

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A7471

CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD REGISTRADA EN EL VOLCÁN SABANCAYA, PERIODO 2023

Departamento Arequipa
Provincia Caylloma
Distrito Achoma



ENERO
2024

INFORME TÉCNICO ANUAL: CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD REGISTRADA EN EL VOLCÁN SABANCAYA, PERIODO 2023

Equipo de trabajo

Mayra Ortega Gonzales
Fredy Apaza Choquehuayta
Pablo Masías Alvarez
Rafael Miranda Cruz
Norbel Alcantara Oyarce
Daniel Ramirez Guzmán
Dayanne Pamo Coaquira
Gianella Paredes Cárdenas
Rosa Anccasi Figueroa
Jorge Luis Chalco Ibárcena
Reynaldo Ccacyancco Ccacyancco

AREQUIPA – PERU

ENERO - 2024

Contenido

RESUMEN	5
1 ASPECTOS GENERALES	6
1.1 Introducción	6
1.2 Problemática	6
1.3 Objetivos	6
2 VOLCÁN SABANCAYA	7
2.1 Ubicación geográfica	7
2.2 Estudios previos	8
2.3 Actividad eruptiva reciente	11
3 MÉTODOS Y REDES DE INSTRUMENTACIÓN	12
3.1. Geología	12
3.2. Deformación volcánica	13
3.3. Sismología volcánica	13
3.4. Química de gases volcánicos	14
3.5. Hidroquímica volcánica	14
3.6. Estudios acústicos	15
3.7. Actividad superficial y Sensores remotos	16
4 DATOS Y RESULTADOS	17
4.1 Geología	17
4.1.1 Muestreo de cenizas	17
4.1.2 Mineralogía de la ceniza	17
4.1.3 Mapa de Isópacas	18
4.2 Deformación volcánica	20
4.2.1 Deformación superficial en el volcán Sabancaya	20
4.2.2 Modelamiento de deformación volcánica con datos GNSS	23
4.2.3 Serie temporal de inclinación del sensor electrónico (Inclinómetro)	24
4.3 Sismología volcánica	25
4.3.1 Caracterización y análisis cuantitativo de las señales sísmicas	26
4.3.2 Localización de sismos Volcano – tectónicos (VT)	32
4.4 Química de gases volcánicos	36
4.5 Hidroquímica volcánica	37
4.6 ESTUDIOS ACÚSTICOS	39

4.6.1	Caracterización de señales acústicas	39
4.6.2	Cálculo de profundidad de las explosiones	41
4.7	Actividad superficial y sensores remotos.....	43
4.7.1	Características de las emisiones.....	43
4.7.2	Sensores remotos.....	49
4.7.3	Sobrevuelos con DRON	52
5	DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	54
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
6.1	Conclusiones.....	56
6.2	Recomendaciones	59
	BIBLIOGRAFÍA.....	60

RESUMEN

Durante el año 2023, el INGEMMET a través de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR – Arequipa), continuo con el estudio permanente y sistemático del volcán Sabancaya, mediante diferentes métodos, tales como la geología, deformación, sismicidad volcánica, desgasificación magmática, seguimiento de fuentes termales, observaciones en superficie, imágenes satelitales, entre. Los datos fueron procesados y analizados en función a estos distintos parámetros a fin de identificar y caracterizar los diversos procesos ocurridos en el volcán Sabancaya.

Los resultados del análisis mineralógico de las cenizas permitieron identificar mayor contenido de material juvenil durante los primeros meses del año. Por su parte, la deformación superficial se asoció a dos factores: (i) proceso de inflación regional debido a la presión generada por el cambio de volumen del reservorio magmático principal, el cual, se ubica a ~6 km al norte del volcán Sabancaya y a ~12.6 km de profundidad por debajo del volcán Hualca Hualca, y (ii) incremento en la inflación cercana al cráter, relacionada a la migración de magma hacia la superficie y desgasificación. En cuanto a la actividad sismo – volcánica, esta estuvo representada principalmente por la ocurrencia de sismos Volcano – tectónicos distales y proximales, a manera de enjambre y la cual, se asoció a un pulso importante de intrusión magmática, asimismo, se tuvo un periodo de importante predominancia de sismicidad de baja frecuencia (sismos de largo periodo, tremor volcánico y explosiones) más superficial y cercana al volcán, la cual, estuvo reflejada por aumentos en la actividad explosiva y tremor volcánico, asociados en superficie a importantes emisiones de gases y ceniza y a emisiones continuas de gases, ceniza y vapor de agua respectivamente, con alturas que oscilaron entre los 1,000 y 3,800 metros sobre el cráter; también se registró en menor cantidad, señales sísmicas asociadas a eventos superficiales tales como caída de rocas y/o pequeños flujos piroclásticos. El seguimiento del gas magmático (SO₂), por su parte, mostró periodos de incremento en los flujos, sugiriendo el ascenso de magma desde la cámara magmática principal hacia niveles más superficiales. Las observaciones y seguimiento de imágenes mediante cámaras ópticas, infrarroja, sobrevuelos con dron y sensores remotos, permitieron corroborar que, todos estos cambios registrados, se asociaron al crecimiento/extrusión del quinto domo de lava (Pichqa) identificado en el cráter activo (el cual inició su formación a lo largo del año 2022) y su posterior destrucción que se dio de manera progresiva.

Finalmente, teniendo como base la evaluación integral y permanente de los parámetros analizados, durante el año 2023, el volcán Sabancaya continuó en **NIVEL DE ALERTA NARANJA** que indica: *cambios en el comportamiento de la actividad del volcán con variaciones en los componentes mineralógicos de la ceniza, registro de procesos de deformación, incrementos importantes de la actividad sismo - volcánica, cambios en las características de las columnas eruptivas y cambios en la morfología del cráter.*

1 ASPECTOS GENERALES

1.1 Introducción

El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), a través de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR), la cual, en base al Artículo 21 del Reglamento de Organización y Funciones (Decreto Supremo N° 035 – 2007 – EM), se encarga de *realizar investigaciones, programas y proyectos Geoambientales, Geotécnicos y la Evaluación y monitoreo de Peligros Geológicos del territorio nacional a fin de contribuir con los organismos competentes en materia de ordenamiento territorial, planificación y desarrollo nacional así como la seguridad física dentro del país y la conservación del patrimonio natural y cultural*; cumplió, a lo largo del 2023, con la función encomendada de realizar el estudio multidisciplinario del proceso eruptivo del volcán Sabancaya (Arequipa). En tal sentido, en el presente informe técnico anual se compila la información obtenida a través de las redes instrumentales de estudios multiparamétricos, instaladas en los alrededores del edificio volcánico.

1.2 Problemática

Las erupciones volcánicas y su impacto en la sociedad son uno de los peligros más severos de la naturaleza, de aquí parte la necesidad de estudiar un determinado volcán en función a diferentes técnicas, a fin de conocer con anticipación las señales precursoras que ocurrirían antes de una erupción y con ello, mitigar o disminuir los riesgos y/o peligros asociados.

1.3 Objetivos

- Realizar estudios multidisciplinarios del volcán Sabancaya, integrando toda la información generada por las diferentes técnicas, en cumplimiento del Programa Presupuestal 0068: Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres (PP0068).
- Identificar patrones relacionados a los diferentes procesos geológicos identificados en el volcán Sabancaya a lo largo del año 2023.

2 VOLCÁN SABANCAYA

El volcán Sabancaya de edad Holocénica (Samaniego et al., 2016) es el más joven de los diez volcanes activos del sur del Perú, el cual, se ha formado en los últimos 10 mil años. Está conformado principalmente por secuencias de flujos de lava de composición andesítica y dacítica, con limitados depósitos piroclásticos (Mariño, 2012; Rivera et al., 2016).

La cumbre del volcán Sabancaya alcanza 5,980 m.s.n.m. y el edificio volcánico cubre un área de 65 a 70 km². Dicho volcán está conformado por dos estratos conos alineados en dirección SO – NE (Fig. 2.1); el más antiguo se halla en el extremo suroeste, en cuya cima se emplaza un domo – colada, mientras que, el cono más reciente se halla en el extremo noreste. El cráter activo se encuentra en la cima del estrato - cono NE.



Figura 2.1 Fotografía del volcán Sabancaya, vista desde el flanco este. A la margen izquierda se aprecia el domo antiguo y a la margen derecha se observa la cima activa.

2.1 Ubicación geográfica

El volcán Sabancaya se encuentra ubicado a 80 km al NNO de la ciudad de Arequipa, y a 30 km al SO de la localidad de Chivay (Fig. 2.2), en la Cordillera Occidental de los Andes del Sur peruano. Política y territorialmente, el Sabancaya está situado en la provincia de Caylloma, departamento de Arequipa, en las coordenadas 15.4°S, 71.5°O, a 5,980 m.s.n.m.

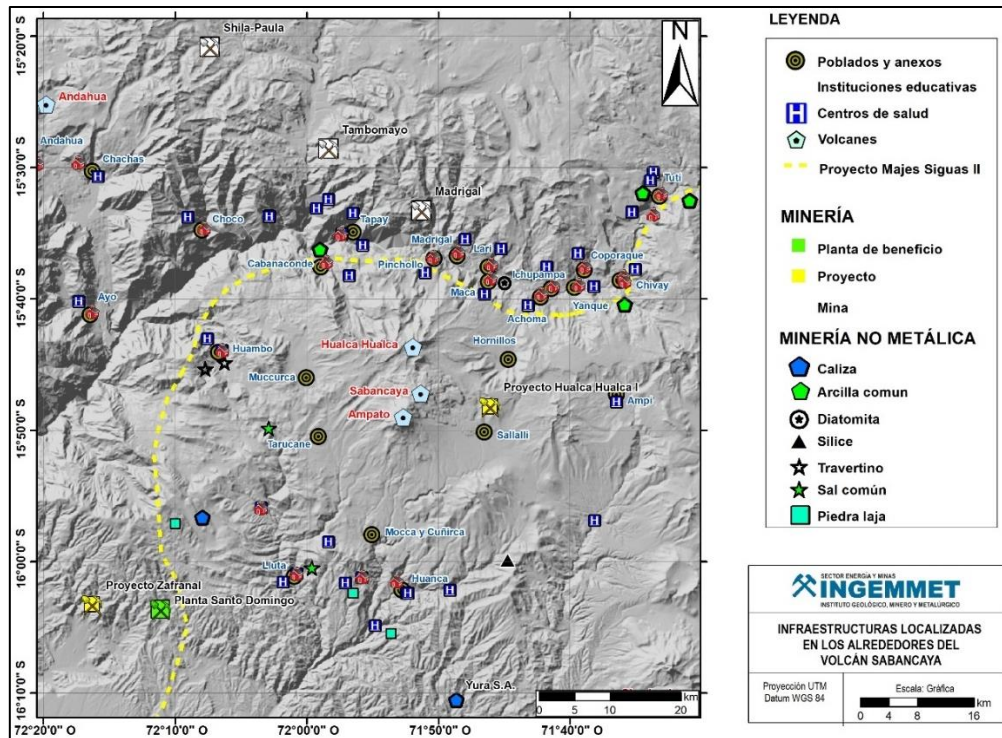


Figura 2.2. Ubicación geográfica del volcán Sabancaya, poblados aledaños y principales infraestructuras y proyectos de inversión que se desarrollan en los alrededores.

2.2 Estudios previos

En la región del volcán Sabancaya se han realizado estudios de carácter geológico, tectónico, geofísico, entre otros. A continuación, se mencionan los más recientes:

- **Coppola et al. (2022)**, utilizaron una base de datos satelital (visible, infrarrojo, imágenes de radar) y una base datos terrestre (imágenes ópticas, flujos de SO₂ y sismicidad superficial) para describir y caracterizar la actividad del volcán Sabancaya antes y después de la erupción, entre los años 2012 y 2020. La fase pre-eruptiva (2012 - 2016) estuvo caracterizada por el incremento de los flujos de gas, producto de la columna de magma convectivo que asciende junto con restos de un tapón enterrado aún permeable al flujo de fluidos. Por el contrario, un nuevo conducto, adyacente al anterior, alimentó la fase eruptiva (2016-2020) que, en cambio, se caracterizó por una actividad extrusiva discontinua, con fases de crecimiento y destrucción del domo (entre tasas de 0.04 a 0.75 m³/s). La actividad extrusiva estuvo acompañada por anomalías termales fluctuantes (0.5 - 25 MW), desgasificación irregular de SO₂ (700 - 7000 t/día) y explosiones (4 - 100 eventos/día) produciendo plumas volcanianas de ceniza (500 - 5000 m.s.c.). Las estimaciones de volúmenes de magma indican que durante la fase eruptiva existe un exceso de desgasificación (0.25 - 1.28 Km³), cantidad mucho mayor al volumen de magma expulsado (<0.01 km³). Similarmente, la energía térmica radiada por la erupción resultó mucho mayor que la causada por el domo, un desbalance que, por analogía con la desgasificación, lo definieron como “exceso de radiación térmica”. Cada desbalance es consistente con la presencia de la convección de magma superficial, el cual alimenta la actividad extrusiva y explosiva del domo del volcán Sabancaya.

- **Boixart et al. (2020)**, mediante el análisis de órbitas ascendentes y descendentes Sentinel – 1 (DInSAR) y conjuntos de datos GNSS, se obtuvieron imágenes de un área de deformación existente y centrada a 5 km al N del volcán Sabancaya. Los resultados del modelo sugirieron que el patrón de inflación en la imagen puede deberse al accionar de una fuente entre 12 y 15 km de profundidad ubicada entre los volcanes Sabancaya y Hualca Hualca, esta ubicación inferida de la fuente de deformación indica que la actividad eruptiva actual en el Sabancaya es alimentada por un reservorio profundo a través de un sistema de conductos magmáticos laterales.
- **MacQueen et al. (2020)**, presentaron evidencias de interacciones Volcano – tectónicas en el volcán Sabancaya que se asociaron con periódicas inyecciones de magma y altas presiones de fluidos porosos regionales. Por otra parte, presentaron además una serie de tiempo de deformación de la superficie en el Sabancaya, identificando una inflación profunda al NO del mismo entre los años 1992 – 1997 y 2013 – 2019. Al comparar estos resultados con datos térmicos, de desgasificación (OMI), actividad sísmica y observaciones visuales, se concluyó que la fuerte actividad sísmica pre – eruptiva en el volcán Sabancaya fue a consecuencia de intrusiones magmáticas que desestabilizaron los sistemas de fallamiento tectónico debido a presiones de fluidos porosos.
- **Ramos et al. (2019)**, realizaron el seguimiento del proceso eruptivo del volcán Sabancaya durante el 2019 y en función a los distintos parámetros de monitoreo (sensores remotos, sismología, deformación, química de gases volcánicos y geología), identificaron una etapa de crecimiento importante de un primer domo de lava (Huk) anidado en el cráter activo del volcán entre abril y noviembre, seguido del inicio de un proceso de destrucción del mismo, caracterizado por la ocurrencia de seis pequeños flujos piroclásticos, los cuales, se desplazaron a 1.5 km desde el cráter.
- **Lazarte et al. (2018)**, realizaron el seguimiento y evaluación del proceso eruptivo del volcán Sabancaya a lo largo del 2018, el cual, se caracterizó por presentar una actividad MODERADA, con la ocurrencia de EXPLOSIONES VULCANIANAS que generaron columnas eruptivas de gases y ceniza que ascendieron hasta aproximadamente 2.5 km y en periodos de alta actividad las columnas alcanzaron alturas de hasta 5.3 km. Los resultados de los análisis químicos mostraron composiciones entre andesita y dacita para la ceniza y andesita para los balísticos. Por otra parte, durante el 2018, se realizó una campaña de instalación de sensores de infrasonido a fin de implementar el monitoreo acústico, el cual, permitió alertar sobre la ocurrencia de explosiones energéticas que se localizaron por debajo del cráter activo del volcán y esto fue corroborado con las observaciones en superficie.
- **Benavente et al. (2017)**, evidenciaron fallas activas con potencial sismogénico que están relacionadas con la evolución Neotectónica de la región Arequipa. Por otra parte, en la zona de volcanes activos, se muestra una actividad extensiva producto del incremento en el esfuerzo litosférico vertical que es compatible con la partición de esfuerzos generados por la subducción. Finalmente, las fallas que limitan el Arco Volcánico con el

Altiplano muestran reactivaciones de tipo transpresivo. Este estudio, permitió elaborar mapas de amenaza sísmica, peligrosidad por movimientos en masa y por procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos, a fin de que sean considerados como herramientas para los Planes de Ordenamiento Territorial y para la toma de decisiones en planes de prevención en el marco de la gestión del riesgo de desastres.

- **Mariño et al. (2016)**, informe técnico sobre la geología del volcán Sabancaya, la evaluación de peligros y la identificación de escenarios eruptivos ante un posible incremento en la actividad del volcán, identificándose cuatro escenarios: los que tienen mayor probabilidad de ocurrir, corresponden a erupciones vulcanianas (IEV 1-2) y erupciones efusivas y los escenarios menos probables corresponden a erupciones subplinianas con IEV 3 y erupciones plinianas con IEV 4-5. Además, se da una explicación detallada de los mapas de peligros volcánicos múltiples (flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares, caídas piroclásticas), identificando zonas de alto moderado y bajo peligro.
- **Ramos et al. (2016)**, realizan un análisis de los inicios de la actividad eruptiva 2016 del volcán Sabancaya, además de la actividad volcánica pre – eruptiva, en donde se identificó patrones anómalos que hicieron suponer la proximidad de una erupción de este volcán, el primer indicio se reflejó por la ocurrencia de sismos Volcano – tectónicos (VT) distales entre febrero y julio del 2013, posteriormente, en el 2016, tanto la deformación como los valores del flujo del gas volcánico SO₂ registraron cambios importantes, indicando procesos de inflación y ascenso de magma respectivamente, y con el incremento de la sismicidad de baja frecuencia asociada a la dinámica de fluidos por los conductos volcánicos, el 06 de noviembre se dio inicio a un nuevo proceso eruptivo del volcán Sabancaya. Comparando este proceso con la erupción anterior (1986 - 1997) se concluyó que aparentemente las características son las mismas, en tal sentido, se espera que la actividad tenga un comportamiento similar y la misma duración de varios meses o años.
- **OVI. (2016)**, realizaron una inspección geológica en sectores proximales al volcán Sabancaya (en un radio menor a 1 km) y en base a los trabajos de campo y análisis de la información, identificaron 7 nuevas zonas de emisiones fumarólicas, aparte del cráter activo. Algunas de estas zonas ya se habían identificado en octubre del 2009, pero a partir de abril del 2016, se registraron más zonas de emisión con temperaturas entre 40 y 85 °C y que alcanzaron alturas de algunos cientos de metros sobre la cima del volcán. Además, en el cráter del volcán, se identificó una zona de derrumbes y grietas en la pared interna NO. Con la ocurrencia de este tipo de manifestaciones, se concluyó que son bastante comunes en un volcán activo, sobre todo a inicios de un proceso eruptivo.
- **Samaniego et al. (2016)**, reconstruyeron la cronología eruptiva del complejo volcánico Ampato – Sabancaya en función a trabajos de campo, datos geo – cronológicos y geoquímicos. Los resultados mostraron un cambio marcado en la tasa eruptiva de ambos volcanes, evidenciando que las tasas eruptivas no fueron homogéneas a lo largo

de su historia. Para el caso del volcán Sabancaya, los estudios tefro-cronológicos indicaron que la actividad de este volcán en el Holoceno tardío se caracterizó por fuertes eventos vulcanianos, identificándose al menos 6 erupciones durante los últimos 4 – 5 ka.

2.3 Actividad eruptiva reciente

Los primeros indicios del actual proceso eruptivo, se presentaron entre febrero y julio del 2013, registrándose importante sismicidad VT distal a manera de enjambres y donde el evento de mayor magnitud fue de 5.4 M_L (Fuente IGP). Esta sismicidad fue precedida por un incremento en la actividad fumarólica del volcán Sabancaya, cuyas columnas eruptivas alcanzaron alturas de hasta 1,000 m sobre la cima del volcán. De acuerdo a estudios de White y McCausland (2016, 2019), este tipo de sismicidad es considerada como precursora de procesos eruptivos, ya que estaría asociada a intrusiones de magma.

Desde marzo del 2013 hasta junio del 2016, la sismicidad estuvo principalmente dominada por sismos Volcano – tectónicos distales (asociados al fracturamiento interno) y a su vez, se registraron sismos de largo periodo (asociados al dinamismo de fluidos por los conductos volcánicos). Por otra parte, la actividad en superficie, durante este periodo, se caracterizó por la presencia de columnas fumarólicas de hasta 2,200 m de altura, las cuales, estuvieron compuestas principalmente de vapor de agua y esporádicamente se observaron gases de color azulino, asociados a un mayor contenido de componentes volcánicos. Las mediciones de flujos de Dióxido de azufre (SO₂) midieron valores de hasta 2,800 t/día en el mes de mayo del 2016, lo cual, estuvo sugiriendo el ascenso de magma hacia la superficie (Ramos et al., 2016).

A partir de agosto del 2016, se comenzaron a registrar cambios en los distintos parámetros de monitoreo, incremento en la sismicidad de tipo híbrido asociado a la migración de fluidos magmáticos hacia la superficie, esto también se confirmó con el aumento en los valores de flujos de SO₂ registrándose el 22 de octubre un valor máximo de 7,000 t/d, en la deformación también se identificó un proceso de inflación constante y lenta (Cruz, 2019). Todos estos cambios terminaron por desencadenar el actual proceso eruptivo del Sabancaya, el cual inició el 6 de noviembre, con la ocurrencia de explosiones continuas que generaron columnas eruptivas de gases y cenizas de más de 5,000 metros sobre la cima del volcán. A lo largo de este proceso eruptivo y mediante el análisis de los distintos parámetros, también fue posible identificar procesos de formación, crecimiento y destrucción de distintos domos de lava formados en el cráter activo del volcán Sabancaya, los cuales, se vinieron presentando con mayor frecuencia desde el 2019 hasta la fecha (Ramos et al., 2019, Ortega et al., 2020).

3 MÉTODOS Y REDES DE INSTRUMENTACIÓN

El estudio de un volcán requiere de la utilización de una variedad de técnicas que permitan registrar tanto la actividad interna como externa, a fin de identificar patrones que adviertan con anticipación el inicio de un proceso eruptivo. Para comprender completamente el comportamiento de un volcán, el estudio debe incluir varios tipos de observaciones (geológicas, movimientos del suelo, flujos de gas volcánico, análisis de imágenes satelitales, entre otros) de forma continua y en tiempo real.

Entre los años 2006 y 2023, INGEMMET vino implementando de manera multiparamétrica y progresiva redes más densas y robustas con transmisión de datos en tiempo real en el volcán Sabancaya, con la finalidad de contar con un registro detallado de los cambios en el comportamiento de la actividad de dicho volcán, para lo cual, se emplearon técnicas tales como la: geología, deformación volcánica, sismología volcánica, química de gases volcánicos, hidroquímica volcánica, estudios acústicos, sensores remotos y seguimiento de la actividad en superficie (Fig. 3.1)

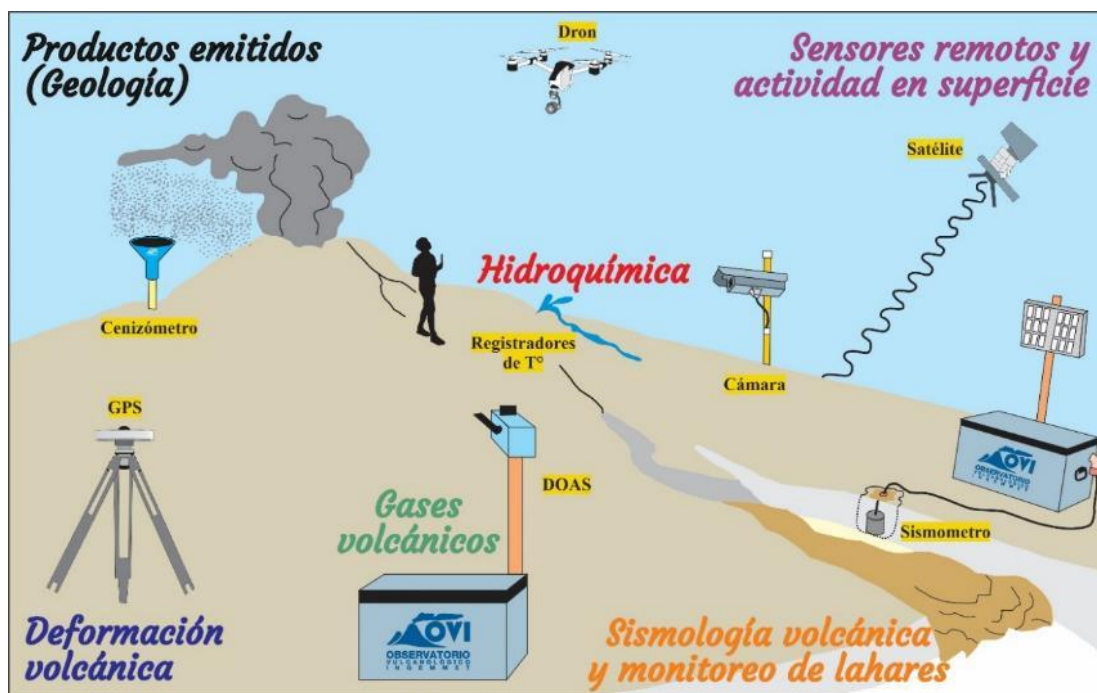


Figura 3.1. Métodos empleados para el estudio de la actividad del volcán Sabancaya a lo largo del año 2023 (Fuente: Modificado de Faust, Lisa – USGS).

3.1. Geología

Los fragmentos balísticos y ceniza expulsada durante erupciones volcánicas explosivas son la principal herramienta para comprender los procesos profundos y superficiales que controlan una erupción y los posibles escenarios que podrían desarrollarse en adelante. Para ello, estos fragmentos de roca y depósitos de caída piroclástica son recolectados y con ellas se desarrollan análisis de laboratorio que involucran la determinación de la composición química, parámetros granulométricos y mineralógicos del magma. Esto a su vez, permite determinar el tipo de

erupción y volumen de magma expulsado, por otro lado, esta caracterización también facilita la identificación de minerales potencialmente peligrosos para la salud humana que se encuentran en estos depósitos.

A lo largo del 2023, la **Red de Cenizómetros**, estuvo conformada por 43 cenizómetros (Fig. 3.2), los mismos que fueron instalándose progresivamente desde el año 2018 y con el apoyo de los voluntarios de Caylloma, de los pueblos del valle del Colca y PREDES-ADRA.

3.2. Deformación volcánica

Técnica que permite describir los cambios morfológicos de la superficie de un volcán. Generalmente, las erupciones volcánicas son precedidas por deformaciones superficiales en respuesta a un cambio en la presurización ejercida por un cambio de volumen en la cámara magmática y/o por el ascenso de un volumen de magma hacia la superficie (Dvorak y Dzurisin, 1997). La respuesta de las deformaciones del suelo volcánico está asociado a un incremento o pérdida de presión en la cámara magmática por el magma, gas o agua. Cuando existe un incremento de presión en los reservorios magmáticos, a este proceso se le denomina **inflación**, así mismo ocurre que cuando un volcán entra en erupción libera esa presión a través de cenizas y demás productos volcánicos emitidos, a este proceso se le denomina **deflación**.

Durante el año 2023, la **Red GNSS**, estuvo conformada por 04 estaciones permanentes en tiempo real (Fig. 3.2). Estas estaciones GNSS de operación permanente han sido instaladas con el apoyo inicial del Programa de Atención de Desastres Volcánicos (VDAP) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

3.3. Sismología volcánica

Es uno de los métodos más antiguos y más utilizados. El estudio y análisis de una región volcánica usando datos sísmicos requiere: detección de las señales, identificación, clasificación (Minakami, 1974; Latter, 1979, 1981; Chouet, 1988, 1992, 1996; Ibáñez y Carmona, 2000; McNutt, 2005; Zobin, 2012; Zoback et al., 2013; McNutt y Roman, 2015) y, finalmente, un análisis cuantitativo del mismo. En este caso, se podrá obtener información de numerosos aspectos, como los parámetros de la fuente (posición, evolución espacio – temporal, cuantificación energética, física y naturaleza, etc.) y del medio (estructura de velocidad, atenuación, respuesta local, heterogeneidades, etc.).

Conocer cómo va evolucionando la sismicidad en un volcán, es una herramienta de importancia invaluable para el pronóstico de erupciones, tal es así que, White y McCausland (2019) propusieron un modelo conceptual con soporte en observaciones de Fournier (2007), Sillitoe (2010), Hill (1977), Hill et al. (2002a, 2002b), en el cual, consideran cuatro etapas de procesos geológicos a los que se les asocia patrones de sismicidad: **(1)** Etapa caracterizada por la ocurrencia de sismicidad profunda asociada a una intrusión de magma en profundidad; **(2)** Etapa

con la ocurrencia de sismos Volcano – tectónicos distales en respuesta a una intrusión de magma en el reservorio de la corteza superior; **(3)** Etapa dominada por sismicidad asociada a la limpieza de conductos volcánicos y **(4)** Etapa correspondiente a la ocurrencia de sismicidad repetitiva asociada al ascenso final de magma.

La **Red sismo – volcánica**, a lo largo del 2023, estuvo constituida por 06 estaciones sísmicas de banda y 01 estación sísmica de periodo corto (Figura 3.2). Del total, 06 estaciones sísmicas transmitieron la información en tiempo real y 01 estación sísmica trabajó de manera temporal.

3.4. Química de gases volcánicos

Consiste en el análisis físico – químico de los gases de origen volcánico, a través de fumarolas, respiraderos de vapor, fuentes termales, etc. Estos gases están asociados a un sistema hidrotermal activo y su posible interacción con un cuerpo magmático (Hochstein y Browne, 2000). Para la medición del gas magmático dióxido de azufre (SO₂), se utiliza un equipo DOAS, el cual, escanea el cielo buscando las plumas volcánicas que pasan por encima de este, midiendo así el flujo de SO₂.

La **red de escáneres DOAS** consta de 4 estaciones (Fig. 3.2), de las cuales, 3 transmiten en tiempo real a las oficinas de la DGAR sede Arequipa. Estas se encuentran instaladas entre 3 y 5 km alrededor del cráter: al noroeste, noreste y sureste del volcán Sabancaya. A lo largo del 2023, estas estaciones permitieron calcular los flujos de SO₂ y así inferir los cambios en la actividad del volcán.

3.5. Hidroquímica volcánica

Técnica que permite buscar y medir cambios en los sistemas hidrotermales asociados a variaciones de las concentraciones totales de los compuestos en aguas termales y frías. Para ello se realizan muestreos de agua en fuentes predeterminadas, a las que se les realizan análisis químicos de metales disueltos, elementos traza, y aniones. Los resultados son presentados estadísticamente comparándolos con los obtenidos años anteriores para poder realizar interpretaciones del estado del volcán.

Para el muestreo de aguas en campo, se realizan mediciones para determinar la temperatura, potencial de hidrógeno pH y conductividad eléctrica en las fuentes. El agua de las fuentes se colecta en dos botellas de plástico de alta densidad. La primera, para el análisis de aniones y la segunda, para los cationes y elementos traza, la que se filtra previamente (0.45 µm) y se lleva a pH >2 con HNO₃ 1:1. Posteriormente el análisis, se realiza en el laboratorio de química de INGEMMET a través de los siguientes métodos:

- Metales disueltos (Na, Mg, K, Ca, Sr, Li, SiO₂, B, Fe, S): se analizan por Espectrometría de Emisión Atómica y Plasma Acoplado Inductivamente (ICP – OES) con el equipo marca VARIAN, modelo 735-ES. Los elementos como Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Sr, Li, Fe, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn son analizados por

Espectrometría de Masa por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) con un equipo marca PERKIN, modelo Nexion 300D.

- Aniones F-, Cl-, SO4=: se analizan por Cromatografía Iónica (Equipos marca Thermo Scientific, modelo Dionex ICS - 5000). Además, CO3=, HCO3- por el método Titrimétrico (Equipo marca Thermo Scientific, modelo Orion Versa Star).

Durante el 2023, en los meses de abril, mayo, junio y julio, se colectaron muestras en las fuentes SA2, SA3, YA1, YA2, CAL y PCL (Fig. 3.2).

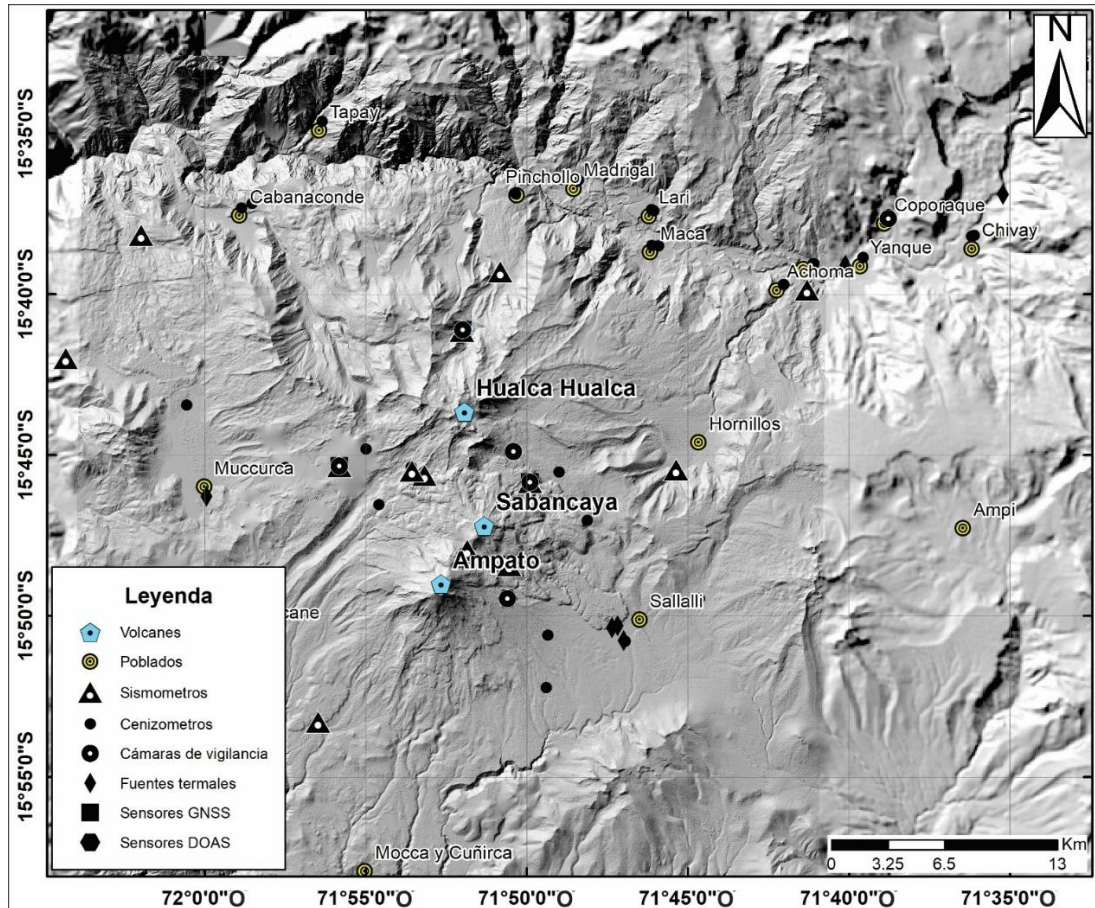


Figura 3.2. Red instrumental multiparamétrica del volcán Sabancaya operada por el INGEMMET (DGAR – Arequipa), periodo 2023.

3.6. Estudios acústicos

Los volcanes producen sonidos en un amplio espectro, incluidas fuertes explosiones al final del rango de infrasonidos (0,1 Hz a 20 - 30 Hz) y pequeñas fumarolas en el rango audible. Los sonidos audibles en el volcán son apenas una pequeña parte de la verdadera energía que puede emitir a frecuencias infrasónicas, las cuales pueden ser propagadas varios kilómetros desde su fuente de origen sin disipación o difusión importante (Paz, C. 2015). El infrasonido está íntimamente ligado al proceso de fragmentación del magma (rápida expansión de la mezcla gas-partícula dentro del conducto) y, en consecuencia, es relacionado con el dinamismo e intensidad eruptiva (Ripepe, M. et al, 2013, Johnson and Ripepe, 2011). Cabe recordar que, la propagación del

infrasonido a distancias locales de los volcanes (<10 km) está influenciada principalmente por el viento, el cual contiene una banda de frecuencias de 0,01 a 5 Hz (Walker y Hedlin, 2010); y las interacciones con la topografía volcánica. (e.g., Fee and Garcés, 2007; Marcillo and Johnson, 2010; Matoza et al., 2009; Johnson et al., 2012; Lacanna et al., 2014; Kim et al., 2018), los cuales pueden difractar, reflejar e incluso bloquear la señal.

Actualmente, en el volcán Sabancaya se cuenta con **una estación de infrasonido** denominada ISB01 ubicada a 2.6 km al sureste del cráter, la cual cuenta con transmisión en tiempo real, la estación contiene un digitalizador, un sensor de infrasonido y un sismómetro vertical (ambos con una tasa de muestro de 100 Hz) marca Raspberry Shake & Boom, GPS (que realiza la sincronización de la hora) y accesorios (Fig. 3.3).

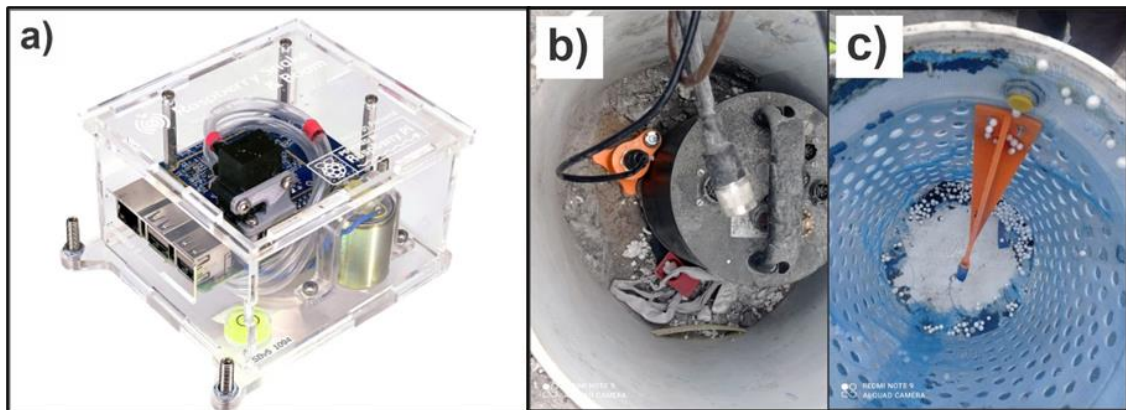


Figura 3.3. a) Equipo infrasonido. **b)** Sensor sísmico vertical **c)** Imagen fotográfica de la instalación del equipo para estudios acústicos.

3.7. Actividad superficial y Sensores remotos

Consiste en el seguimiento de esta actividad volcánica observada en superficie, el cual, es uno de los recursos más valiosos y útiles, debido a que permite la identificación de cambios en el comportamiento de un volcán y estado de una erupción. Estas observaciones en superficie se realizan mediante imágenes obtenidas de cámaras ópticas de video – vigilancia, cámara infrarroja y sobrevuelos con dron. Por su parte, la utilización de sensores remotos en volcanes a través de imágenes satelitales (GOES, Sentinel II, PlanetScope), se realiza con la finalidad de monitorear el estado eruptivo de un volcán, comprender el dinamismo de las erupciones volcánicas y evaluar los daños que estas pueden generar.

La **Red de cámara de vídeo – vigilancia**, está conformada por 05 cámaras que transmiten la información visual en tiempo real (Fig. 3.2): 04 ópticas (SAMP, SCOP, SHUA y SMUC) y 01 térmica (SIRH), las cuales, se encuentran instaladas en los poblados cercanos y zonas aledañas al volcán.

4 DATOS Y RESULTADOS

4.1 Geología

Las muestras recolectadas permitieron realizar análisis granulométricos, mineralógicos, petrográficos y geoquímicos, con el fin de continuar con el seguimiento de las características del magma involucrado en este proceso eruptivo.

4.1.1 Muestreo de cenizas

En el volcán Sabancaya se realizó un estudio de la caída de cenizas en los alrededores del volcán, mediante el uso de colectores especiales denominados cenizómetros. Las muestras obtenidas fueron analizadas para determinar las características de la actividad y mecanismos eruptivos. Los espesores tomados de los cenizómetros instalados en las zonas proximales del volcán Sabancaya se detallan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Datos de cenizómetros ubicados en las zonas proximales del volcán Sabancaya.

CÓDIGO	LOCALIDAD	ESPESOR
SC-01	Estación Muccurca	0.60 mm
SC-02	Subida Muccurca	0.35 mm
SC-04	Parjo	0.20 mm
SC-05	Estación Ampato	0.65 mm
SC-06	Frente Ampato	0.35 mm
SC-22	SB11	0.35 mm
SC-23	Hornillo 2	0.20 mm
SC-24	Hornillos 3	>0.5 mm
SC-27	SB07	1.7 mm
SC-28	Sallalli 2	0.2 mm

4.1.2 Mineralogía de la ceniza

Para el análisis de mineralogía de la ceniza, se seleccionó 4 muestras (Fig. 4.1) para su análisis de componentes litológicos (33s-SAB-R23-003, 33s-SAB-R23-008, 33s-SAB-R23-019 y 33s-SAB-R23-026). Las cenizas emitidas desde octubre de 2022 hasta setiembre de 2023 contienen principalmente líticos juveniles grises claros y oscuros, cristales, en su mayoría biotitas y piroxenos, y una cantidad pequeña de partículas hidrotermalizadas y oxidadas. De manera que, el porcentaje de los componentes identificados en las muestras analizadas fue el siguiente: material juvenil (75.62 - 95.95%), cristales libres (2.18 - 16.99%), y líticos oxidados (1.60 - 7.40%).

La muestra 33s-SAB-R23-003 correspondiente al periodo de octubre del 2022 a junio del 2023, el mismo que posee mayor material juvenil en comparación a la muestra 33s-SAB-R23-026 tomada en el periodo de junio a septiembre del 2023, asimismo existe un predominio, en la última muestra, de cristales libres.

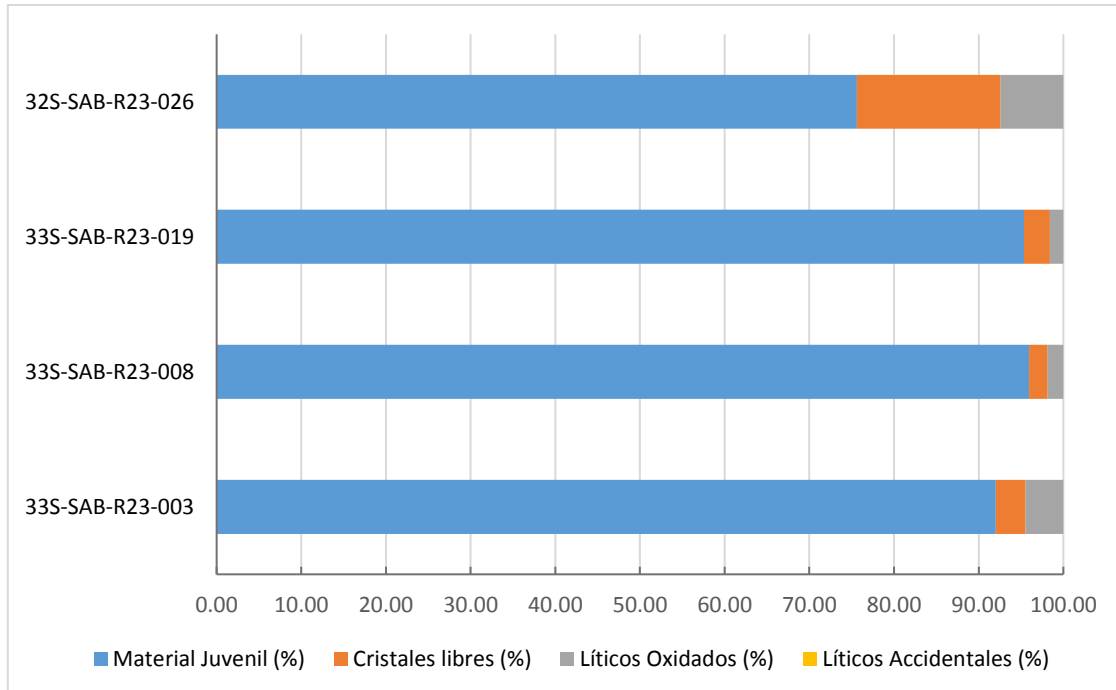


Figura 4.1. Porcentaje de partículas de las muestras de ceniza según sus componentes. (Periodo octubre 2022 – septiembre 2023).

4.1.3 Mapa de Isópacas

Se elaboró en base a 48 puntos de medición de acumulación de ceniza, los datos fueron tomados entre octubre del 2022 y septiembre del 2023. Estos datos fueron introducidos y trabajados en un sistema de información geográfica (ArcGIS) donde se generaron elipses de igual espesor, después se calculó el área de cada isópaca. La isópaca de mayor espesor (>1.2 mm) abarcó un área de 15.59 km² y la isópaca de menor espesor (0.1 mm) abarcó un área de 1283.05 km² (Tabla 4.2), dentro de esta última área se encuentran los poblados de Huanca, Cabanaconde, Tapay, Madrigal, Lari, Maca, Achoma e Ichupampa. (Fig. 4.2).

Asimismo, se presentaron espesores menores o igual a 0.2 mm en un radio entre 20 y 30 km del cráter del volcán, mientras que, en los cenizómetros proximales (ubicados entre 4 - 6 km), se registraron espesores entre 0.8 - 1.40 mm. Los registros de recopilación de la acumulación de caídas de ceniza en el sector norte y noroeste registraron entre 0.1 – 0.6 mm en un rango de 5 y 18 km. Específicamente en el sector sur, este y suroeste, a una distancia entre 3 y 20 km del volcán, se registraron espesores de 0.1 a 1.40 mm.

Tabla 4.2. Área abarcada por las isópacas.

Espesor (mm)	Área (km ²)
0.1	1283.05
0.2	879.59
0.4	170.96
0.8	25.79
>1.2	15.59

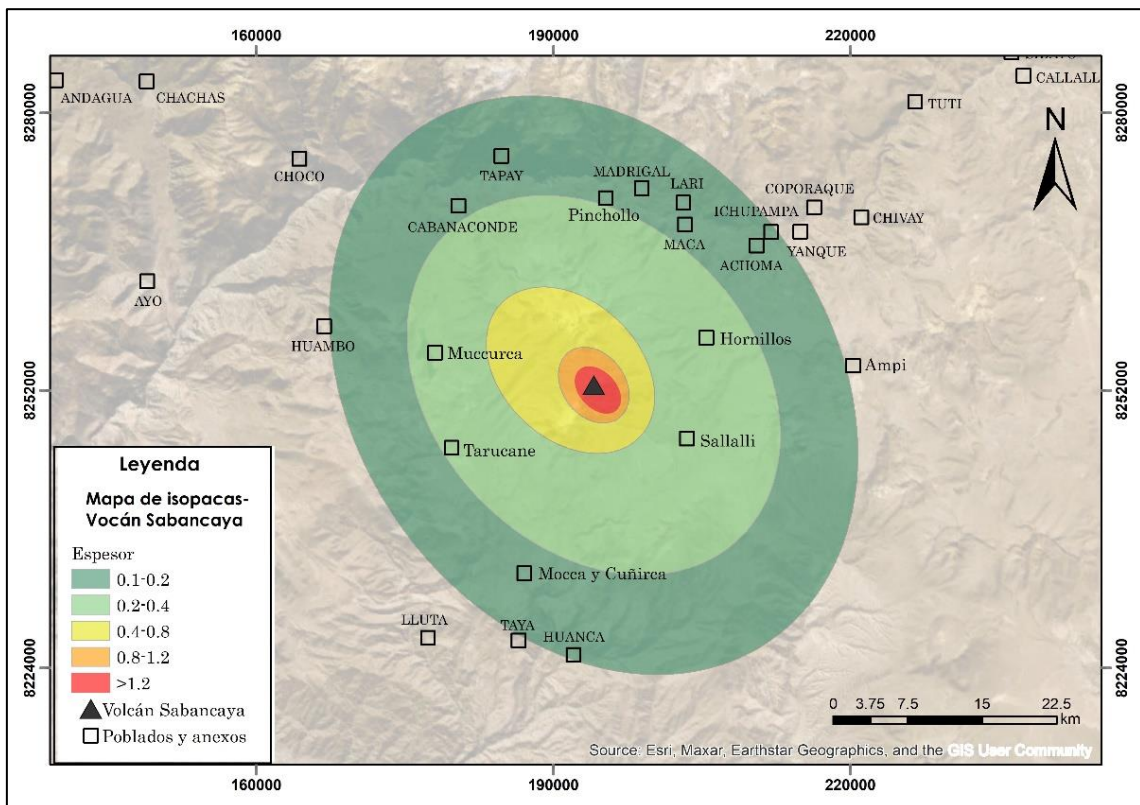


Figura 4.2. Mapa de isópacas para el periodo octubre 2022 a septiembre del 2023.

4.1.3.1 Cálculo del volumen

En la Tabla 4.3 y Fig. 4.3, se muestran los espesores de las isópacas en función a la raíz cuadrada del área de los mismos, con estos datos se hallaron los valores de T_0 y K y esto a su vez permitió obtener un volumen total de $\sim 0.000519 \text{ km}^3$ equivalente a $519,000 \text{ m}^3$.

Tabla 4.3. Datos de los espesores de isópacas y raíz cuadrada del área de las mismas.

Espesor (m)	Raíz (área en km ²)
0.0001	35.81968732
0.0002	29.65788259

0.0004	13.0751673
0.0008	5.07838557
0.0012	3.948417404

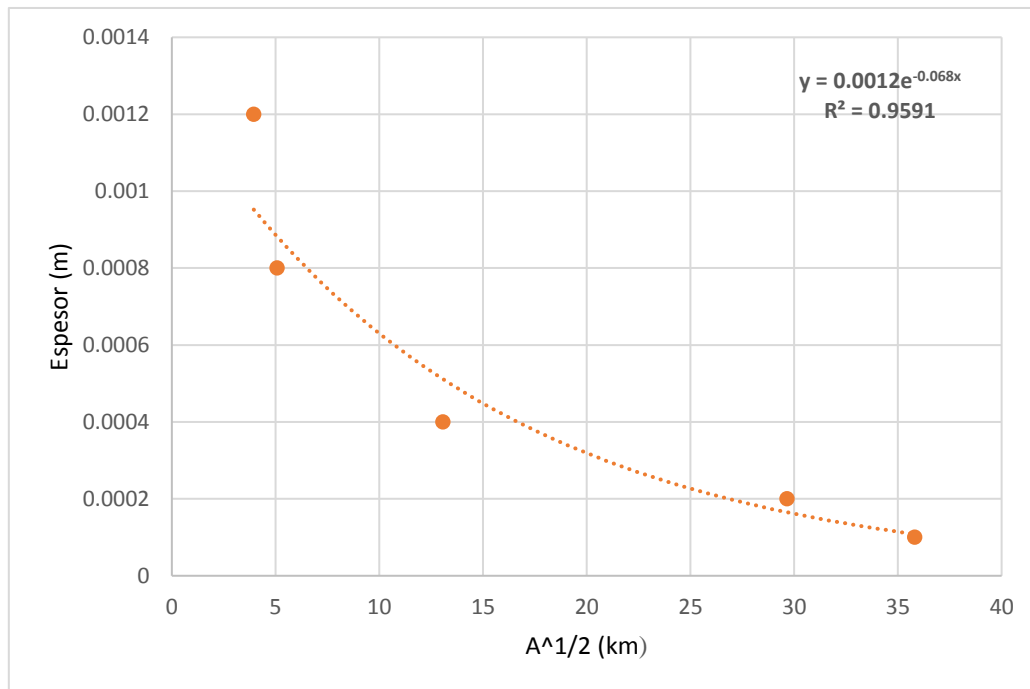


Figura 4.3. El diagrama de *Fierstein y Nathenson (1992)* está representada por el espesor en el eje "Y" vs la raíz cuadrada del área en el eje "X", donde se realiza el ajuste de la curva exponencial.

4.2 Deformación volcánica

Los datos GNSS se obtienen del procesamiento mediante el software GAMIT/GLOBK ([Herring et al., 2010](#)) y ante la ausencia de un marco de referencia local que elimine la influencia tectónica causada por la subducción de placas en la zona de estudio, se ha utilizado el principio de relatividad Galileana ([Galileo Galilei, 1638](#)), ajustando las posiciones y velocidades a la estación de referencia AREQ ubicada a ~75 km al sureste del Volcán Sabancaya. Para identificar patrones de deformación volcánica, se estimaron los cambios de longitud de línea base y de las posiciones horizontales. Las velocidades de deformación se estimaron para emplear en el modelamiento inverso de la fuente de deformación y determinar la tasa de cambio de volumen intruido.

4.2.1 Deformación superficial en el volcán Sabancaya

La tasa de deformación en el Sabancaya se registró de manera continua y constante durante el 2023, en la Fig. 4.4, se ilustra las series de tiempo de la componente de deformación de las cuatro (04) estaciones GNSS de registro permanente, identificándose tres periodos de deformación limitados por líneas rojas verticales (Fig. 4.4a).

- **Periodo 1 (entre agosto del 2022 a junio del 2023)**, con una velocidad de deformación registrada de 34 ± 1.5 mm/año, periodo a partir de la cual se identificó una ralentización

en la magnitud de deformación asociado a una disminución en la tasa de recarga hacia la fuente profunda, registrando velocidades inferiores a 10 ± 2 mm/año (Fig. 4.5a), este cambio, sería la respuesta a esta tasa de disminución constante de la velocidad de deformación registradas en las estaciones SBHO y SBSE.

- **Periodo 2 (Entre el 05 – 20 junio del 2023)**, en la serie de la estación geodésica SBHO se registra una ausencia en la tasa de recarga, con una velocidad de deformación con tendencia hacia la línea base cero (Fig. 4.5a).
- **Periodo 3 (del 22 de junio hasta la emisión del informe)**, las estaciones GNSS registran un periodo de recarga continua hacia la fuente regional profunda (Fig. 4.4a) con una velocidad de deformación con tendencia al incremento a razón de 24 ± 3 mm/año, este cambio de velocidad de deformación se observa en la Fig. 4.5. Estos resultados en la tasa de deformación y la magnitud de recarga hacia la fuente regional profunda evidencian que el proceso eruptivo del Sabancaya continuará con tendencia al incremento (Fig. 4.4 y 4.5).

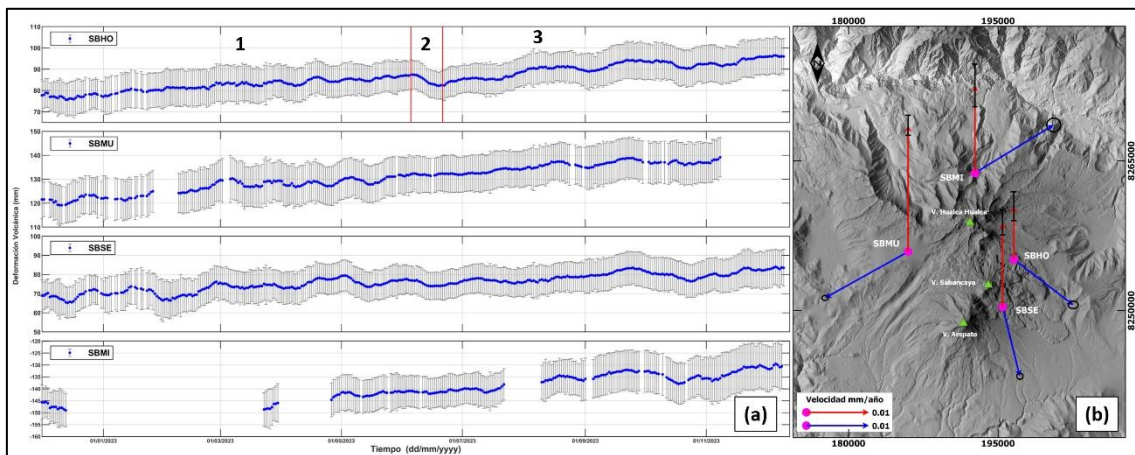


Figura 4.4. Variación temporal de la tasa de deformación en el volcán Sabancaya, **a)** serie temporal de deformación registrada por las 4 estaciones GNSS CORS y **b)** mapa de vectores anuales de desplazamiento horizontal.

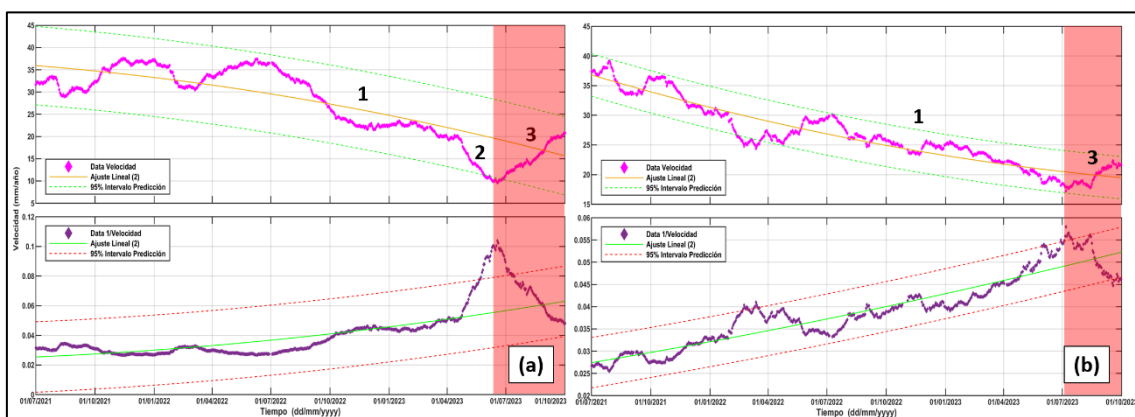


Figura 4.5. Serie temporal de las velocidades de deformación en el Sabancaya, **a)** arriba, velocidad de deformación de la estación GNSS SBHO y abajo es el inverso de la velocidad y **b)** es la velocidad de deformación para la estación GNSS SBSE y su velocidad inversa.

En la Fig. 4.4b (flechas azules), se ilustra el mapa de vectores de desplazamiento de las componentes horizontales de las estaciones GNSS CORS en el Sabancaya, el desplazamiento registrado obedece a una fuente puntual de deformación que se sitúa a ~6 km al norte del Sabancaya que evidencia un comportamiento radial de desplazamiento con respecto a la fuente con una velocidad de desplazamiento anual a razón de 10 – 19 mm/año, mientras que, la tasa de deformación anual registrada fue de 12 – 24 mm/año (Fig. 4.4b, flechas rojas)

4.2.1.1 *Serie temporal de desplazamiento horizontal (Línea Base)*

Las series temporales de Línea Base permiten identificar patrones de deformación asociados a cambios debido a una fuente de deformación superficial y cuan próximas se encuentran las estaciones de dicha fuente. En el Sabancaya se tiene hasta seis (06) líneas base que cubren el ámbito del cráter del volcán, de las cuales, en la serie de las estaciones SBSE y SBHO (Fig. 4.6a y 4.6b) se identifican dos periodos de disminución en la tasa de alargamiento entre ambas estaciones (periodo 1: entre febrero a junio y el segundo periodo entre septiembre y octubre, Fig. 4.6b), con un subsecuente incremento en el desplazamiento entre ambas estaciones, observados entre los periodos de junio a septiembre y entre octubre y noviembre.

En las estaciones SBMU y SBHO se observó un periodo notorio de disminución de la velocidad de alargamiento entre enero y abril (Fig. 4.6c) y un incremento en la tasa de desplazamiento entre abril y agosto (Fig. 4.6d). A su vez, en las series de las estaciones GNSS SBSE y SBMU (Fig. 4.6e y 4.6f) se observa que la velocidad de alargamiento entre ambas estaciones experimentó una notoria disminución con una sucesiva estabilización de la tasa de desplazamiento, donde las series con líneas de color representan las velocidades de desplazamiento entre el par de estaciones. Ambos procesos de alargamiento y disminución en la tasa de desplazamiento de estaciones GNSS se asocia principalmente a dos factores (1) incremento en el volumen de la tasa de migración del magma y/o gases desde la fuente profunda que presuriza el sistema en las fuentes más superficiales y (2) procesos asociados a la liberación de la presión acumulada en las fuentes superficiales con una subsecuente expulsión de productos volcánicos como cenizas, gases, etc.

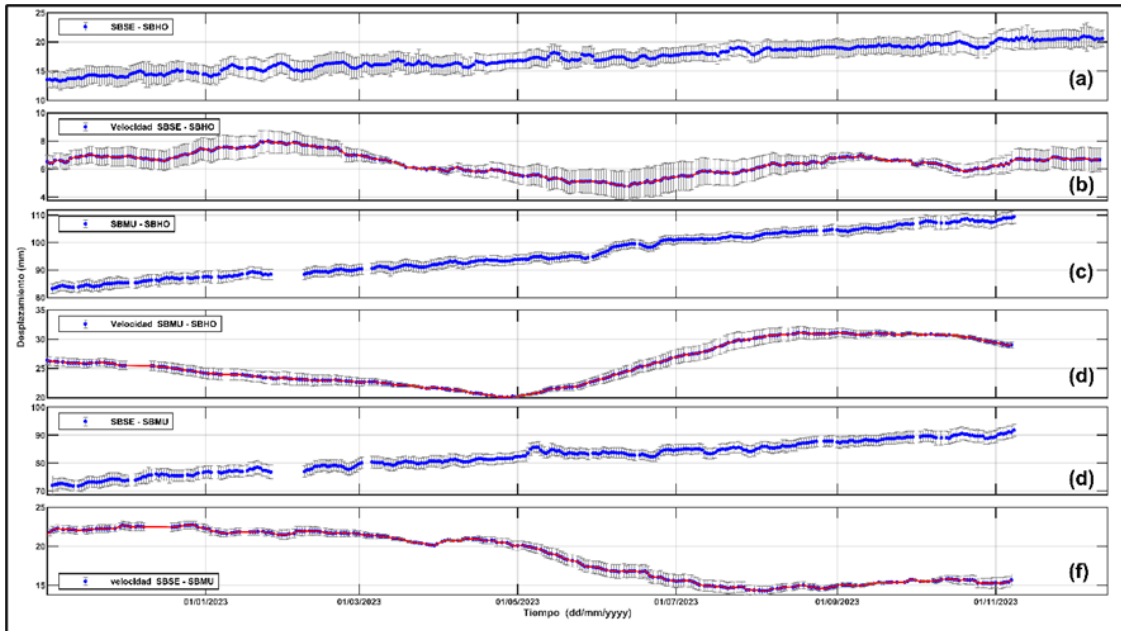


Figura 4.6. Variación temporal del alargamiento producido por el proceso inflacionario y deflacionario debido a una fuente puntual profunda con una subsecuente migración de gases, magma, etc, hacia fuentes más superficiales del volcán que provoca desplazamiento en las estaciones GNSS.

4.2.2 Modelamiento de deformación volcánica con datos GNSS

Se ha realizado el modelado matemático con los datos obtenidos de las velocidades anuales registrados por las cuatro (04) estaciones GNSS de la red del Sabancaya para el periodo 2023. Se ha tomado como base una geometría de fuente esférica que es aquella geometría que mejor se ajusta a las velocidades de desplazamiento en el volcán ya publicado en diversos artículos (MacQueen et al, 2020 y Boixart et al, 2020). Posteriormente, se realizó el modelamiento inverso de la deformación superficial, asumiendo una fuente esférica de radio definido que supuestamente está inmerso en un semi – espacio infinito linealmente elástico (McTigue, 1987), los resultados de las inversiones estimadas obtenidas del modelado de la fuente son coherentes con las velocidades obtenidas por las estaciones GNSS (Fig. 4.7, flechas rojas, velocidad modelada y flechas azules velocidad de estaciones GNSS) y que se describen en Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Resumen de resultados de los parámetros obtenidos del modelado inverso de datos GNSS.

	χ^2_v	Este	Norte	Z (km)	R (km)	P	ΔV (x10 ⁶ m ³ /año)
GPS	6.99	190044	8258342	5.1 ± 1	1.5	0.0003	14.35 ± 2

χ^2_v = chi cuadrado (error estadístico), Z = profundidad bajo el nivel medio del mar, R = radio de la esfera, P = presión (adimensional), ΔV = Cambio de volumen

El resultado del modelamiento inverso para el periodo del 2023 simulado para fuente de cavidad con geometría matemáticamente esférica, en la cual, el cambio de volumen es de 14 m³/año, se ajusta coherentemente a los datos de las velocidades registradas por las estaciones GNSS (Fig. 4.7).

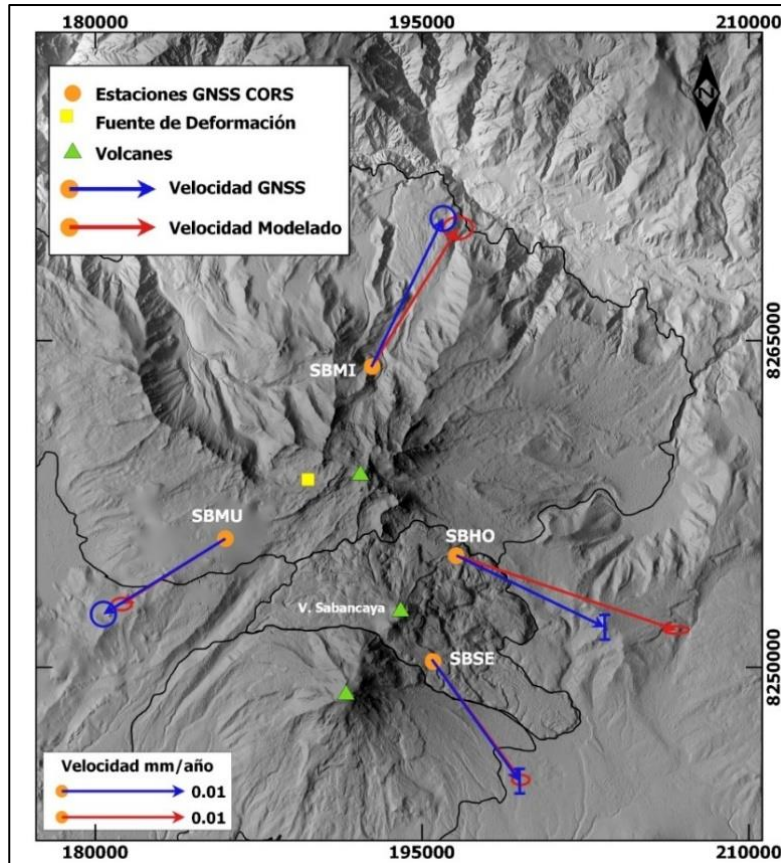


Figura 4.7. Mapa de vectores de velocidad horizontal de cada estación GNSS y su respectiva velocidad de modelado (flecha color rojo) que es coherente con los datos de campo, donde el símbolo cuadrado color amarillo representa la fuente de deformación modelada. Los vectores de velocidad presentan un desplazamiento radial al cráter del volcán, lo que evidencia un proceso continuo inflacionario con periodos de disminución e incremento en la tasa de recarga hacia la fuente profunda.

4.2.3 Serie temporal de inclinación del sensor electrónico (Inclinómetro)

En el inclinómetro electrónico se observan cambios en ambas componentes (X, Y) en diferentes periodos del 2023. En la Fig. 4.8a, se muestra la serie temporal del registro de las componentes de inclinación de la estación SBIV (Volcán), en las que se identificaron dos procesos de deformación con clara tendencia hacia el descenso de las componentes ESTE y NORTE, el mismo que, en enero alcanzó un valor de hasta $19 \mu\text{rad}$ y entre el 15 y 28 de octubre, se aprecia un salto que alcanzó un valor de $22 \mu\text{rad}$. Durante el periodo entre febrero y octubre se evidencia un ascenso de las componentes ESTE y NORTE de la estación a razón de $63 \mu\text{rad}$, mientras que, el vector resultante de la inclinación se desplaza a razón de $10 \mu\text{rad/año}$ en dirección hacia al cráter del volcán (Fig. 4.8b), lo cual, es coherente con la disminución en la tasa de recarga hacia la fuente superficial registrada en la estación GNSS SBHO y SBSE, donde las velocidades de deformación se registraron menores a $10 \pm 2 \text{ mm/año}$. Después de octubre los sensores no han evidenciado un claro proceso de deformación. En la componente ESTE se muestra una tendencia hacia la estabilización del sensor, mientras que, en la componente NORTE se evidencia un ligero ascenso.

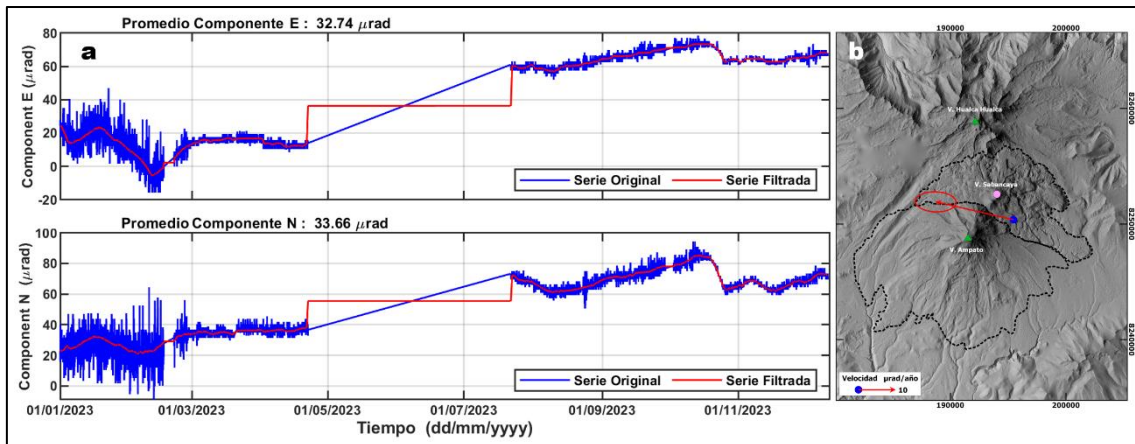


Figura 4.8. Variación temporal de las componentes de inclinación del sensor electrónico de la estación SBIV, **a)** componentes Este y Norte del inclinómetro electrónico **b)** vector de inclinación resultante del inclinómetro SBIV entre febrero y octubre del 2023, donde la flecha indica la tasa de desplazamiento de la estación.

4.3 Sismología volcánica

La red sismo – volcánica del Sabancaya, permitió identificar, clasificar y realizar el conteo diario de sismos, para esto se utilizó la información registrada en la estación sísmica SB07, puesto que es la estación que tuvo una operatividad del 100 % durante el año 2023. Por otra parte, también se realizó la localización y estimación de parámetros de fuente en función a la información de todas las estaciones de la red.

La data sísmica se registró en modo continuo y fueron almacenados en archivos de 01 hora en el formato original de los equipos sísmicos (.gcf para GURALP y .mseed para SILICON), posteriormente se procedió al cambio de formato con el cual se trabaja (.sac). Básicamente, se hace un procesamiento primario, que consiste en extraer la información más importante para detectar cambios en la actividad sísmica. Al realizar la clasificación de las señales sísmicas (programa: Classification_v02, modificado por personal del OVI del programa Classification de Lesage, 2009), por defecto el programa extrae los siguientes parámetros:

- Hora de ocurrencia del evento sísmico.
- Amplitud máxima ($\mu\text{m/s}$).
- Frecuencia máxima (Hz).
- Duración (s).
- Energía sísmica (MJ).
- Desplazamiento reducido – D_r (cm^2).

Por otra parte, se realizó la localización de los sismos asociados al fracturamiento interno de rocas (VT), utilizando un modelo de velocidades calculado mediante el programa VELEST (Kissling, 1995) y una relación de velocidad de 1.7, para el cálculo de los parámetros hipocentrales (latitud, longitud y profundidad) se empleó el programa Hypoellipse (Lahr, 1999), los errores de localización fueron menores de 2.6 km, además, se calculó la magnitud local (M_L) de cada evento sísmico.

4.3.1 Caracterización y análisis cuantitativo de las señales sísmicas

Desde que el volcán Sabancaya inició su proceso eruptivo (06 de noviembre del 2016) hasta la fecha, se han observado periodos de incremento en la sismicidad, siendo el más importante de ellos, el ocurrido durante el año 2019, donde se registró aumentos tanto en el número como en la energía de los diferentes tipos de sismos volcánicos. Específicamente, durante el año 2023, predominó la sismicidad de alta frecuencia (VT proximales y distales), seguida por sismicidad de baja frecuencia (sismos LP y EXP), y finalmente, por los sismos de tipo híbrido y tremor (TRE).

En general, se han identificado seis (06) tipos de señales sismo – volcánicas (Tabla 4.5 y Fig. 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14), las cuales, se detallan a continuación:

Tabla 4.5. Clasificación de sismos volcánicos registrados en el volcán Sabancaya por la estación SB07, periodo 2023.

N°	Tipo	Características
1	Volcano - tectónico (VT) proximal y distal	Caracterizados por presentar claros inicios de las fases P y S, además de altas frecuencias de hasta ~20 Hz, predominando en los 5 y 8 Hz. Este tipo de sismicidad se asocia a fracturamiento de rocas en ambientes volcánicos y alrededores, como zonas de debilidad, fallas geológicas activas, etc. Los sismos VT se presentaron a manera de enjambres y también como eventos discretos con magnitudes locales entre 0.1 y 5.1 M _L . Dentro de esta sismicidad se identificaron (Fig. 4.9): (a) VT proximales, localizados en un radio < 5 km del cráter, con diferencias de S – P < 1.2 segundos y (b) VT distales, localizados en un radio > 5 km del cráter y con diferencias de S – P > 1.2 segundos.
2	Largo Periodo (LP)	Se caracterizan por presentar inicios emergentes, con frecuencias que oscilaron entre 1 y 5 Hz. Este tipo de sismicidad se asocia a la dinámica de fluidos en el interior de los conductos del edificio volcánico (Fig. 4.10, superior). Asimismo, dentro de este tipo de sismicidad, se identificó la ocurrencia de sismos “Tornillo”, los cuales, se distinguen por su patrón armónico (Fig. 4.10, inferior), que se ha interpretado como la vibración de un resonador afectado por la interacción de líquidos y gases formando burbujas a altas presiones dentro de una cavidad. Estos eventos exhiben frecuencias bajas, con una predominancia alrededor de los 4.5 Hz.
3	Híbridos (HIB)	Se caracterizan por tener un inicio con altas frecuencias (~ 5 Hz) y la última parte de la señal (coda) es muy similar a un sismo LP (~ 1.6 Hz). Esta sismicidad suele atribuirse al aumento de presión de los fluidos volcánicos provocando una ruptura y el paso inmediato del magma hacia niveles más superficiales; sin embargo, Harrington y Brodsky (2007) , postulan que este no sería el único mecanismo de generación, en su lugar, sugieren que puede ser el resultado de bajas velocidades de ruptura combinadas con fuertes efectos de trayectoria y esto debido a sus fuentes poco profundas (Fig. 4.11).

<p>4</p>	<p>Explosiones (EXP) y Eventos LF acoplados</p>	<p>Las señales sísmicas de explosiones (Fig. 4.12) presentaron frecuencias bajas que oscilaron entre 0.4 y 4.8 Hz (predominando en ~1.5 Hz). Dichas explosiones se caracterizaron por presentar al inicio una componente VLP (< 0.5 Hz) y así mismo, estuvieron acompañadas en muchas ocasiones por tembor volcánico.</p> <p>Dentro de este tipo de sismos, se identificaron otras explosiones con cierta particularidad en su forma de onda y contenido espectral, denominadas “Eventos LF acoplados”, según Caplan-Auerbach y Petersen (2005), estos se definen como dos sismos de baja frecuencia uno tras otro, separados por algunos segundos. En el volcán Sabancaya, estos eventos presentaron frecuencias predominantes en 0.8 Hz (primer evento) y 1.7 Hz (segundo evento) y por lo general, el segundo evento fue de mayor amplitud y el intervalo de tiempo entre ambos sismos osciló entre 7 y 36 s.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Los intervalos de tiempo de $P_2 - P_1$ que oscilaron entre 7 y 15 s, por lo general, indicaron la presencia de magma cerca de la superficie y que posteriormente, contribuyó al crecimiento del domo de lava. - Por su parte, los intervalos de tiempo de $P_2 - P_1$ que fueron mayor a los 15 s y llegaron hasta un máximo de 36 segundos, se relacionaron a magma relativamente profundo y a su vez coincidió con el periodo de destrucción del domo de lava.
<p>5</p>	<p>Tremor volcánico</p>	<p>Son vibraciones continuas en el tiempo de fluidos por cavidades o por desgasificación, los cuales, se presentaron como pulsos aislados (periodos cortos de tiempo, por algunos minutos) o de manera continua (periodos de tiempo más duraderos como horas, días, etc.). Se identificaron dos tipos de tembor volcánico:</p> <ol style="list-style-type: none"> a) Tremor espasmódico – TRE (Fig. 4.13, superior), caracterizado por presentar frecuencias de hasta 5.3 Hz y mayores duraciones. b) Tremor armónico – TRA (Fig. 4.13, inferior), se caracterizó por presentar señales de baja frecuencia (una frecuencia fundamental y sobretonos) que oscilaron entre 0.3 y 3 Hz, a menudo fueron de muy poca duración y las amplitudes muy pequeñas.
<p>6</p>	<p>Eventos superficiales</p>	<p>También se han podido registrar señales causadas por procesos más superficiales y que son de suma importancia identificar para conocer a que se deben.</p> <ol style="list-style-type: none"> a) Caída de rocas (Fig. 4.14), señales con inicios emergentes presentaron duraciones de hasta seis minutos y frecuencias que oscilaron entre 0 – 21 Hz con energía sísmicas de hasta 0.6 MJ.

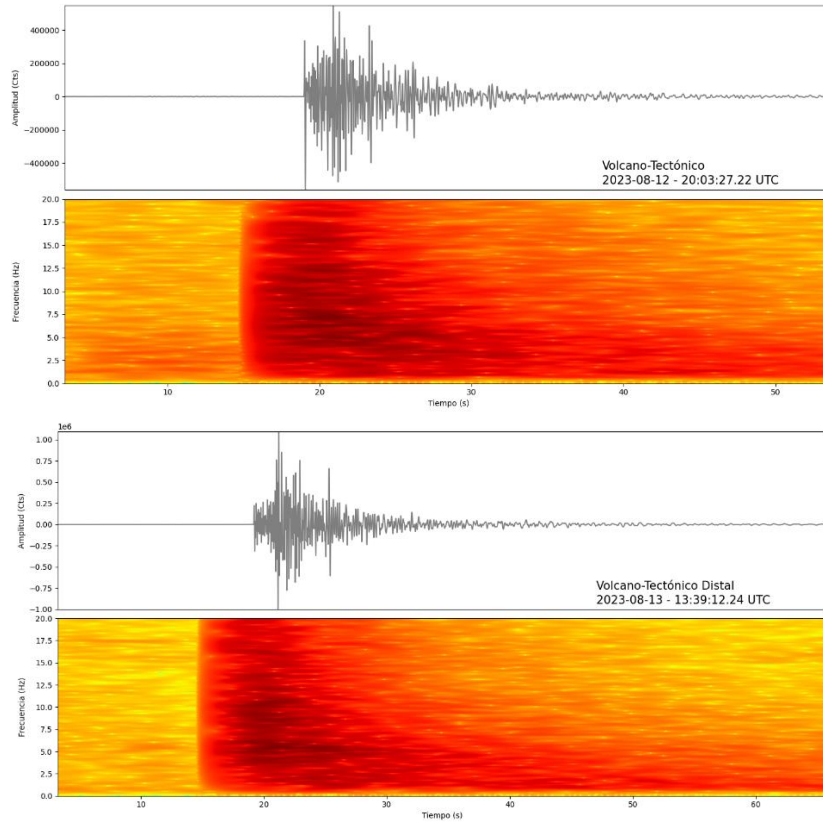


Figura 4.9. Superior: Sismo Volcano – tectónico proximal registrado el 12 de agosto a las 20:01 UTC, Inferior: Sismo Volcano – tectónico distal registrado el 13 de agosto a las 13:39 UTC.

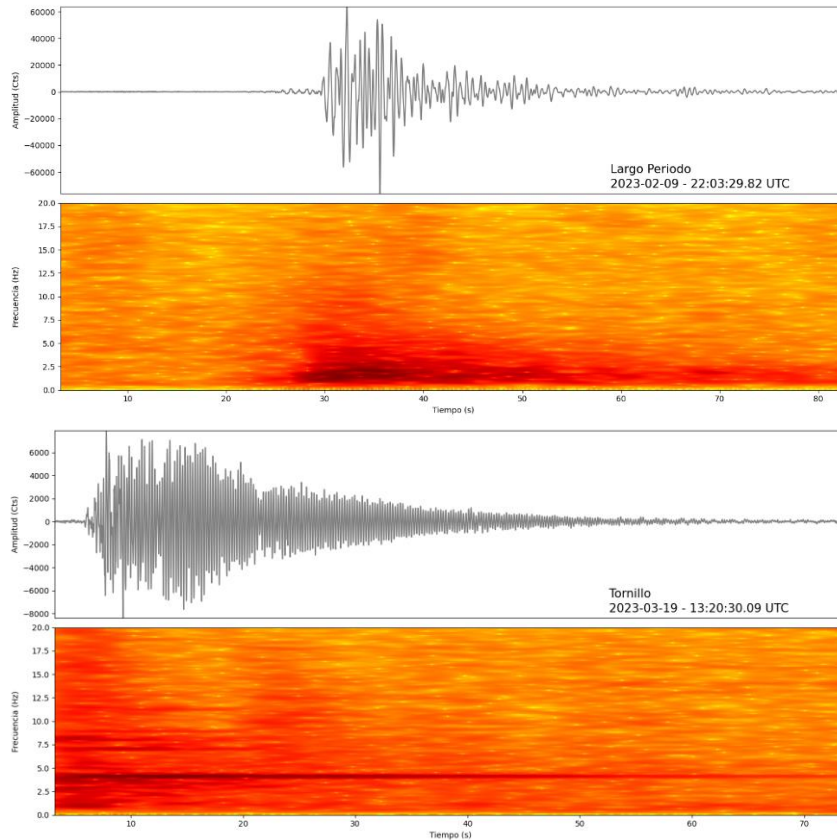


Figura 4.10. Superior: Sismo de largo periodo registrado el 29 de marzo a las 22:03 UTC, Inferior: Sismo de tipo Tornillo registrado el 19 de marzo a las 13:20 UTC.

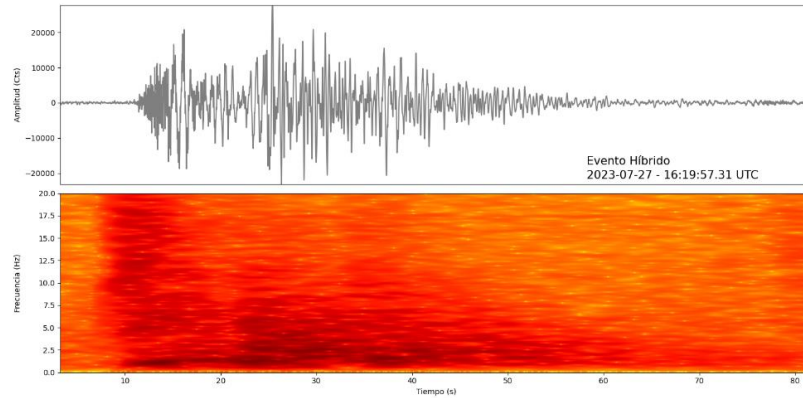


Figura 4.11. Sismo híbrido registrado el 29 de marzo a las 22:03 UTC.

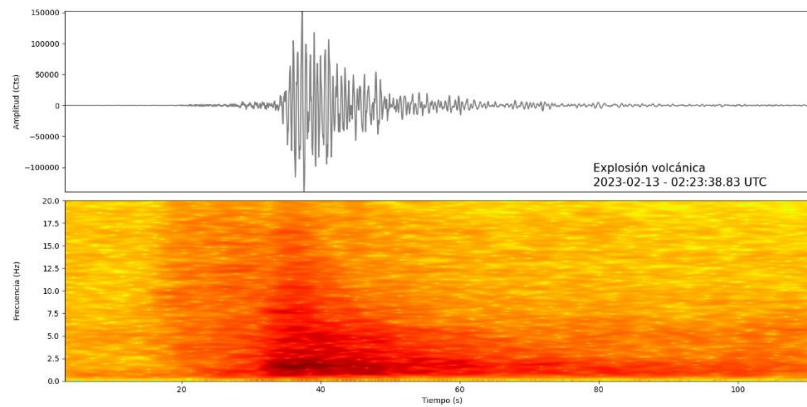


Figura 4.12. Sismo asociado a explosión volcánica registrada el 13 de febrero a las 02:23 UTC.

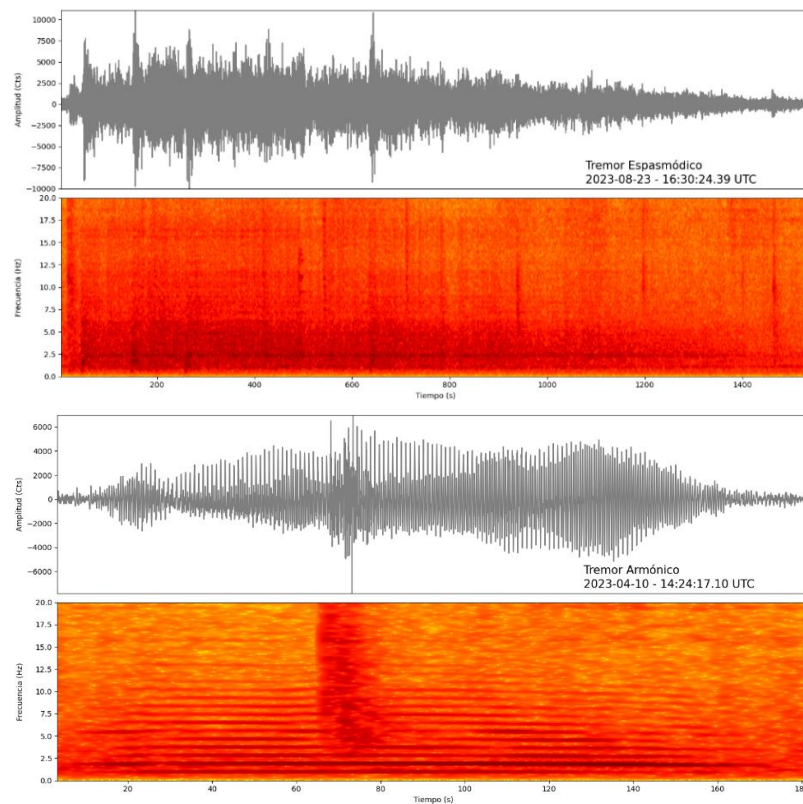


Figura 4.13. Superior: Tremor espasmódico registrado el 23 de agosto a las 16:30 UTC, Inferior: Tremor armónico registrado el 10 de abril a las 14:24 UTC.

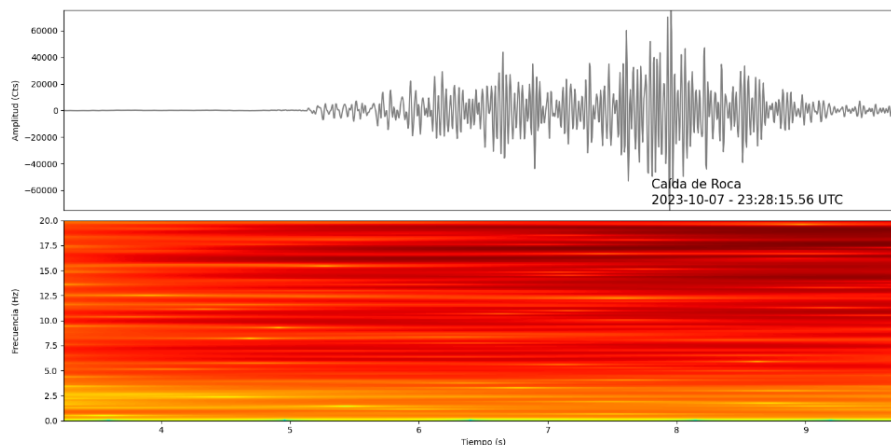


Figura 4.14. Sismo asociado a caídas de roca registrada el 07 de octubre a las 23:28 UTC.

A lo largo del 2023, se registró un total de 82,155 sismos volcánicos (Tabla 4.6 y Fig. 4.15), con un promedio de 247 eventos sísmicos por día; entre ellos se destacó la sismicidad por fracturamiento interno (40,725 sismos VT proximales y distales), seguido por la sismicidad por movimiento de fluidos (26,254 sismos LP), explosiones – EXP (10,543), luego actividad tremórica (4,395 con duraciones de hasta 20 horas por día), y por último sismos híbridos – HIB (238), todos estos eventos con energías sísmicas que oscilaron entre 1 y 12,654 MJ (Megajoules).

Tabla 4.6. Sismos identificados en el volcán Sabancaya y evolución estadística a lo largo del 2023.

Tipo de sismos	Número Total	Porcentaje (%)	Promedio / día	Energía (MJ)
VT proximal	20356	25	61	965
VT distal	20369	25	61	12654
LP	26254	32	79	299
HYB	238	0	1	1
TRE	4395	5	13	73
EXP	10543	13	32	1849
TOTAL	82155	100	247	15841

En cuanto a la tasa de ocurrencia de sismos, durante el año 2023, en el volcán Sabancaya, ha predominado la sismicidad asociada al fracturamiento interno (tanto VT proximales como distales), estos últimos, en ocasiones se presentaron a manera de enjambre sísmicos, alcanzando su pico en junio con más de 1000 sismos VT/día. Luego, siguió la sismicidad por movimiento de fluidos (sismos de Largo Periodo y Explosiones). En menor cantidad, se registraron episodios de actividad tremórica (TRE y TRA) con duraciones que oscilaron de 5 minutos hasta 20 horas de duración. Por último, la sismicidad asociada al ascenso de fluidos (gases y/o magma), se presentó de forma esporádica a lo largo del periodo analizado, contabilizándose hasta 20 sismos HIB/ día.

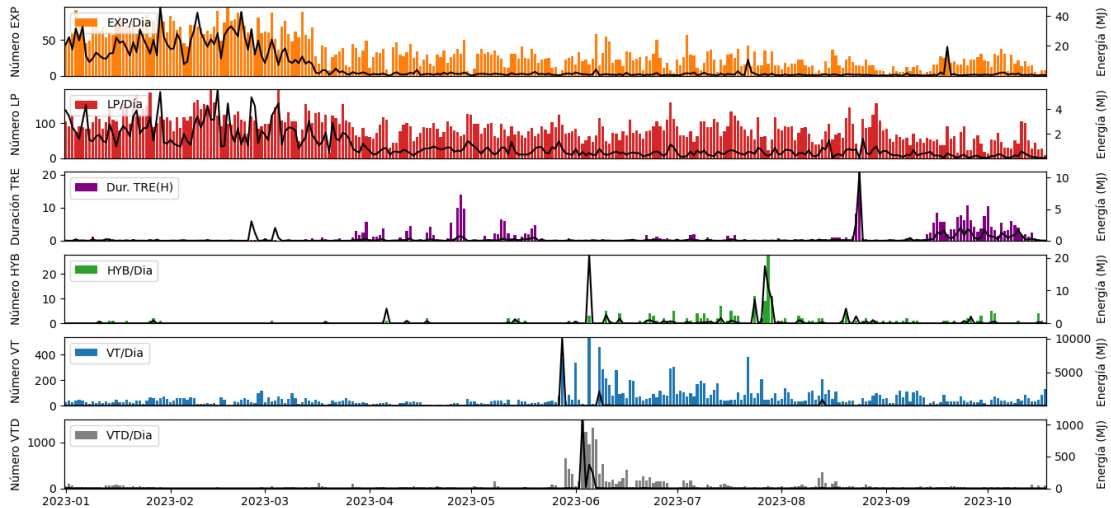


Figura 4.15. Gráfica de la distribución diaria por número y energía de eventos sísmo-volcánicos registrados en el volcán Sabancaya, periodo 2023.

Su representación porcentual en base a la energía sísmica liberada por tipo de sismicidad (Tabla 4.6 y Fig. 4.16) muestra que, la sismicidad por fracturamiento interno, en especial los sismos VT distales (VTD) han liberado una gran cantidad de energía (correspondiente al 87%), ya que se presentaban en forma de enjambre sísmico, luego continúan las explosiones con un 11% del total de energía liberada en este año, las cuales tuvieron un alza a principio y a finales de este año, luego continúan los sismos de Largo periodo (LP) con un 1.9% y por último, con menores energías, menor al 1%, los sismos híbridos, tornillo y la actividad tremórica (TRE y TRA).

Distribución Anual de la Energía Liberada - volcán Sabancaya

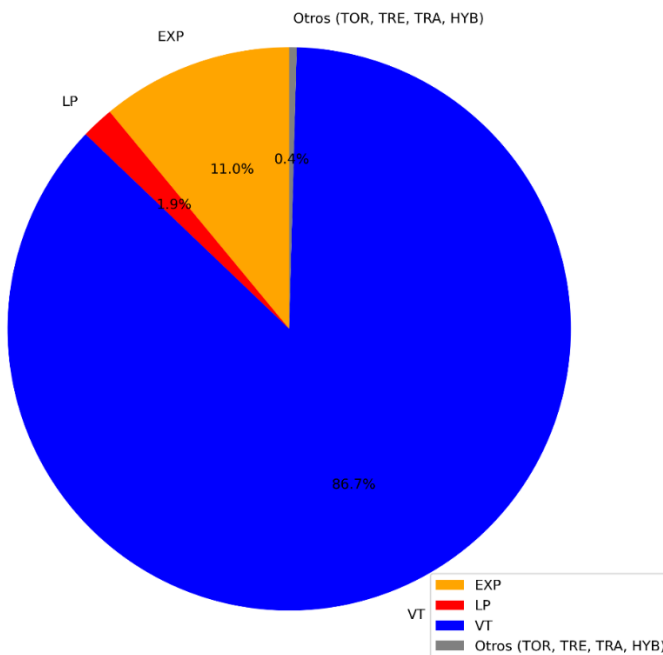


Figura 4.16. Representación porcentual de la distribución anual de la energía sísmica liberada por tipo de sismicidad. Volcán Sabancaya, periodo 2023.

4.3.2 Localización de sismos Volcano – tectónicos (VT)

Durante el 2023 en el volcán Sabancaya y alrededores se ha registrado una importante sismicidad volcano tectónica – VT, la red sísmica desplegada ha permitido localizar más de 6061 sismos de este tipo, los cuales, se caracterizaron por presentar fases claras de las ondas sísmicas P y S; y registrarse en un mínimo de cuatro estaciones sísmicas. El cálculo de los parámetros hipocentrales (latitud, longitud y profundidad) se desarrolló mediante el programa Hypoellipse, con errores de localización menores de 2.6 km.

Los sismos VT se localizaron principalmente al noreste, este y oeste hasta más de 25 km respecto al cráter, mientras tanto, la distribución en función de la profundidad mostró sismos hasta los 20 km respecto al nivel del mar, los cuales, presentaron magnitudes M_L entre 0.1 y 5.1 (Fig. 4.17).

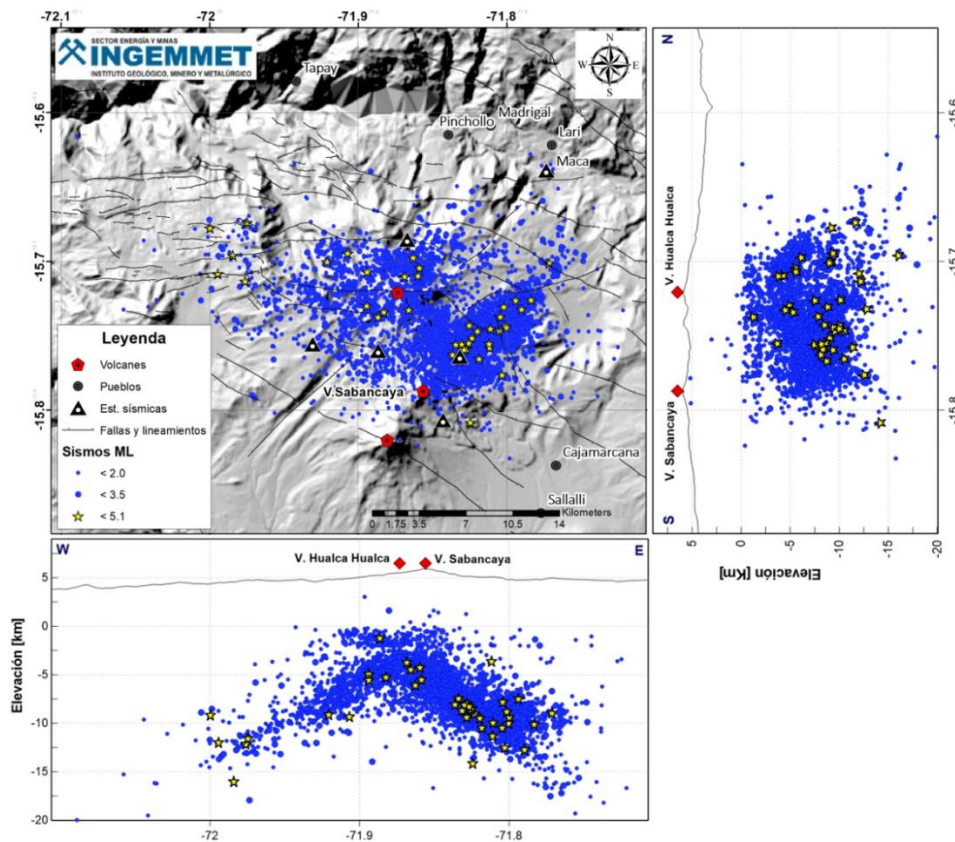


Figura 4.17. Localización de la sismicidad Volcano – tectónica (VT) registrada en el volcán Sabancaya durante el 2023.

Al igual que el año anterior, se identificó un enjambre importante con aproximadamente 1700 sismos VT registrados entre el 26 de mayo y 06 de junio del 2023 (Fig. 4.18), los cuales, se localizaron entre 1.5 y 11 km al este y noreste del cráter, con una orientación noroeste – sureste y una distribución en profundidad de hasta 12 km posiblemente asociado a la reactivación de las fallas Hualca Hualca y Colihuire (Fig. 4.19). El enjambre descrito estaría probablemente asociado a un pulso de intrusión de magma importante relacionado a la cámara profunda localizada por debajo del volcán Hualca Hualca (Cruz, 2019) debido a la sobrepresurización de los acuíferos que cruzan las fallas tectónicas debido a la intrusión de magma (White & McCausland, 2016).

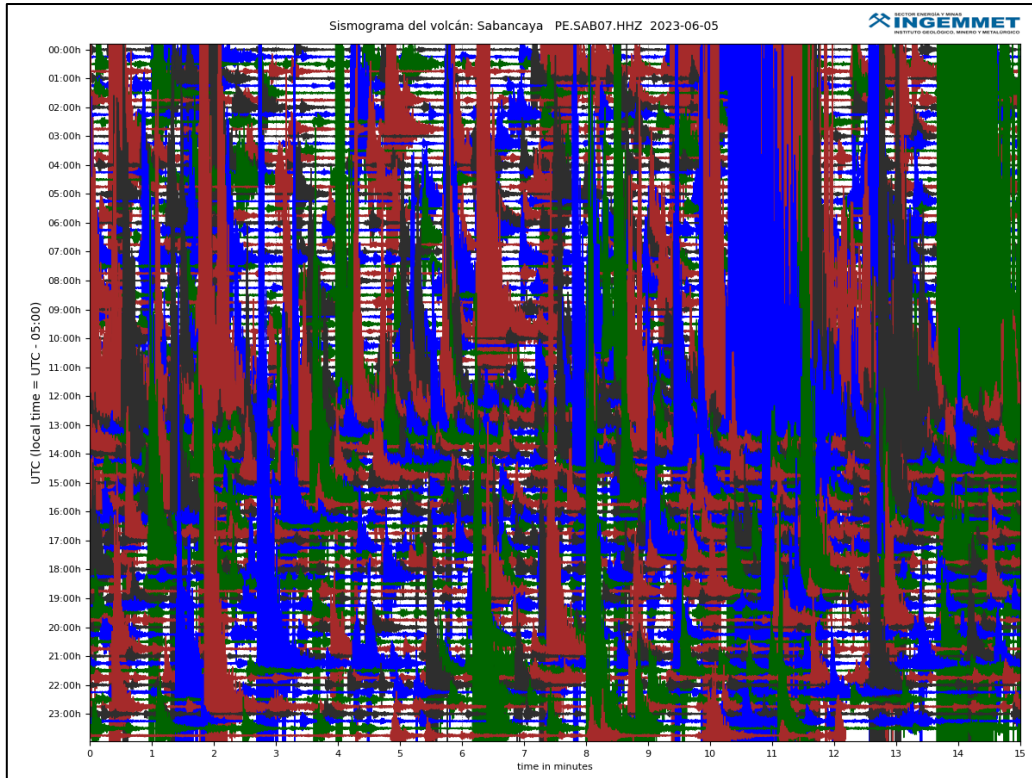


Figura 4.18. Enjambre de sismos Volcano - tectónico (VT) registrado en el volcán Sabancaya el 05 de junio del 2023.

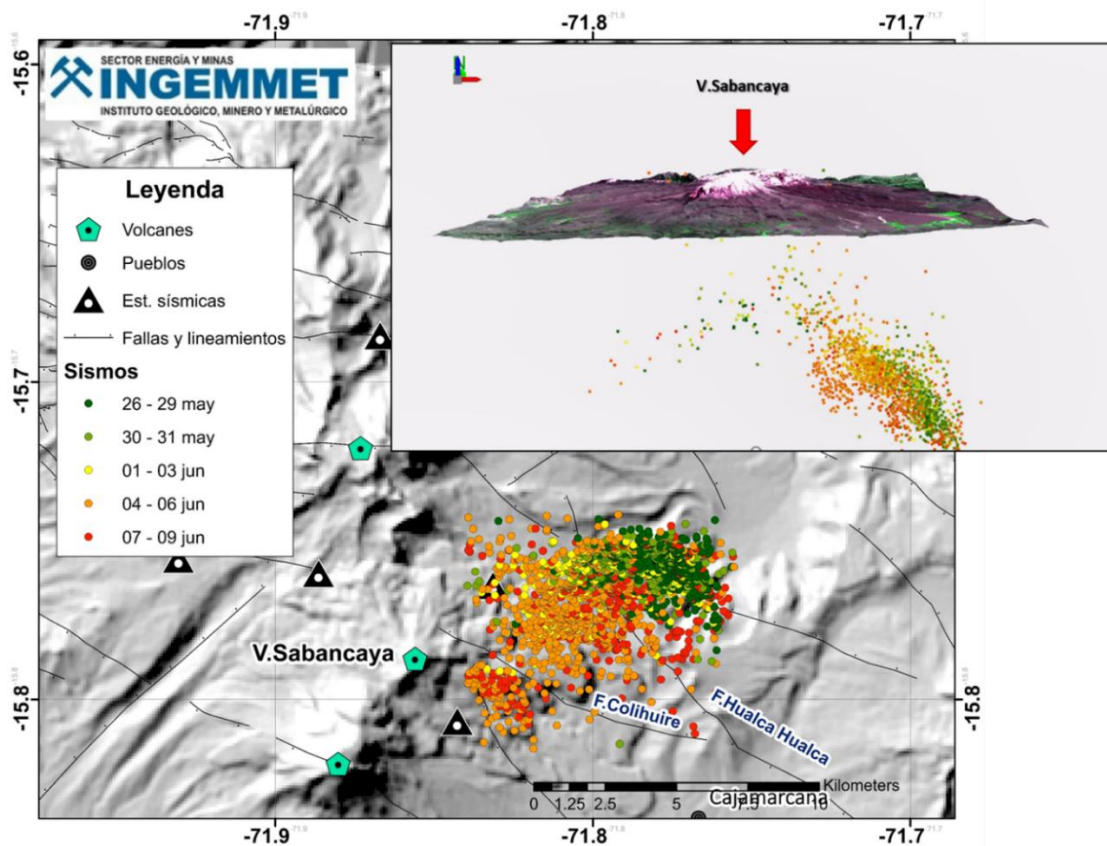


Figura 4.19. Localización del enjambre de sismos VT registrado entre el 26 de mayo y 06 de junio del 2023 en el volcán Sabancaya. **a)** Distribución espacial y **b)** distribución en profundidad este y oeste.

4.3.2.1 *Mecanismos Focales*

El cálculo de los mecanismos focales se realizó mediante el programa SEISAN a través de los subprogramas FOCMEC, FPFIT Y HASH, mediante la conversión de datos en formato GCF a SEISAN. Por otro lado, es necesario que los sismos tengan una buena localización y cobertura azimutal, se recomienda que se emplee una gran red de estaciones sísmicas. Para el presente trabajo, se utilizó sismos registrados entre 5 y 6 estaciones sísmicas, con magnitudes > de 3.0 M_L .

A continuación, se describen las características principales de los mecanismos focales calculados, los cuales fueron agrupados por zonas (Fig. 4.20):

- **ZONA A:** el mecanismo focal del sismo registrado en esta zona corresponde al 01 de enero, el cual estaría asociado a esfuerzos extensionales concordante a la falla Pungo - hornillos que es de tipo normal.
- **ZONA B:** las soluciones obtenidas para los sismos del 19 de abril y 02 de mayo fueron de tipo transcurrente, estos sismos se encuentran muy cercanos al lineamiento de Sepina, lo que indicaría su influencia y que los esfuerzos serían transversales, cabe mencionar que, estos mismos resultados se obtuvieron para sismos en año anteriores.
- **ZONA C:** a esta zona le corresponden sismos registrados el 01 y 02 de enero, los cuales tienen soluciones diferentes, siendo el primero un mecanismo focal de tipo normal posiblemente asociado a la falla Solarpampa y el segundo de tipo transcurrente, el cual sería afectado probablemente por el lineamiento de Sepina.
- **ZONA D:** le corresponde 01 sismo registrado el 25 de junio, el cual tiene un mecanismo focal de tipo normal en dirección noreste - suroeste, el cual estaría asociado a esfuerzos extensionales y correspondería posiblemente al lineamiento de Sepina.
- **ZONA E:** los sismos registrados el 02 de enero y 25 de abril (localizados al noreste) mostraron una solución tipo normal con dirección oeste – este, los cuales estarían asociados a la falla Hualca-Hualca.
- **ZONA F:** en esta zona se obtuvieron 07 soluciones de mecanismos focales, los que en su mayoría fueron de tipo transcurrente (26 y 30 mayo, 04, 12, 21 y 22 de junio), estos sismos pertenecen al enjambre sísmico importante registrado desde el pasado 28 de mayo, el cual estaría asociado a un proceso de intrusión de magma del volcán Sabancaya. Así mismo, se obtuvo una solución de tipo normal en dirección noroeste – este registrado el 03 de junio, el cual podría estar relacionado a la falla Hualca – Hualca.

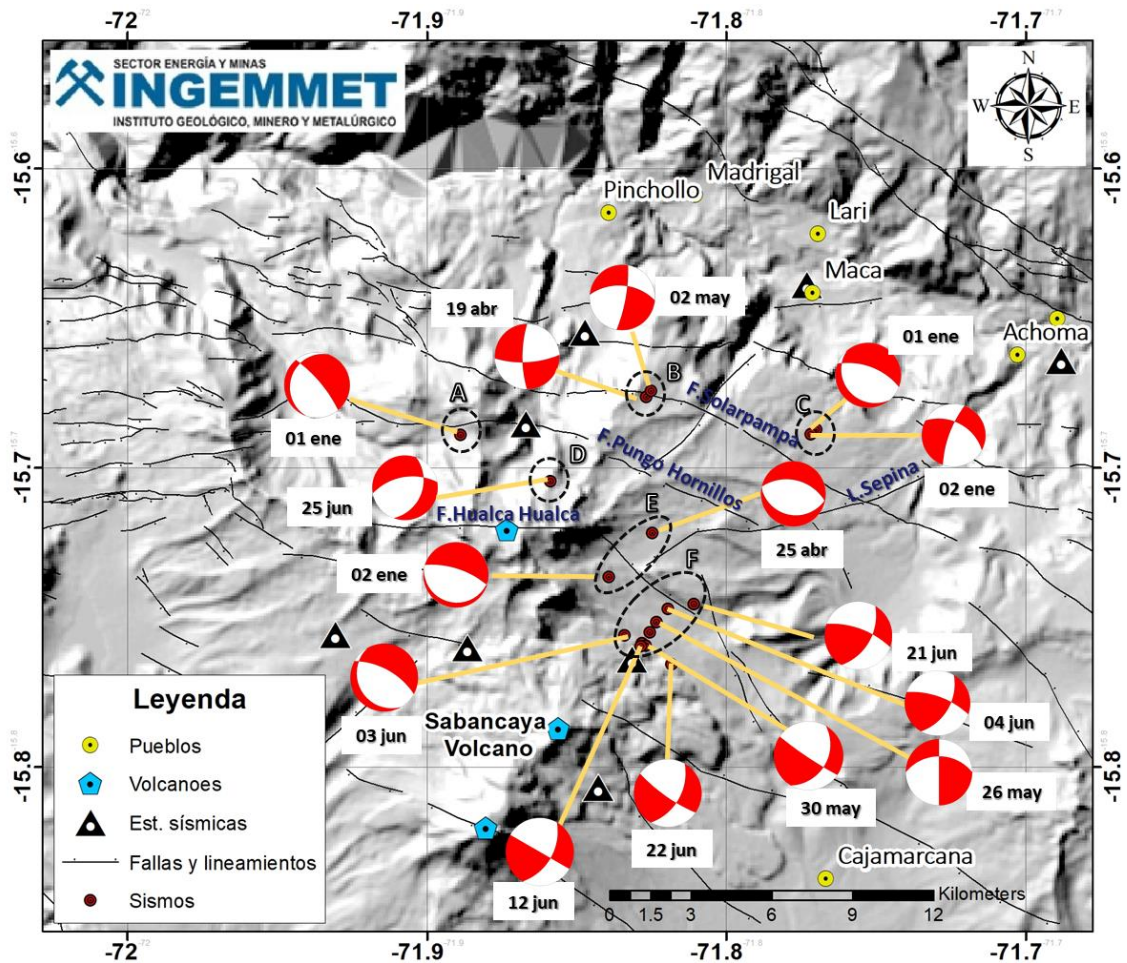


Figura 4.20. Mecanismos focales calculados durante el 2023 en el volcán Sabancaya.

4.3.2.2 Volumen de magma intruído

El cálculo del volumen intruído no depende de localizaciones precisas, así mismo, puede estimarse de manera rápida y fácil con pocas estaciones sísmicas. A continuación, se muestra la ecuación del volumen intruído en m³ (White y McCausland, 2016):

$$\text{Intruded } V = 10^{(\log_{10}(\text{Intruded } V))}$$

$$\log \log (\text{Intruded } V) = 0.77 \times \log_{10}(\sum Mo) - 5.32$$

$$Mo = 10^{\left(\frac{3}{2}\right)(M+6.07)}$$

Dónde: M= Magnitud, Mo= Momento sísmico en N.m e Intruded V= volumen intruído en m³.

En la Fig. 4.21, se muestra la variación de las magnitudes calculadas para sismos VT registrados en el volcán Sabancaya durante el presente año, se puede observar un valor máximo de 5.1 M_L perteneciente al enjambre del mes de junio, durante el resto del año se observa pequeñas variaciones, sin relevancia alguna. Es así entonces que, por medio de las magnitudes se realizó el cálculo del volumen intruído de magma, en donde el valor máximo fue de 58 millones de m³ asociado al enjambre antes mencionado (Fig. 4.18). Al igual que las magnitudes, los valores de

volúmenes de magma fueron disminuyendo durante el año, con valores promedio menores a 1 millón de m³.

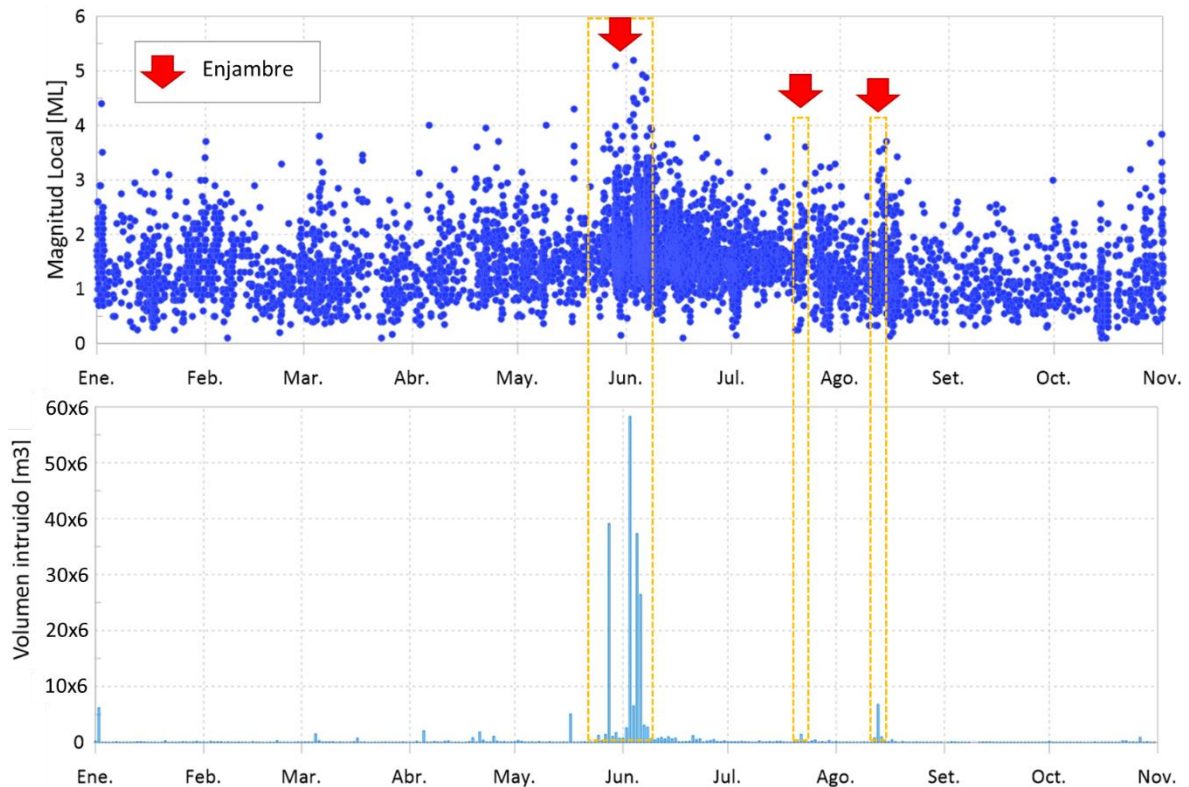


Figura 4.21. Magnitud de sismos VT y volumen de magma intruido en el volcán Sabancaya durante el 2023.

4.4 Química de gases volcánicos

Durante el 2023 la desgasificación presentó los valores más altos registrados durante el periodo eruptivo actual, el promedio diario tuvo 4 picos que superaron las 4,000 t/día (área verde en la Fig. 4.22) y el flujo máximo alcanzó un valor de 15,200 t/día el 20 de junio (área azul en la Fig. 4.22), seguido por valores que superaban las 10,000 t/día, esto se vio reflejado en el acumulado diario teniendo un máximo de 570,000 t/día (barras violetas en la Fig. 4.22); sin embargo, desde fines de agosto estos valores disminuyeron casi en un 50% teniendo algunos picos que alcanzaron las 6,000 t/día manteniéndose aun en umbrales catalogados como valores GRANDES.

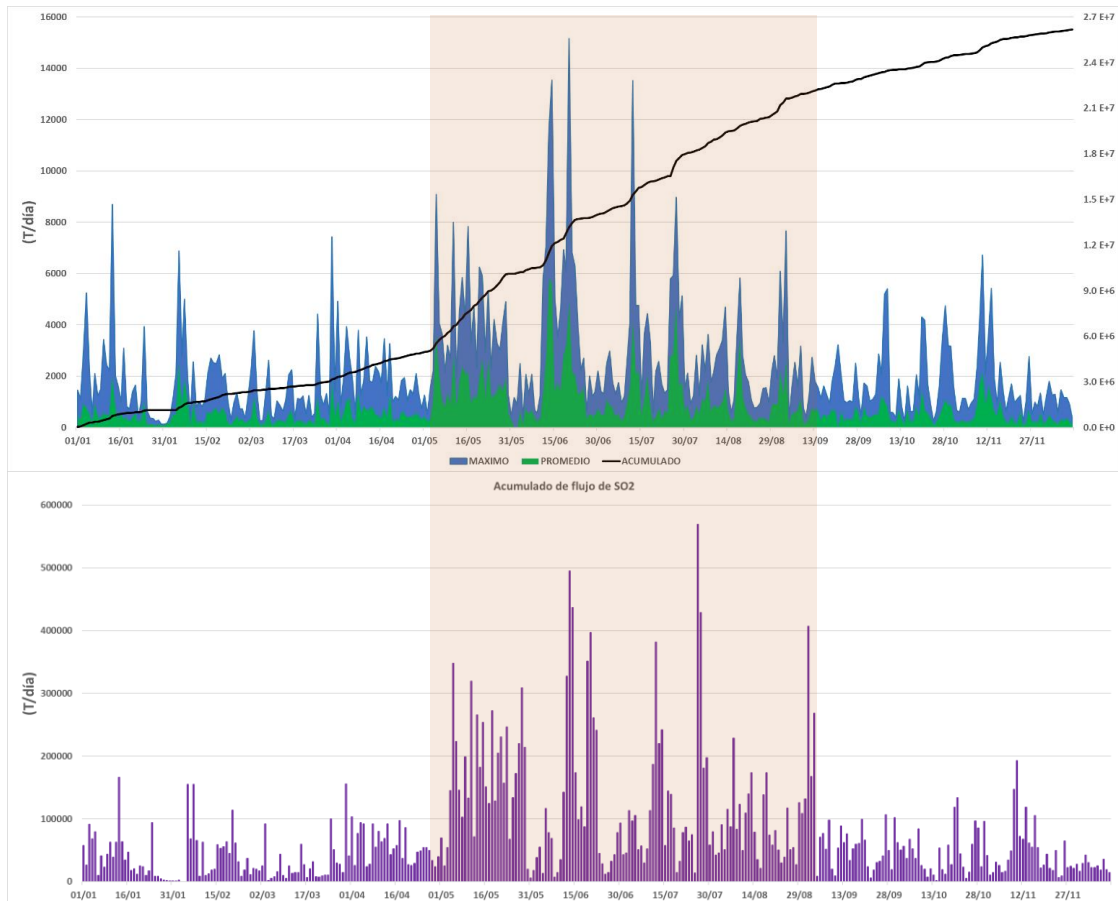


Figura 4.22. Mediciones de los flujos promedios, máximos, acumulados diarios y acumulado global con la red de escáneres DOAS (SAD1, SAD2, SAD3 y SAD5).

4.5 Hidroquímica volcánica

Los resultados de los análisis químicos de las muestras colectas para aniones, metales disueltos y parámetros fisicoquímicos se presentan en la Tabla 4.7 y los resultados de los análisis químicos para los elementos traza se muestran en la Tabla 4.8.

Tabla 4.7. Resultados de los parámetros fisicoquímicos temperatura T° en $^\circ\text{C}$, potencia de hidrógeno pH, conductividad eléctrica CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ y análisis químicos de aniones y metales disueltos en mg/L .

Fuente	Fecha	T°	pH*	CE*	HCO_3^-	F	Cl	SO_4^{2-}	Na	Mg	K	Ca	SiO_2	Fe	S	Sr	Li
SA2	08/06/2023	13.8	7.32	1785	210.2	1.0	74.6	669	131.8	127.0	24.7	61.5	94.1	<0.01	223.3	0.3449	0.2208
SA2	25/07/2023	13.7	7.61	1691	219.4	1.0	70.4	607	135.9	130.9	26.8	63.5	99.0	<0.01	252.5	0.3532	0.2869
SA3	08/06/2023	20.1	6.16	3592	269.5	1.2	183.4	1588	289.1	298.1	51.5	111.4	101.6	<0.01	531.0	0.6925	0.4799
SA3	16/10/2023		7.76	3606	284.4	1.4	187.0	1814	315.7	329.7	58.8	119.1	110.2	<0.01	646.7	0.7344	0.6200
YA1	30/04/2023	61.3	7.98	5510	708.8	1.9	1133.3	348	1079.1	7.7	80.0	86.5	100.2	0.01	133.2	3.2501	5.9332
YA2	30/04/2023	75.5	8.12	5067	824.8	1.1	1041.1	273	977.8	7.6	70.1	76.9	89.8	0.07	113.6	3.1175	5.4626
CAL	30/04/2023	68.9	8.26	6658	824.8	1.4	1568.3	318	1243.0	12.0	74.0	117.1	66.2	0.04	114.1	4.8925	3.5431
PCL	01/05/2023		8.33	3775	70.1	4.5	868.1	292	674.8	4.9	85.8	50.3	218.7	<0.01	121.1	1.2082	4.5721

nd: No detectado

* medido en laboratorio

Tabla 4.8. Resultados de los análisis químicos de los elementos traza en mg/L.

Fuente	Fecha	As	B	Ba	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Se	Ti	Tl	U	V	Zn
SA2	08/06/2023	0.067	0.69	0.0275	nd	0.0102	0.0012	0.0065	0.0031	nd	0.0035	nd	0.0003	0.1406	0.019
SA2	25/07/2023	0.068	0.92	0.0220	nd	0.0094	0.0012	0.0066	0.0028	nd	0.0058	nd	0.0003	0.1504	0.015
SA3	08/06/2023	0.091	1.28	0.0175	nd	0.0100	0.0009	0.0072	0.0019	nd	0.0044	nd	0.0015	0.2542	0.019
SA3	16/10/2023	0.095	1.88	0.0175	nd	0.0097	0.0011	0.0074	0.0015	0.002	0.0070	nd	0.0016	0.2964	0.018
YA1	30/04/2023	0.013	14.69	0.1326	0.0030	0.0613	0.2677	0.0003	0.0009	0.0020	0.0145	0.0003	nd	0.0010	0.004
YA2	30/04/2023	0.012	13.36	0.1316	0.0030	0.0252	0.2282	0.0006	0.0007	0.0020	0.0148	0.0002	nd	0.0009	0.006
CAL	30/04/2023	0.817	22.03	0.1406	0.0030	0.0352	0.9005	<0.0002	0.0014	0.0040	0.0098	nd	nd	0.0010	0.002
PCL	01/05/2023	1.587	16.64	0.1390	nd	0.0163	0.0024	0.0020	nd	0.0030	0.0172	0.0047	nd	nd	0.001

nd: No detectado

En los resultados de las fuentes SA2 y SA3 (Fig. 4.23) a lo largo del año del 2023, se observa una leve recuperación de las concentraciones que venían mostrando una clara tendencia a disminuir, en la mayoría de los casos. Este comportamiento se puede interpretar como un nuevo aporte de componentes magmáticos al sistema hidrotermal.

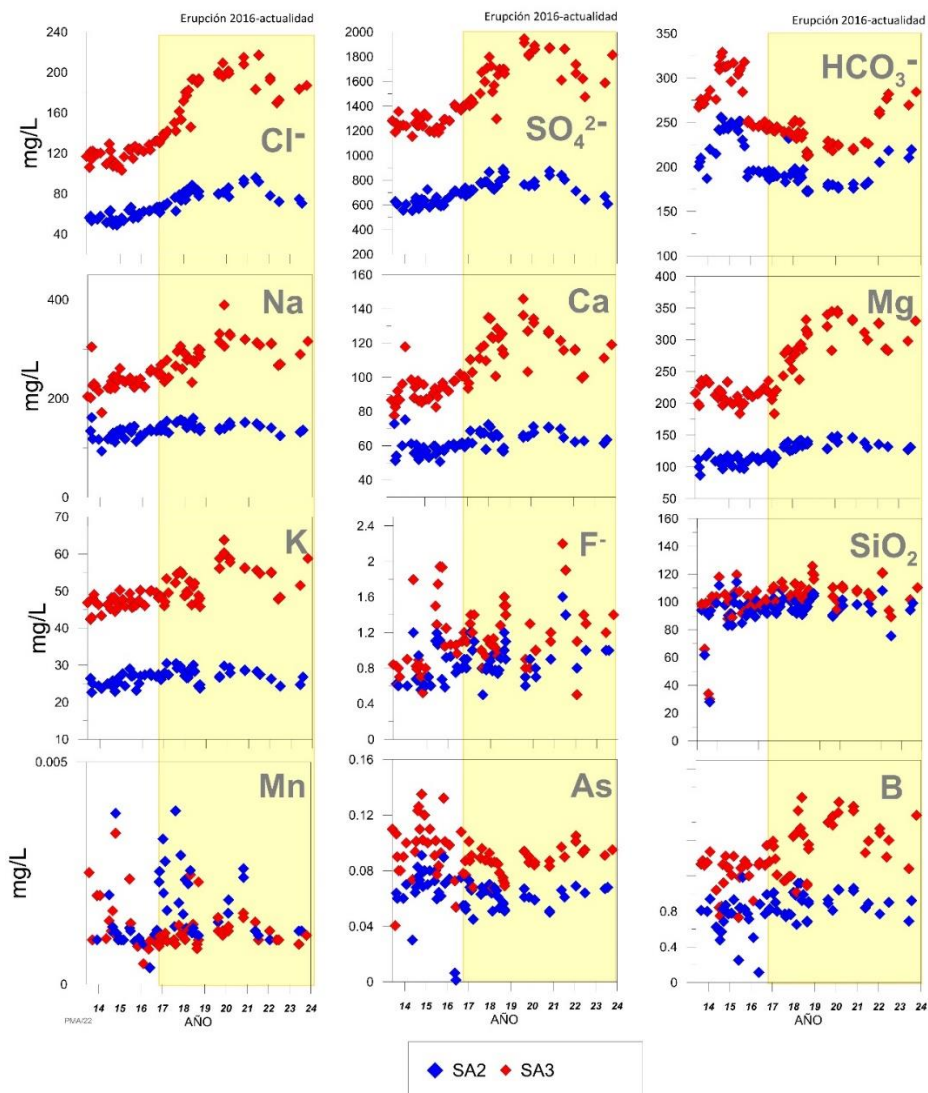


Figura 4.23. Gráficas de los resultados de la composición química del agua de las fuentes SA2 y SA3, con concentración de cloruro Cl^- , sulfato SO_4^{2-} y bicarbonato HCO_3^- , sodio Na, calcio Ca, Magnesio Mg, potasio K, Fluoruro F^- , Sílice SiO_2 , manganeso Mn, Arsénico As y Boro B. Periodo 2013 – 2023. Volcán Sabancaya.

4.6 ESTUDIOS ACÚSTICOS

4.6.1 Caracterización de señales acústicas

En el caso del volcán Sabancaya, aproximadamente el 30% de las explosiones fueron registradas claramente a pesar de los fuertes vientos en los alrededores del volcán. La identificación de las señales de infrasonido se logró con ayuda de las señales sísmicas y registros de las cámaras de video - vigilancia volcánica (Fig. 4.24), las cuales fueron asociadas a explosiones acompañadas de emisiones de ceniza y gases volcánicos (Fig. 4.24c). Durante el 2023 se logró identificar más de 1,346 señales de infrasonido asociadas a la actividad explosiva del volcán.

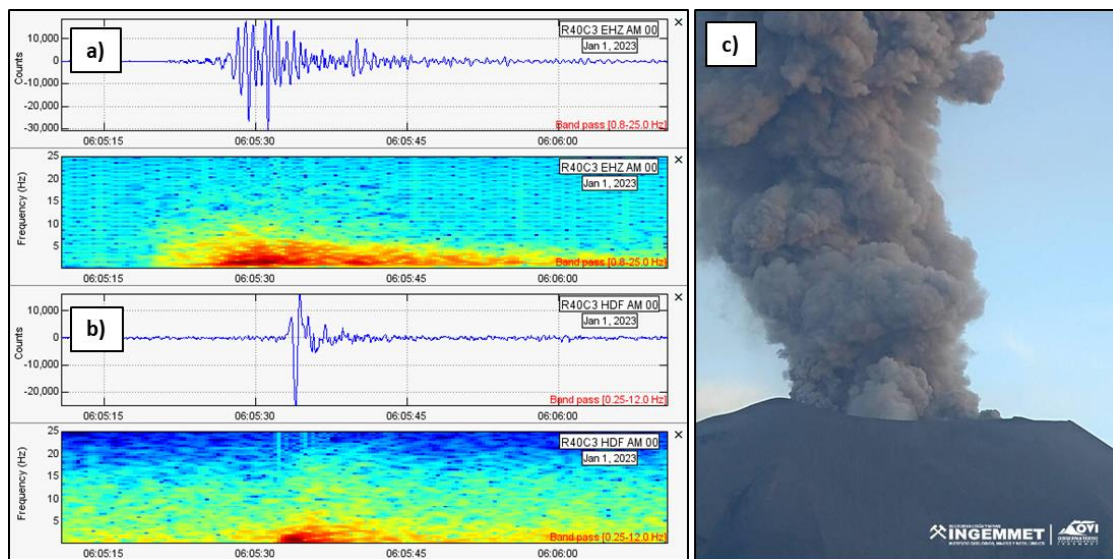


Figura 4.24. Explosión registrada el 01 de enero del 2023 en la estación ISB01 del volcán Sabancaya; **a)** Señal sísmica (forma de onda y espectrograma); **b)** Señal de infrasonido (forma de onda y espectrograma); y **c)** Registro de imagen cámara SHUA (ubicada a 4.6 km del volcán).

En la Fig. 4.25, se muestran dos subtipos de señales registradas, el primero con inicios impulsivos asociado a explosiones discretas (Fig. 4.25a) y el segundo con inicios emergentes y duración sostenida, asociada a explosiones seguidas de tremor (Fig. 4.25b).

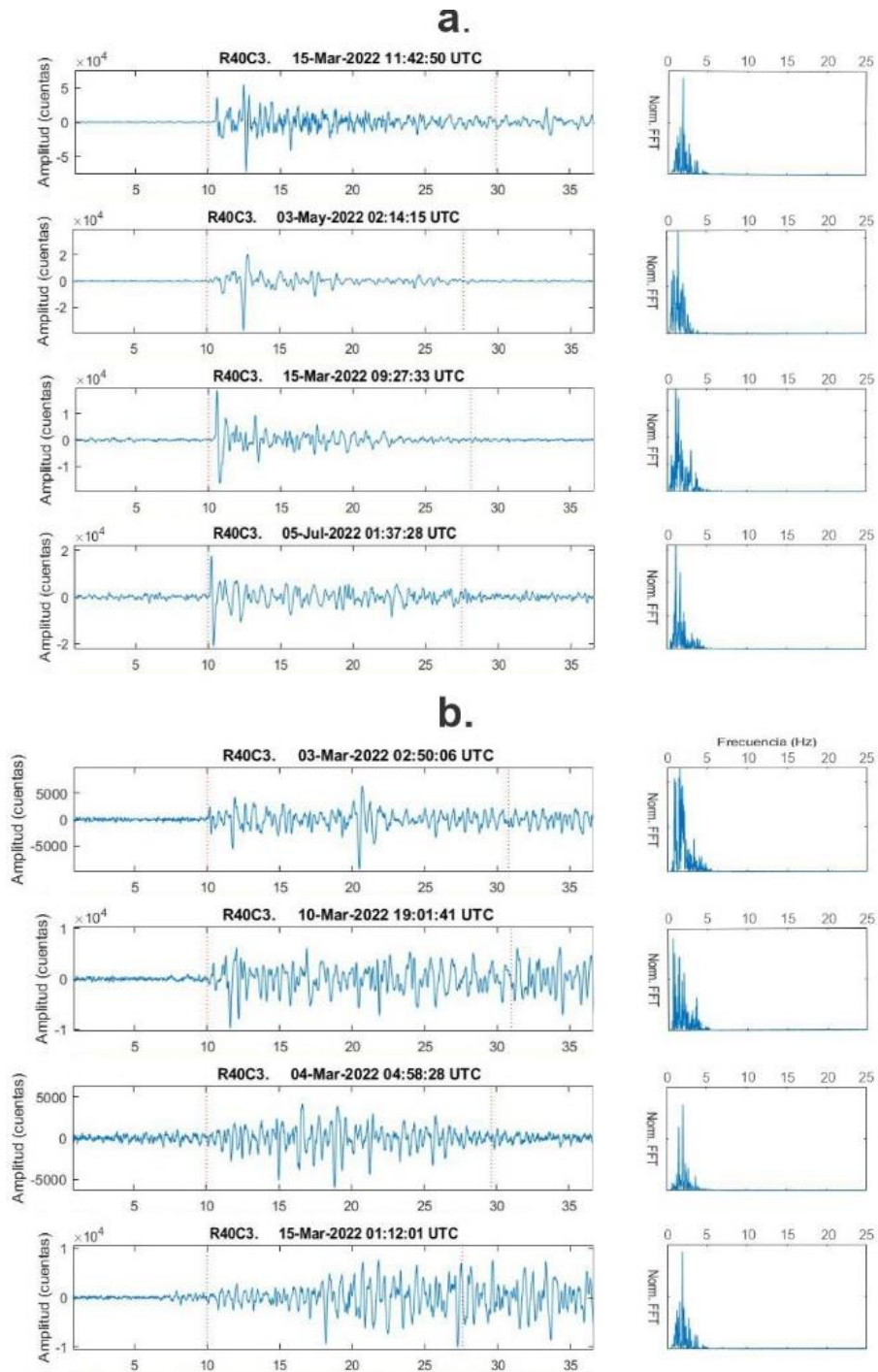


Figura 4.25. Señales de infrasonidos registradas en el volcán Sabancaya. **a)** Explosiones discretas; **b)** Explosiones con tremor.

El rango de frecuencias de las señales de infrasonido estuvo entre 0.3 y 5.6 Hz (Fig. 4.25 y 4.26), los cuales, concuerdan con [Johnson y Ronan \(2015\)](#), que indican que las explosiones volcánicas poseen frecuencias < 7 Hz.

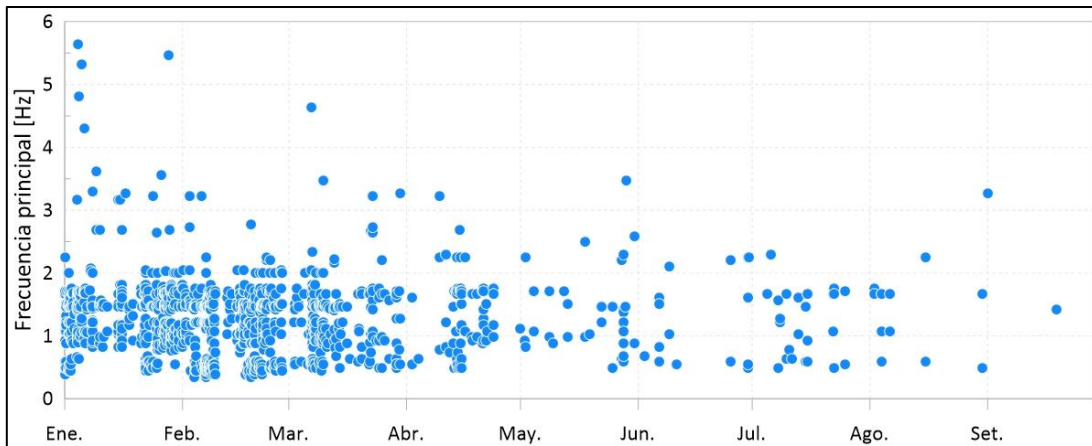


Figura 4.26. Frecuencias dominantes de señales de infrasonido registradas en el volcán Sabancaya.

A lo largo del año 2023, se ha calculado valores de energía acústica entre 0.001 y 0.03 MJ para las explosiones registradas en el volcán Sabancaya (Fig. 4.27). Por un lado, se puede observar que hay un mayor número de eventos registrados entre enero y marzo en comparación al resto del año, en cuanto a las energías acústicas se muestra (Fig. 4.27, en sombreado gris) tres periodos de incrementos. Es así que, la gran cantidad de eventos y bajas energías indicarían una mayor cantidad de magma cerca de la superficie y un conducto principal obstruido (representado por un domo emplazado), y la disminución considerable de eventos e incrementos de energía acústica indicarían un conducto más abierto.

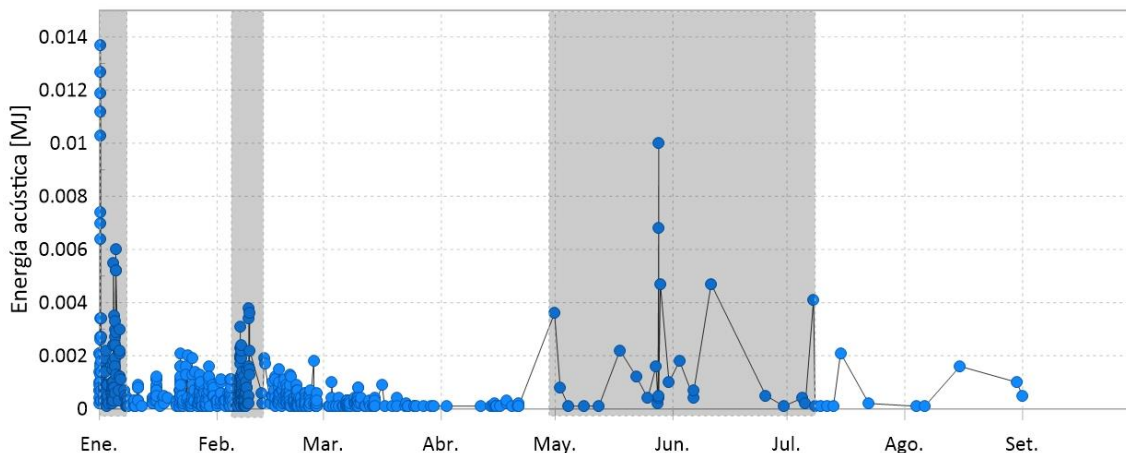


Figura 4.27. Energía acústica de señales de infrasonido asociadas a explosiones registradas en el volcán Sabancaya durante el 2023.

4.6.2 Cálculo de profundidad de las explosiones

El incremento y disminución del tiempo entre las primeras llegadas de las señales acústicas y sísmicas pueden ser explicadas por las condiciones atmosféricas, sin embargo, también pueden ser producto de cambios en la ruta de propagación de las señales entre explosiones (Iezzi et al., 2020), es así que, pueden ser utilizadas para determinar la profundidad de las fuentes de explosión, asimismo, se considera las distancias de las fuentes de registro hacia la estación sísmo-acústica y las velocidades del sonido y sísmica (Fig. 4.28). Cabe recordar que, durante el

actual proceso eruptivo del volcán Sabancaya, se ha registrado explosiones a manera de “eventos acoplados” (Fig. 4.24a), los cuales son dos eventos separados entre algunos segundos a unos pocos minutos, donde el primer evento (P_1) es una explosión contenida más profunda y el segundo evento (P_2) se correlaciona con una explosión superficial (White & McCausland, 2019).

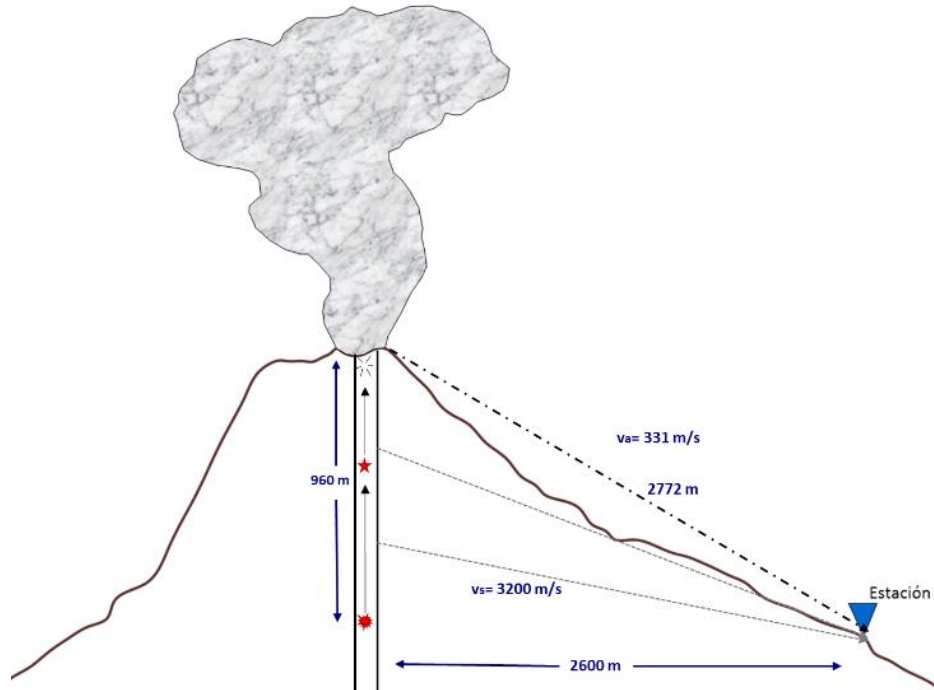


Figura 4.28. Modelo esquemático de las fuentes de explosiones del volcán Sabancaya utilizando datos de distancias y velocidades de ondas acústicas y sísmicas.

Durante el presente año se diferencian dos periodos muy claros, el primero comprendido entre enero y marzo, en el cual se estimó diferencias menores de tiempo entre la acústica y P_1 variando de 10 a 22 segundos, posteriormente estos tiempos se incrementaron calculándose entre 16 y 57 segundos. Para el caso de la diferencia entre la acústica y P_2 , se observa una tendencia similar calculándose entre 3 y 8 segundos para enero a marzo, incrementándose en los meses posteriores con valores entre 5 y 22 segundos (Fig. 4.29).

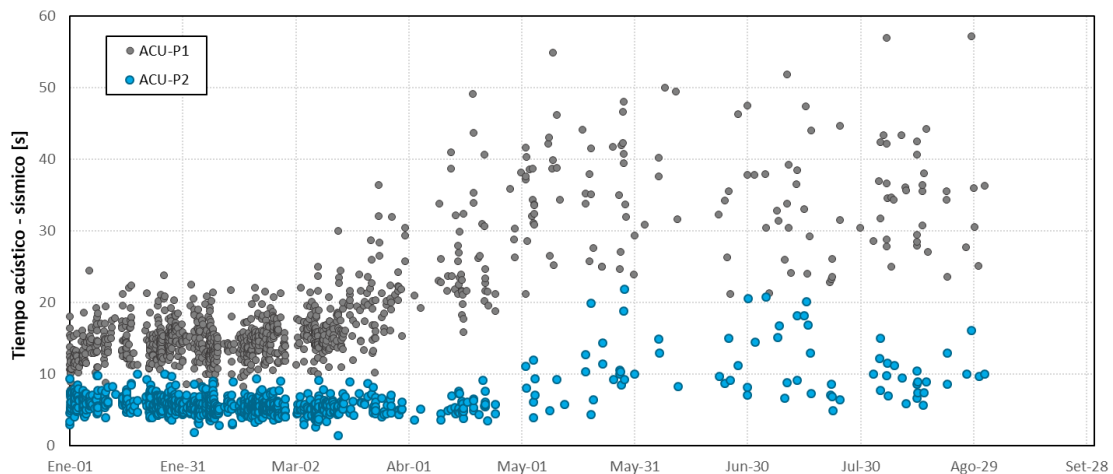


Figura 4.29. Diferencia de tiempo (segundos) entre señales de infrasonido y sísmicas P_1 y P_2 .

En cuanto al cálculo de las profundidades de las explosiones, en la Fig. 4.30 se muestra dos periodos mencionados anteriormente, el primero con profundidades menores en ambas fuentes P₁ y P₂ (350 – 1000 m y 1100 - 2700 m respectivamente) indicando un mayor volumen de magma cercano a la superficie asociado también al crecimiento importante del quinto domo de lava, por otro lado, en los meses posteriores se observó un aumento en la profundidad de la fuente de las explosiones, para P₁ entre 3000 y 7100 m y para P₂ entre 2900 y 4000 m, lo cual nos indicaría lo contrario al primer periodo, es decir, magma más profundo y destrucción y/o ausencia de domo.

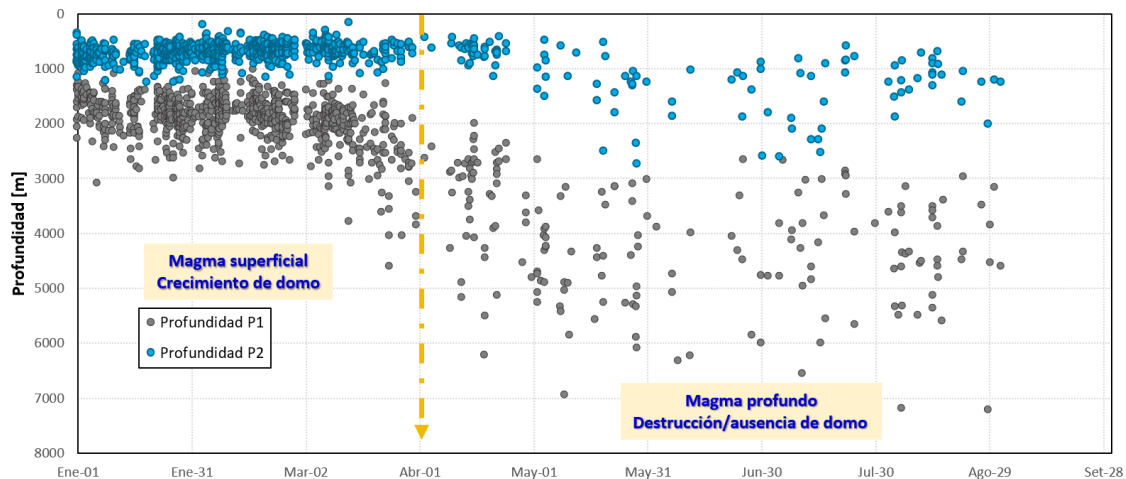


Figura 4.30. Profundidad de las fuentes de explosiones registradas en el volcán Sabancaya en el 2023.

4.7 Actividad superficial y sensores remotos

4.7.1 Características de las emisiones

4.7.1.1 Forma y ocurrencia

Durante el año 2023, el volcán Sabancaya ha presentado una actividad moderada, caracterizada por emisiones de vapor de agua, gases magmáticos y ceniza, los cuales, han sido emitidos mediante la ocurrencia de explosiones de distinta magnitud, emisiones continuas de ceniza y expulsión de gases magmáticos con presencia de vapor de agua.

Las alturas de las emisiones, principalmente, oscilaron entre los 1,000 y 1,500 m sobre el nivel del cráter (Fig. 4.31) y eventos con alturas superiores se presentaron esporádicamente, por ejemplo, la emisión del día 30 de marzo que alcanzó una altura máxima de 3,800 metros. Por lo general, las emisiones de ceniza gris clara (material particulado de grano fino) estuvieron presentes a lo largo de todo el periodo analizado, mientras que, las emisiones de ceniza gris oscuro (material particulado de grano grueso) fueron en menor proporción (mayo – septiembre). Por su parte, las emisiones de gases magmáticos como dióxido de azufre (SO₂), dióxido de carbono (CO₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S) y otros aerosoles, se presentaron esporádicamente durante los meses de enero, febrero, junio, septiembre - octubre, como

manifestaciones de gases azulinos y respecto a las emisiones blanquecinas conformadas, principalmente, por vapor de agua, fueron observadas durante los meses de enero a marzo, septiembre a octubre.

Con relación a lo observado durante el año 2023, se definieron 02 periodos donde se registraron variaciones en la ocurrencia de las emisiones y las cuales corresponde de enero a marzo y de septiembre a octubre.

En la Fig. 4.31, se muestra las características de las emisiones, tales como emisiones máximas por día y alturas de las emisiones y explosiones observadas durante el año 2023, definidas por la presencia de gases, vapor de agua y ceniza y a su vez, representada por diferentes coloraciones y las anomalías térmicas detectadas por el sistema MIROVA. Cabe resaltar que, los datos obtenidos, mediante cámaras de vídeo vigilancia, corresponden a observaciones diurnas.

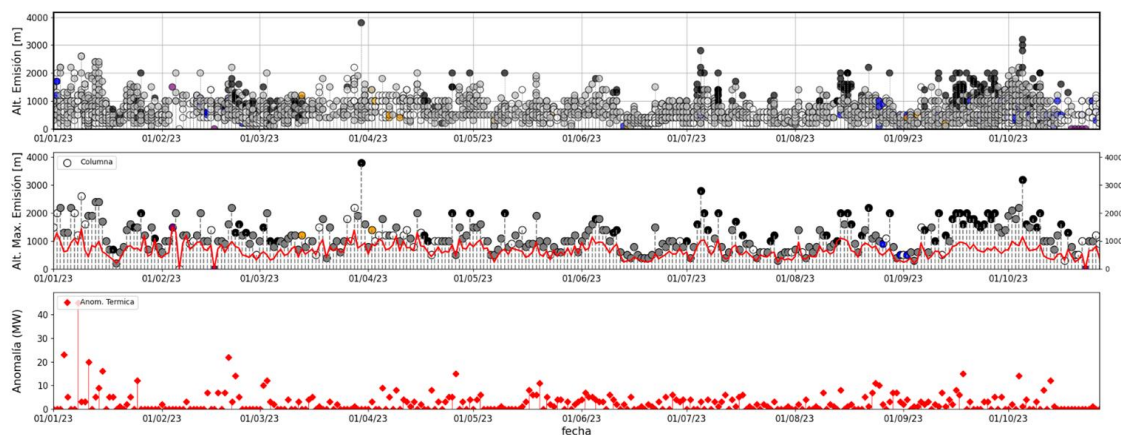


Figura 4.31. Histograma de las emisiones del volcán Sabancaya, características de las emisiones por día, la altura de las emisiones y explosiones en el volcán Sabancaya y anomalías térmicas (MIROVA), durante el año 2023.

4.7.1.2 Eventos particulares

El proceso eruptivo del volcán Sabancaya ha permitido visualizar una serie particularidades que son registradas por las cámaras de video vigilancia, entre ellas, se tiene la presencia de balísticos o fragmentos de rocas, flujos granulares e incandescencias. En el año 2023, se realizó la cuantificación y análisis de estos eventos como se muestra en la Fig. 4.32.

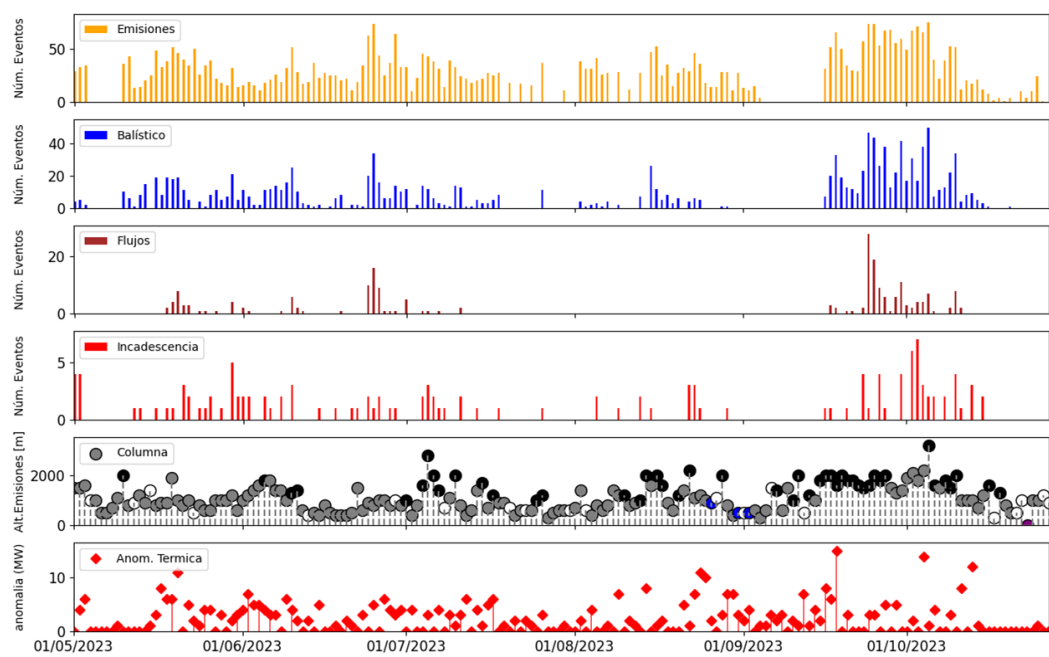


Figura 4.32. Eventos particulares registrados durante el proceso eruptivo del volcán Sabancaya 2023.

- Productos balísticos

Durante el periodo mayo - octubre, se realizó el análisis mediante la visualización de las imágenes provenientes de la cámara infrarroja (SIRH) y óptica (SHUA), se logró identificar la eyección de productos balísticos. En la Fig. 4.33, se puede apreciar la ocurrencia de eventos con eyección de productos balísticos, cabe destacar que, en octubre, la tasa de ocurrencia de eventos se incrementa, llegando a un máximo de 40 eventos por día.

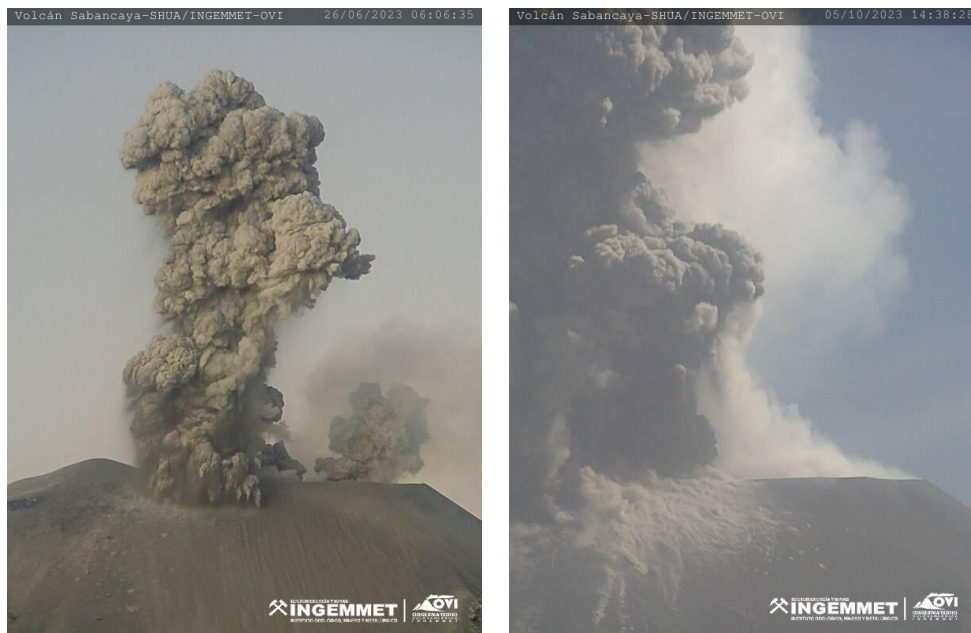
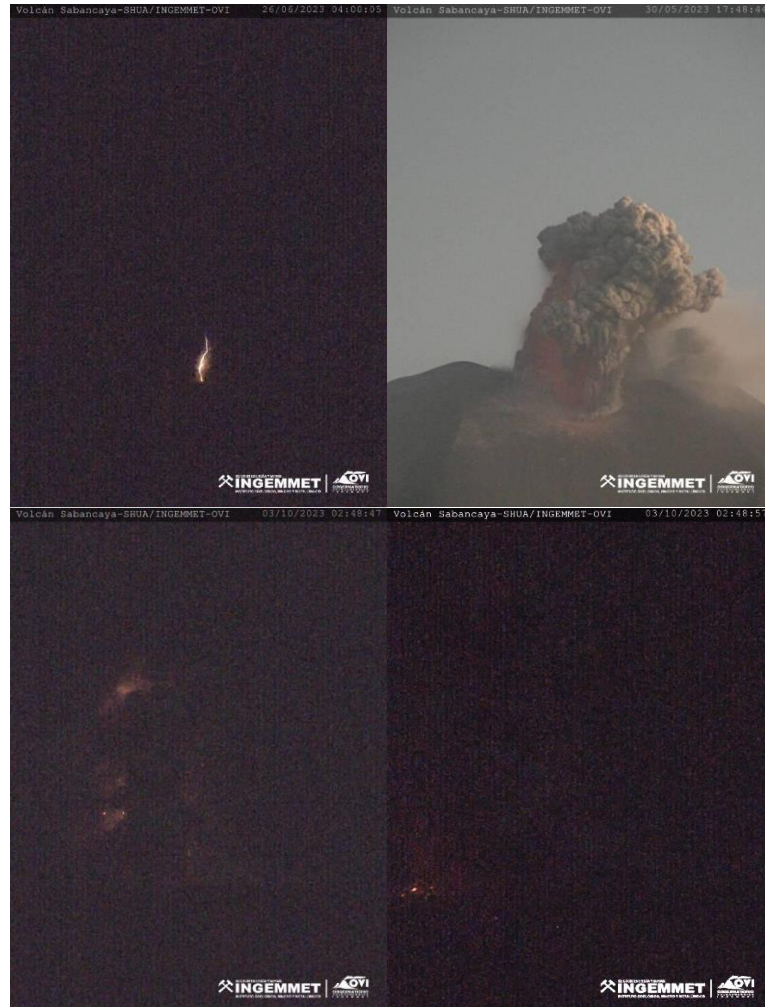


Figura 4.33. Imágenes de productos balísticos emitidos por el volcán Sabancaya, captadas por la cámara de video vigilancia SHUA.

- Incandescencias

Por su naturaleza, estos eventos se han visualizado solo durante horas de la noche y fueron relacionados a magma presente cerca de la superficie. En la Fig. 4.34, se muestra la ocurrencia de estos eventos entre mayo y octubre del 2023, por ejemplo, el día 26 de junio se logró registrar una incandescencia con la presencia de un rayo sobre el cráter, producto de la fricción de las partículas de ceniza, posteriormente, se observó un incremento importante en el número de eventos diarios, durante el mes de octubre, llegando a contabilizarse hasta 06 eventos el día 03 de octubre.

Figura 4.34.
Imágenes de eventos de incandescencia captadas por la cámara de video vigilancia SHUA, ubicada al Noroeste del cráter.



- Emisiones rojizas

Estos eventos con esta particularidad en su tonalidad se presentaron en muy pocas ocasiones, por ejemplo, el día 8 de agosto se identificó claramente esta característica (Fig. 4.35).



Figura 4.35. Imagen de emisión rojiza observada el día 08 de agosto en el volcán Sabancaya, captadas por la cámara SHUA.

- Caída de rocas y/o pequeños flujos piroclásticos

La ocurrencia de caída de rocas, semejantes a flujos piroclásticos, pero de menor extensión, se observó puntualmente el día 05 de mayo del 2023. El alcance es menor a 1 km en dirección norte, este evento fue captado por la cámara de vídeo vigilancia SHUA (Fig. 4.36), ubicada el noroeste del cráter.



Figura 4.36. Imágenes de un pequeño PDC de corto alcance (<1 km) en dirección norte del cráter del volcán Sabancaya, captadas por la cámara SHUA.

- Flujos granulares

Este tipo de eventos se presentaron en pocas ocasiones durante el 2023, cuya característica principal es el desplazamiento de rocas hacia una pendiente negativa, creándose un flujo continuo de partículas que discurren desde la parte más alta del cráter hacia los flancos del volcán, en la Fig. 4.37 se muestra la secuencia del flujo registrado el 24 de septiembre del 2023.

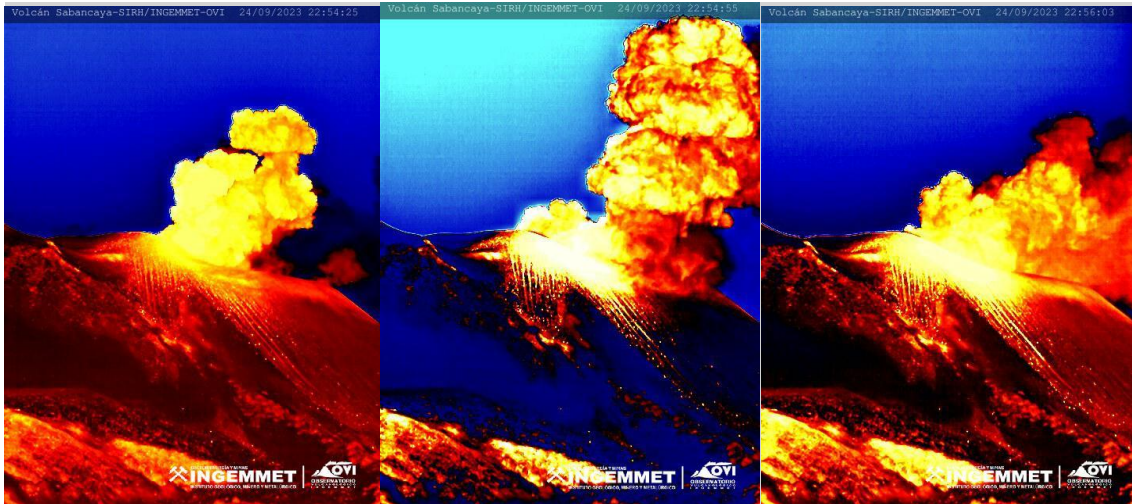


Figura 4.37. Imágenes de un flujo granular que se desplaza hacia el flanco norte del volcán Sabancaya.

4.7.1.3 Dirección predominante

La dirección y alcance de la dispersión de las emisiones están controladas por la altura de estas y por factores meteorológicos, principalmente, por la dirección y velocidad del viento. Estos factores son considerados para el modelamiento de dispersión y posteriormente esta información, se corrobora con las imágenes de la red de cámaras de vídeo vigilancia y el seguimiento mediante las imágenes satelitales (GOES 16). El desplazamiento de las emisiones volcánicas durante al año 2023, tuvieron direcciones predominantes al Sureste, Este, Suroeste, Noroeste y en menor proporción hacia el Oeste, Sur, Noreste y Norte.

Las direcciones de dispersión que presentaron mayor porcentaje de ocurrencia fueron hacia el Sureste, Este, Suroeste y Noreste, afectando principalmente los anexos de Sallalli y Hornillos, con caída de ceniza de leve a moderada en los poblados de Maca, Achoma Chivay, Coporaque, Ichupampa, Yanque, Lari, Madrigal, Pinchollo, Cabanaconde, Lluta, Huambo y Huanca, y con caídas de ceniza leve en los anexos de Muccurca, Tarucane, Ampí, Mocca y Cuñirca.

4.7.1.4 Imágenes representativas de las columnas eruptivas

Las imágenes de las explosiones más representativas del volcán Sabancaya, captadas por las cámaras de vídeo vigilancia durante el año 2023, se caracterizaron por presentar alturas mayores a los 1,000 m sobre el cráter e importante contenido de ceniza (Fig. 4.38).



Figura 4.38. Registro fotográfico de las explosiones más representativas en el volcán Sabancaya a lo largo del año 2023, las cuales, generaron columnas eruptivas de gases y ceniza con alturas que oscilaron entre los 2,200 y 3,800 metros sobre el cráter del volcán.

4.7.2 Sensores remotos

Durante el año 2023, el volcán Sabancaya ha presentado importantes cambios morfológicos como la destrucción del quinto domo (Pichqa). Estos cambios fueron evidenciados mediante la observación de imágenes satelitales **Sentinel II** y **PlanetScope**.

4.7.2.1 Imágenes satelitales ópticas

- Evolución morfológica del domo de lava PICHQA

Durante el año 2022 y primeros meses del año 2023, se evidenció la formación y crecimiento del quinto domo de lava (denominado Pichqa) a partir del seguimiento de Imágenes PlanetScope, sin embargo, desde mayo del 2023, se identificó que el área del domo era mucho menor, un domo visiblemente desgastado, por lo cual, sugirió que el domo se encontraría en proceso de destrucción parcial (Fig. 4.39). Posteriormente, en el mes de junio se observa la aparición de nuevos puntos de emisión en el sector norte, por su parte, el domo de lava se había

reducido notablemente (zona Sur, Oeste), lo cual, sugirió la destrucción progresiva del mismo, observándose en ese momento solo los remanentes de dicho cuerpo. Entre el mes de julio y agosto, se observaron zonas más retrabajadas debido a las continuas explosiones y el día 07 de agosto del 2023, se pudo apreciar una zona cóncava al noroeste por donde se generaban las explosiones y flujos granulares. Dicha zona se observa hasta octubre, sin embargo, sus dimensiones disminuyeron notablemente, como se puede apreciar en la Fig. 4.39.



Figura 4.39. Secuencia de imágenes del Sistema Satelital PlanetScope entre mayo y septiembre, donde se muestra la destrucción del quinto domo en el cráter del volcán Sabancaya.

Mediante el análisis de imágenes satelitales Sentinel II, de la Agencia Espacial Europea (ESA), se realizó el seguimiento de las anomalías térmicas del volcán Sabancaya durante el periodo septiembre - octubre del año 2023, para lo cual, se utilizó la combinación de bandas B12, B11 y 8A, su equivalente térmico en imágenes Sentinel, donde los valores más fríos son representados por coloraciones azules y los valores más calientes por coloraciones amarillas y rojas.

La Fig. 4.40 muestra las anomalías térmicas visualizadas durante este periodo de análisis, así tenemos que, del 11 de setiembre al 11 de octubre la anomalía térmica presentaba mayor número de puntos calientes. Posteriormente, a mediados de octubre, la anomalía térmica disminuye. Las anomalías observadas tienen la característica de presentarse en forma circular alrededor del centro del cráter y principalmente en el sector norte, este y noroeste. Esta variación de la temperatura de la superficie estaría ligada a la presencia y destrucción del quinto domo de lava (Pichqa). A continuación, se muestra la secuencia de imágenes satelitales con anomalías térmicas.

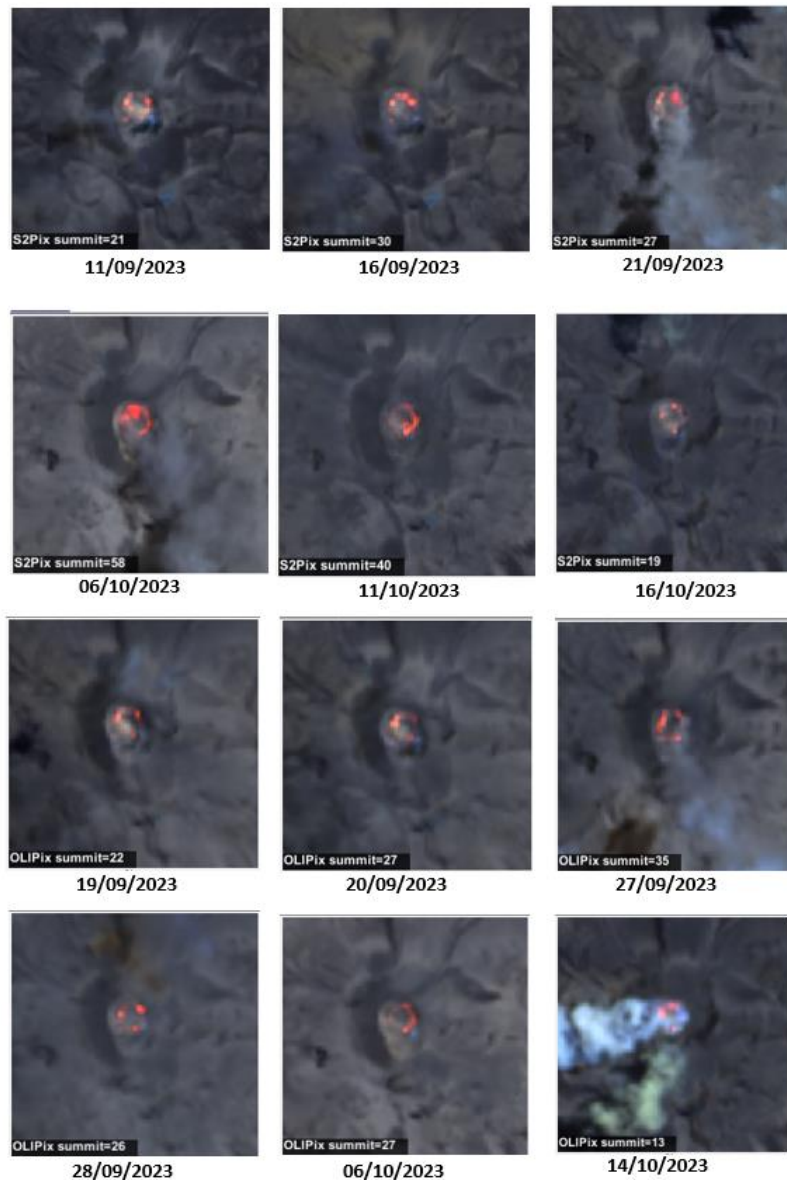


Figura 4.40. Imágenes satelitales Sentinel II, donde se muestra la evolución de las anomalías térmicas observadas en el cráter del volcán Sabancaya durante el año 2023.

- Energía volcánica irradiada (VRP, por sus siglas en inglés)

La energía volcánica irradiada (VRP) a lo largo del año 2023, muestra durante el mes de enero el valor más alto registrado de energía VRP equivalente a 45 MW (Megavatios). El 20 de febrero se registra 25 MW (Megavatios), cabe resaltar que, durante los 3 primeros meses del año se registraron los valores más altos de anomalías térmicas. Entre marzo y octubre el valor más alto fue de 15 MW (Megavatios), sin embargo, a lo largo del año se continuó registrando anomalías que indicaron la presencia de pequeños cuerpos calientes cerca de la superficie. (Fig. 4.41).

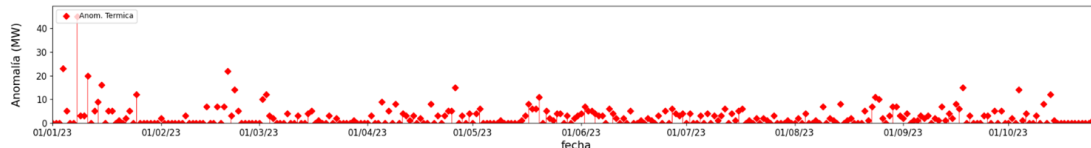


Figura 4.41. Energía volcánica Irradiada diaria correspondiente a las anomalías térmicas registradas en el volcán Sabancaya (**Fuente: MIROVA**).

4.7.3 Sobrevuelos con DRON

Mediante dos sobrevuelos con DRON, realizados en abril y junio, se pudo confirmar el proceso de destrucción del quinto domo (Pichqa) del volcán Sabancaya (Fig. 4.42, Fig. 4.43), a través de las imágenes se observó que el área donde se encontraba este domo estaba destruida, presentando escarpas en el centro del cráter.



Figura 4.42. Vista del cráter del Sabancaya en dirección Sur – Norte, del 29 de abril del 2023, donde se observa la ausencia del domo de lava. Imagen obtenida de un sobrevuelo con dron.



Figura 4.43. Vista del sobrevuelo con dron del cráter del Sabancaya, del día 08 de junio, en dirección Sur – Norte, donde se observa los restos del domo de lava en la zona central (Líneas amarillas discontinuas).

En el tercer sobrevuelo, se pudo corroborar la destrucción total del quinto domo de lava (Pichqa) así como la alteración hidrotermal de la zona (Fig. 4.44). Mediante las imágenes se observó que las paredes del cráter ya no mostraban coloraciones rojizas, sin embargo, aún se podían apreciar puntos de desgasificación importantes en la zona Este y Noreste del cráter.



Figura 4.44. Vista del sobrevuelo con dron del cráter del Sabancaya, del día 01 de diciembre, en dirección Sur – Norte.

5 DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la Fig. 4.45, se aprecia la evolución temporal de cada parámetro a lo largo del año 2023 (Fig. 4.45, de arriba hacia abajo): **a.** Deformación volcánica; **b.** Volumen intruido y energía liberada por las explosiones; **c.** Flujos de Dióxido de azufre SO₂ **d.** Altura y coloración de las emisiones y **e.** Anomalías térmicas (MIROVA). Como se mencionó anteriormente, tras el seguimiento, análisis e interpretación de los resultados, a lo largo del periodo analizado, se identificaron tres procesos en el volcán Sabancaya, los cuales, se detallan a continuación:

- **Proceso I. Continuó el crecimiento/extrusión del quinto domo de lava “Pichqa” (enero – marzo 2023).** Durante el año 2022, se identificó la formación y crecimiento del quinto domo de lava en el cráter activo del volcán Sabancaya, el mismo que, durante el año 2023, continuó con su crecimiento/extrusión, este proceso se reflejó principalmente en un predominio en la sismicidad más cercana al volcán (LP y EXP – eventos LF acoplados). Esta actividad estaría asociada a la migración de fluidos (gases, magma) a través de los conductos volcánicos hacia profundidades someras y cercanas al ventó eruptivo. Este comportamiento se correlacionó con un proceso de inflación registrado entre agosto del 2022 y mayo del 2023, asimismo, el análisis mineralógico, para las muestras colectadas durante este periodo, indicaron mayor predominancia de material juvenil. Por otra parte, la acumulación de gases por debajo de la superficie (reflejado en los bajos flujos de SO₂) debido a la poca permeabilidad, contribuyó al crecimiento de este quinto domo de lava. A su vez, el registro de valores altos de anomalías térmicas registradas por el sistema MIROVA, sugirió la presencia de un cuerpo caliente muy cerca de la superficie. Toda esta información registrada a través de los diferentes parámetros analizados, posteriormente, fue confirmada con el análisis de imágenes satelitales, térmicas, donde efectivamente se pudo observar la presencia de un nuevo cuerpo de lava anidado en el cráter del volcán Sabancaya.
- **Proceso II. Destrucción progresiva del quinto domo de lava “Pichqa” (abril – noviembre 2023).** Luego del crecimiento de este domo, a partir de abril se registra un cambio en la actividad del volcán, en donde la energía de las explosiones disminuye notablemente y empieza a predominar en su lugar episodios de tremor volcánico, por otra parte, los flujos de SO₂ también mostraron valores más, indicando un conducto más abierto. Por su parte, a través de la acústica se identificó que la fuente de generación de las explosiones se hizo más profunda indicando que no había presencia de magma cercano a la superficie. En superficie, esto se reflejó con la ocurrencia de explosiones acompañadas de proyectiles balísticos, emisiones rojizas, las cuales, probablemente indicarían la oxidación y alteración de los conductos, cráter volcánico o domo de lava, esto como respuesta a una interacción con el sistema hidrotermal, donde las sucesivas explosiones extraen el material oxidado o alterado junto con material nuevo, generando este tipo de emisiones. También se registró la ocurrencia de pequeños flujos piroclásticos, eventos típicos durante periodos de destrucción de domos de lava. Este escenario fue corroborado mediante el seguimiento con las imágenes satelitales y sobrevuelos con dron.

- **Proceso III. Pulso importante de intrusión magmática (mayo - junio 2023).** A la par del **Proceso II**, se registró la ocurrencia de un enjambre importante de sismos Volcano – tectónicos distales (26 de mayo – 6 de junio), dicho enjambre se localizó entre 1.5 y 11 km al este y noreste del cráter, con una orientación noroeste – sureste y una distribución en profundidad de hasta 12 km posiblemente debido a la reactivación de las fallas Hualca Hualca y Colihuire, esto como respuesta a un pulso de intrusión de magma importante relacionado a la cámara profunda localizada por debajo del volcán Hualca Hualca, dicho pulso de magma intruido tuvo un volumen aproximado de 58 millones de m³. La ocurrencia de este enjambre se correlacionó con la continua inflación registrada a 6 km al norte del cráter del volcán Sabancaya y como con el registro frecuente de flujos de SO₂ con valores considerados como “**MUY GRANDES**”.

Por lo tanto, con base en la interpretación integral de los diferentes parámetros analizados, el comportamiento del volcán Sabancaya permanece en un contexto de una erupción leve a moderada, asociada a un proceso de importante intrusión magmática, formación, crecimiento y destrucción de domos de lava en el cráter activo, cuya dinámica interna genera una actividad explosiva con emanación de gases magmáticos, material juvenil (en mayor porcentaje que el material oxidado e hidrotermalizado) y en ocasiones eyección de proyectiles balísticos alrededor del cráter; todo lo anterior, a consecuencia del accionar de la cámara magmática principal ubicada a 12.6 km por debajo del volcán Hualca Hualca (Cruz, 2019).

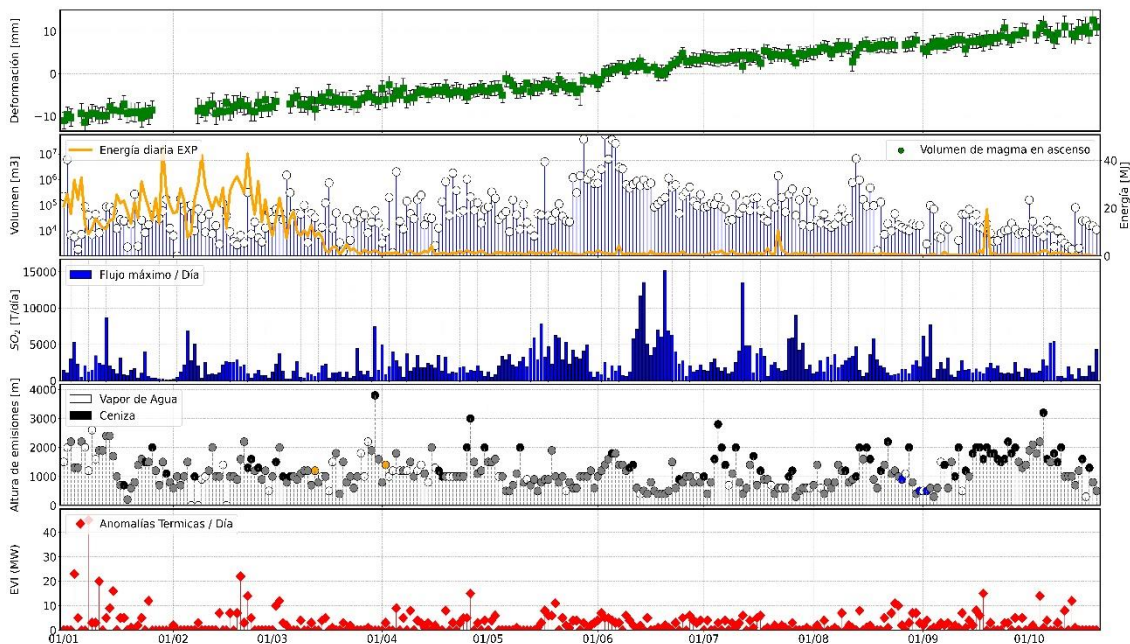


Figura 4.45. Evolución temporal de la actividad volcánica en base a los parámetros analizados en el volcán Sabancaya para el año 2023. **a.** Deformación volcánica; **b.** Volumen intruido y energía liberada por las explosiones; **c.** Flujos de Dióxido de azufre SO₂, **d.** Altura y coloración de las emisiones y **e.** Anomalías térmicas (MIROVA).

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- El conteo litológico de las muestras del periodo octubre 2022 – junio 2023 nos indica, que las explosiones ocurridas presentaron un alto contenido de material juvenil y poco contenido de material extraído del conducto, mientras que, el periodo junio – setiembre 2023 sugirió que las explosiones presentaron mayor contenido de cristales libres y líticos oxidados extraídos del conducto y del sistema hidrotermal.
- Se ha calculado el volumen máximo de ceniza emitida, siendo este de 0.00051 km^3 para el periodo de octubre 2022 hasta setiembre 2023.
- Durante el periodo 2023, los poblados más afectados por caídas de ceniza fueron Huanca, Cabanaconde, Tapay, Madrigal, Lari, Maca, Achoma e Ichupampa, que fueron cubierto con un espesor de 0.1 mm de ceniza.
- El volcán Sabancaya durante el 2023 ha evidenciado 3 periodos de deformación constante y continúa registrado por 4 estaciones GNSS permanentes, (1) proceso inflacionario entre agosto del 2022 a mayo del 2023 a razón de $34 \pm 1.5 \text{ mm/año}$ (2) proceso deflacionario durante el mes de junio a razón de $10 \pm 2 \text{ mm/año}$ (3) proceso inflacionario entre julio a diciembre de hasta $24 \pm 3 \text{ mm/año}$, estos resultados muestran que la tasa de deformación y la tasa de recarga hacia la fuente regional profunda evidencian que el proceso eruptivo del Sabancaya continuará con tendencia al incremento, con una velocidad media de 10 – 19 mm/año.
- Los resultados de Línea base han permitido identificar 2 patrones de deformación locales asociado al desplazamiento horizontal, (1) disminución en la tasa de desplazamiento hasta mayo del 2023 de las estaciones GNSS más próximas a la fuente de deformación superficial, (2) un alargamiento entre las estaciones cercana a la fuente superficial entre mayo – diciembre, ambos procesos superficiales asociados a (i) una liberación de presión acumulada de las fuentes superficiales con una subsecuente emisión de productos volcánicos en forma de cenizas, gases, etc, y (ii) incremento en la tasa de recarga del magma desde la fuente profunda hacia la fuente superficial que presuriza el sistema y provoca un desplazamiento en las estaciones GNSS, lo cual sugiere que el proceso eruptivo del Sabancaya continuará.
- Se realizó el modelamiento inverso de las velocidades de 4 estaciones GNSS, dando como resultados que las inversiones del modelado resultaron coherentes con los datos GNSS obteniéndose un cambio de volumen de $14 \text{ mm}^3/\text{año}$.
- Los vectores de inclinación del inclinómetro en el flanco sureste tienden en dirección al cráter el volcán, lo cual revela una estrecha correspondencia con disminución en la tasa de recarga hacia la fuente superficial registrado por las estaciones GNSS SBHO y SBSE

- hasta octubre del 2023, a partir de esta fecha en adelante, los sensores de inclinación mostraron una tendencia hacia la estabilización del sensor en la componente ESTE y la componente NORTE evidencia un ligero ascenso.
- Se han localizado 6,061 sismos de ruptura (VT), los cuales se ubicaron principalmente al noreste, este y oeste hasta más de 25 km respecto al cráter, mientras tanto, la distribución en función de la profundidad mostró sismos hasta los 20 km respecto al nivel del mar, los cuales, presentaron magnitudes M_L entre 0.1 y 5.1.
 - Se identificó un enjambre importante con aproximadamente 1700 sismos VT registrados entre el 26 de mayo y 06 de junio del 2023, localizado entre 1.5 y 11 km al este y noreste del cráter, con una orientación noroeste – sureste y una distribución en profundidad de hasta 12 km posiblemente asociado a la reactivación de las fallas Hualca Hualca y Colihuire. Este enjambre estaría probablemente asociado a un pulso de intrusión de magma importante relacionado a la cámara profunda localizada por debajo del volcán Hualca Hualca.
 - El cálculo de los mecanismos focales permitió identificar 6 zonas, las mismas que estuvieron asociadas a diversos tipos de fallamiento, del cual, se destaca la **ZONA F** que estuvo asociada a un proceso de intrusión de magma del volcán Sabancaya.
 - Por medio de las magnitudes se realizó el cálculo del volumen intruído de magma, en donde el valor máximo fue de 58 millones de m^3 asociado al único enjambre de este año. Posteriormente, los valores de volúmenes de magma fueron disminuyendo durante el año, con valores promedio menores a 1 millón de m^3 .
 - A lo largo 2023, se registró un total de 82,155 sismos de origen volcánico, asociados en principio al fracturamiento interno a raíz de procesos de intrusión magmática (40,725 señales sísmicas), luego siguió la sismicidad asociada a la dinámica de fluidos por los conductos volcánicos hacia zonas más superficiales (26,254 señales sísmicas) y finalmente la ocurrencia de explosiones volcánicas (10,543 señales sísmicas) acompañadas, en muchas ocasiones, de emisiones constantes de gases y ceniza (4,395 episodios de tremor volcánico).
 - Respecto a la actividad explosiva, en términos de energía sísmica liberada, se registraron valores diarios que oscilaron entre energías MUY BAJAS (< 5 MJ) a MUY ALTAS (< 40 MJ).
 - Durante el año 2023, se registró entre enero y marzo una mayor actividad asociada principalmente a la sismicidad por movimiento de fluidos (LP y EXP), el cual, sugirió principalmente la migración de magma a través de los conductos volcánicos hacia zonas más superficiales, cercanas al cráter y el posterior crecimiento/extrusión del quinto domo de lava en el cráter activo del volcán.
 - Las señales sísmicas que se asociaron con el proceso de destrucción progresiva de este quinto domo de lava, básicamente, fueron explosiones de baja energía (< 0.2 MJ)

- acompañadas de tremor volcánico de alta frecuencia (> 10 Hz.) que en superficie generaron procesos de colapsos de columnas eruptivas de gases y ceniza. Este proceso de destrucción se inició aproximadamente desde abril en adelante.
- A lo largo del 2023, se registraron otras señales asociadas a procesos más superficiales, como la caída de rocas, probablemente asociadas a los periodos de destrucción y/o destrucción parcial del domo de lava.
 - Durante el 2023 mediante el registro del gas magmático (SO₂), se evidenció un proceso de desgasificación continua, con los valores más altos de todo el proceso eruptivo actual, el flujo máximo alcanzó un valor de 15,200 t/día el 20 de junio, posteriormente, entre los meses de junio y julio se observó un periodo de incremento superando los 10,000 t/día. Estos valores estarían relacionados a movimiento de magma hacia la superficie que posteriormente se reflejaría en un incremento en la actividad superficial.
 - El sistema hidrotermal del Sabancaya, presentó una perturbación que se intensificó antes del inicio de la actividad magmática del 2016, alcanzando un máximo en concentraciones de componentes magmáticas en el año 2020, posteriormente se vio una tendencia a disminuir hasta el año 2022. Durante el 2023, la tendencia cambió nuevamente, mostrando un leve incremento de las concentraciones de los componentes magmáticos en el sistema hidrotermal, lo que indicaría un mayor aporte de gases magmáticos debido posiblemente al ascenso de nuevo magma.
 - Durante el 2023 se lograron identificar más de 1,346 señales de infrasonido asociadas a la actividad explosiva del volcán, con valores de energía acústica entre 0.001 y 0.03 MJ.
 - En cuanto al cálculo de las profundidades de las explosiones, se identificaron dos periodos el primero con profundidades menores en ambas fuentes P₁ y P₂ (350 – 1000 m y 1100 - 2700 m respectivamente) indicando un mayor volumen de magma cercano a la superficie asociado también al crecimiento importante del quinto domo de lava, por otro lado, en los meses posteriores se observó un aumento en la profundidad de la fuente de las explosiones, para P₁ entre 3000 y 7100 m y para P₂ entre 2900 y 4000 m, lo cual nos indicaría lo contrario al primer periodo, es decir, magma más profundo y destrucción y/o ausencia de domo.
 - La actividad superficial del volcán Sabancaya en el 2023, ha presentado una actividad considerada como moderada, caracterizada por explosiones y/o emisiones continuas de gases, vapor de agua y ceniza, presencia de eventos de incandescencia, productos balísticos emitidos y caída de rocas semejantes a pequeños flujos piroclásticos. La altura más alta alcanzada fue de 3,800 m sobre el cráter, registrada el día 30 de marzo.
 - En el periodo de análisis se observan 2 periodos de mayor actividad: a inicios de año entre enero - marzo y septiembre -a octubre, en los cuales, se observa mayor cantidad de emisiones con alto contenido de gases y ceniza, así como alturas entre 1,000 y 2,000 m sobre el cráter.

- En cuanto a los eventos de incandescencia y proyectiles balísticos, se evidencia picos importantes en el mes de octubre, llegando a contabilizarse hasta 40 eventos de productos balísticos, y hasta 6 eventos de incandescencia que se registró el día 03 de octubre.
- Durante el 2023 se observaron fenómenos inusuales denominados flujos piroclásticos y granulares. El pequeño flujo piroclástico se generó el día 05 de mayo con un alcance menor de 1 km en dirección norte. Por otro lado, se registraron flujos granulares de corto alcance principalmente entre los meses de septiembre y octubre.
- A partir del seguimiento de las imágenes satelitales, se concluye que el quinto domo del volcán Sabancaya ha presentado una destrucción progresiva, la cual, ha sido evidenciada desde mayo del 2023, mediante la visualización de imágenes PlanetScope y fue confirmado mediante el sobrevuelo con dron realizado entre abril y diciembre. La destrucción del domo se ha observado hasta el mes de diciembre.
- La Energía Volcánica Irradiada (VRP) registró un valor máximo de 45 MW (20 de febrero) y a partir de entonces presentó valores menores a 15 MW durante los meses siguientes de marzo a octubre.

6.2 Recomendaciones

Tras un permanente y arduo trabajo de campo y gabinete se recomienda lo siguiente:

- Continuar con los estudios de investigación del volcán Sabancaya, a fin de establecer continuidad en los registros de la data obtenida a través de los diferentes métodos (geología, deformación, sismología volcánica, química de gases, acústica, actividad superficial, sensores remotos y sobrevuelos con dron).
- Mantener el nivel de alerta en **NARANJA**.
- No acercarse a un radio menor de 12 km del cráter.
- Informarse permanentemente de la situación del volcán a través de los reportes de actividad, semanales y diarios emitidos por las instituciones competentes.


Ing. MAYRA ALEXANDRA ORTEGA GONZÁLES
Especialista en Volcanes
INGEMMET


ING. JERSY MARIÑO SALAZAR
Director (e)
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico
INGEMMET

BIBLIOGRAFÍA

Benavente, C., Delgado, G., García, B., Aguirre, E. y Audin, L. 2017. Neotectónica, evolución del relieve y peligro sísmico en la región Arequipa. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 64, 370 p., 1 mapa.

<https://hdl.handle.net/20.500.12544/1223>

Boixart, G., Cruz, L. F., Miranda Cruz, R., Euillades, P. A., Euillades, L. D. & Battaglia, M. 2020. Source Model for Sabancaya Volcano Constrained by DInSAR and GNSS Surface Deformation Observation. Remote Sensing, 12(11), 1852.

<https://doi.org/10.3390/rs12111852>

Caplan-Auerbach, J. y Petersen, T. (2005). Repeating coupled earthquakes at Shishaldin Volcano, Alaska. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 145(1-2), 151-172.

<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.01.011>

Chouet, B. (1988). Resonance of a fluid-driven crack: radiation properties and implications for the source of long-period events and harmonic tremor. Journal Geophysical Research. 93, 4375 - 4400.

<https://doi.org/10.1029/JB093iB05p04375>

Chouet, B.A. (1992). A seismic model for the source of long-period events and harmonic tremor, in Volcanic Seismology, pp 133–156, eds Gasparini, P., Scarpa, R., Aki, K., Springer, Berlin

https://doi.org/10.1007/978-3-642-77008-1_11

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

<https://doi.org/10.1038/380309a0>

Coppola, D., Valade, S., Masias, P. et al. (2022). Shallow magma convection evidenced by excess degassing and thermal radiation during the dome-forming Sabancaya eruption (2012–2020). Bull Volcanol 84, 16.

<https://doi.org/10.1007/s00445-022-01523-1>

Cruz, L. 2019. Análisis de deformación del volcán Sabancaya como herramienta útil en el pronóstico de erupciones periodo 2012-2017. Tesis Título Profesional. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10016>

Dvorak, J. J., Y Dzurisin, D. (1997). Volcano geodesy: The search for magma reservoirs and the formation of eruptive vents. Reviews of Geophysics, 35(3), 343-384.

<https://doi.org/10.1029/97RG00070>

Fee, D. y Garcés, M., (2007). Infrasonic tremor in the diffraction zone. Geophys. Res. Lett. 34, L16826.

<https://doi:10.1029/2007GL03061>.

Fierstein, J. y Nathenson, M. (1992). Another look at the calculation of fallout tephra volumes. *Bulletin of Volcanology*, 54, 156-167.

<https://doi.org/10.1007/BF00278005>

Fournier, R.O. (2007). Hydrothermal Systems and Volcano Geochemistry. In *Volcano Deformation*. Springer, Berlin Heidelberg. 323–341.

https://doi.org/10.1007/978-3-540-49302-0_10

Harrington, R. M. y Brodsky, E. (2007). Volcanic hybrid earthquakes that are brittle-failure events. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L06308.

<https://doi.org/10.1029/2006GL028714>

Herring, T., King, R. W. & McCluskey, S. (2010). M. Introduction to GAMIT/GLOBK Release 10.4. Massachusetts Institute of Technology Technical Report, Cambridge.

Hill, D., Pollitz, F. y Newhall, C. (2002b). Earthquake-Volcano Interactions. *Phys. Today* 41 47.

<https://doi.org/10.1063/1.1535006>

Hill, D.P., Dawson, P., Johnston, M.J., Pitt, A.M., Biasi, G. y Smith, K. (2002a). Very-long-period volcanic earthquakes beneath Mammoth Mountain, California. *Geophysical Research Letters*. 29 (10) (8–1).

<https://doi.org/10.1029/2002GL014833>

Hill, D.P. (1977). A Model for earthquake swarms. *Journal Geophysical Research*. 82, 1347–1352.

<https://doi.org/10.1029/JB082i008p01347>

Hochstein, M. y Browne, P. (2000). Surface Manifestations of Geothermal Systems with Volcanic Heat Sources. *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press. USA. p 837.

Iezzi AM, Fee D, Haney MM and Lyons JJ. (2020). Seismo-Acoustic Characterization of Mount Cleveland Volcano Explosions. *Front. Earth Sci*. 8:573368.

<https://doi:10.3389/feart.2020.573368>.

Ibáñez, J. y Carmona, E. (2000). Sismicidad Volcánica. Serie: Casa de los volcanes n° 7. Editores: Astiz M. Y García A. 269-282.

Johnson, J.B., Ronan, T.J., (2015). Infrasound from volcanic rockfalls. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 120, 2015JB012436.

<https://doi:10.1002/2015JB012436>.

Johnson, J.B., Anderson, J., Marcillo, O., Arrowsmith, S. (2012). Probing local wind and temperature structure using infrasound from Volcan Villarrica (Chile). *J. Geophys. Res. Atmospheres* 117, D17107.

<https://doi:10.1029/2012JD017694>.

Johnson, J.B. y Ripepe, M. (2011). Volcano infrasound: a review. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 206 (3–4), 61– 69.

Kissling, E. (1995). Program VELEST USER'S GUIDE - Short Introduction. Institute of Geophysics, ETH Zuerich.

Kim, K., Rodgers, A., Seastrand, D., (2018). Local infrasound variability related to in situ atmospheric observation. *Geophys. Res. Lett.*, 45,
<https://doi:10.1002/2018GL077124>.

Lacanna, G., Ichihara, M., Iwakuni, M., Takeo, M., Iguchi, M., Ripepe, M., (2014). Influence of atmospheric structure and topography on infrasonic wave propagation. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 119, 2988–3005.
<https://doi:10.1002/2013JB010827>.

Latter, J. (1979). Volcanological observations at Tongariro National Park, 2. Types and classification of volcanic earthquakes, 1976–1978. Dep Sci Inst Res Geophys Div, New Zealand, Rep 150, ix + 60.
<http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=9254945>

Latter, J. (1981). Volcanic Earthquakes and their Relationship to Eruptions at Ruapehu and Ngauruhoe Volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 9, 293-309 p.
[https://doi.org/10.1016/0377-0273\(81\)90041-X](https://doi.org/10.1016/0377-0273(81)90041-X)

Lahr, J. (1999). Hypoellipse user guide. U.S. Geological Survey Open-File Report 99-23, On-Line Edition.
<https://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0023/>.

Lazarte, I, Cueva, K., Manrique, N., Masías, P., Apaza, F., Miranda, R., Ortega, M., Ancasí, R., Macchaca, R. 2018. Informe técnico anual: Vigilancia del volcán Sabancaya, periodo 2018. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Informe técnico N° A6951. 86p.
<https://hdl.handle.net/20.500.12544/2487>

Lesage, P. (2009). Interactive Matlab software for the analysis of seismic volcanic signals. *Computers & Geosciences*, 35(10), 2137-2144 p.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.01.010>

MacQueen, P., Delgado, F., Reath, K., Pritchard, M. E., Bagnardi, M., Milillo, P., Lundgren, P., Macedo, O., Aguilar, V., Ortega, M., Ancasí, R., Lazarte, I. y Miranda, R. 2020. Volcano-tectonic interactions at Sabancaya volcano, Peru: Eruptions, magmatic inflation, moderate earthquakes, and fault creep. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2019JB019281.
<https://doi.org/10.1029/2019JB019281>

Marcillo, O. y Johnson, J.B., (2010). Tracking near-surface atmospheric conditions using an infrasound network. *J. Acoust. Soc. Am.* 128, EL14–EL19.
<https://doi:10.1121/1.3442725>.

Mariño, J., Rivera, M., Samaniego, P. y Macedo, L. 2016. Evaluación y zonificación de peligros del volcán Sabancaya. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Informe técnico N° A6734. 26p.
<https://hdl.handle.net/20.500.12544/993>

Mariño, J. 2012. Escenarios eruptivos y mapa de peligros del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Tesis Maestría, Universidad de Nice, Francia, 87p.

Matoza, R.S., Fee, D., Garcés, M.A., Seiner, J.M., Ramón, P.A. and Hedlin, M.A.H., (2009). Infrasonic jet noise from volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters*, 36(8).
<https://doi:10.1029/2008gl036486>.

McNutt, S.R. y Roman, D.C. (2015). Volcanic seismicity. In the *Encyclopedia of Volcanoes* (1011-1034). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00059-6>.

McNutt, S. R. (2005). Volcanic Seismology. Alaska Volcano Observatory. Geophysical Institute, University of Alaska. 36.
<https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122459>

McTigue, D. F. (1987). Elastic stress and deformation near a finite spherical magma body: resolution of the point source paradox. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B12), 12931-12940.
<https://doi.org/10.1029/JB092iB12p12931>

Minakami, T. (1974). Seismology of volcanoes in Japan in *Physical Volcanology* (eds. L. Civetta, P. Gasparini, G. Luongo and A. Rapolla), 1.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41141-9.50007-3>

Observatorio Vulcanológico del INGEMMET. 2016. Inspección Geológica del volcán Sabancaya (Distrito Maca y Lluta, Provincia Caylloma, Región Arequipa). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Informe técnico N° A6728. 16p.
<https://hdl.handle.net/20.500.12544/1002>

Ortega, M., Apaza, F., Masías, P., Miranda, R., Cruz, L., Antayhua, Y., Anccasi, R., Ccallata, B., Paxi, R., Valdivia, D., Japura, S. y Taipe, E. (2020). Informe técnico anual: Vigilancia del volcán Sabancaya, periodo 2020. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Informe técnico N° A7136. 125p.
<https://hdl.handle.net/20.500.12544/3104>

Paz, C. (2015). Modelo experimental de la dinámica de estallido y emisión acústica en volcanes. Tesis para optar al título de doctor en ciencias mención física. Universidad de Santiago de Chile.

Ramos, D., Masías, P., Apaza, F., Miranda, R., Antayhua, Y., Ortega, M., Anccasi, R., Ccallata, B., Luza C., Valdivia, D., Cruz, L. y Taipe, E. 2019. Informe técnico anual: Vigilancia del volcán Sabancaya, periodo 2019. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Informe técnico N° A6998. 99p.
<https://hdl.handle.net/20.500.12544/2578>

Ramos, D., Masías, P., Apaza, F., Lazarte, I., Taipe, E., Miranda, R., Ortega, M., Anccasi, R., Ccallata, B., Calderón, J. y Rivera, M. 2016. Los inicios de la actividad eruptiva 2016 del volcán Sabancaya. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Informe técnico N° A6735. 30p.

<https://hdl.handle.net/20.500.12544/1467>

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

Rivera, M., Mariño, J., Samaniego, P., Delgado, R. y Manrique, N. 2016. Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato - Sabancaya (Arequipa). INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 61, 122 p., 2 mapas.

<https://hdl.handle.net/20.500.12544/297>

Samaniego, P., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, C., Zerathe, S., Delgado, R., Valderrama, P. y Scao, V. 2016. The eruptive chronology of the Ampato – Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 323, 110 – 128p.

<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.04.038>

Sillitoe, R.H. (2010). Porphyry copper systems. *Econ. Geol.* 105 (1), 3–41.

<http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>

Walker, K.T. y Hedlin, M.A., (2010). A review of wind-noise reduction methodologies, in: *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. Springer, pp. 141–182.

White, R. y McCausland, W. (2019). Using a process– based model of pre – eruption seismicity patterns and its use for eruption forecasting at dormant stratovolcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*

<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.03.004>

White, R. y McCausland, W. (2016). Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 309, 139–155.

<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.10.020>

Zoback, M.L., Geist, E., Pallister, J., Hill, D.P., Young, S. y McCausland, W. (2013). Advances in natural hazard science and assessment, 1963–2013. Geological society of America, special papers, 501, 81-154.

[https://doi.org/10.1130/2013.2501\(05\)](https://doi.org/10.1130/2013.2501(05))

Zobin, V.M. (2012). Introduction to volcanic seismology (Vol. 6). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56375-0.00002-5>