el software, y retornar la información calculada a la base de datos principal donde se muestran parámetros como: el punto de localización final, el polígono formado por los interceptos de los rayos proyectados, el centroide del polígono, las estaciones identificadas y a que volcán corresponden.

Palabras clave: Infrasonido volcánico, correlación cruzada, triangulación, time delay estimation, weighted average location.

Abstract

The development of tools in volcanic monitoring is one of the main challenges for researchers, geologists, and geophysicists. The techniques used to detect and characterize the internal behavior of a volcano provide detailed information about its activity and potential risks to communities. One technique employed for this task is monitoring volcanic infrasound activity; considering that volcanoes produce various phenomena emitting infrasound signals during events such as eruptions, causing explosions, eruptive columns, mudflows, lahars, and gas emissions.

Different methods exist for detecting infrasound signals, each requiring specific considerations for technique development. At the Colombian Geological Service, software was developed using cross-correlation functions between pairs of acoustic sensors to detect volcanic infrasound signals, generating a correlogram to visualize detected events. Additionally, the software calculates parameters associated with these waves, such as azimuths or angles of incidence of the emitting source and their uncertainties.

In this study, these angles were analyzed to implement a technique for event localization through the development of software tools automating the event location determination process. However, many of these data can be affected because infrasound waves are disturbed by environmental factors such as strong winds, temperature gradient variations, and atmospheric dynamics, affecting wave trajectories. Another factor to consider is anthropogenic phenomena that may be captured by sensors and classified as an event detection. Furthermore, uncertainties in these angles must be considered since infrasonic arrays with short sensor separations result in delays close to zero, implying greater uncertainty in data calculation. Therefore, the localization methodology was based on triangulating reverse azimuth angles and calculating the area formed by the intersections between the projected reverse angles, using techniques such as multi-station localization, weighted average position, and time difference of arrival (TDOA).

The implementation of these techniques allowed obtaining approximate positions of infrasound events detected by the software and returning the calculated information to the main database, displaying parameters such as the final location point, the polygon formed by intersections of projected rays, the centroid of the polygon, identified stations, and the corresponding volcano.

Keywords: Volcanic infrasound, cross-correlation, triangulation, time delay estimation, weighted average location.

2 Introducción

En los últimos años, el monitoreo volcánico mediante infrasonidos ha cobrado vital importancia para recopilar información acerca de los procesos volcánicos explosivos desde distancias cortas a distancias de miles de kilómetros [1], [6]. En consecuencia, y con el continuo desarrollo e investigación de estas técnicas, se adquirieron nuevos conocimientos sobre la actividad volcánica, así como algunas consideraciones con respecto a las distancias de propagación de las ondas, los tipos de arreglos o redes infrasónicas utilizadas para detectar las señales y las técnicas de procesamiento de datos [2],

[3]. Por ejemplo, cuando la onda acústica se propaga a distancias cortas, se considera una atmósfera casi homogénea, permitiendo despreocuparse los efectos por dispersión, atenuación o reflejo de las ondas [4]. Este método de detección se conoce como monitoreo local [5]. Ahora, cuando la onda se propaga a largas distancias atravesando atmósferas no homogéneas, el análisis cuantitativo de los parámetros eruptivos calculados se ve afectado por los efectos de propagación y el aumento de la relación señal ruido (SNR) [6][6][6][6][6]. La investigación realizada en este documento utiliza el método de monitoreo local debido a sus ventajas en la detección de la señal, siendo más representativa en las cercanías de la fuente.

Actualmente en Colombia, se monitorean 25 estructuras volcánicas que tienen la potencialidad de erupcionar en un futuro [8]. Este monitoreo está a cargo del Servicio Geológico Colombiano (SGC), donde se utiliza métodos para detectar, localizar y caracterizar la actividad volcánica y sísmica de estas estructuras geológicas, y para ello, han desarrollado e implementado técnicas y estrategias que permiten informar y alertar sobre las amenazas y riesgos geológicos que pueden afectar las comunidades, determinando así, el nivel de actividad de un volcán según su comportamiento: verde, si es activo en reposo, amarillo, volcán activo con cambios en el comportamiento del nivel base de los parámetros monitoreados y otras manifestaciones, naranja, cuando hay cambios importantes en los parámetros monitoreados y rojo, cuando el volcán está en erupción [47]. El S.G.C utiliza técnicas de monitoreo que permiten la recopilación de datos sísmicos, deformación, cámaras, infrasonidos, imágenes satelitales, entre otros.

La ubicación de las fuentes infrasónicas se puede estimar a través de diferentes metodologías mediante procedimientos de búsqueda en cuadrícula [4] o el despliegue de una amplia red de sensores cerca y alrededor de la fuente Ripepe, M., Marchetti, E., & Ulivieri, G. (2007). Infrasonic monitoring at Stromboli volcano during the 2003 effusive eruption: Insights on the explosive and degassing process of an open conduit system. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2006JB004613>

[37]. Este proyecto implementó una técnica que permite localizar la fuente de un evento volcánico, a partir de las señales infrasónicas emitidas por un volcán. Aunque el desarrollo de este trabajo esperaba abarcar el total de los volcanes en Colombia, muchos de ellos no cuentan con la instrumentación necesaria para aplicar

ciertas técnicas. Por lo cual, el estudio principal se enfoca en el volcán Nevado del Ruíz, ubicado en la Cordillera Central Colombiana con coordenadas $4^{\circ}53'N$, $75^{\circ}19'W$ y una altitud de 5321 *m. s. n. m* [7], en los departamentos del Tolima y Caldas a unos 140 km de Bogotá.

El estudio del infrasonido volcánico está asociado a las explosiones generadas por la expansión rápida de gases y volátiles, a partir de los cuales se puede detectar, localizar y cuantificar la actividad volcánica[10]. Estas ondas infrasónicas son capturadas por micrófonos acústicos que registran las frecuencias menores a 20 Hz y brindan información sobre los fenómenos que salen a la superficie del volcán. Así mismo, para realizar el proceso de localización, es necesario identificar, procesar y caracterizar las señales; este sistema de captura y procesamiento utiliza técnicas como la función de correlación cruzada (CC) entre un par de sensores acústicos, la generación de correlogramas y la estimación del tiempo de retardo (*time delay estimation*).

El proceso de localización se basó en la triangulación del ángulo inverso conocido como *back azimuth*, para los cuales se calcularon los interceptos que forman el área donde se localiza el evento volcánico; además, se aplicaron técnicas como: tiempo de diferencia de arribo (TDOA), localización multi estación y la ubicación promedio ponderada (*weighted average location*). El sistema que permite determinar la ubicación del evento fue implementado en una herramienta computacional que permite agilizar y procesar en tiempo real la información capturada y retornarla a una base de datos, donde se lleva un control de los parámetros calculados.

En este documento se detalla el proceso de localización de los eventos volcánicos mediante el análisis de las señales infrasónicas. Sin embargo, para una mejor comprensión del desarrollo de este trabajo, en las siguientes secciones, empezando por el marco teórico, se encuentran los fundamentos, términos, principios y consideraciones sobre el infrasonido; como se capturan y detectan estas señales, así como los arreglos de sensores utilizados y el software desarrollado por el S.G.C. En la metodología, se profundiza en las técnicas y principios matemáticos utilizados para localizar las fuentes de los eventos detectados. Luego, se analizan y muestran los resultados obtenidos con la implementación del software de localización, las limitaciones y consideraciones que se deben tener en cuenta para abordar la formación de interceptos y la aplicación de las técnicas mencionadas en la metodología. Finalmente, se presentan las conclusiones y referencias utilizadas para el desarrollo de este trabajo.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General.

Implementar una herramienta software para la localización de señales de infrasonido volcánico.

3.2 Objetivos Específicos.

- Consolidar la base de datos de las señales infrasónicas.
- Procesar los datos y estructurar una técnica que permita localizar las fuentes de señales infrasónicas.
- Diseñar, desarrollar e implementar un software que localiza las señales infrasónicas
- Validar el software.

4 Antecedentes

En Colombia, el S.G.C es la entidad encargada de los estudios y recopilación de información proveniente de la actividad volcánica; para esto, cuenta con tres Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos (O.V.S) con sedes ubicadas en Pasto, Popayán y Manizales. El desarrollo de esta práctica está fundamentado en la metodología de detección de las señales infrasónicas por parte del personal del S.G.C, que se basa en capturar las señales infrasónicas originadas por un evento volcánico.

A partir de la detección del evento se puede obtener información relevante que permite determinar la zona específica donde se produjo. Para esto, se desarrolló el programa “volcanstudio-realtime” encargado de la recopilación e identificación de las señales infrasónicas emitidas por un volcán. El software procesa los datos de pares de sensores acústicos o sismo-acústicos y encuentra la correlación de las señales para identificar cuando se captura un evento infrasónico. Debido a que el programa aún se encuentra en etapas de desarrollo, se identificó la oportunidad de desarrollar e implementar nuevas técnicas que permitan fortalecer el programa con un sistema de localización de las señales de infrasonido detectadas.

Estos sistemas de identificación y localización se apoyan en los estudios realizados por los Observatorios y los estudios de algunos investigadores en el ámbito intencional que se mencionaran a continuación:

- Se expone la metodología, técnicas, documentación y modelos que se pueden seguir para realizar el monitoreo volcánico mediante infrasonido.

El autor de este documento aborda desde los conceptos básicos como las fuentes, medio y trayectorias, hasta la correlación y retraso de las señales; estos conceptos son indispensables para abordar la metodología que expone más adelante y permite comprender cómo se realiza el proceso. Por último, explica acerca del software desarrollado para las funciones de monitoreo y mejoras que se pueden implementar en el programa

[3].

- Esta investigación abarca desde el proceso de detección y configuración del arreglo hasta el desarrollo de un algoritmo para localizar las fuentes de infrasonido volcánico. Para la etapa de detección utilizaron un conjunto de tres micrófonos y aplicaron CC mediante una rutina que compara las trazas infrasónicas para identificar los tiempos de retardo asociados a los valores máximos de correlación. Respecto a la localización de la fuente, realizaron la modelización directa de la llegada de infrasonidos para distinguir las diferentes aperturas de la fuente, es decir, asignan las ubicaciones conocidas de las aperturas y los cráteres en términos de los tiempos de arribo para los tres micrófonos Fee, D., y Matoza, R. S. (2013). An overview of volcano infrasound: From hawaiian to plinian, local to global. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123–139. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.09.002>

- [38].

- Para obtener la ubicación de la fuente, en este documento plantean el algoritmo srcLoc, que consiste en una técnica para localizar fuentes acústicas en dos y tres dimensiones. SrcLoc fue diseñado como una alternativa a los métodos de triangulación en campo cercano, así, este sistema considera como entradas las ubicaciones espaciales de los sensores y un vector de diferencias de tiempo para cada par único de sensores; además, calcularon las diferencias de tiempo de arribo mediante CC.

En la primera etapa el sistema emplea las ubicaciones de los sensores y los tiempos de arribo obtenidos mediante TDOA y realiza una inversión de mínimos cuadrados para ubicar la fuente. Luego con las soluciones analíticas, se inicia un proceso de optimización que resuelve las diferencias de tiempo de arribo mejor ajustadas. En la etapa siguiente, consideran una onda de sonido generada por una fuente que se propaga radialmente en el espacio, y este radio, aumenta linealmente con el tiempo, así, se obtiene un “cono espacio-tiempo” en tres dimensiones que intercepta con las líneas imaginarias de la ubicación de los sensores como se muestra en la **figura 1**.

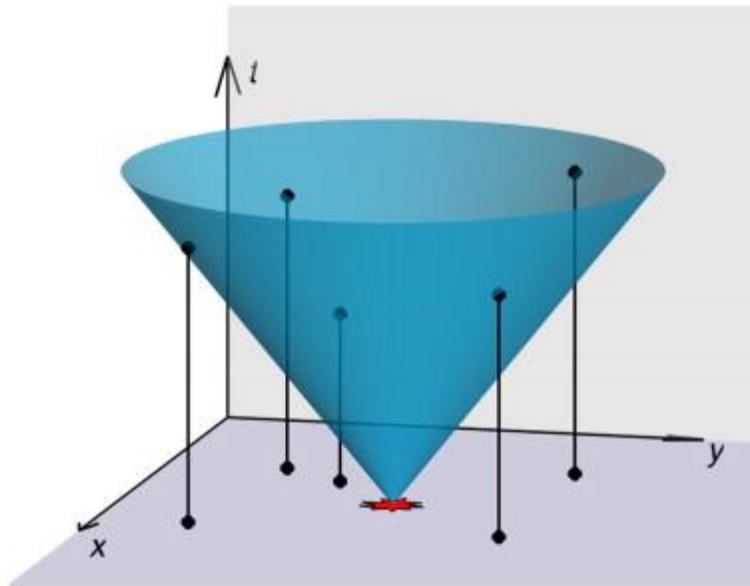


Figura 1. Esquema del cono espacio-tiempo formado por la propagación radial de la onda de infrasonido [39].

El programa luego debe obtener las coordenadas espaciales de las soluciones analíticas al realizar la inversión del cono que mejor se ajusta a la información del tiempo de arribo. La pendiente del cono es inversamente proporcional a la velocidad del sonido, y el vértice proporciona la ubicación de la fuente en el espacio y tiempo [39].

- Infrapy, consiste en un sistema diseñado para la detección de detonaciones nucleares que permite detectar, localizar y caracterizar las fuentes explosivas. Este software es el resultado de la investigación y desarrollo colaborativo de varios científicos y se basa en un algoritmo de detección de formación de haces para identificar múltiples señales coincidentes. El método de localización consiste en la

aplicación del Bayesiano de localización de Fuentes de Infrasonido (*Bayesian Infrasonic Source Localization*); sucesivamente, el programa utiliza una región de interés definida por el usuario, sin embargo, debido a su continuo desarrollo, se pretende identificar automáticamente las regiones relevantes para el análisis [40].

- Para la captura de las señales utilizaron un arreglo de cuatro sensores infrasónicos, y para la obtención de información cualitativa sobre el origen de los eventos de infrasonido, calcularon la diferencia de tiempos de arribo para las cuatro estaciones. La ubicación de la fuente se estimó mediante un procedimiento de búsqueda en cuadrícula sobre una superficie definida de $1.5 \times 1.5 \text{ km}$ con un espaciado de 25 m y centrado en el edificio volcánico. Calcularon los tiempos de viaje teóricos, y según estos tiempos, las señales infrasónicas de las diferentes estaciones fueron retrasadas y comparadas mediante la función de semblanza; esta función representa la probabilidad de que un nodo sea la única ubicación de origen. Por último, la fuente se ubicó en el nodo donde el retardo de las señales mostró el mayor valor de apariencia [4].

5 Marco Teórico

En esta sección se describirán los aspectos generales del monitoreo volcánico, generalidades del infrasonido, las fuentes que lo producen, como se propaga el mismo en la atmósfera, y finalmente, se describirán los arreglos infrasónicos, equipos y los métodos de detección utilizados en el S.G.C.

Las primeras detecciones de ondas infrasónicas producidas por un volcán fueron documentadas utilizando microbarómetros analógicos; estos tipos de sensores son capaces de medir frecuencias inferiores a 1Hz. Históricamente, han ocurrido erupciones de gran magnitud como la erupción del Krakatau en 1883, o la erupción del Mount St. Helens en 1980 que produjeron oscilaciones atmosféricas registradas globalmente, y se consideran como eyecciones masivas de energía térmica. Para comienzos de los 90's, los investigadores instalaron sensores capaces de registrar infrasonidos cercanos dentro de la banda de 1 – 20 Hz; demostrando en los primeros informes, la importancia de incluir redes infrasónicas como complemento de las redes sísmicas Jeremy D. Webster, philblom, & SpacelySpaceSprockets. (2022). LANL-Seismoacoustics/infrapy: v0.4 (v0.4). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7116991> [41].

La práctica del monitoreo consiste en supervisar la actividad volcánica y reconocer sus cambios; para lograrlo, se implementan técnicas e instrumentación que permite reconocer las fluctuaciones o alteraciones en el comportamiento habitual del sistema que se está observando. Por ello, existen diferentes métodos que convergen en el mismo propósito de monitoreo.

5.1 Monitoreo volcánico

Los volcanes generan fenómenos naturales capaces de liberar una gran cantidad de energía, la cual, produce señales sísmicas y acústicas que se utilizan para estudiar y desarrollar técnicas que permitan la detección, identificación y localización de las amenazas geológicas para una población o comunidad. El monitoreo volcánico requiere de la mayor cantidad de herramientas que brinden información sobre la actividad y el comportamiento del volcán; por esto, requiere de diferentes metodologías que permitan analizar su estado en tiempo real [45]. En la **figura 2**, se muestran técnicas de monitoreo como: el sismológico, la deformación, mediante sensores térmicos, entre otros, que proporcionan un excelente sistema de monitoreo en tiempo real; sin embargo, estos no siempre pueden determinar el momento y lugar en que un fenómeno volcánico sale a la superficie [35]. En estos casos, el uso del monitoreo del infrasonido cobra mayor importancia, pues permite comprender la dinámica de la posición y el tiempo en que un fenómeno se manifiesta en la superficie. Respecto del lugar donde ocurre un fenómeno volcánico. Existen algunas dificultades como señales de origen antrópico, condiciones atmosféricas variables en que las ondas se desplazan, la posible existencia de varios puntos simultáneos de emisión y fuentes que cambian de posición en el tiempo como en el caso de un lahar.

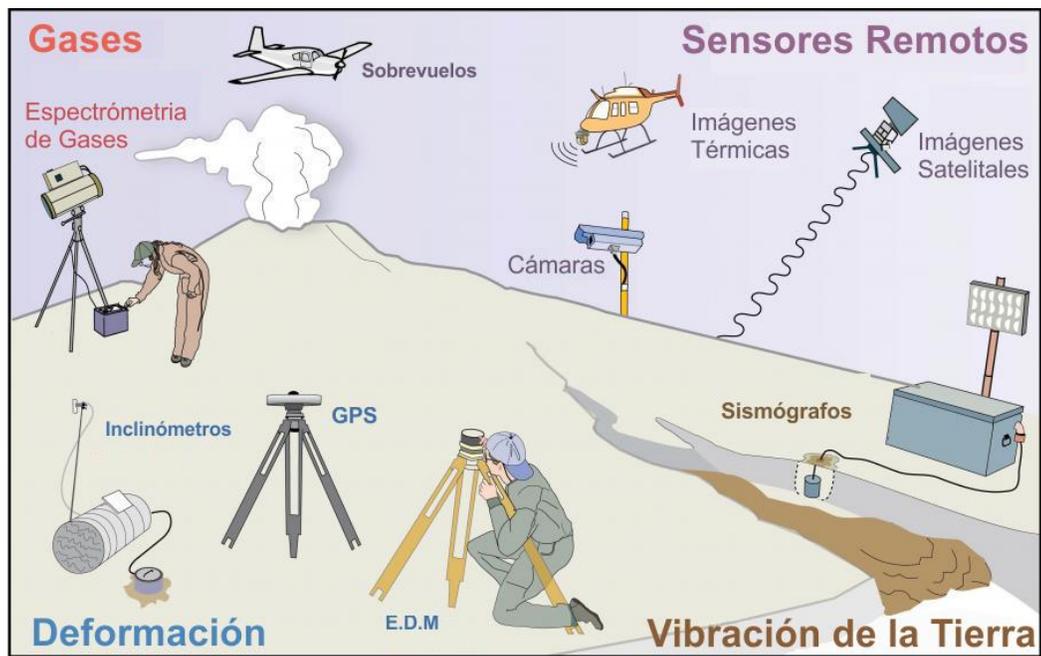


Figura 2. Técnicas de monitoreo volcánico [30].

5.2 Señales de Infrasonido

El infrasonido se puede entender como las vibraciones u ondas acústicas que se propagan en el aire con frecuencias menores a 20 Hz y cuya frecuencia es inferior a la que el oído humano puede percibir. Se caracterizan por ser ondas poco direccionales y con una gran longitud de onda, lo cual hace que sean difíciles de generar, por lo tanto, están relacionadas con fenómenos transitorios de gran magnitud como erupciones volcánicas, explosiones o fenómenos estacionarios y periódicos como mareas y auroras boreales; una particularidad propia de este tipo de ondas es su baja atenuación lo que permite su propagación a largas distancias.

El infrasonido se puede clasificar según su rango de frecuencias en tres tipos como se muestra en la **tabla 1**.

Tabla 1. Tipos de infrasonido.

Tipo	Rango (Hz)
Infrasonido cercano	20 a 1
Infrasonido	1 a 0.01
Ondas acústicas de gravedad	< 0.01

Como se mencionó, para generar infrasonidos, es necesario una fuente capaz de aportar una gran cantidad de energía; los volcanes poseen la potencia suficiente para generar dicha onda acústica; por ejemplo, si un volcán erupciona, libera energía en forma de ondas de presión o movimientos vibracionales, viajando a través del suelo o en la atmosfera en forma de ondas acústicas [10].

El infrasonido, así como cualquier otra onda acústica, requiere de una fuente que proporcione la energía necesaria para que las ondas se propaguen a través del medio; estas ondas, poseen longitudes de onda con un rango desde los 17 metros para ondas con una frecuencia de 20 *Hz* hasta ondas con más de 30 kilómetros para frecuencias de 0.01 *Hz*. Esto implica que se debe generar una potencia acústica muy elevada para que la onda se contenga mayor energía que el nivel de ruido de fondo de un medio determinado. Estas características de las fuentes infrasónicas implican eventos de gran magnitud, lo cual dificulta las simulaciones y manejo de fuentes artificiales.

Las características de la onda infrasónica están dadas en mayor medida por las propiedades intrínsecas de la fuente, las cuales son:

- **Frecuencia:** Se reconoce como la tasa de recurrencia de un evento periódico y se observa en la periodicidad de rotaciones, oscilaciones y ondas. Una señal periódica en aplicaciones reales es compleja; por lo cual, para entender la dinámica de la onda, se analizan los componentes de frecuencia que componen la señal y son generalmente propiedades de interés; la descomposición de los componentes de una señal realiza mediante análisis de Fourier y pueden clasificarse en tres: (i). Baja Frecuencia. (ii). Frecuencia Media. (iii). Alta Frecuencia.

Este tipo de análisis se realiza en el dominio de frecuencia y se conoce como análisis espectral. Comúnmente es utilizado para ondas producto de sonidos y vibraciones. Con esto, se pretende determinar la procedencia de la onda o señal detectada y como fue generada, permitiendo, incluso, diferenciar las señales provenientes de fuentes de distinta naturaleza [2].

- **Amplitud:** Propiedad directamente relacionada con la potencia de la fuente para la generación de la onda; aunque al atravesar el medio la señal se atenúa, al extrapolar los datos se obtiene la potencia fuente [2].
- **Velocidad de la onda:** Esta es la velocidad con que la onda se propaga en el medio; esta depende de la ubicación y características de la fuente, así como del medio en el que se propague [2].
- **Trayecto de la onda:** Esta es una propiedad principalmente del medio, dependiendo de la ubicación de la fuente, la trayectoria de la onda puede variar, por ejemplo, con reflexiones en capas de la atmosfera [2].
- **Tipo de señal:** Teniendo en cuenta las propiedades de la fuente, se puede caracterizar el tipo de señal en dos tipos: explosiva, que se caracteriza por una señal impulsiva, y no explosiva, que refiere a una señal periódica [2].

5.3 Tipos de Fuentes

Dentro de las fuentes que pueden generar infrasonidos se pueden clasificar dos grupos, las fuentes de origen Natural y las de origen Artificial

5.3.1 Fuentes Naturales de Infrasonido

Se caracterizan por ser fuentes de grandes dimensiones y capaces de generar grandes cantidades de energía; esto implica que son capaces de producir potencias con magnitudes considerablemente altas y, por lo tanto, son objeto de estudio científico, desarrollando metodologías que puedan recopilar datos para ser cuantificadas, localizadas y eventualmente categorizadas.

➤ **Erupciones Volcánicas:**

Se generan infrasonidos de tipo explosivo los cuales varían en un rango de 1.2 mHz a 20 Hz dependiendo de la escala y magnitud de la erupción. Cuando se presenta un colapso en la caldera volcánica, los niveles de energía son lo suficientemente grandes para provocar este tipo de ondas de presión en la atmosfera y pueden propagarse miles de kilómetros.

Estas señales son complejas debido a que se generan en un conjunto de explosiones y no a un solo evento, produciendo un conjunto de señales solapadas de diferentes periodos. En este contexto, se pueden generar dos tipos de señales, las impulsivas producto de las explosiones y las periódicas irregulares debidas a cambios de temperatura o movimientos de la estructura geológica [2].

➤ **Microbaroms:**

Estas ondas se generan debido a las tormentas atmosféricas marinas, este tipo de onda infrasónica se conoce como microbarom y se encuentra continuamente en todo el planeta. Su amplitud varía dependiendo de la distancia al mar y las condiciones atmosféricas. Su rango va de los 0.125 a 0.333 Hz [2].

➤ **Meteorológicas:**

Son fenómenos que ocurren en la atmosfera y pueden generar infrasonidos producidos por tornados, truenos y vientos fuertes [2].

5.3.2 Fuentes Artificiales de Infrasonido

Estas fuentes se deben principalmente a procesos de eventos relacionados con maquinaria o artefactos creados por el humano. Sin embargo, aunque la mayoría de los artefactos no se crean con el fin de generar ondas infrasónicas; se han creado fuentes con parámetros manipulables, en los que se busca estudiar su propagación en la atmosfera.

➤ **Resonadores y bocinas:**

Es una forma de generar infrasonidos de manera controlada, pero esto requiere bocinas de grandes dimensiones y resonadores Helmholtz. Son utilizados para la calibración de arreglos.

➤ **Maquinaria:**

La emisión de ondas de baja frecuencia puede producir desde náuseas y malestar hasta cuadros estomacales, respiratorios y cardiacos graves; esto impulso el estudio de la emisión de este tipo ondas en maquinarias como turbinas, máquinas de impacto, transporte, bombas, entre otros.

➤ **Explosiones Nucleares:**

Las condiciones extremas y cambios que ocurren en la atmosfera producto de explosiones nucleares producen todo tipo de radiaciones y ondas. En el caso de las acústicas, las frecuencias altas, son atenuadas rápidamente, dejando las señales de baja frecuencia que se pueden propagar grandes distancias. Son tipo explosivo y periódicas, su frecuencia se encuentra entre los 0.02 y 4 Hz; por otro lado, la amplitud está directamente relacionada con la potencia de la bomba.

5.4 Medio de Propagación y Trayectoria

El medio de propagación forma parte fundamental para la existencia de las ondas de infrasonido, por lo tanto, es importante conocer sus propiedades para determinar sus efectos sobre las ondas detectada. Uno de los medios más frecuentes de propagación de este tipo de ondas es la atmosfera por lo cual, se debe entender como sucede este proceso.

5.4.1 Atmosfera

La atmosfera es una capa compuesta por gases con una concentración mayor de nitrógeno 78% y oxígeno 21%, argón 0.93%, entre otros; su estructura es definida y se divide según su altitud en cuatro capas: la troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera.

Tabla 2. Capas atmosféricas [2],[46].

Capa	Descripción
Troposfera	Es la parte inferior y más densa de la atmosfera, al ser la más cercana a la superficie terrestre, en ella ocurren fenómenos climáticos asociados a lluvias, nubes y tormentas. Cuando la altitud aumenta, la temperatura de la capa disminuye llegando a las 55° Celsius bajo cero. Esta capa contiene aproximadamente el 75% del peso total del aire, humedad y polvo atmosférico.
Estratosfera	Tiene una extensión aproximada de 45 km de altitud y se compone de aire claro y seco. Posee una

	temperatura constante en la zona inferior y a medida que aumenta la altura, su temperatura también aumenta debido a la absorción de energía solar de su capa de ozono; es capaz de capturar las radiaciones ultravioletas del sol evitando que lleguen a la corteza terrestre. Se caracteriza por una humedad casi ausente por lo cual no es frecuente la producción de nubes. La zona superior de la estratosfera alcanza una temperatura de 10° Celsius
Mesosfera	También conocida como ionosfera, debido a la baja densidad de aire y la gran cantidad de iones que contiene. En esta capa, la temperatura disminuye drásticamente en la zona superior de esta capa llegando a los 100° Celsius bajo cero.
Termosfera	Esta capa alcanza temperaturas hasta de 1000° Celsius y se ubica a unos 300 km de altura

Las divisiones o capas de la atmosfera determinan variables físicas que influyen directamente en la propagación de las ondas infrasónicas, algunas de estas variables son la temperatura y la velocidad del viento.

Como se mencionó, el medio juega un papel fundamental en la existencia y propagación de las ondas acústicas; de esta manera, el medio es el factor que determina las propiedades de la onda que no dependen la fuente; estas propiedades son: velocidad, atenuación, trayecto y método en que se detecta.

En el caso del infrasonido, la onda viajará a través de la atmosfera hasta encontrarse con el sensor (micrófono), durante ese trayecto de propagación influirán fenómenos como reflexiones, refracciones, atenuación por la distancia y absorción; sin embargo, una onda en campo cercano se mantiene casi intacta respecto a la fuente, por lo tanto, se encuentra relativamente libre de los efectos de trayectoria, en donde se pueden obviar las reflexiones y refracciones en el medio [5],[11]; no obstante, para ondas en campo lejano estos efectos si deben ser considerados.

5.5 Velocidad del sonido

La componente horizontal de la velocidad de la onda de infrasonido la determina el arreglo infrasónico; este valor se utiliza para cuantificar el trayecto de la onda desde la fuente hasta el sensor. La expresión que determina la velocidad en función de la temperatura está dada por:

$$v = \sqrt{\gamma r T} \quad (1)$$

Donde $\gamma = 1.4$ para el aire en condiciones normales, $r = \frac{R}{M} = \frac{8.314}{28.9 \times 10^{-3}} \frac{m^2}{Ks^2}$, R es la constante universal de los gases y M el peso molecular del gas.

Por otra parte, la dinámica es otra variable que influye en la propagación de la onda; la atmosfera no es inmóvil por lo cual los vientos afectan indudablemente la trayectoria de los frentes de onda [2].

Teniendo en cuenta la influencia del medio en la velocidad de la onda; el trayecto de propagación de la señal se ve afectado por las propiedades del medio de propagación como se muestra en la **figura 3**; para el infrasonido esto implica que el desplazamiento de grandes distancias aumenta los efectos de las propiedades del medio. Por lo tanto, la onda de infrasonido puede verse afectada por diferentes fenómenos atmosféricos.

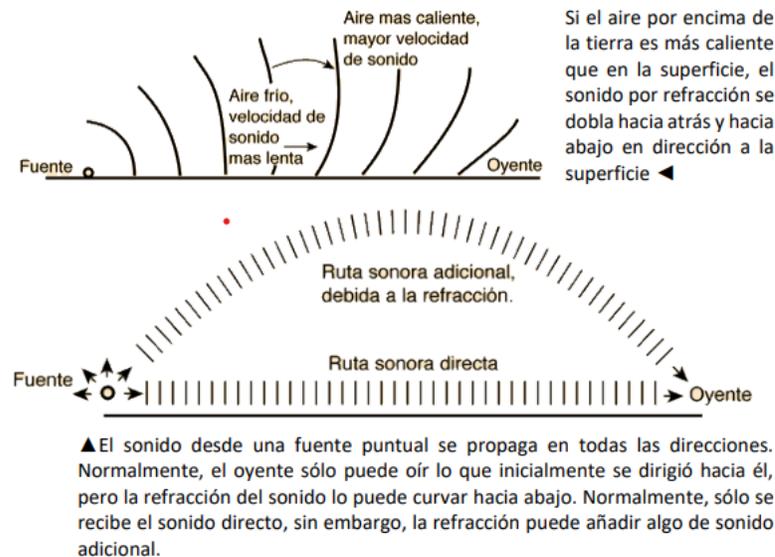


Figura 3. Representación de la perturbación de las ondas en su propagación

[3].

Además de estos efectos, existen otros factores que afectan el trayecto de la onda, entre ellos están la reflexión, el eco y en ocasiones, reverberaciones de las ondas acústicas en la superficie terrestre.

5.6 Método de detección.

Las ondas de infrasonido son capturadas mediante un arreglo de uno a varios sensores acústicos (micrófonos) que se instalan en tierra. Sin embargo, para lograr detecciones adecuadas de las señales volcánicas por sobre otras fuentes de infrasonido que puedan perturbar la señal se deben tener en cuenta las propiedades del infrasonido y el viento.

En el caso de la detección de infrasonido volcánico y lo que corresponde a los estudios adelantados por el Servicio Geológico Colombiano, se implementaron dos técnicas que permiten capturar estos datos, las técnicas de análisis mencionadas son la función de correlación y los residuales o retrasos a partir de la ubicación de la fuente.

5.7 Viento y longitud de correlación

El viento es una fuente de infrasonido que puede ocupar gran parte del espectro y por ende afectar los datos que se quieren capturar de una fuente específica, en consecuencia, es uno de los factores ambientales principales que se debe evitar.

Para eliminar o filtrar los efectos del viento se debe considerar la longitud de correlación también conocida como longitud de correlación espacial. Este es un concepto que permite describir la distancia sobre la cual dos puntos están correlacionados. Al tener una función de onda espacial se puede definir la longitud de correlación como la distancia más corta en que es posible obtener una buena correlación; es decir, la distancia mínima para encontrar nuevamente un valle o una cresta de la función espacial.

5.8 Señal residual o retraso

El retraso o delay, se debe a la diferencia en distancia que recorre la onda de infrasonido entre la fuente y cada uno de los sensores del arreglo; la diferencia se puede estimar asumiendo que la onda viaja en línea recta hacia cada sensor. Analizando el arreglo de la **figura 4**, se cuenta con un par de sensores separados una distancia x .

Mediante el análisis geométrico de la **figura 4** **Figura Figura**, se puede calcular el retraso de la señal entre el par de micrófonos. El retardo o *delay* se representa como Δ y este se puede calcular como:

$$\Delta = x * \cos\theta \quad (2)$$

Donde x es la distancia entre el par de sensores o micrófonos y Δ representa la distancia de más que debe recorrer la onda para llegar el micrófono 1.

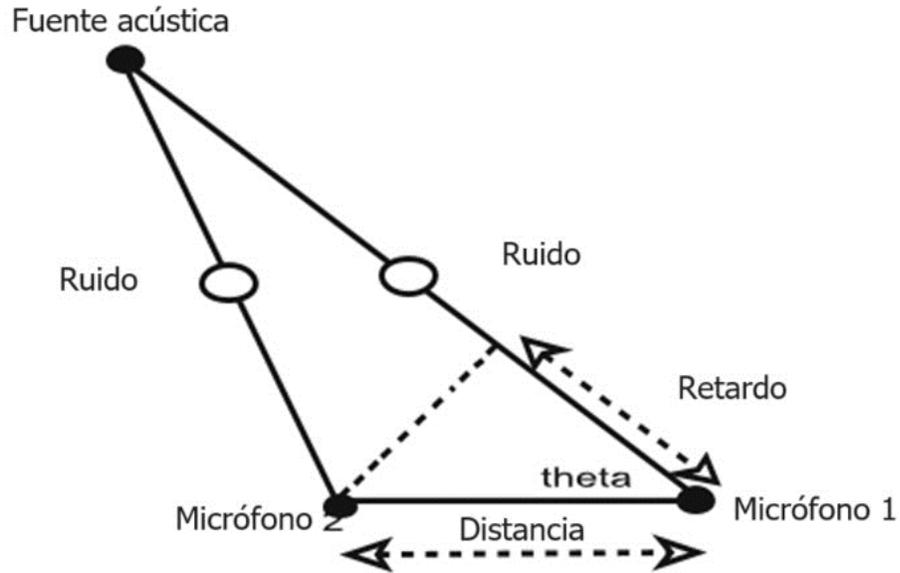


Figura 4. Arreglo Geométrico para el cálculo del retraso (*delay*) [31].

Ahora, el cálculo del retraso (*delay*) está dado por:

$$delay = \frac{\Delta}{v} \quad (3),$$

La variable v representa la velocidad del sonido. Finalmente, el ángulo de incidencia de la onda se determina mediante la función de correlación; una vez calculado el retraso, de la **ecuación 4** se obtiene el ángulo de incidencia [14].

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{v \cdot delay}{x}\right) \quad (4)$$

5.9 Base teórica de correlación cruzada implementada

La función de correlación cruzada se utiliza como una medida de correspondencia o interrelación entre dos señales. Matemáticamente para dos señales, f y g , la expresión está definida como:

$$R_{fg}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n) * g(n - l) \quad (5)$$

Donde $R_{fg}(l)$, es el coeficiente de correlación, $f(n)$, corresponde a la señal emisora, $g(n)$, es la señal receptora y $l = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

El proceso de correlación consiste en tres pasos:

- Paso 1. desplazar la función g a lo largo de la función f .
- Paso 2. Calcular la señal multiplicación
- Paso 3. Obtener la sumatoria de las muestras de la señal multiplicada en el paso dos.

Ahora, la metodología utilizada para la función de CC de las señales para el par de sensores acústicos [15], se denota como $CC(X_C, X_H; \tau)$, donde X_C y X_H representan los datos filtrados de los sensores C y H respectivamente y τ representa el tiempo de retraso entre X_C y X_H .

En la **ecuación 6**, A_n representa la fluctuación de la presión de las señales infrasónicas; S_n es la onda sísmica transformada a infrasónica el ruido asociado al viento está representado por W_n y el ruido debido a la instrumentación se denota como N_n .

$$X_n = A_n + S_n + W_n + N_n \quad (6)$$

Para la **ecuación 6**, no existe correlación entre los parámetros $A_n + W_n + N_n$, y, tampoco existe correlación de ruido instrumental entre los sensores [15].

Como se mencionó anteriormente, el ruido del viento es factor que se debe considerar para discriminar el infrasonido volcánico; además, los fuertes vientos generan infrasonidos que se presentan constantemente. Para solucionar esto, se han utilizado metodologías en los arreglos infrasónicos que buscan mitigar los efectos parásitos en las señales de interés; la arquitectura de los arreglos infrasónicos es de vital importancia para capturar las señales infrasónicas, considerando que, un solo sensor no permite distinguir entre una señal infrasónica del viento o de una volcánica, por lo cual, los sensores infrasónicos deben ir instalados al menos en pares, usando dos sensores acústicos o un par sismo-acústico [12]. Existe un método que permite diferenciar una señal infrasónica del ruido del viento mediante una función de CC entre un par de sensores sismo-acústico[13]; sin embargo, esta metodología está limitada para volcanes en los que la actividad sísmica es reducida, por lo tanto, no se puede aplicar en todos los casos.

En el caso de la **figura 5**, para un par señales A y B hipotéticas, la función de correlación $A * B$ y $B * A$, genera un pico máximo en el cero esto se debe a que las señales ocurren al mismo tiempo en A y en B

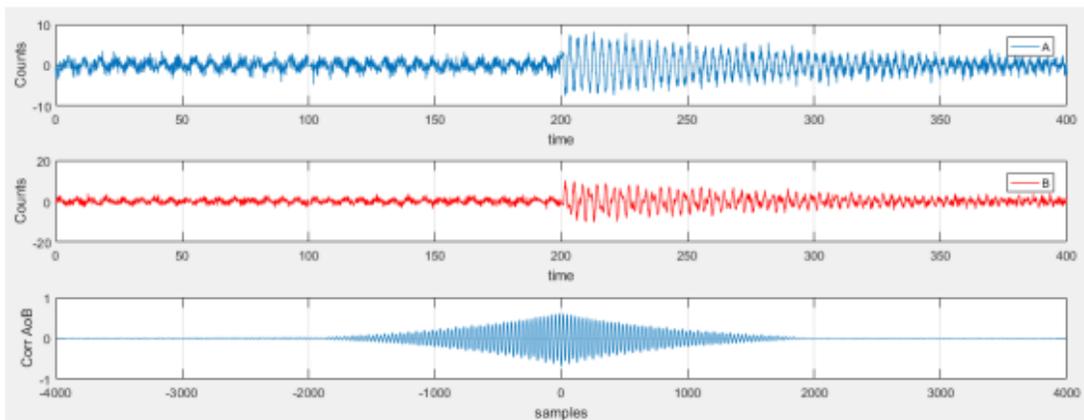


Figura 5. Función de correlación en señales recibidas al mismo tiempo en A y B

[3].

Por otro lado, para dos señales desplazadas en el tiempo, se obtienen diferentes tiempos de arribo; aplicando la función de CC se genera un máximo desplazado en cero; este desplazamiento es la diferencia de muestras que hay entre el inicio de la señal A y la señal B, como se observa en la **figura 6**.

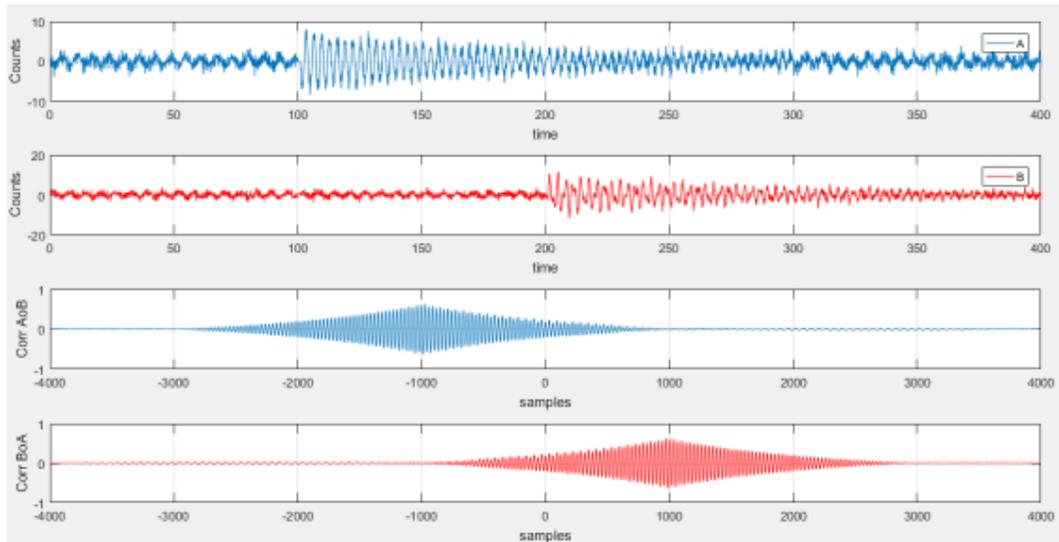


Figura 6. Función de correlación para dos señales con diferentes tiempos de arribo

[3].

De acuerdo con lo anterior, y con el fin de discriminar la señal infrasónica del ruido del viento, la diferencia en el registro del viento entre los dos sensores cercanos implica que la función de correlación en presencia de viento no genere un pico máximo, mientras que la respuesta de la función de correlación en el registro de infrasonido de la fuente puntual, si genera un pico máximo, como se representa en la **figura 7**.



Figura 7. Correlación cruzada, donde el mayor pico positivo marca el tiempo de arribo de la señal receptora [42].

5.10 Correlogramas

Un correlograma o función de correlación automática, es una forma visual de mostrar la correlación en una serie de datos que cambian en el tiempo. Comúnmente se utiliza para mostrar cuando hay correlación entre los pares de señales analizadas.

La metodología implementada en el S.G.C. utiliza la correlación cruzada entre dos sensores acústicos y, mediante este algoritmo se evalúan los datos de las trazas en ventanas de tiempo como se observa en la **figura 8**.

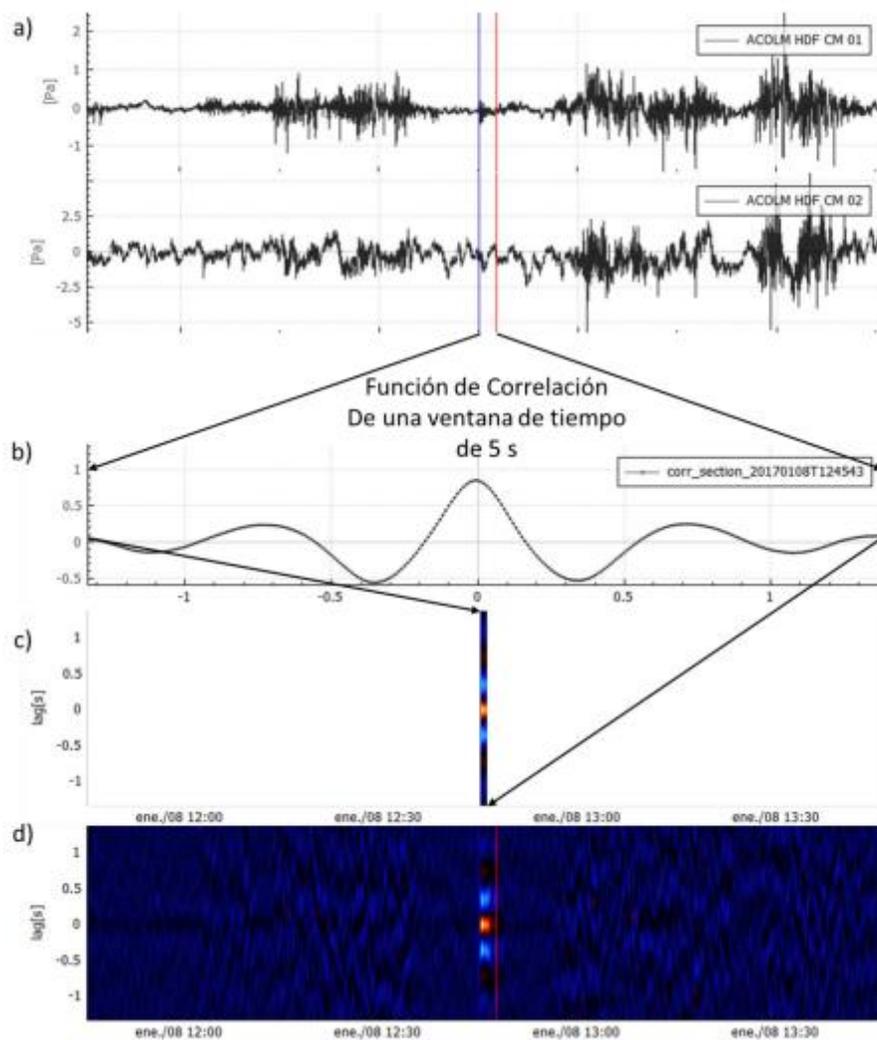


Figura 8. Obtención del correlograma. a) Trazas de la señal detectada por los sensores acústicos; no se observan perturbaciones debido al viento. b) Función de correlación ubicada para una ventana de 5s. c) Correlograma

obtenido luego de aplicar la función de correlación en la ventana de tiempo y evidenciar el evento infrasónico detectado

[3].

5.11 Arreglo y disposición de los sensores.

Para el monitoreo vulcanológico, el S.G.C a través de los O.V.S, ha implementado redes de infrasonido local en volcanes con actividad recurrente. Los arreglos constan de dos sensores instalados a distancias y orientaciones estratégicas que permiten la detección de señales de infrasonido volcánico. Aunque las señales provenientes de infrasonidos pueden viajar grandes distancias, los eventos volcánicos que son objeto de estudio no corresponden a erupciones de tal magnitud; por lo cual, la ubicación de estos sensores espera detectar las señales entre un radio de 5 a 20 kilómetros.

5.12 Instalación de las estaciones

Según datos del S.G.C

[3], hasta el año 2019, se cuenta con doce estaciones infrasónicas instaladas, en seis de los veinte volcanes vigilados en Colombia, consultar **tabla 3**. Seis de las estaciones cuentan con un par de sensores; otras seis cuentan con un solo sensor.

Cabe aclarar que la metodología expuesta en este documento aplica solo para las estaciones con al menos un par de sensores de infrasonido.

Tabla 3. Número de sensores instalados por volcán

[3].

Volcán	Estaciones con 1 sensor	Estaciones con 1 par de sensores	Sensores Instalados	Distancia máxima al cráter (km)
Nevado del Ruiz	2	3	8	5.9
Nevado del Huila	1	0	1	4
Puracé	1	0	1	2.6
Galeras	0	3	6	6.9
Cumbal	1	0	1	2.5
Chiles	1	0	1	5.3
Total	12	6	18	Rango de 2.5 a 6.9

Para instalar una estación de infrasonido, se necesita al menos de un par de sensores acústicos o un par sismo-acústico, el equipo digitalizador con GPS e instrumentos comúnmente utilizados en una instalación convencional como radios, baterías, paneles, pararrayos, polos a tierra, etc.

El monitoreo infrasónico del Volcán Nevado del Ruiz consta de tres pares de sensores acústicos distribuidos en un radio cercano al cráter, como se muestra en la **figura 9**.

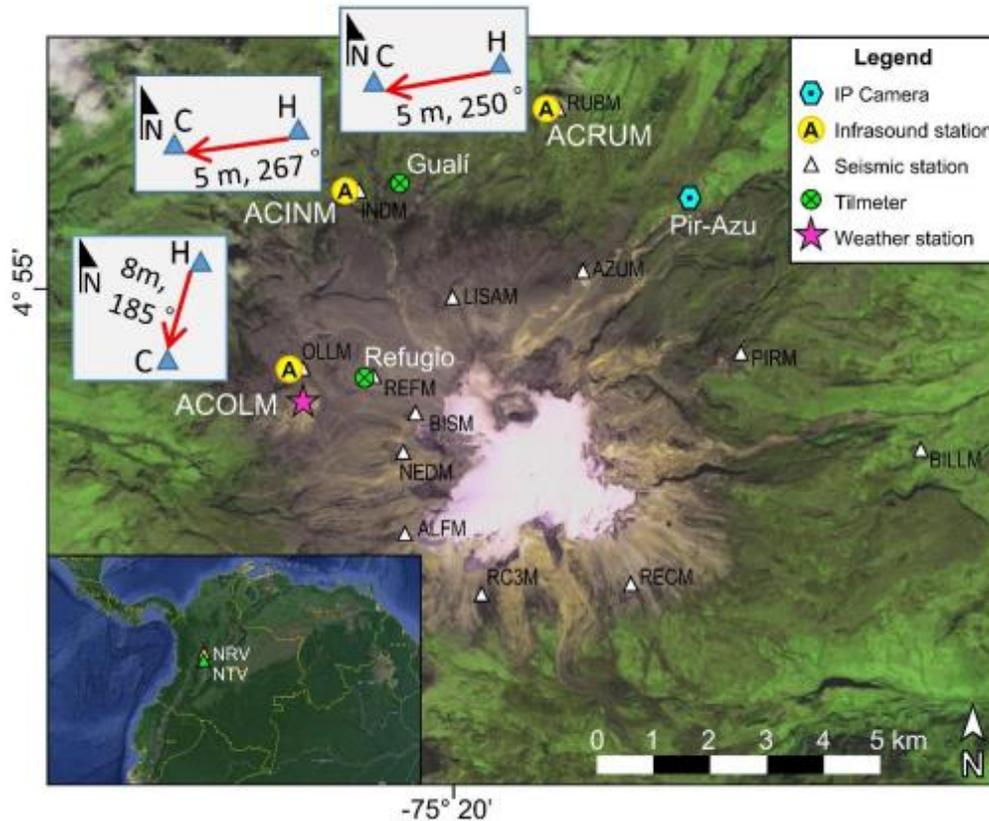


Figura 9. Mapa de localización de las estaciones acústicas instaladas en el VNR [15].

En Castaño et al., [15] se explica como en el Volcán Nevado del Ruíz se han operado estaciones de infrasonido con un sensor de acústico y un sismómetro; sin embargo, esta metodología no permitió resolver las señales de infrasonido cubiertas por el ruido del viento. Por lo tanto, se instalaron tres estaciones de infrasonido, que corresponden a ACINM, ACOLM y ACRUM, cada una de las estaciones tiene un par de sensores acústicos separados aproximadamente cinco metros para ACRUM y ACINM y ocho metros para ACOLM.

El arreglo consta de un sensor Chaparral 60 Vx con un rango de frecuencias de 0.1 a 200 Hz, escala completa de 720 Pa, nivel de ruido de 2 mPa y RMS en 0.5 – 2 Hz; un sensor tipo Hakusan SI104, con un rango de frecuencias de 0.3 a 2000 Hz, escala completa de 2 kPa, nivel de ruido 0.1 Pa. El sensor Hakusan tiene un nivel de ruido instrumental mayor; sin embargo, posee una sensibilidad por debajo de 0.1 Pa.

Además, la estación acústica, también consta de un digitalizador Guralp DM26 el cual registra a 100 Hz en formato miniSEED.



Figura 10. Instalación estación ACOLM VNR con par de sensores acústicos, caja con instrumentación y digitalizador

[3].

5.13 Instrumentación y equipos

Existe gran variedad de equipos infrasónicos en el mercado, no obstante, los utilizados por el S.G.C para la instalación de los arreglos o redes son:

5.13.1 Hakusan Corporation, modelo Hakusan SI104:

Empresa Japonesa dedicada al desarrollo y venta de sistemas de redes de observación sísmica y sistemas de prevención de desastres sísmicos. El sensor cuenta con un rango de frecuencia de 0.3 – 2000Hz en escala completa de $2kPa$, ruido de nivel $\sim 0.1 Pa$ (*pico a pico*), este sensor posee un ruido instrumental alto pero una sensibilidad inferior a $0.1 Pa$ [15].

5.13.2 Chaparral Model 60 Vx Infrasound Sensor:

Se caracteriza por un bajo consumo de energía, construcción robusta a prueba de condiciones climáticas adversas. Tiene $5.08 cm$ de altura y un peso de $198.447g$. A pesar de su tamaño reducido y poco peso, atenúa el ruido, opera de manera estable, posee un amplio ancho de banda y baja sensibilidad sísmica. Esto permite garantizar mediciones precisas en entornos exigentes [23].



Figura 11. Sensor acústico Chaparral [23].

Dentro de los sensores expuestos, destaca el uso de los sensores Chaparral, siendo uno de los más reconocidos debido a sus características como estabilidad, rango dinámico y portabilidad.

Sin embargo, debido a la continua investigación y desarrollo de técnicas de captura de infrasonido, se han desarrollado otros equipos que permiten detectar este tipo de señales. Dentro de la gama de instrumentos de detección están:

5.13.3 Hyperion Technology Group, Hyperion 511/A infrasound Sensor:

La empresa Hyperion, en su apartado de sensores comerciales para el mercado, desarrollan sistemas de sensores y algoritmos de procesamiento de señales para detectar, rastrear y geolocalizar objetivos de interés, en campos que involucran la acústica audible, el infrasonido y la actividad sísmica Slad, G., & Merchant, B. (2021). Evaluation of Low Cost Infrasound Sensor Packages. <https://doi.org/10.2172/1829264>

[25].



Figura 12. Sensor Hyperion Technology Group Slad, G., & Merchant, B. (2021). Evaluation of Low Cost Infrasound Sensor Packages. <https://doi.org/10.2172/1829264> [25].

5.13.4 InfraBSU, InfraBSU sensors

Es un sensor desarrollado por Jeffery Johnson, como una continuación del sensor infraNMT; se basa en un transductor de presión diferencial piezoresistivo micro mecanizado y un filtro mecánico. Los componentes electrónicos se encuentran bajo el estuche de PVC y, son alimentados con una batería de 9V; este sensor es normalmente utilizado en aplicaciones de campo[24].



Figura 13. Sensor infrasonido InfraBSU [24].

5.13.5 Martec, MB2005

Consiste en un microbarometro con una cápsula barométrica al vacío. El desplazamiento de un sensor LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) en conjunto con elementos electrónicos de bajo ruido, miden la deformación de la cápsula barométrica ante los cambios de la presión atmosférica[26].



Figura 14. Sensor MB2005 [26].

5.14 Software usado

La obtención de los correlogramas se lleva a cabo mediante del programa VolcanStudio, el cual consiste en una rutina de Matlab construida a través del proyecto SATREPS en conjunto con la PhD. Mie Ichihara[13]. El software mencionado fue desarrollado por el Ing. Carlos Alberto Ospina Caicedo para el S.G.C en el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVSPo). El programa se implementó en Python y utiliza librerías de procesamiento, análisis y visualización de señales como ObsPy, Seaborn, Matplotlib, entre otras.

El programa permite la lectura de las señales y calcula parámetros asociados a las señales sísmicas e infrasónicas. Cuenta con un sistema de detección de eventos automatizado mediante correlogramas que se aplican en ventanas de tiempo establecidas en la rutina. VolcanStudio es uno de los softwares que se ejecutan en tiempo real en tres de los O.V.S del país, por lo cual destaca su importancia en el ámbito de la investigación y monitoreo de los volcanes en Colombia.

5.15 Técnicas de localización

Para localizar fuentes acústicas, se pueden utilizar técnicas de distintas clases, dependiendo de los rangos, equipos, condiciones ambientales, topografía, entre otras consideraciones. En consecuencia, existe una amplia gama de técnicas aplicables que pueden ser consideradas cuando se requiere determinar una ubicación de origen de una fuente acústica. Estas clases se pueden dividir en técnicas: geométricas, basadas en el área y generales [43]. Sin embargo, el desarrollo de este documento se basó en el análisis de técnicas geométricas específicamente en la técnica de triangulación y formación de haces para localizar las fuentes de infrasonido, por lo cual, se hará énfasis en las técnicas de este tipo.

5.15.1 Técnicas geométricas

Se trata de métodos que tienen como objetivo estimar la ubicación de los nodos de la red mediante el análisis geométrico. Dentro de este tipo de técnicas están:

5.15.1.1 Trilateración:

Es un método sencillo que estima la ubicación de un nodo a partir de la intersección de tres círculos generados por los tres sensores, como se muestra en la **figura 15**; para esto, utiliza las posiciones conocidas de los sensores y la medida de distancias. Este principio implica que la localización de la fuente se encuentra en la intersección de los círculos formados [43].

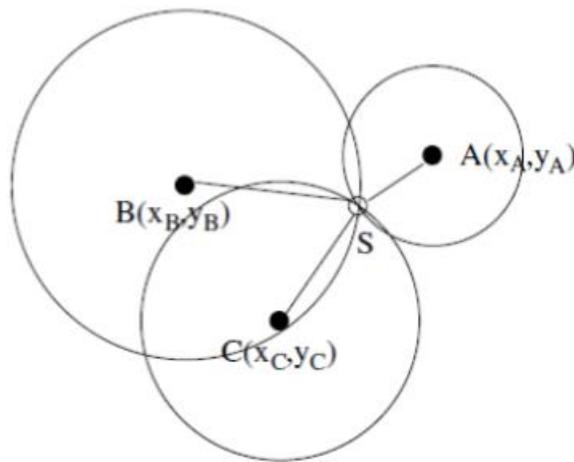


Figura 15. Técnica de localización mediante trilateración[43].

5.15.1.2 Multilateración

Sigue el mismo principio de la trilateración, sin embargo, en este método, se utilizan más puntos de referencia. Las distancias deben ser obtenidas mediante la ejecución de técnicas como TDOA, y, además, se debe obtener la solución lineal de sistemas sobre determinados de ecuaciones; la solución del sistema lineal resulta en la minimización del error en las mediciones. Sin embargo, en esta técnica, se deben usar más de tres sensores para obtener buenos resultados [43].

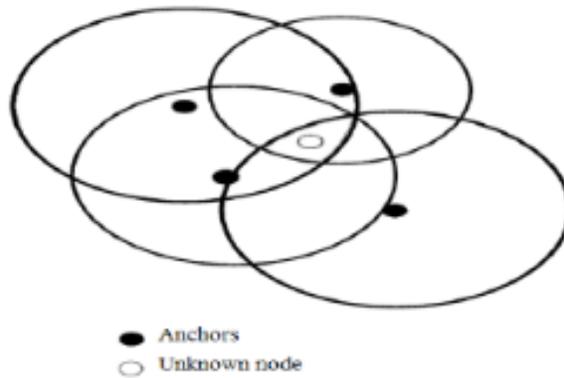


Figura 16. Técnica de multilateración [43].

5.15.1.3 Triangulación

Consiste en el cálculo de los ángulos y las direcciones de la señal para determinar la ubicación de la fuente. Así, el punto desconocido (fuente) determina sus ángulos relativos a los sensores o puntos de referencia. Luego mediante análisis trigonométrico se determina la ubicación de la fuente [43].

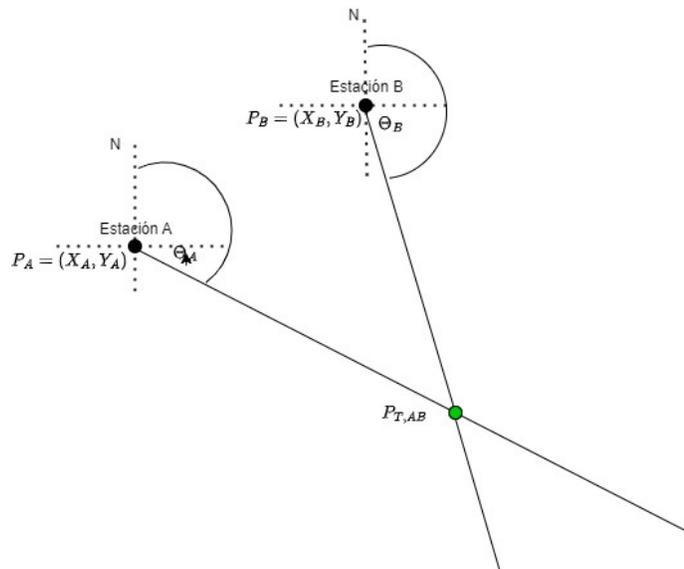


Figura 17. Localización de la fuente mediante triangulación.

5.15.1.4 Triangulación multi estación

Para explicar de manera sencilla el sistema de localización multi estación implementado en Chien-Bang, et al. (2022)[21], el método de análisis se puede analizar en principio para dos estaciones como se muestra en la **figura 17**. Partiendo de dos estaciones A y B con coordenadas, $P_A = (x_A, y_A)$ y $P_B = (x_B, y_B)$ y los ángulos de arribo inversos (*back Azimuth*) θ_A y θ_B , respectivamente para cada punto; se puede estimar la localización de la fuente proyectando los ángulos inversos como dos líneas en el plano. Para esto, es

necesario el cálculo de parámetros como los interceptos entre los ángulos proyectados; de esta forma se obtiene un punto de localización estimado con coordenadas $P_{T,AB} = (x_T, y_T)$.

Seguidamente, los ángulos proyectados deben tener un error para cada azimut encontrado; este error es de vital importancia para obtener una región o área de la posible localización del evento identificado; así, el error se denota como $\Delta\theta_A$ y $\Delta\theta_B$ para las estaciones A y B respectivamente. Luego, se debe sumar y restar el error a cada azimut de la estación correspondiente. En el caso de las estaciones A y B se obtiene:

Estación A:

$$\theta_{A+} = \theta_A + \Delta\theta_A \quad (7)$$

$$\theta_{A-} = \theta_A - \Delta\theta_A \quad (8)$$

Estación B:

$$\theta_{B+} = \theta_B + \Delta\theta_B \quad (9)$$

$$\theta_{B-} = \theta_B - \Delta\theta_B \quad (10)$$

La triangulación angular se convierte en un proceso iterativo entre las rectas proyectadas para formar un área como se muestra en la **figura 18**.

Considere los puntos: $P_{1,AB} = (x_{1,AB}, y_{1,AB})$, $P_{2,AB} = (x_{2,AB}, y_{2,AB})$, $P_{3,AB} = (x_{3,AB}, y_{3,AB})$, $P_{4,AB} = (x_{4,AB}, y_{4,AB})$ como PP, PN, NP y NN respectivamente.

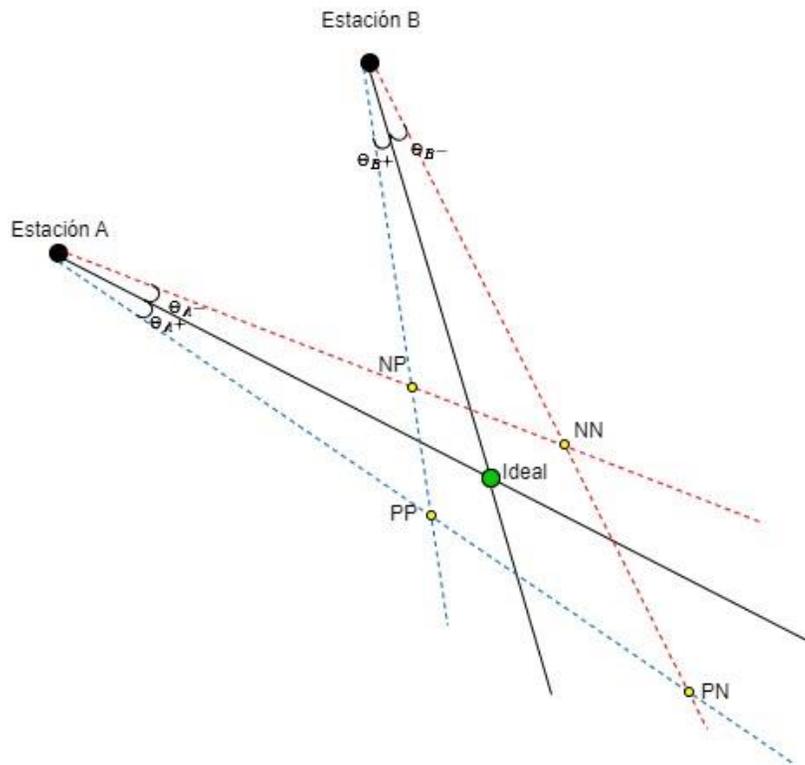


Figura 18. Formación del área a partir del método de localización multi estación. i) **PP**: intercepción de θ_{A+} con θ_{B+} . ii) **PN**: Intercepción de θ_{A+} con θ_{B-} . iii) **NP**: Intercepción de θ_{A-} con θ_{B+} . iv) **NN**: Intercepción de θ_{A-} con θ_{B-} .

Con los ángulos calculados en las **ecuaciones 7, 8, 9 y 10**, cada intercepción que forma la región se obtiene utilizando la metodología de intersección entre dos rectas. Para esto, matemáticamente:

$$y = mx + b \quad (11)$$

Donde m que representa la pendiente se puede expresar como $m = \tan(\theta)$; así, reemplazando cada ángulo se obtienen cuatro ecuaciones de la forma:

$$y = \tan(\theta_{A+}) * (x - x_A) + y_A \quad (12)$$

$$y = \tan(\theta_{A-}) * (x - x_A) + y_A \quad (13)$$

$$y = \tan(\theta_{B+}) * (x - x_B) + y_B \quad (14)$$

$$y = \tan(\theta_{B-}) * (x - x_B) + y_B \quad (15)$$

Explicando el proceso con un par de estaciones; se iguala la **ecuación 12** con la **ecuación 14** y se obtiene el intercepción **PP** mostrado en la **figura 18**:

$$\tan(\theta_{A+}) * (x - x_A) + y_A = \tan(\theta_{B+}) * (x - x_B) + y_B \quad (16)$$

Despejando la **ecuación 16** se tiene que:

$$x_{PP} = \frac{y_B - y_A - x_B \tan(\theta_{B+}) + x_A \tan(\theta_{A+})}{\tan(\theta_{A+}) - \tan(\theta_{B+})} \quad (17)$$

Sustituyendo el resultado de la coordenada x_{PP} en la **ecuación 12**, se obtiene el valor de la coordenada y_{PP} para el intercepción PP

El procedimiento de las **ecuaciones 16 y 17** se debe repetir para encontrar cada uno de los intercepciones **PN**, **NP** y **NN** que forman la región triangulada. A continuación, se evalúa la distancia entre el punto ideal y la región estimada, con el fin de definir la precisión del sistema de localización. Para esto, se determina la máxima distancia entre el punto $P_{T,AB}$ con cada uno de los puntos que delimitan la región encontrada, es decir, los puntos $P_{1,AB}$, $P_{2,AB}$, $P_{3,AB}$ y $P_{4,AB}$. De esta forma, se define el error Δ_{AB} como:

$$\Delta_{AB} = \max(\overline{P_{T,AB}P_{1,AB}}, \overline{P_{T,AB}P_{2,AB}}, \overline{P_{T,AB}P_{3,AB}}, \overline{P_{T,AB}P_{4,AB}}) \quad (18)$$

Además, como se trata de un sistema multi estación, esto implica que puede existir una estación C, una estación D o n estaciones. Por lo tanto, el procedimiento consiste en hallar los puntos $P_{T,AB} = (x_T, y_T)$, $P_{T,AC} = (x_T, y_T)$ y $P_{T,BC} = (x_T, y_T)$. Este mismo principio se debe extender para n estaciones,

teniendo en cuenta las posibles combinaciones entre par de estaciones trianguladas como se muestra en la **figura 19**.

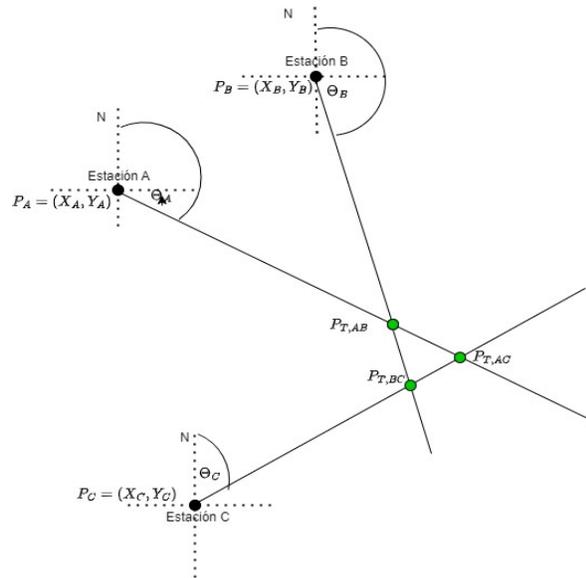


Figura 19. Método de triangulación multi estación para tres estaciones [21].

6 Metodología implementada en el proceso de localización

En esta sección se explican los conceptos implementados en la técnica de localización, así como los datos que se utilizaron para llevar a cabo el procedimiento. Así mismo, se retoma el sistema de localización multi estación para detallar como implementar la técnica y las consideraciones matemáticas que se tuvieron en cuenta para obtener un punto de localización que más adelante se conocerá con el nombre de $P_{T,Final}$.

Para el proceso de localización se utilizaron los datos recopilados por los O.V.S. En primera instancia, se analizó la técnica de localización adecuada para ubicar la fuente; con la técnica definida, se desarrollaron los algoritmos necesarios para ejecutar la herramienta software de localización. Por último, para el volcán Nevado del Ruiz se realizaron las pruebas, debido a que este volcán cuenta con un mayor número de arreglos acústicos permitiendo visualizar más datos y posibles fallas.

Teniendo en cuenta la instrumentación y la metodología implementada por los O.V.S para capturar y procesar las señales, se utilizaron métodos de triangulación para los azimuts obtenidos.

6.1 Datos obtenidos por el software VolcanStudio

id	dt	id_st1	id_st2	duration	max_crr	max_lag	backaz1	backaz2	backaz_err
1	2023-04-01 07:19:24.8	ACOLM.HDF.CM.01	ACOLM.HDF.CM.02	22.4	0.411	0.02	40.44	330.55	64.959
2	2023-03-19 10:24:57.6	ACOLM.HDF.CM.01	ACOLM.HDF.CM.02	22.4	0.538	-0.03	19.69	251.3	23.815
3	2023-05-11 19:25:32.8	ACRUM.HDF.CM.	ACRUM.HDF.CM.02	22.4	0.402	0	-1	-1	-1
4	2023-03-31 07:19:24.8	ACOLM.HDF.CM.01	ACOLM.HDF.CM.02	22.4	0.479	0	95.49	275.49	26.25
5	2023-04-16 02:31:56.8	ACINM.HDF.CM.01	ACINM.HDF.CM.02	22.4	0.764	-0.03	-1	-1	-1
6	2023-04-16 02:31:56.8	ACOLM.HDF.CM.01	ACOLM.HDF.CM.02	22.4	0.686	-0.01	119.69	251.3	23.815
7	2023-05-09 00:21:39.2	ACOLM.HDF.CM.01	ACOLM.HDF.CM.02	22.4	0.422	0	95.49	275.49	26.25
8	2022-01-21 10:31:40	ACOLM.HDF.CM.01	ACOLM.HDF.CM.02	0	1	0	287.27	83.72	0
9	2022-01-21 10:32:25	ACOLM.HDF.CM.01	ACOLM.HDF.CM.02	0	1	-0.02	237.74	133.24	0
10	2023-03-19 10:24:57.6	ACOLM.HDF.CM.01	ACOLM.HDF.CM.02	22.4	0.485	0.01	71.3	-60.31	35.246
11	2023-04-10 13:45:48.8	ACINM.HDF.CM.01	ACINM.HDF.CM.02	22.4	0.786	-0.03	-1	-1	-1
12	2023-05-09 00:22:24	ACOLM.HDF.CM.01	ACOLM.HDF.CM.02	22.4	0.409	-0.02	150.55	220.44	22.41
13	2023-05-11 19:31:31.2	ACRUM.HDF.CM.	ACRUM.HDF.CM.02	22.4	0.454	0.03	-1	-1	-1
14	2023-03-31 07:19:47.2	ACOLM.HDF.CM.01	ACOLM.HDF.CM.02	22.4	0.563	0	95.49	275.49	26.25
15	2023-04-01 07:38:04.8	ACOLM.HDF.CM.01	ACOLM.HDF.CM.02	22.4	0.413	-0.01	119.69	251.3	23.815
16	2023-04-16 02:32:19.2	ACOLM.HDF.CM.01	ACOLM.HDF.CM.02	22.4	0.438	-0.01	119.69	251.3	23.815

Figura 20. Base de datos de los eventos detectados mediante la rutina implementada en VolcanStudio. A) Histórico de eventos detectados. B) Nombre la/s estación/es que detectaron una señal infrasónica. C) Correlación máxima obtenida. D). Ángulos de incidencia inversos y error.

Como se mencionó anteriormente, se implementó la técnica y la herramienta software a partir de los datos recopilados por los Observatorios, para esto se consultó una base de datos que contiene las detecciones y los parámetros calculados por el software VolcanStudio. Esta base de datos se muestra y describe en la **figura 20**.

6.2 Implementación del sistema de triangulación multi estación

Retomando la metodología explicada en el apartado **5.15.1.4**, específicamente en la **ecuación 18**, se debe calcular la distancia del punto $P_{T,AB}$ al punto $P_{1,AB}$, luego para el punto $P_{T,AB}$ al punto $P_{2,AB}$ y así sucesivamente. El cálculo de la distancia entre dos puntos se puede ver desde una expresión vectorial y analítica:

Para la expresión vectorial se determina la distancia a partir de dos puntos A y B en el plano, la distancia del punto A a B se conoce como módulo del vector \overline{AB} y la expresión de la distancia está dada por $d(A, B)$.

En el caso de la expresión analítica, se consideran las coordenadas de los puntos $A(x_a, y_a)$ y $B(x_b, y_b)$, que se expresa como:

$$\overline{AB} = (x_b - x_a, y_b - y_a) \quad (19)$$

Por lo tanto, la expresión del cálculo de esta distancia será:

$$d(A, B) = |\overline{AB}| = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2} \quad (20)$$

Este desarrollo se realiza para cada punto $P_{n,AB}$, siendo $n = 1,2,3,4$ con el punto “ideal” (objetivo) $P_{T,AB}$

Al incrementar el número de estaciones a triangular, por ejemplo, tres estaciones, A, B y C, deben considerarse más puntos “ideales” denotados como, $P_{T,AB}$, $P_{T,AC}$ y $P_{T,BC}$, como se muestra en la **figura 19**; para el punto $P_{T,AB}$ se encontró una región delimitada R_{AB} por los interceptos hallados en el proceso anterior. Este proceso se repite para cada combinación de los posibles puntos P_T obteniendo en este caso tres regiones diferentes, R_{AB} , R_{AC} y R_{BC} , y calculando el error Δ para cada par, es decir, Δ_{AB} , Δ_{AC} y Δ_{BC} .

Ahora, si, Δ_{AB} es más pequeño que, Δ_{AC} y Δ_{BC} , entonces la probabilidad de que el objetivo esté en $P_{T,AB}$ es más alta que en los otros puntos. Sin embargo, si se considera la probabilidad más alta en uno de los otros puntos, la distribución de error no será suave, lo que implica una incertidumbre mayor en las medidas, debido a que los puntos, $P_{T,i}$, siendo, $i = AB, AC$ y BC , tienen su propia probabilidad Δ_i . Para corregir esto, se deben considerar todos los puntos $P_{T,i}$ en el análisis, para suavizar la distribución del error [21].

Entonces, considerando la probabilidad de cada predicción, se calcula un resultado final $P_{T,final}$, mediante el promedio ponderado de ubicación para los puntos $P_{T,i}$.

De lo anterior, la expresión para $P_{T,final}$, está dada por:

$$P_{T,final} = \frac{\sum_i W_i P_i}{\sum_i W_i} \quad (21)$$

Recordando que $i = AB, AC, BC$ y qué W_{AB} , W_{AC} y W_{BC} son los pesos de los puntos $P_{T,i}$.

La probabilidad de encontrar el objetivo en uno de los puntos localizados $P_{T,i}$, será el recíproco de la región delimitada por los puntos $P_{n,AB}$ analizados en el caso de dos estaciones.

Asumiendo que el área delimitada por los puntos $P_{n,AB}$ es proporcional al cuadrado de la función de error Δ_i , se obtiene:

$$A(P_{n,i}) \propto \Delta_i^2 \quad (22)$$

Donde A representa el área de la región delimitada $P_{n,i}$ y, recordando que $n = 1,2,3,4$. En consecuencia, la probabilidad será inversamente proporcional al cuadrado de la función del error Δ_i^2 . Matemáticamente:

$$p(P_{T,i}) \propto \frac{1}{\Delta_i^2} \quad (23)$$

Lo anterior expresa la probabilidad de la localización $P_{T,i}$. Esto implica que el ponderado W_i de la predicción del punto $P_{T,i}$ se puede calcular como $\frac{1}{\Delta_i^2}$, con esto se logra seleccionar una predicción de la localización con una mayor probabilidad.

6.3 Cuadrantes y condicionales

Mediante las pruebas realizadas se tomaron consideraciones en el proceso de localización debido a que la proyección de las rectas se distribuía en todo el plano; esto implicaba que los interceptos se podrían hallar equívocamente detrás de las estaciones si estas no se interceptaban en la proyección del ángulo, como se observa en la **figura 34**.

La solución consistió en clasificar los ángulos detectados de acuerdo con los cuadrantes donde se deben proyectar, además considerando si la pendiente es positiva o negativa, se pueden condicionar todos los puntos de coordenadas donde no se debe hallar ningún intercepto para el par de estaciones trianguladas, teniendo en cuenta, además, las posiciones prohibidas para el intercepto en esa triangulación.

Los cuadrantes se clasificaron de la siguiente forma:

Tabla 4. Cuadrantes de proyección.

Cuadrante	Rango
1	$\geq 0 < 90$
2	$\geq 90 < 180$
3	$\geq 180 < 270$
4	$\geq 270 < 360$

Si el cálculo de la pendiente es positivo, los cuadrantes permitidos para la proyección serán el primero y el tercero; si, por el contrario, la pendiente es negativa, los cuadrantes permitidos serán el segundo y el cuarto. Este sistema de cuadrantes se puede observar en la **figura 21**.

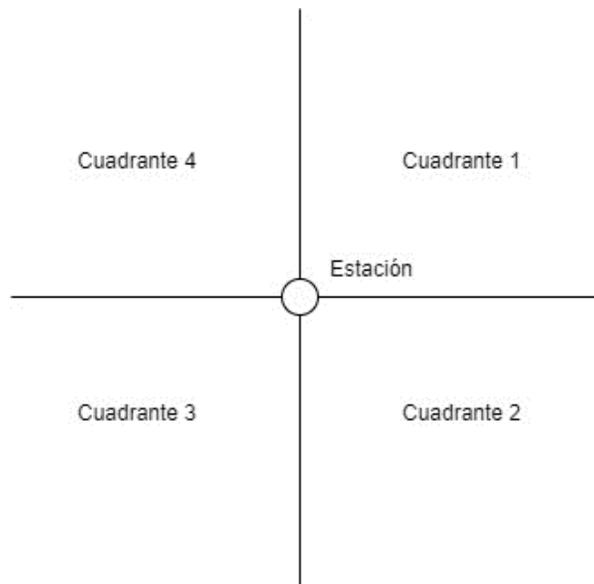


Figura 21. Cuadrantes de proyección para el ángulo identificado.

De esta forma se vuelve a obtener un proceso iterativo condicional para el par de estaciones trianguladas. Cada proceso contiene cuatro casos donde se determina la posición en los cuadrantes permitidos y los posibles interceptos con sus respectivas condiciones. A continuación, se explica el desarrollo de este método para las posibles combinaciones entre par de estaciones.

6.3.1 Pendiente Positiva – Positiva

- Estación 1: Cuadrantes (1,3)
- Estación 2: Cuadrantes (1,3)

Caso 1: (1,1), Caso 2: (1,3), Caso 3: (3,1) y Caso 4: (3,3)

6.3.2 Pendiente Positiva – Negativa

- Estación 1: Cuadrantes (1,3)
- Estación 2: Cuadrantes (2,4)

Caso 1: (1,2), Caso 2: (1,4), Caso 3: (3,2) y Caso 4: (3,4)

6.3.3 Pendiente Negativa – Positiva

- Estación 1: Cuadrantes (2,4)
- Estación 2: Cuadrantes (1,3)

Caso 1: (2,1), Caso 2: (2,3), Caso 3: (4,1) y Caso 4: (4,3)

6.3.4 Pendiente Negativa – Positiva

- Estación 1: Cuadrantes (2,4)
- Estación 2: Cuadrantes (2,4)

Caso 1: (2,2), Caso 2: (2,4), Caso 3: (4,2) y Caso 4: (4,4)

Cada caso particular está condicionado según la posición de las estaciones y los puntos donde puede o no existir un intercepto, de esta forma se condiciona cualquier posible error en el proceso de localización e intersección de las rectas.

6.4 Superposición de áreas y formación de polígono principal.

La implementación de esta técnica permite definir una región única en la cual se interceptan las áreas encontradas en cada triangulación por par de estaciones; siguiendo la metodología anterior, una vez se proyectan las rectas con los ángulos de arribo θ correspondientes y sus respectivos errores $\Delta\theta$, se almacenan las coordenadas que forman la región. Una vez realizado este proceso, se grafican las áreas encontradas y se escoge el polígono principal, siendo este el polígono encerrado o interceptado por las regiones identificadas; lo anterior, gráficamente se representa en la **figura 22**.

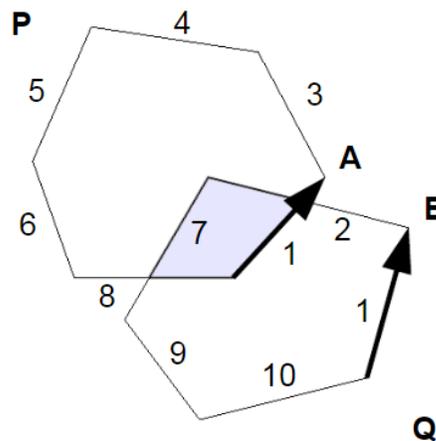


Figura 22. Polígono principal formado por el solapamiento o intersección de los polígonos obtenidos en la triangulación [32],[44] .

Con lo anterior, mediante procesos computacionales, se solapan los polígonos formados en cada triangulación y se escoge el mejor polígono, que representará el área con mayor probabilidad de encontrar el punto de localización buscado; adicionalmente, se pueden calcular varios parámetros representativos, como el área, perímetro y centroide; dando una visión al especialista sobre la ubicación que se quiere determinar y su congruencia con lo calculado.

Esta es una técnica de solapamiento de polígonos ampliamente utilizada en procesos geodésicos, topografía, procesamiento digital de imágenes y geometría computacional.

7 Resultados

En esta sección, se explica la gestión de la información utilizada para el sistema de localización, la forma en que organizaron los datos, así como las consideraciones y hallazgos que ocurrieron durante las etapas de desarrollo y pruebas. Así mismo, se mostraron los resultados obtenidos, las técnicas implementadas y a partir de que herramientas se pueden visualizar los datos calculados.

7.1 Análisis exploratorio de datos y consideraciones de preprocesamiento.

Para la consolidación de la base de datos, se realizó un filtrado de información cubriendo varios aspectos que afectan el proceso de localización. Para esto, se implementó un filtro en función de los datos obtenidos con la correlación cruzada en donde los datos con un valor máximo de correlación (*maxcorr*) menores a 0.4 [48] no se tuvieron en cuenta, debido a que son medidas con una incertidumbre muy alta y, por lo tanto, no se puede confirmar si corresponde a un evento infrasónico. Por otro lado, debido a la cantidad de datos registrados por una misma estación para un mismo evento, se implementó una rutina iterativa de búsqueda que optimiza la información seleccionada por ventana de tiempo analizada, esto ocurre, cuando en una ventana de tiempo se encuentran 5 medidas de una misma estación (por ejemplo, inderena (ACINM)) con los mismos datos y un dato de otra estación (por ejemplo, olleta (ACOLM)). Como el programa requiere de al menos dos estaciones para localizar un evento, realiza un proceso iterativo eliminando los datos repetidos dentro de la ventana identificada, permitiendo, solo los datos con diferentes valores y diferentes estaciones para una misma ventana de tiempo. Luego, todos los datos de la ventana son organizados en *DataFrames* que se pasan al script de triangulación para realizar los cálculos correspondientes.

7.2 Herramienta Software.

Con el propósito de verificar si la técnica triangulación funcionaba correctamente, se programó una rutina para datos puntuales y datos de prueba. Para esto, se desarrolló una metodología mediante un Jupyter Notebook en donde se pueden ejecutar partes del código y compararlos rápidamente.

El proceso de verificación consideró datos ideales con ángulos inversos apuntando hacia el cráter del volcán o cercano a este; además, se consideraron: las coordenadas de las estaciones y del volcán, las conversiones necesarias y los cálculos pertinentes. Esto requiere que, en cada instancia, se depuren paso a paso los datos obtenidos por cada función; los resultados obtenidos se pueden comprobar introduciendo la información en algún sistema de información geográfica como Google Earth o ArcGIS y comparándola con los obtenidos en la rutina.

A continuación, se muestran los datos calculados en la rutina de verificación.

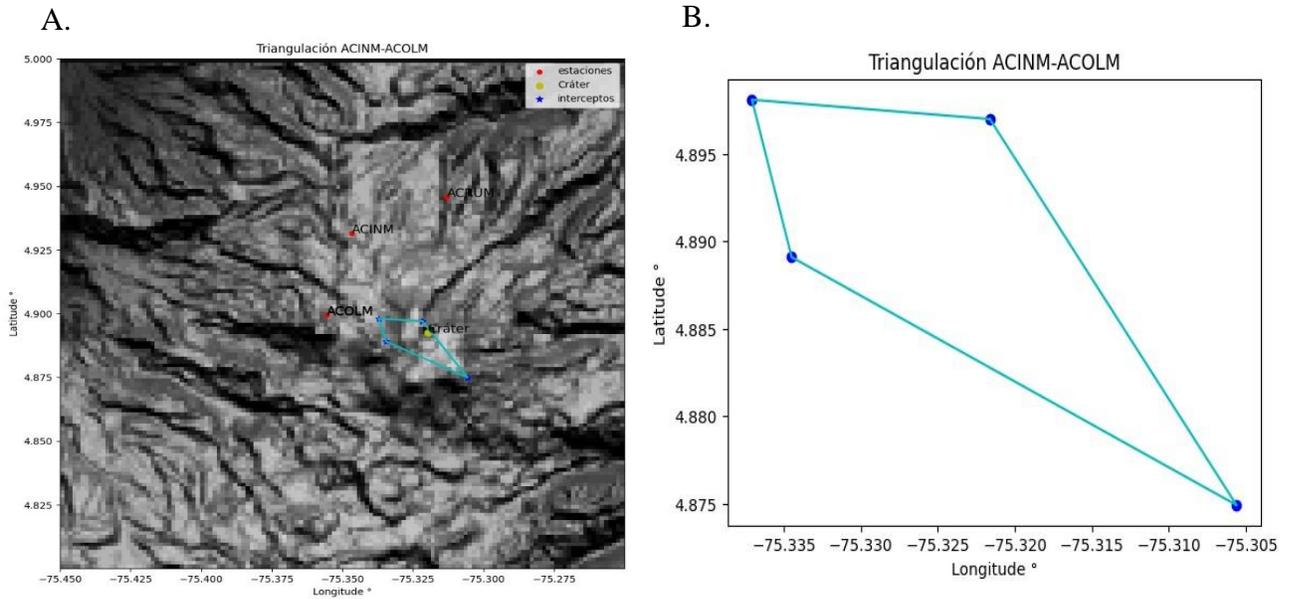


Figura 23. A) Triangulación para las estaciones ACINM y ACOLM en el Volcán Nevado del Ruíz. B) Región obtenida a partir de los interceptos calculados en la triangulación.

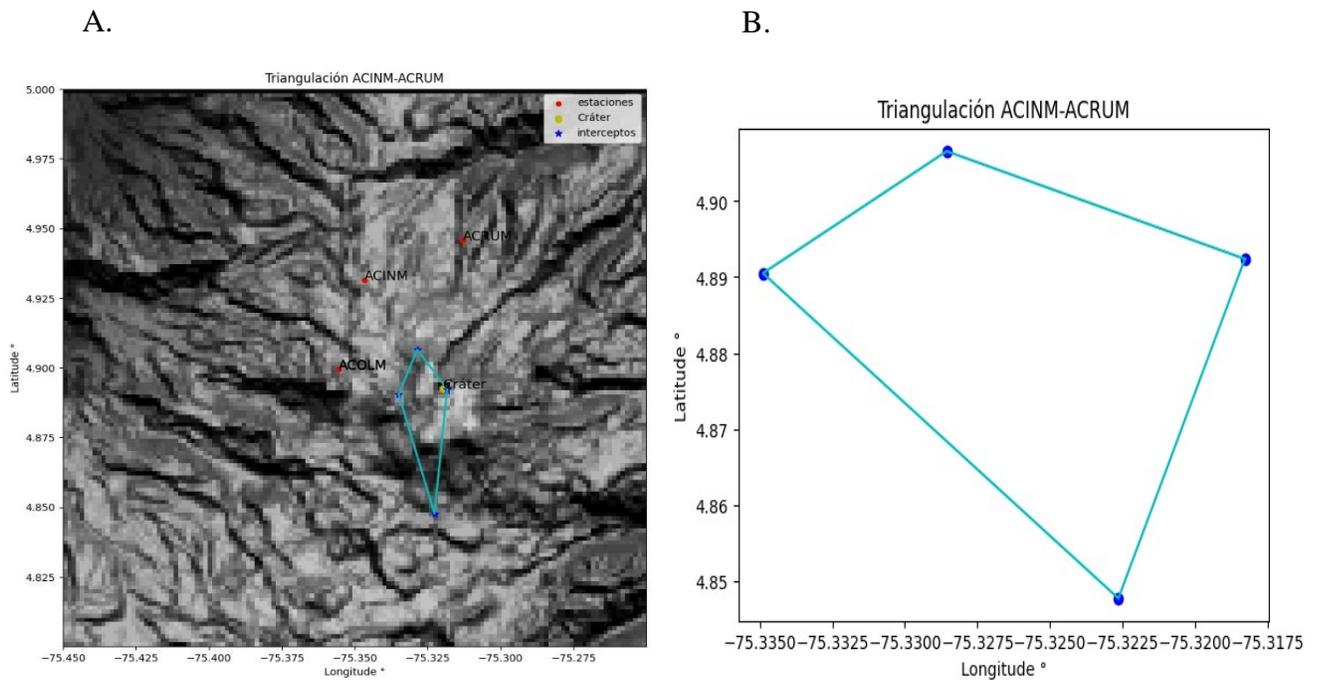


Figura 24. A) Triangulación para las estaciones ACINM y ACRUM en el Volcán Nevado del Ruíz. B) Región obtenida a partir de los interceptos calculados en la triangulación.

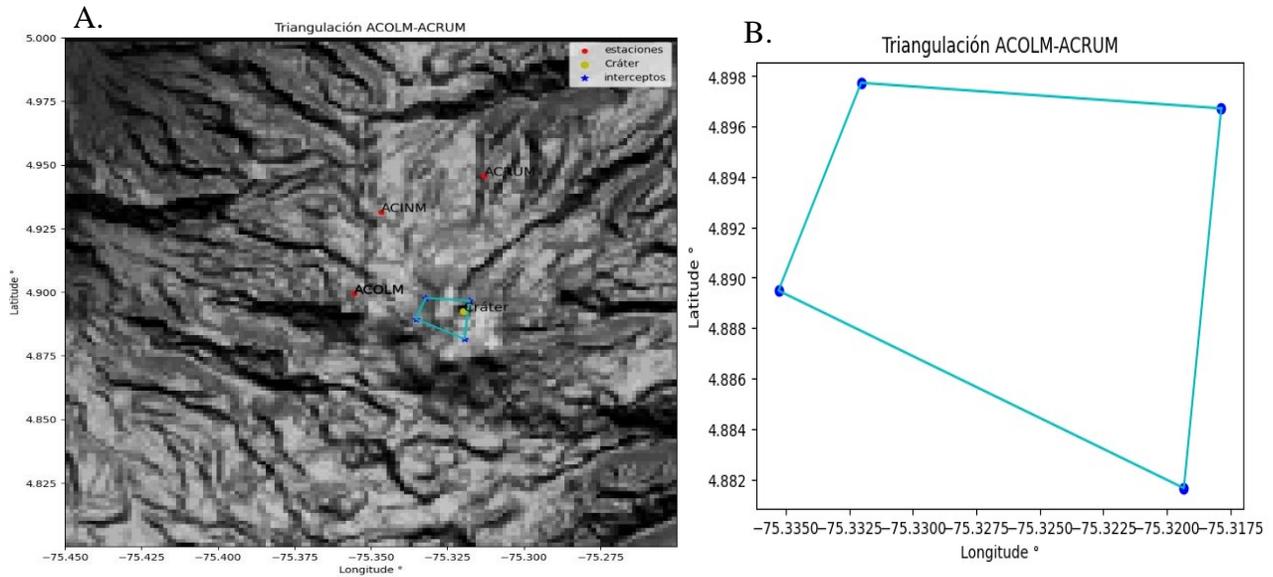


Figura 25. A) Triangulación para las estaciones ACINM y ACRUM en el Volcán Nevado del Ruíz. B) Región obtenida a partir de los interceptos calculados en la triangulación.

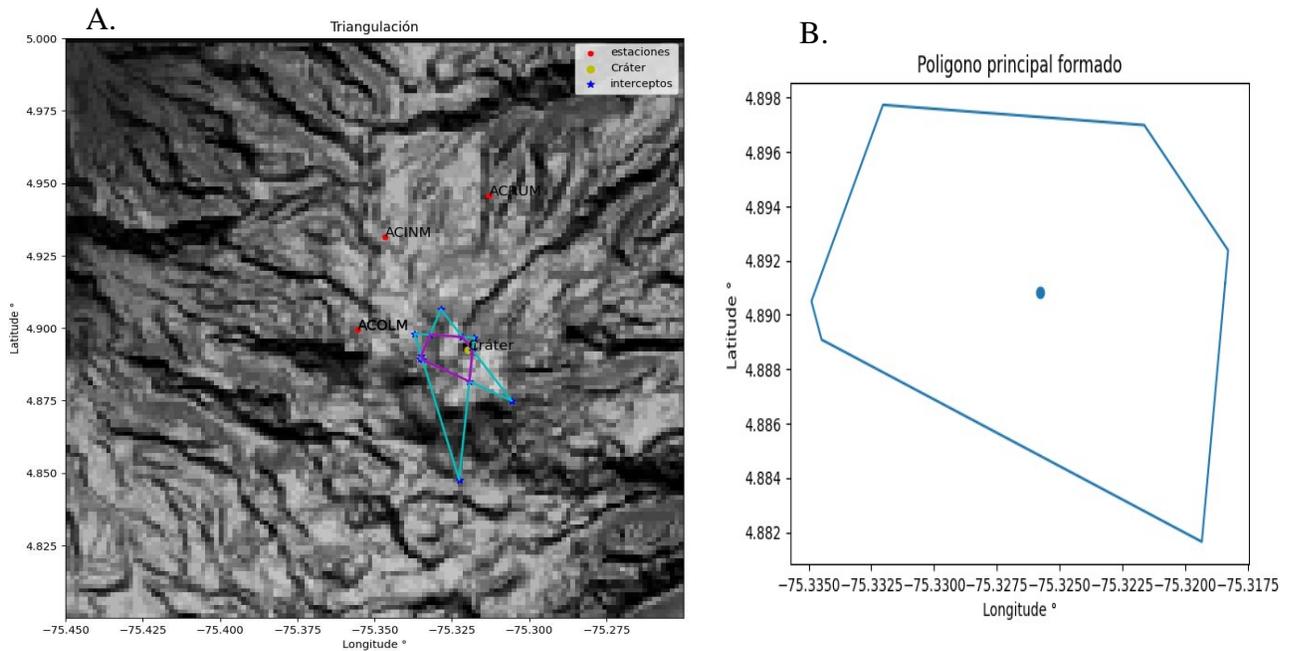


Figura 26. A) Regiones formadas por los interceptos calculadas en cada par de triangulaciones en el Volcán Nevado del Ruíz. B) Obtención del polígono principal.

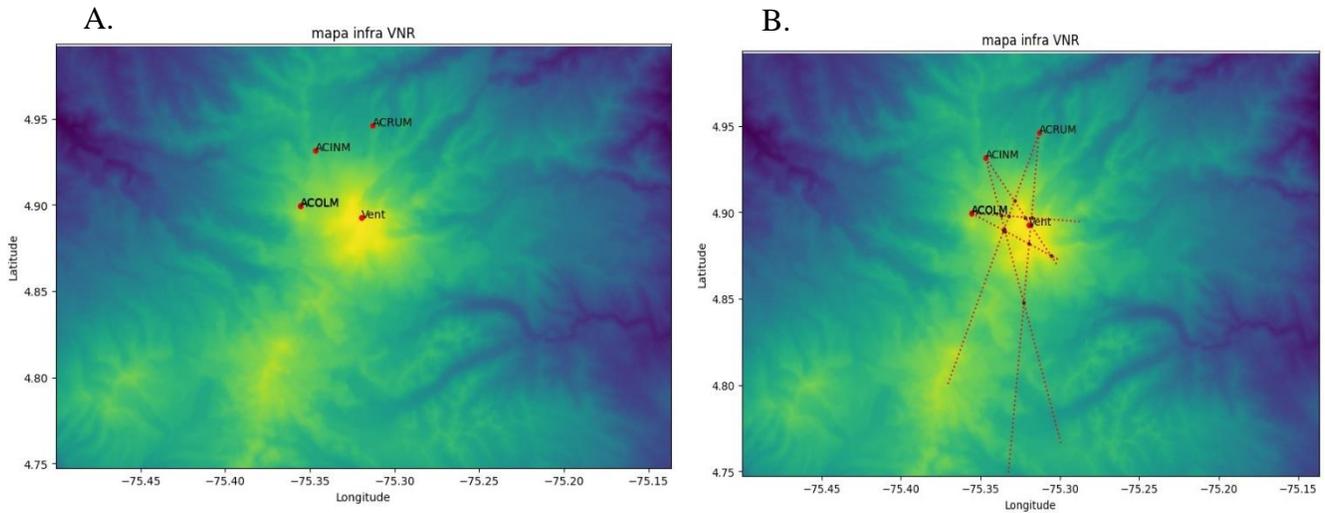


Figura 27. A) Regiones formadas por los interceptos calculadas en cada par de triangulaciones en el Volcán Nevado del Ruíz. B) Obtención del polígono principal a partir de la proyección de los ángulos $\Delta\theta$.

De las **figuras 23 a 26**, se muestra el proceso ejecutado para obtener las regiones descritas en la técnica de localización multi estación. La **figura 23, 24 y 25**, calculan las regiones para las diferentes triangulaciones entre las estaciones ACINM, ACOLM y ACRUM. En las imágenes B., los puntos azules representan los interceptos formados a partir de la proyección de cada ángulo $\Delta\theta$ explicado en las ecuaciones **7, 8, 9 y 10**. Estas regiones son interceptadas para formar un polígono principal, representado con color morado en la imagen A., como se muestra en la **figura 26**; representando el área o región más probable donde se puede encontrar la ubicación del evento. Además, se calculan los puntos que delimitan esta región, que, en la proyección representan las coordenadas de ubicación; adicionalmente, se pueden calcular parámetros como el centroide, perímetro, área, entre otros. Por último, la **figura 27**, muestra cómo se proyectan estos ángulos en el sistema coordenado específicamente en el Volcán Nevado del Ruíz.

Una vez, se confirmaron los datos y se verificó la técnica a implementar, se desarrolló la rutina de localización, cargando los datos y archivos de configuración brindados por el OVSPo. Para la construcción del sistema, se implementaron ocho scripts que se muestran en la **figura 30**, dentro del contenedor **Loc**. Los algoritmos desarrollados permitieron realizar: el filtrado de los datos, la implementación de los archivos de configuración, las conversiones, los cálculos de triangulación e iteraciones y el retorno a la base de datos principal.

Mediante el modelo de arquitectura software C4 se explica el proceso de interacción con el usuario, así como la arquitectura del software de localización en tres niveles principales. Cada nivel muestra la configuración que permite la ejecución del software; sin embargo, este modelo se enfoca en mostrar como ocurre el proceso de

localización y las rutinas que utiliza para ello, por lo cual, no se consideran todos los archivos que conforman el programa VolcanStudio.

El primer nivel representado en la **figura 28**, muestra como el software se comunica de forma sencilla con el usuario. Para el segundo nivel en la **figura 29**, se expone el sistema principal, sus componentes (rutinas), contenedores (archivos) y almacenamiento de datos que conforman el programa; detallando, cómo se comunican y las acciones que emplean para ejecutarse.



Figura 28. Comunicación usuario-software para VolcanStudio.

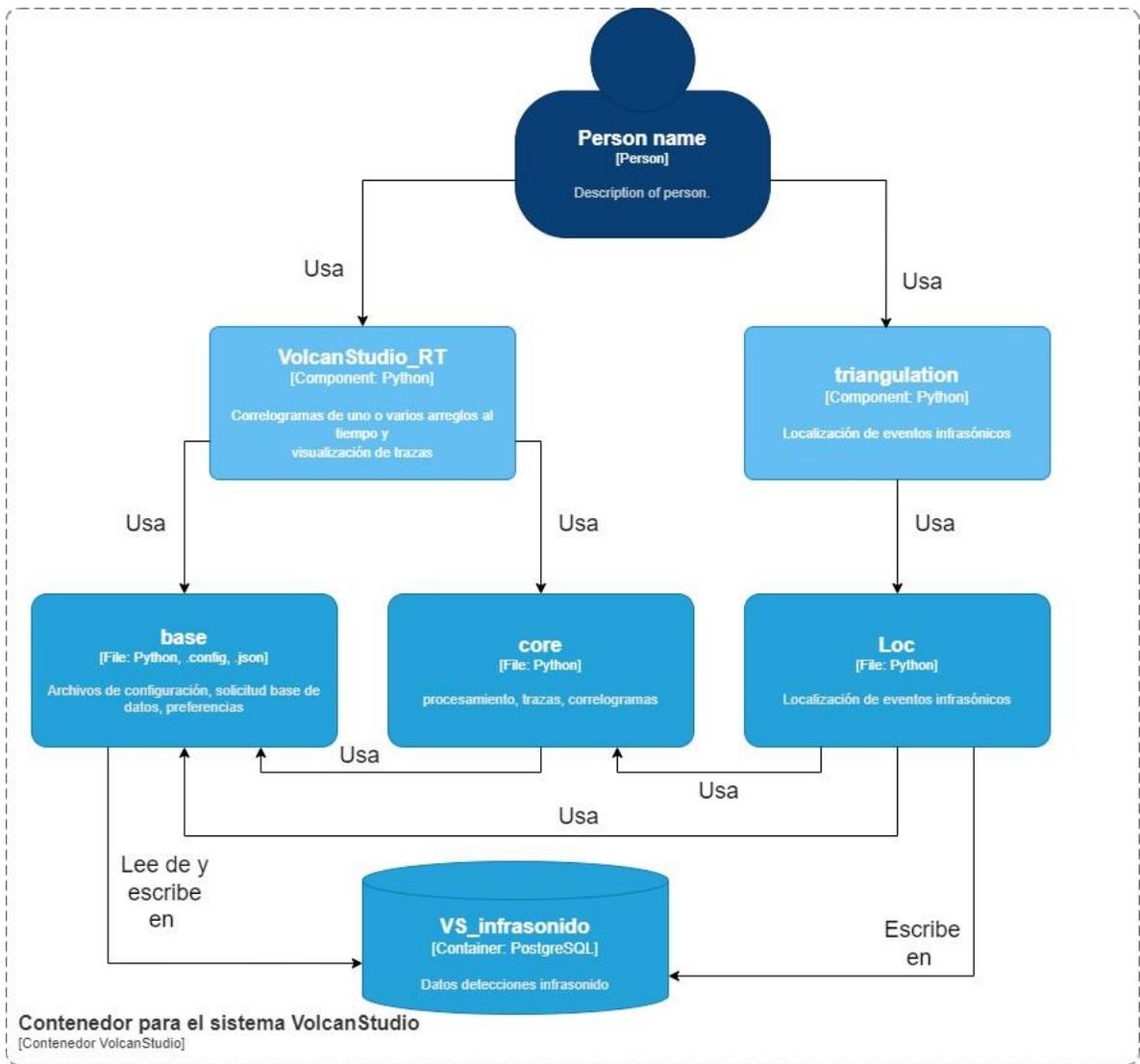


Figura 29. Comunicación de los componentes principales con los contenedores de archivos y la base de datos.

Finalmente, para el tercer nivel, en la **figura 30**, se detallan los componentes que conforman cada contenedor; es decir, los scripts contenidos en cada carpeta que constituyen el sistema de localización. En esta figura se muestra la comunicación entre scripts de diferentes contenedores, y a su vez, como interactúan entre ellos. Además, el diagrama muestra cuales son los encargados de leer y retornar información a la base de datos.

Por otro lado, para el desarrollo del sistema de localización, se implementaron dos procesos que se deben ejecutar en paralelo haciendo uso de la librería **Threading** en Python, conocidos comúnmente como hilos. Esto, soluciona el problema de la ejecución en tiempo real y el proceso de consultas ejecutándose al mismo tiempo. En consecuencia, mientras el programa principal *realtime* se ejecuta en tiempo real, paralelamente, permite hacer consultas de usuario en donde se genera una tabla temporal en la base de datos con las localizaciones y

los atributos calculados. Otra herramienta útil es que permite visualizar los datos encontrados haciendo uso de las librerías de visualización.

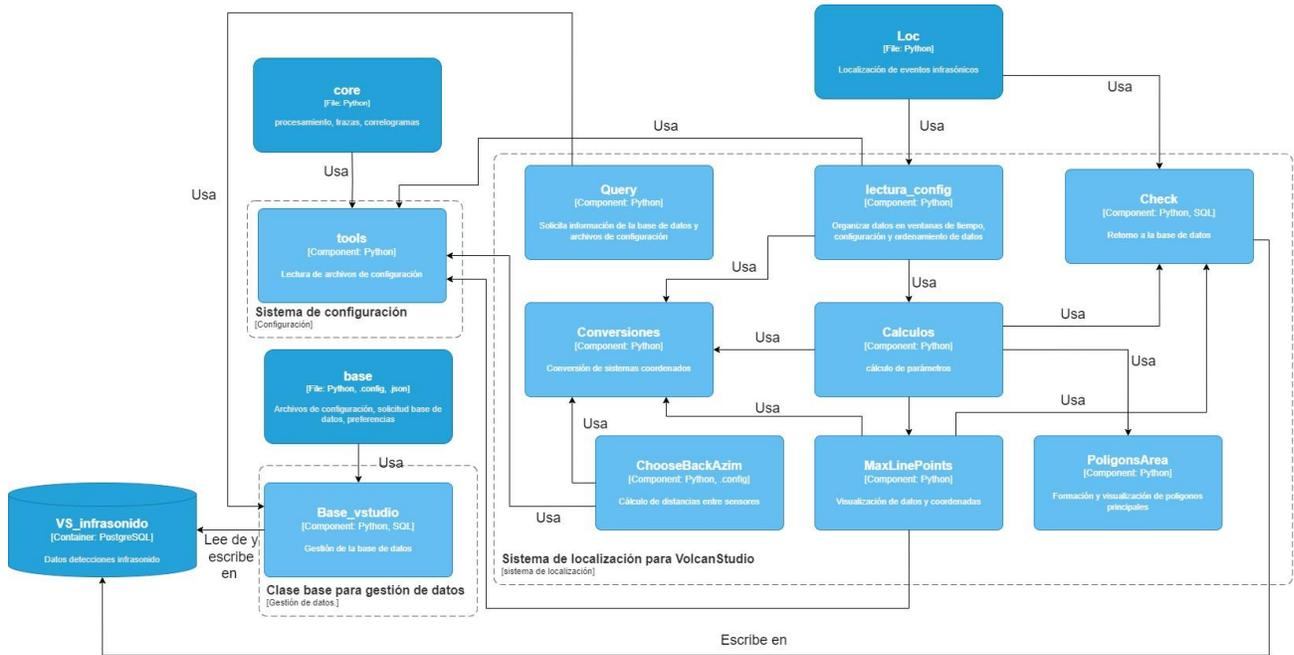


Figura 30. Arquitectura del sistema de localización, contenedores principales y comunicación entre componentes de diferentes contenedores.

7.3 Flujo del programa

El proceso de localización se basa en ocho scripts almacenados dentro de la carpeta **Loc**; estos scripts, y, los archivos de configuración *.config* y *.json*, son llamados por el programa principal *triangulation*. Así mismo, el sistema usa otros scripts de rutinas establecidas dentro del software para ejecutar las consultas, conversiones, cálculos y retorno de registros a la base de datos manteniendo una secuencia lógica durante toda la ejecución tanto para las consultas como en tiempo real, este esquema se muestra en la **figura 30**.

Aunque se desarrollaron ocho scripts para ejecutar organizar y visualizar los datos, los scripts más destacados dentro del sistema son *LecturaConfig* y *Calculos*.

En *LecturaConfig*, se ajustan los datos de configuración junto con los datos obtenidos y filtrados de la base de datos. Luego el mismo script mediante rutinas de selección basadas en criterios de configuración elige el volcán del que proviene cada señal, encuentra las coordenadas correspondientes, divide la información por observatorios (OVS), selecciona las ventanas de tiempo, reajusta los datos repetidos y/o erróneos, organiza los datos en *DataFrames* de acuerdo con la ventana seleccionada y, por último, envía la información ordenada al script *Calculos.py*, el cual, se encarga de realizar todas las operaciones necesarias para la localización. Esto implica ejecutar las conversiones de coordenadas, cálculo de interceptos, iteraciones entre par de estaciones,

ajuste de errores, selección de áreas y puntos, y, por último, retorno de los datos correctamente organizados a la base de datos mediante el script *Check.py*. El esquema de retorno de información se muestra y describe en la **figura 31**.

Durante la implementación de la técnica de localización, se realizaron pruebas puntuales en donde se buscó considerar todos los escenarios posibles. Lo que requirió el uso de parámetros que se deben tener en cuenta antes de realizar el proceso de localización; por ejemplo, la base de datos no discrimina los registros por Observatorio, en cambio, se tiene un conjunto de datos global con todos los registros combinados. Por ello, fue indispensable el desarrollo de una rutina que, mediante siglas identificativas de cada estación, determina a que Observatorio corresponden los registros y los almacena para luego ser procesados.

id	id_station	pwnfinal	polygon_obj	centroid_polygon	id_station_triangulation	vent_code
110		(-75.368088515...	((-75.35241805344951,4.898367823039447),(-7...	(-75.38452178963348,4.91834...	{141631,14175...	M
117	117	(-75.379377068...	((-75.3519991211978,4.900763840157566),(-75...	(-75.33629520459341,4.92175...	{141631,14175...	M
118	118	(-75.379377068...	((-75.3519991211978,4.900763840157566),(-75...	(-75.33629520459341,4.92175...	{141631,14175...	M
119	119	(-75.391967004...	((-75.38260150333483,4.908578911643652),(-7...	(-75.34356453091804,4.91153...	{141631,14175...	M
120	120	(0,0)	((-75.45870694504316,4.860117879878058),(-7...	(-75.17947896327172,4.86023...	{141631,14175...	M
121	121	(-75.368088515...	((-75.35241805344951,4.898367823039447),(-7...	(-75.38452178963348,4.91834...	{141631,14175...	M
122	122	(-75.379377068...	((-75.3519991211978,4.900763840157566),(-75...	(-75.33629520459341,4.92175...	{141631,14175...	M
123	123	(-75.391967004...	((-75.38260150333483,4.908578911643652),(-7...	(-75.34356453091804,4.91153...	{141631,14175...	M
124	124	(0,0)	((-75.45870694504316,4.860117879878058),(-7...	(-75.17947896327172,4.86023...	{141631,14175...	M
125	125	(-75.368088515...	((-75.35241805344951,4.898367823039447),(-7...	(-75.38452178963348,4.91834...	{141631,14175...	M
126	126	(-75.379377068...	((-75.3519991211978,4.900763840157566),(-75...	(-75.33629520459341,4.92175...	{141631,14175...	M
127	127	(-75.391967004...	((-75.38260150333483,4.908578911643652),(-7...	(-75.34356453091804,4.91153...	{141631,14175...	M
128	128	(0,0)	((-75.45870694504316,4.860117879878058),(-7...	(-75.17947896327172,4.86023...	{141631,14175...	M
129	129	(0,0)	((-75.28863184781478,4.924890866280407),(-7...	(-75.60302251835756,4.95609...	{141754,14163...	M
130	130	(-75.346037523...	((-75.34661350970279,4.902814701568225),(-7...	(-75.34601464352747,4.89801...	{141754,14163...	M
131	131	(-75.356119276...	((-75.37358686024643,4.934541048943163),(-7...	(-75.3655420977553,4.933296...	{141754,14163...	M
132	132	(0,0)	((-75.34660283415943,4.882060578633283),(-7...	(-75.34596388522573,4.89566...	{141754,14163...	M

Figura 31. A). Nombre de la tabla donde se almacena la información de las localizaciones. B). Punto de localización calculado. C). Coordenadas del polígono formado por los interceptos. D). Id de las estaciones utilizadas en proceso de localización. E). Código con el que se discriminan los datos encontrados por observatorio y volcán.

Otro desafío, previo al proceso de localización, fue la identificación de medidas de una sola estación, limitando por completo la técnica, debido a que requiere de al menos los registros de dos estaciones diferentes para brindar una ubicación. Adicionalmente, se encontró para una ventana de tiempo, una misma estación con registros diferentes; esto implica que, aunque los registros sean diferentes, pertenecen a una misma estación, lo cual no permite la triangulación y por lo tanto, solo permite estimar la dirección de arribo de la señal, en consecuencia, fueron catalogados como datos “erróneos”. Los datos considerados “erróneos” en el proceso, son filtrados durante la ejecución, teniendo en cuenta que el programa debe funcionar en tiempo real y, por lo tanto, debe filtrar los datos una vez los identifica y continuar con el análisis.

Los primeros filtros de datos no deseados para la localización permitieron identificar ventanas donde una misma estación tiene diferentes registros, pero contiene uno o más registros de otra estación. Para aclarar el proceso:

1. Se agrupan las detecciones por tiempo y se filtra por volcán y datos erróneos.
2. Requiere de al menos dos estaciones para encontrar una localización
3. Las estaciones trianguladas deben ser diferentes
4. Se aplican todas las combinaciones posibles con cada detección

La **figura 32**, muestra los comandos de ejecución del sistema, donde se especifica el programa principal de arranque, *triangulation.py* y luego se especifica el comando de consultas o ejecución en tiempo real.

```

C:\Windows\System32\cmd.exe - python triangulation.py query
D:\PC SEBAS OJO\SEBAS\Laboral\ServicioGeologico\Script localizacion\volcanstudio-realtime>python triangulation.py query
--> Iniciando script de localización <--
ingrese la fecha de inicio "aaaa/mm/dd H:M:S.f": 2023/04/10 21:37:20.0
ingrese la fecha final "aaaa/mm/dd H:M:S.f": 2023/04/10 21:47:00.0
  
```

Figura 32. i) Recuadro rojo: Comando de arranque sistema localización para consultas. ii) Recuadros azules: Periodo que comprende las fechas de consulta.

En la **figura 33**, se puede observar la selección de la ventana de tiempo, la identificación por volcán y el filtrado de datos; además, se muestra cómo se realiza el proceso iterativo, los cálculos, conversiones y la organización de los datos.

```

C:\Windows\System32\cmd.exe
To triangulation, d_t_to_angles
dt          id_st1          id_st2          ...          longitude          latitude          ventCode
0 2023-03-06 14:42:11.200  ACOLM.HDF.CM.01  ACOLM.HDF.CM.02  ...  460581.972458  541556.798818  M
1 2023-03-06 14:42:11.200  ACRUM.HDF.CM.  ACRUM.HDF.CM.02  ...  465293.375085  546686.265084  M
2 2023-03-06 14:42:33.600  ACOLM.HDF.CM.01  ACOLM.HDF.CM.02  ...  460581.972458  541556.798818  M

[3 rows x 13 columns]
TriangulationData
0 119.69
1 157.42
Name: backaz1, dtype: float64
0 -108.70
1 336.39
Name: backaz2, dtype: float64
0 ACOLM.HDF.CM.01
1 ACRUM.HDF.CM.
Name: id_st1, dtype: object
0 ACOLM.HDF.CM.02
1 ACRUM.HDF.CM.02
Name: id_st2, dtype: object
bucle
[[119.69, -108.7], [119.69, 336.39], [157.42, -108.7], [157.42, 336.39]]
iterator azimuths
[119.69, -108.7]
iterator
backaz backaz_err
0 119.69 23.815
1 -108.70 2.912
*** Check Angles ***
longitude latitude iden
0 458258.608552 544697.218046 PP
1 458715.125623 544080.158022 PN
2 450735.230676 542570.018457 NP
3 454043.905226 542229.559236 NN
[array('d', [-75.40507168335886]), array('d', [4.915218850813955])]

interceptos
interceptos_degrees
longitude latitude identificador
0 -75.376499 4.927818 PP
1 -75.372378 4.922238 PN
  
```

Figura 33. Vista de ejecución del software en consola.

Con la identificación y corrección de errores en los registros, se ejecutó la técnica de localización y se graficaron los resultados para pequeñas ventanas de tiempo, con el objetivo de identificar anomalías durante el proceso.

Una anomalía encontrada mediante el sistema de superposición de áreas y construcción de polígonos fue que en muchos escenarios es indispensable contar con al menos los registros de tres estaciones diferentes, de lo contrario, el polígono formado puede sobrepasar el límite de la zona analizada y formar polígonos extremadamente grandes, esto considerando que en ciertos escenarios los ángulos $\Delta\theta$ no se interceptan o se interceptan en puntos muy alejados de los de estudio. Por lo tanto, esta técnica solo se aplica cuando en la ventana de tiempo se registran los datos tres estaciones diferentes.



Figura 34. Interceptos equívocos encontrados en el proceso de triangulación.

Por último, fue necesario condicionar la dirección en que los ángulos proyectados se interceptaban. En el proceso de proyección de ángulos, cuando no se encuentra un intercepto en la dirección de la que proviene la señal, se proyecta una línea sobre todo el espacio buscando un intercepto; esto implica que la línea se traza por delante y por detrás de la estación, generando interceptos falsos y afectando la formación de áreas, polígonos, punto de localización y cálculo de errores. Para esto, se implementó la metodología descrita en la **sección 6.3**.

7.4 Registros localizados

Para el desarrollo del software, se trabajó con una base de datos que contiene registros que van desde 2022/05/01 00:16:48.0 hasta el 2023/05/16 00:23:53.6. Esta consta de 87562 registros, de los cuales, 43228 corresponden al Volcán Nevado del Ruíz.

Al clasificar los datos del VNR se obtiene que:

- 38699 corresponden a la estación ACOLM
- 2410 corresponden a la estación ACINM
- 2119 corresponden a la estación ACRUM

Una vez procesados y filtrados por el software de localización, son preseleccionados 39340 posibles datos para triangular. Después de ejecutado el programa, se obtienen 1618 localizaciones. En la **figura 35**, mediante el diagrama de caja o *boxplot*, se muestran que la mayor cantidad de datos localizados se encuentran entre 1 y 10 km de distancia al cráter. Además, este grafico permite visualizar el limite superior e inferior y los valores atípicos representados como círculos.

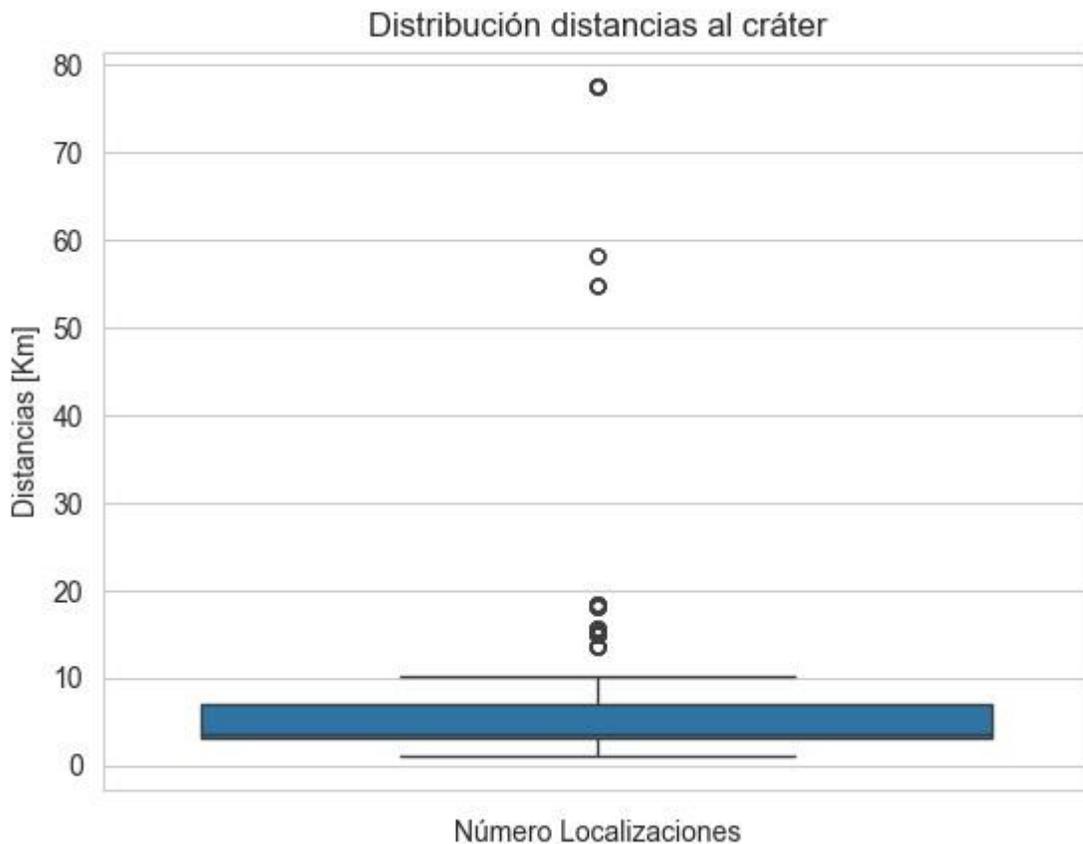


Figura 35. Diagrama de caja de la distribución de distancias al cráter respecto al número de localizaciones

En la **figura 36**, a través del diagrama de barras se puede observar la cantidad de datos localizados en cada uno de los rangos de distancias al cráter.

- Rango 1 a 2 km, 151 de 1618
- Rango 2 a 3 km, 14 de 1618
- Rango 3 a 4 km, 777 de 1618
- Rango 4 a 10 km, 566 de 1618
- Rango mayor a 10 km 110 de 1618

Se obtiene la mayor cantidad de datos localizados entre los 3 y 4 km (iii) de distancia al cráter, el segundo más alto es el rango de 4 a 10 km(iv) y el tercer rango más representativo es de 1 a 2 km (i).

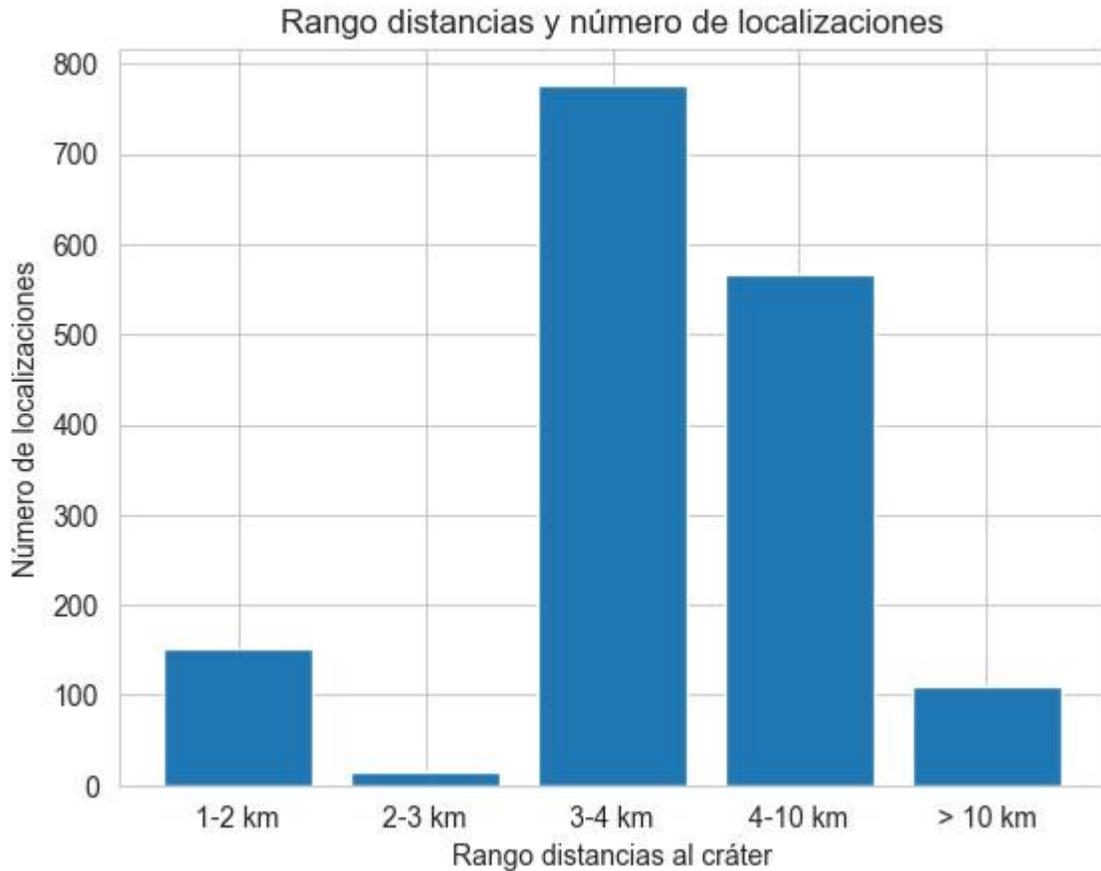


Figura 36. Representación del numero de localizaciones en cada rango de distancias al cráter.

7.5 Validación del software

Mediante las técnicas de localización multi estación, superposición de áreas y formación del polígono principal, se implementó una tabla dentro de la base de datos del OVSPo, donde se almacenan las localizaciones, polígonos, áreas formadas, coordenadas y estaciones que se triangularon para obtener dichas medidas. Estos datos permiten obtener una tabla temporal, en caso de acceder mediante el método de consulta, o una tabla principal, en donde se almacenan los datos para la ejecución en tiempo real. La tabla almacenada se puede observar en la **figura 31**.

En cuanto a los cálculos realizados junto al ingeniero Carlos Alberto Ospina, se identificaron los puntos de localización para el Volcán Puracé y el Volcán Nevado del Ruiz y se visualizaron las ubicaciones aproximadas de eventos correspondientes a salidas de gases, producidos por la actividad volcánica.

El análisis de los correlogramas en la **figura 37**, permite visualizar cuando es detectado un evento. Si el correlograma se mantiene en la escala de azules se determina que no hay correlación entre señales por lo tanto el espectro azul es constante; sin embargo, cuando un evento es detectado, el espectro se perturba y se obtienen valores máximos de correlación representados por los tonos naranjas en el espectro. Particularmente, en esta figura, se puede evidenciar un evento detectado por las tres estaciones; para confirmar la veracidad del evento detectado, se cruzan los datos con otro sistema de monitoreo, en este caso a través del monitoreo por cámaras, se puede confirmar en el Volcán la emisión de gases asociada a las señales infrasónicas detectadas.

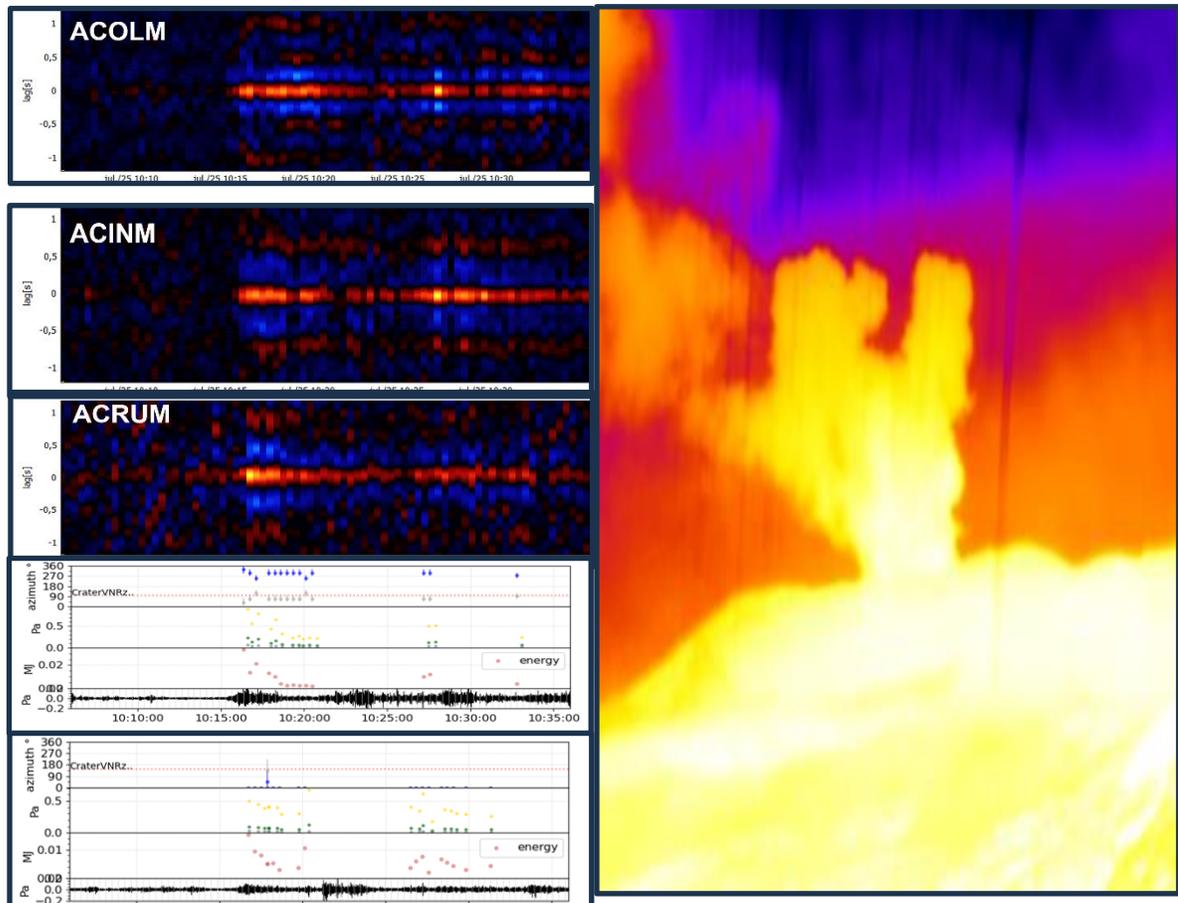


Figura 37. Correlogramas obtenidos mediante correlación cruzada entre par sensores que captan la señal de infrasonido a las 10:17 UTC del 25 de julio de 2021. Registro fotográfico donde se observa una actividad del volcán Nevado del Ruiz, asociada a la señal de infrasonido. Fuente SGC.

Mediante el software ArcGIS Earth, se visualizaron los datos coordenados almacenados en la base de datos, graficando los puntos de formación del polígono, el punto *pwfinal* y el centroide. En la **figura 38** Se puede ver una discrepancia entre el centroide del polígono y el punto *pwfinal*; esto ocurre cuando el intercepto de uno de los polígonos está muy alejado del área de estudio y forma una figura que cubre un área considerable. Aunque el cálculo del punto *pwfinal* se hace mediante *weight average localtion* y tiene en cuenta factores como la

distancia punto a punto de cada polígono formado en cada iteración. Se evidencia que la formación de polígonos muy grandes y fuera del rango si puede perturbar el cálculo de la ubicación, sin embargo, no se ve mayormente afectado considerando el gran tamaño del polígono formado.

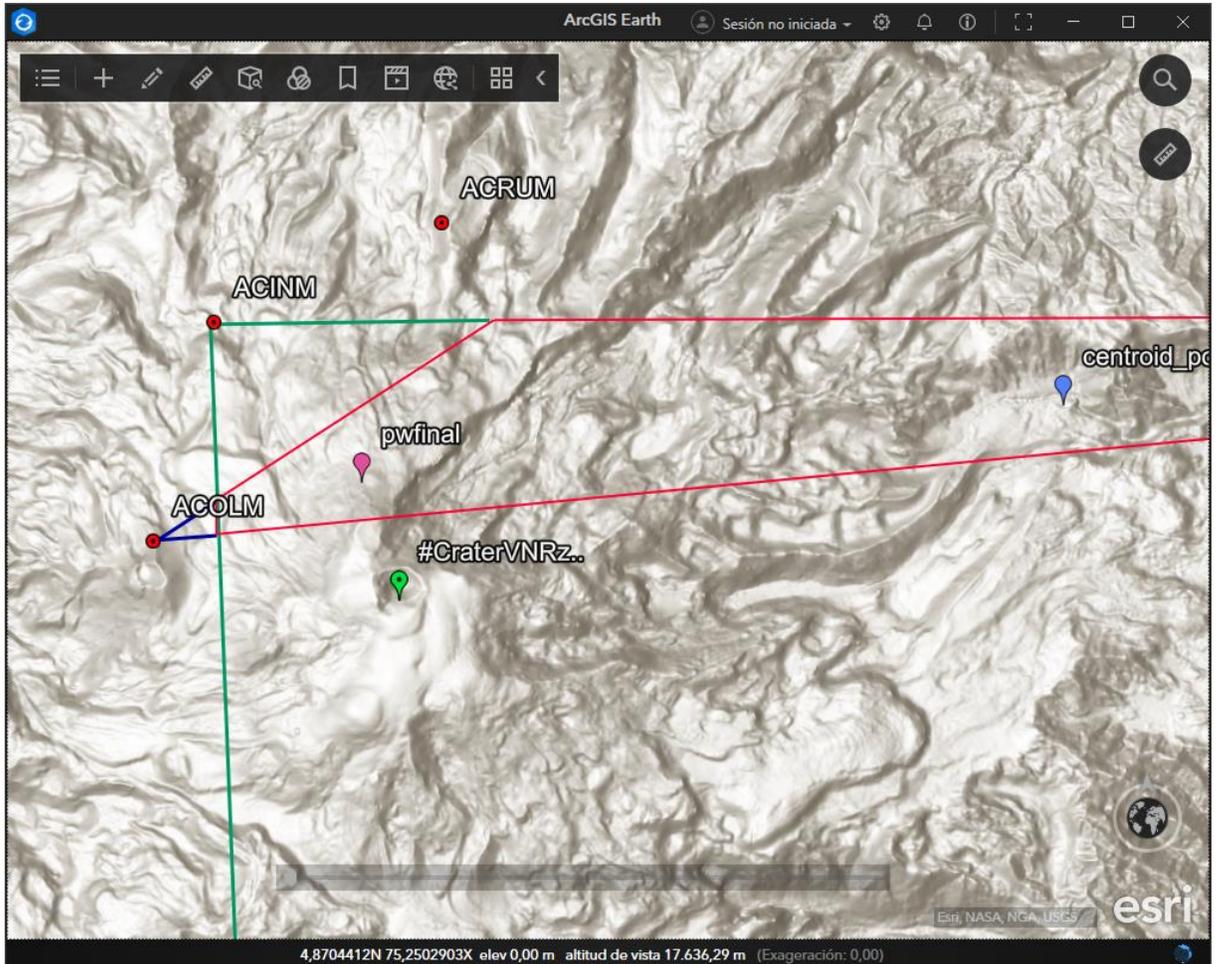


Figura 38. Localización de evento Volcánico asociado a la expulsión de gases en el Volcán Nevado del Ruiz.

Cabe resaltar, que la localización se hizo solo con dos estaciones; si la tercera estación detectara el evento claramente se cortaría el polígono y se obtendría una mejor medida.

Recientemente en el Volcán Puracé, se instaló un nuevo arreglo infrasónico permitiendo realizar pruebas con el software de localización desarrollado. En la **figura 39**, se observa el evento detectado de la misma manera en que se explicó para la **figura 37**; aquí, se evidencia un patrón de señales más recurrente de aproximadamente 5 minutos de actividad infrasónica detectada y se valida el evento detectado mediante el monitoreo de cámaras,

confirmando la emisión de gases en el cráter del volcán. Cabe aclarar que el Volcán Puracé pertenece a la cadena de los Coconucos por lo que la actividad infrasónica podría ocurrir en alguno de los Volcanes aledaños.

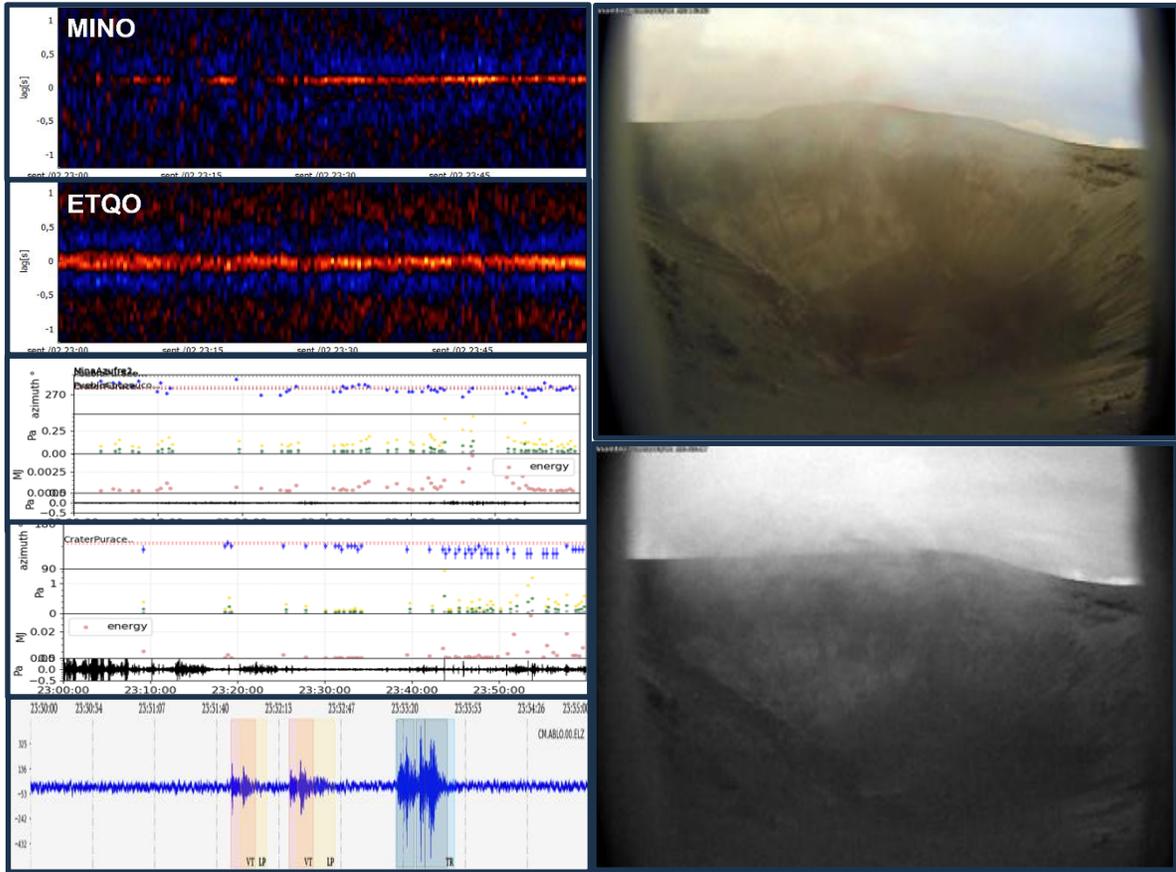


Figura 39. Correlogramas obtenidos mediante correlación cruzada entre par sensores que captan la señal de infrasonido a las 23:30 UTC del 2 de septiembre de 2023. Registro fotográfico donde se observa una actividad del volcán Puracé, asociada a la señal de infrasonido. Fuente SGC.

Nuevamente se graficaron los datos de localización almacenados en la base de datos y se obtuvieron medidas aproximadas a lo esperado para el evento detectado. En la **figura 40**, se evidencian dos localizaciones producto de la detección de dos eventos infrasónicos. Hay que resaltar que la ubicación de las estaciones de acústica en el Volcán Puracé favorece el sistema de localización al ubicarse en cuadrantes diferentes y permitiendo “cortar” el mapa con la proyección de sus ángulos inversos.

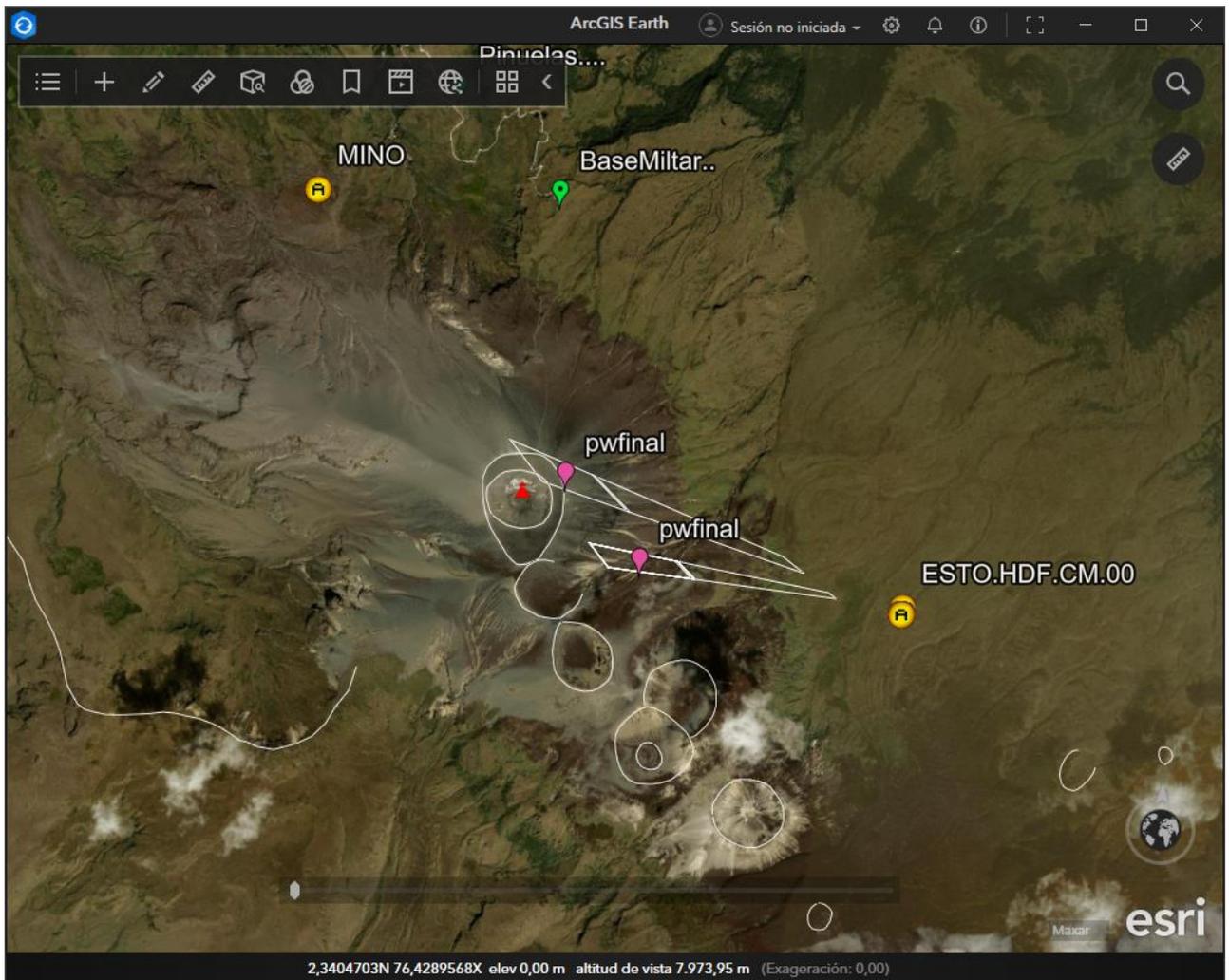


Figura 40. Localización de evento Volcánico, asociado a la expulsión de gases, en el Volcán Puracé. Tomado de Servicio Geológico Colombiano, Avances investigación Localización OVSPPO.

8 Alcances y limitaciones

La técnica implementada en el software permite localizar los eventos infrasonidos detectados; sin embargo, se deben tener las siguientes consideraciones cuando se opera con la herramienta.

1. El software depende de la calidad de los registros detectados, es decir, cuanto mejor se calculen los ángulos de dirección hacia la fuente y sus incertidumbres sean pequeñas, se obtiene una mejor localización.
2. Si bien el programa genera una localización, la precisión de ésta se ve directamente afectada por las incertidumbres en los ángulos inversos (hacia la fuente).

3. El sistema depende del número de estaciones instaladas para su funcionamiento; el software no es capaz de generar una localización con los datos de una sola estación.
4. Entre mejor distribuidos estén los arreglos infrasónicos, se obtendrá una mejor localización con distancias mucho más cercanas al cráter (considerando el primer punto).
5. El software aún no tiene la capacidad de clasificar las localizaciones entre señales antrópicas y señales provenientes del volcán; sin embargo, mediante las gráficas, se pueden observar los puntos localizados en el mapa.
6. Cuando el número de estaciones que detectan el evento aumenta y se logra una buena calidad en los registros, se consigue un área mejor formada y una localización más precisa.

9 Recomendaciones

Teniendo en cuenta las investigaciones realizadas para implementar el software de localización, se destacan las siguientes recomendaciones para implementar esta y otras técnicas de localización de fuentes de infrasonido.

1. Mejorar la arquitectura de los arreglos infrasónicos instalados.
2. Incrementar el número de estaciones de infrasonido y mejorar su distribución
3. La captura de datos de una sola estación limita las posibilidades de lograr una localización, por lo tanto, se recomienda verificar el correcto funcionamiento de las estaciones, así como su calibración.
4. Implementar sistemas de clasificación de las señales con algoritmos de aprendizaje de máquina.
5. Implementar herramientas y/o técnicas de minimización de ruido en campo.

10 Conclusiones

Se logró consolidar una base de datos óptima para realizar una localización adecuada, filtrando los datos con parámetros de correlación por debajo de 0.4 y filtrando la información de la base de datos principal; además, se ejecutaron procesos de limpieza de datos duplicados por ventana de tiempo analizada.

En el proceso de localización es indispensable organizar los registros para identificar errores en la técnica y determinación de la localización; destacando el análisis exploratorio de datos como una herramienta indispensable antes de ejecutar cualquier operación sobre los registros; no obstante, aún se pueden mejorar los filtros de las señales, resaltando la presencia señales antrópicas, es decir, ajenas al volcán y que son identificadas por los sensores afectando las medidas de localización. Para esto, se implementó un sistema de filtrado y clasificación basado en las coordenadas y direcciones de los ángulos arriba identificados.

Se demostró que la localización de fuentes de infrasonido volcánico es posible implementado técnicas conocidas como la función de correlación, tiempo de diferencia de arribo (TDOA) y el sistema de localización multi estación. Sin embargo y considerando lo presentado anteriormente, se deben tener en cuenta ajustes puntuales tanto en la calidad y filtrado de los de los datos como en la instalación de la instrumentación utilizada para obtener una correcta ubicación de la fuente. Además, cabe resaltar que incrementar el número de arreglos infrasónicos por volcán monitoreado, permitiría obtener una mayor precisión de localización y la implementación de otras técnicas.

Por otro lado, el software desarrollado cumple con el propósito principal de localizar las fuentes infrasónicas utilizando técnicas sencillas pero determinantes en este proceso. Además, se destaca el desarrollo y correcta implementación de los scripts para hacer uso de las funciones predefinidas dentro del programa principal *volcánstudio-realtime.py*, considerando que no interfiere con la ejecución previa y, por el contrario, representa un avance tecnológico en la consolidación de este como herramienta de monitoreo como apoyo para la gestión del riesgo por erupción volcánica en el país.

La técnica implementada permite confirmar visualmente cuando se obtiene un registro producto de salida de gases o una explosión en el volcán y relacionarla directamente con la traza infrasónica analizada. Es importante resaltar que esta técnica de validación mediante cámaras ya ha sido implementada por otros investigadores en el área [10], [15], [33]; lo cual brinda certeza sobre su aplicación como técnica de validación en este proyecto.

Por último, es importante destacar el infrasonido como una técnica indispensable en el monitoreo volcánico al permitir identificar comportamientos y anomalías que otras técnicas bajo diferentes perturbaciones climáticas no pueden detectar. Sin embargo, requiere de una correcta sinergia entre la instrumentación y

las herramientas software que posibilitan llevar a cabo las diferentes técnicas aplicables a este sistema de detección de señales.

11 Referencias

- [1]. 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). [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00409-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00409-2)
- [2]. Muñoz, J. (2002). Introducción a los infrasonidos y su recepción. [Trabajo de Grado] Universidad Austral de Chile.
- [3]. Ospina, Carlos. (2019). Monitoreo volcánico con infrasonido, Metodología SGC. Popayán: Servicio Geológico Colombiano.
- [4]. Cannata, A., Montalto, P., Privitera, E., & Russo, G. (2009). Characterization and location of infrasonic sources in active volcanoes: Mount Etna, September–November 2007. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2008JB006007>
- [5]. Johnson, J. (2019). Local Volcano Infrasound Monitoring. In *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies* (pp. 989–1022). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5_32
- [6]. Dabrowa, A. L., Green, D. N., Johnson, J. B., Phillips, J. C., & Rust, A. C. (2014). Comparing near-regional and local measurements of infrasound from Mount Erebus, Antarctica: Implications for monitoring. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 288, 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.10.001>
- [7]. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (s.f.). Volcán Nevado del Ruíz. Ministerio de Medio Ambiente. Recuperado el 6 de diciembre de 2023. <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/volcan-nevado-ruiz>
- [8]. Servicio Geológico Colombiano. (2023). Anomalía de Temperatura y Salida de Gases en el Flanco Suroriental del Complejo Volcánico Cerro Bravo. https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Informes%20tcnicos/Informe_tecnicoanomia_temperatura_gases_volcan_Cerro_Bravo_julio_2023.pdf
- [9]. Vega, L., Zorita, D. (s.f.). Infrasonidos y ultrasonidos. Universidad de Valladolid. Recuperado el 18 de octubre de 2023 https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_03_04/infra_y_ultra/infrasonidos.htm
- [10]. Chavarro, J. (2023). 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. [Trabajo de grado]. Universidad de Caldas.

- [11]. Garcés, M. A., Hansen, R. A., & Lindquist, K. G. (1998). Traveltimes for infrasonic waves propagating in a stratified atmosphere. *Geophysical Journal International*, 255–263. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00618.x>
- [12]. McKee, K., Fee, D., Haney, M., Matoza, R. S., & Lyons, J. (2018). Infrasound Signal Detection and Back Azimuth Estimation Using Ground-Coupled Airwaves on a Seismo-Acoustic Sensor Pair. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 6826–6844. <https://doi.org/10.1029/2017JB015132>
- [13]. 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). <https://doi.org/10.1029/2011GL050542>
- [14]. Rocha, G. D., Torres, J. C. B., Petraglia, M. R., & Vorländer, M. (2021). Direction of arrival estimation of partial sound sources of vehicles with a two-microphone array. *Acta Acustica*. <https://doi.org/10.1051/aacus/2021011>
- [15]. Castaño, L. M., Ospina, C. A., Cadena, O. E., Galvis-Arenas, B., Londono, J. M., Laverde, C. A., Kaneko, T., & 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*. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01197-z>
- [16]. Rawat, A. (2020). A Review on Python Programming. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 8–11. <https://journal.ijresm.com/index.php/ijresm/article/view/395>
- [17]. NumPy. (s. f.). The fundamental package for scientific computing with Python. Recuperado el 30 de octubre de 2023. <https://numpy.org/>
- [18]. Pandas - Python Data Analysis Library. (s. f.). Recuperado el 30 de octubre de 2023. <https://pandas.pydata.org/>
- [19]. OBSPY. (s. f.). A Python Framework for Seismology. Recuperado el 30 de octubre de 2023. <https://docs.obspy.org/>
- [20]. Matplotlib . (s. f.). Visualization with Python. Recuperado el 30 de octubre de 2023. <https://matplotlib.org/>
- [21]. Chen, C.-B., Lo, T.-Y., Chang, J.-Y., Huang, S.-P., Tsai, W.-T., Liou, C.-Y., & Mao, S.-G. (2022). Precision Enhancement of Wireless Localization System Using Passive DOA Multiple Sensor Network for Moving Target. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s22197563>
- [22]. Douglas Shields, F. (2005). Low-frequency wind noise correlation in microphone arrays. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 3489–3496. <https://doi.org/10.1121/1.1879252>
- [23]. Chaparral Physics. Arctic tested, Alaska Tough. (s. f.). Recuperado el 30 de octubre de 2023. <http://chaparralphysics.com/>

- [24]. Slad, G., & Merchant, B. (2021). Evaluation of Low Cost Infrasound Sensor Packages. <https://doi.org/10.2172/1829264>
- [25]. Merchant, B. (2015). Hyperion 5113/A Infrasound Sensor Evaluation. <https://doi.org/10.2172/1221711>
- [26]. Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional. (s.f.). Sensores sísmicos acústicos. Recuperado el 20 de noviembre de 2023. <https://www.igepn.edu.ec/sensores-sismicos-y-acusticos>
- [27]. La biblioteca estándar de Python. (s. f.). Python documentation. Recuperado el 22 de noviembre de 2023 <https://docs.python.org/es/3/library/index.html>
- [28]. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (s.f.). Glaciares en Colombia. Ministerio de Medio Ambiente. Recuperado el 22 de noviembre de 2023 <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/glaciares-colombia>
- [29]. Rodriguez, E. (2013). Triangulación de polígonos. CINVESTAV <https://www.tamps.cinvestav.mx/~ertello/gc/sesion11.pdf>
- [30]. Servicio Geológico Minero Argentino (s.f.). PREGUNTAS FRECUENTES SOBRE LOS VOLCANES. Ministerio de Economía. <https://oavv.segemar.gob.ar/preguntas-frecuentes-sobre-los-volcanes/>
- [31]. Biswas, T., Mandal, S. B., Saha, D., & Chakrabarti, A. (2017). Dual Microphone Sound Source Localization Using Reconfigurable Hardware. In *Communications in Computer and Information Science*, 397–406. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6427-2_32
- [32]. Kestler, H. A., Müller, A., Kraus, J. M., Buchholz, M., Gress, T. M., Liu, H., Kane, D. W., Zeeberg, B. R., & Weinstein, J. N. (2008). VennMaster: Area-proportional Euler diagrams for functional GO analysis of microarrays. *BMC Bioinformatics*. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-9-67>
- [33]. Yamakawa, K., Ichihara, M., Ishii, K., Aoyama, H., Nishimura, T., & Ripepe, M. (2018). Azimuth Estimations from a Small Aperture Infrasonic Array: Test Observations at Stromboli Volcano, Italy. *Geophysical Research Letters*, 8931–8938. <https://doi.org/10.1029/2018GL078851>
- [34]. Liang, M., Xi-Hai, L., Wan-Gang, Z., & Dai-Zhi, L. (2015). The Generalized Cross-Correlation Method for Time Delay Estimation of Infrasound Signal. 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 1320–1323. <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2015.283>
- [35]. Ripepe, M., & Marchetti, E. (2002). Array tracking of infrasonic sources at Stromboli volcano. *Geophysical Research Letters*, 29(22). <https://doi.org/10.1029/2002GL015452>
- [36]. Ripepe, M., Marchetti, E., & Ulivieri, G. (2007). Infrasonic monitoring at Stromboli volcano during the 2003 effusive eruption: Insights on the explosive and degassing process of an open conduit system. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2006JB004613>

- [37]. Fee, D., y Matoza, R. S. (2013). An overview of volcano infrasound: From hawaiian to plinian, local to global. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123–139. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.09.002>
- [38]. Johnson, J. B. (2004). Source location variability and volcanic vent mapping with a small-aperture infrasound array at Stromboli Volcano, Italy. *Bulletin of Volcanology*, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0356-8>
- [39]. Rowell, C. R., Fee, D., Szuberla, C. A. L., Arnoult, K., Matoza, R. S., Firstov, P. P., Kim, K., & Makhmudov, E. (2014). Three-dimensional volcano-acoustic source localization at Karymsky Volcano, Kamchatka, Russia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 101–115. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.06.015>
- [40]. Jeremy D. Webster, philblom, & SpacelySpaceSprockets. (2022). LANL-Seismoacoustics/infrapy: v0.4 (v0.4). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7116991>
- [41]. Johnson, J. B., & Ripepe, M. (2011). Volcano infrasound: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 206(3–4), 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.06.006>
- [42]. Chamorro, C., y Ovando, E., (23-24 de noviembre de 2018). Análisis de señales: Aplicación de la correlación cruzada discreta para la determinación del -primer arribo de la onda cortante. XXIX Reunión de Ingeniería Geotécnica, SMIG, León, Guanajuato.
- [43]. Mekelleche, F., & Haffaf, H. (2017). Classification and Comparison of Range-Based Localization Techniques in Wireless Sensor Networks. *Journal of Communications*, 221–227. <https://doi.org/10.12720/jcm.12.4.221-227>
- [44] S. Arlinghaus. S., y Kerski, J., (2015). Spatial Transformations and Visualization: Selected Common Threads and Root Concepts Linking Old to NewSolstice. *Solstice*, 26(1). ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/291970970_Spatial_Transformations_and_Visualization_Selected_Common_Threads_and_Root_Concepts_Linking_Old_to_New
- [45]. Zhao, J., Liu, Y., & Yang, J. (2021). 3D matching positioning method for landslide using infrasound signal received by triangular pyramid vector array, based on ray theory. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 889–904. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01988-4>
- [46]. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (s.f.). Recuperado el 28 de noviembre de 2023 ATMÓSFERA <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/atmosfera>
- [47]. Servicio Geológico Colombiano. (2023). Colombia cambia su esquema de medición de la actividad volcánica. <https://www2.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Colombia-cambia-su-esquema-de-medicion-de-la-actividad-volcanica.aspx>

[48]. Cuellar Quiñones, J. C., Arciniegas H., J. L., & Ortiz, J. H. (2018). Modelo para la medición de QoE en IPTV. Universidad Icesi. <https://doi.org/10.18046/EUI/ee.3.2018>

