



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



ANÁLISIS DEL PROCESO ERUPTIVO DEL VOLCÁN SABANCAYA: AGOSTO 2023 - AGOSTO 2024

Informe Técnico N°032-2024/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Setiembre, 2024

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Análisis del proceso eruptivo del volcán Sabancaya: agosto 2023 – agosto 2024

Autores:

Riky Centeno
Yovana Álvarez
Katherine Vargas
Jorge Mamani
Miguel Castro
David Valdivia
Marco Rivera

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
Teléfono: 51-1-3172300

**ANÁLISIS DEL PROCESO ERUPTIVO DEL VOLCÁN SABANCAYA:
AGOSTO 2023 — AGOSTO 2024**

Lima — Perú
Septiembre, 2024

RESUMEN

Se describe la actividad eruptiva del volcán Sabancaya desarrollada entre agosto de 2023 y agosto de 2024 a partir del análisis de la variación de datos multiparamétricos, incluyendo la sismicidad, deformación del terreno, emisiones de dióxido de azufre (SO_2), características de las emisiones de cenizas y anomalías térmicas. Durante este período, el volcán presentó una actividad explosiva constante y moderada, caracterizada por la ocurrencia frecuente de explosiones vulcanianas y la formación y evolución de domos de lava.

Se registraron 37 explosiones diarias, con predominio de sismos de tipo Largo Período (LP) asociados a la circulación de fluidos magmáticos. En el sector norte del volcán Sabancaya se observó una tasa de inflación vertical de 1.5 ± 0.3 cm/año, inferior a la media observada desde 2013. Las emisiones de ceniza alcanzaron alturas entre 1500 y 3500 m sobre el borde del cráter. El promedio diario del flujo de SO_2 fue de 807 toneladas, con picos que superaron las 4000 toneladas diarias. Se identificaron anomalías térmicas con niveles de Potencia de Radiación Volcánica (VRP) entre 4 MW y 30 MW, y picos de 55 MW. Se identificaron tres fases para el crecimiento de un domo: 1) la primera fase en diciembre 2023 a marzo 2024; 2) una segunda fase de destrucción parcial entre abril y mayo 2024, y 3) un crecimiento significativo en julio 2024. Estos cambios coincidieron con oscilaciones en la deformación del terreno e incremento en la actividad sísmica y emisiones de ceniza. El análisis integrado de los datos indica la presencia de un sistema magmático caracterizado por continuos aportes de magma asociados a ciclos de presurización y despresurización desarrollados al interior del volcán. Según los datos de monitoreo, para un futuro próximo, es probable que la actividad eruptiva continúe, aunque no se puede descartar la posibilidad de un ligero incremento.

CONTENIDO

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

2.- RED DE MONITOREO MULTIPARAMÉTRICO

3.- ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE MONITOREO

3.1.- Sismicidad volcánica

3.2.- Actividad superficial y satelital

3.2.1.- Deformación del terreno

3.2.1.1.- Datos GPS/GNSS

3.2.1.2.- Datos de interferometría

3.2.1.3.- Análisis de imágenes de radar

3.2.2.- Caracterización de emisiones volcánicas

3.2.2.1.- Altura de columnas y dispersión de cenizas

3.2.2.2.- Medidas de espesor de cenizas

3.2.2.3.- Flujo de gas SO₂

3.2.3.- Mediciones de radiación térmica satelital

4.- DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1.- Evolución temporal de la actividad según análisis multiparamétrico

4.1.1.- Sismicidad

4.1.2.- RSAM

4.1.3.- Deformación del terreno

4.1.4.- Evolución del domo de lava

4.1.5.- Anomalías térmicas

4.1.6.- Emisiones volcánicas

4.2.- Los datos multiparamétricos y sus implicaciones sobre la dinámica eruptiva

5.- PRONÓSTICO Y ESCENARIOS FUTUROS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

1.- INTRODUCCIÓN

El volcán Sabancaya ($15^{\circ}47'S$, $71^{\circ}51'O$, 5967 m s.n.m.) es el segundo volcán más activo del sur del Perú, ubicado en la provincia de Caylloma, departamento de Arequipa, a aproximadamente 70 km al noroeste de la ciudad de Arequipa, y a menos de 20 km al sur del valle del Colca. Forma parte del complejo volcánico Ampato-Sabancaya (CVAS), situado en la Zona Volcánica Central (CVZ) de los Andes (Figura 1), caracterizada por una corteza continental excepcionalmente gruesa de 65-70 km de espesor (Beck et al., 1996).

La actividad eruptiva actual del Sabancaya comenzó en noviembre de 2016 y continua hasta la actualidad. Esta actividad se caracteriza principalmente por la ocurrencia de explosiones vulcanianas frecuentes y la extrusión intermitente de domos de lava (Machacca et al., 2023). Los principales peligros volcánicos asociados a esta actividad incluyen la caída de ceniza, emplazamiento de flujos piroclásticos, lahares y emisiones de gases volcánicos. Estudios efectuados por Del Carpio et al. (2022) muestra que la caída de ceniza ha afectado áreas aledañas al Sabancaya, en un radio de hasta 30 km alrededor del volcán, impactando en la salud de las personas, la agricultura y la ganadería local.

En la zona de influencia del volcán Sabancaya en un radio de 30 km se encuentran ubicadas numerosas comunidades rurales y pequeños centros poblados, con una población estimada en más de diez mil habitantes (Del Carpio et al., 2022). Esta población es altamente vulnerable debido a su dependencia de actividades agrícolas, ganaderas y el turismo. El riesgo potencial más significativo es la posibilidad de un incremento de la actividad eruptiva que podría generar flujos piroclásticos de corto alcance o lahares que afecten áreas pobladas.

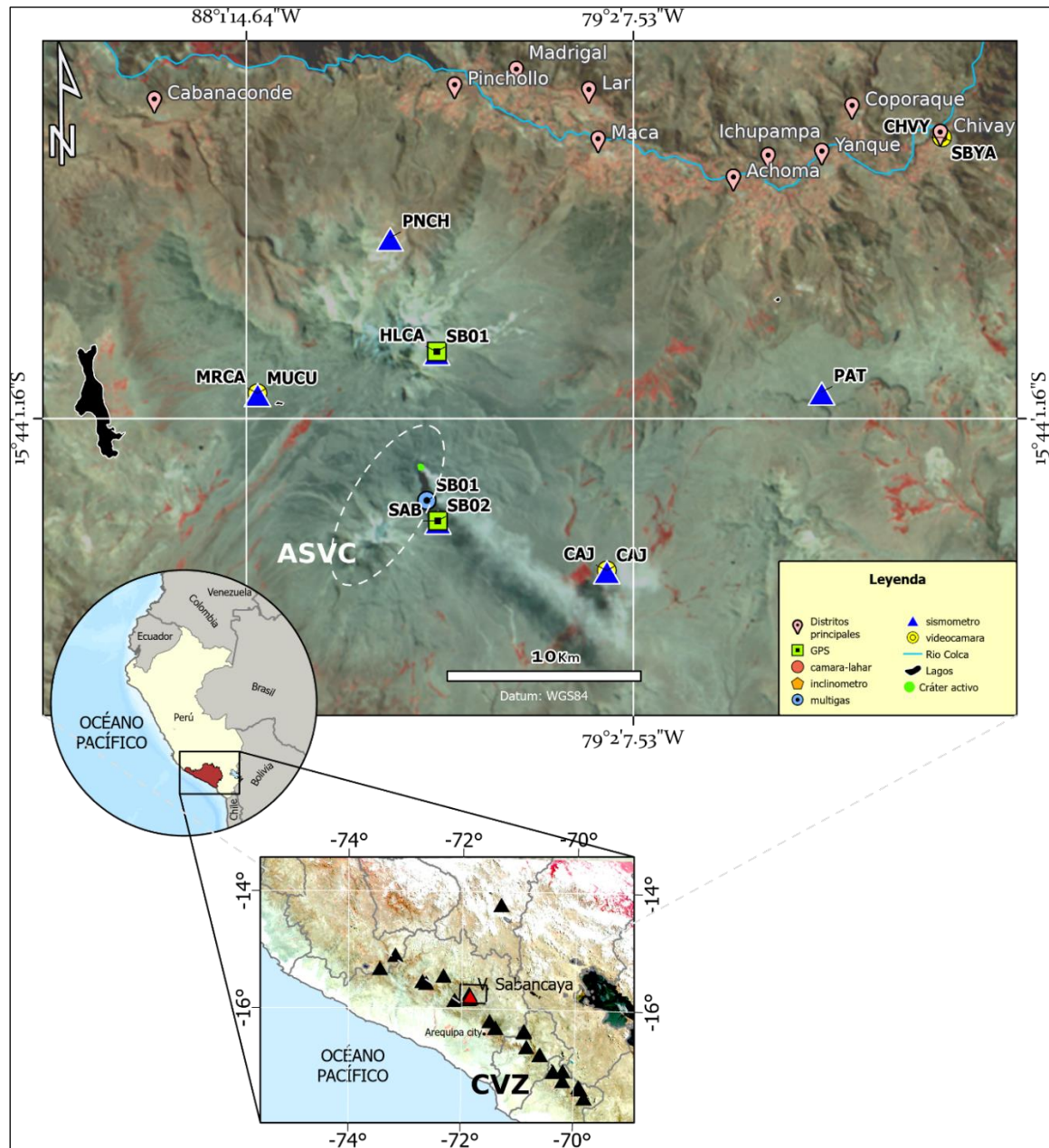


Figura 1.- Mapa de Ubicación de la Red de vigilancia volcánica del Sabancaya, distritos y centros poblados ubicados dentro del radio de 30 km del volcán.

Desde noviembre de 2016 el Sabancaya viene presentando actividad eruptiva, debido a ello, el IGP viene generando periódicamente información respecto a su actividad. Durante el periodo anterior al presente análisis (mayo de 2022 - julio de 2023), el Sabancaya mantuvo una actividad explosiva moderada pero sostenida. Centeno et al. (2023) reportaron fluctuaciones en la mayoría de los parámetros geofísicos monitoreados, incluyendo la detección de episodios significativos de tremor volcánico entre noviembre y

diciembre de 2022, y marzo a mayo de 2023, ligados al ascenso de magma a la superficie, resultando en un crecimiento acelerado del domo de lava visible en el cráter del volcán. El informe también destacó la ocurrencia de un importante enjambre de sismos volcano-tectónicos distales después de mayo de 2023, lo que sugirió una presurización del sistema volcánico.

El presente informe brinda continuidad a la evaluación de la actividad presentada por el volcán Sabancaya, proporcionando un análisis actualizado y detallado de su actividad eruptiva para el periodo de agosto de 2023 a agosto de 2024. Este seguimiento continuo es crucial por tres razones: 1) permite comprender mejor la evolución de los procesos magmáticos y eruptivos en curso; 2) facilita la identificación de posibles precursores de cambios en la actividad eruptiva; y 3) proporciona información vital para la evaluación e implementación de acciones de prevención ante el riesgo volcánico en la región sur del país.

La integración de datos multiparamétricos de monitoreo volcánico sobre la sismicidad, deformación, flujos de gas SO_2 , emisiones de cenizas, etc. nos permite obtener una visión más completa de la dinámica eruptiva del Sabancaya, lo cual es esencial para mejorar nuestra capacidad de pronóstico e informar de manera adecuada y oportuna a las autoridades e instituciones del SINAGERD sobre los peligros potenciales. Este informe busca, por tanto, contribuir a la mitigación del riesgo volcánico y a la protección de las poblaciones vulnerables en el área de influencia del volcán Sabancaya.

2.- RED DE MONITOREO MULTIPARAMÉTRICO

La red sísmica que opera en el entorno del volcán Sabancaya está integrada por seis sismómetros de banda ancha (30 s - 50 Hz), los cuales se encuentran distribuidos en las estaciones SABA, CAJA, PATA, MRCA, PNCH y HLCA (Figura 1). La estación SABA, situada a una distancia de 2.9 km del cráter, se destaca como la principal estación para llevar a cabo un análisis constante de la actividad sísmica. Esta estación provee información crucial que contribuye a la identificación y clasificación de los diversos eventos sísmicos relacionados con la actividad volcánica.

Asimismo, para llevar a cabo el seguimiento de la deformación del edificio volcánico, se dispone de una red geodésica compuesta por dos receptores GNSS (GPS) ubicados en las estaciones SABA y HLCA (Figura 1). Los equipos mencionados tienen la capacidad de recopilar información a intervalos de tiempo de 30 segundos, lo que posibilita la identificación y medición precisa de las variaciones en la actividad del volcán.

La vigilancia de la actividad superficial y la altura de las columnas eruptivas generadas tras las explosiones se lleva a cabo mediante una red compuesta por tres cámaras científicas de video. Las cámaras se encuentran en las estaciones SBYA (31.8 km al noreste del cráter), CAJA (11.1 km al sureste del cráter) y MRCA (9.2 km al noroeste del cráter) y toman fotografías cada 30 segundos. Esta disposición facilita la observación de la actividad del volcán desde diversas perspectivas y distancias.

El seguimiento del dióxido de azufre (SO_2), un gas volcánico, se lleva a cabo a través del sistema "Proyecto MOUNTS" y con la utilización de un sensor DOAS durante campañas temporales en terreno.

El monitoreo de las estaciones permanentes se complementa con campañas de campo periódicas que incluyen mediciones in situ y muestreo de productos volcánicos. También se realizan sobrevuelos con drones y aeronaves tripuladas para llevar a cabo inspecciones visuales del cráter. Se lleva a cabo el análisis de imágenes satelitales (MODIS, VIIRS, Sentinel-2, Landsat-8, Sentinel-1, Dove y Perusat-01) con el propósito de realizar el monitoreo térmico, de deformación y de cambios morfológicos del volcán.

La información recopilada se transmite en tiempo real al Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL) del Instituto Geofísico del Perú (IGP) en Arequipa, en donde se lleva a cabo un análisis integrado de los datos con el fin de evaluar el estado de actividad del volcán y emitir alertas tempranas en caso de ser requerido.

La utilización de una red multiparamétrica posibilita la monitorización constante de la actividad del volcán Sabancaya, suministrando información esencial para la comprensión de su comportamiento eruptivo y la valoración de los riesgos vinculados.

3.- ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE MONITOREO

A continuación, se presenta un análisis detallado sobre los datos de monitoreo registrados en el volcán Sabancaya, entre agosto de 2023 a agosto de 2024.

3.1. Sismicidad volcánica

La actividad sísmica del volcán Sabancaya, tal como se observa en la Figura 2, se caracterizó por mantener variaciones significativas en la intensidad y la naturaleza de los eventos sísmicos detectados.

A lo largo de este período, la estación sísmica SABA, registró en promedio 37 explosiones diarias, evidenciando la persistencia de la actividad vulcaniana. Sin embargo, se observaron fluctuaciones notables en la energía liberada por estas explosiones, con valores que oscilaron entre 0.2 y 2.3 Mega Joules (MJ). Estas variaciones en la energía sísmica sugieren cambios notables en la presurización del sistema magmático y la eficiencia en la liberación de gases (Figura 2a).

Los eventos de Largo Período (LP) continuaron siendo predominantes, representando aproximadamente el 51% de la sismicidad total. Estos eventos, asociados al movimiento de fluidos (gases, magma, etc.) en el sistema volcánico, mostraron una correlación positiva con las fases de mayor actividad explosiva, sugiriendo un vínculo directo con los procesos de ascenso y desgasificación del magma (Figura 2b). Asimismo, se observa una mayor incidencia de sismos tipo "Tornillo" (TOR), entre los meses de junio y agosto de 2024.

Los episodios de tremor volcánico, tanto espasmódico (TRE) como armónico (TRA), mostraron una tendencia al aumento en duración e

intensidad desde el inicio hacia el final del período de análisis. Particularmente notable fue un episodio de tremor espasmódico detectado durante agosto y setiembre de 2023; así como, a finales de febrero hasta mayo de 2024, ambos periodos precedieron un ligero incremento en la actividad explosiva del volcán (Figura 2c).

Además, durante el periodo de análisis, se identificaron varios enjambres sísmicos de eventos volcano-tectónicos distales (dVT), principalmente localizados en los sectores norte y noreste del volcán Sabancaya, a distancias de hasta 30 km del cráter y profundidades entre 5 y 21 km. Estos enjambres, que en ocasiones superaron los 600 eventos diarios (Figura 2d), fueron interpretados por Machacca et al. (2023) como indicadores de la reactivación de fallas tectónicas regionales en respuesta a la presurización del sistema magmático profundo.

La Figura 2e, muestra la curva de RSAM promedio obtenida de la razón de las señales sísmicas de las estaciones Sabancaya (SABA) y Salinas (HSAL, a 96km del volcán), esto con el propósito de resaltar la actividad propia del volcán. Los valores oscilan principalmente entre 1 y 3 unidades, con picos ocasionales que superaron las 5 unidades. Se observa un período de mayor actividad que coincide con el tremor, especialmente a finales de agosto de 2023. Así también, la curva presenta una considerable variabilidad a corto plazo, reflejando una dinámica sísmica compleja. Aunque se observan fluctuaciones frecuentes, no hay una tendencia clara de aumento o disminución a largo del periodo de análisis.

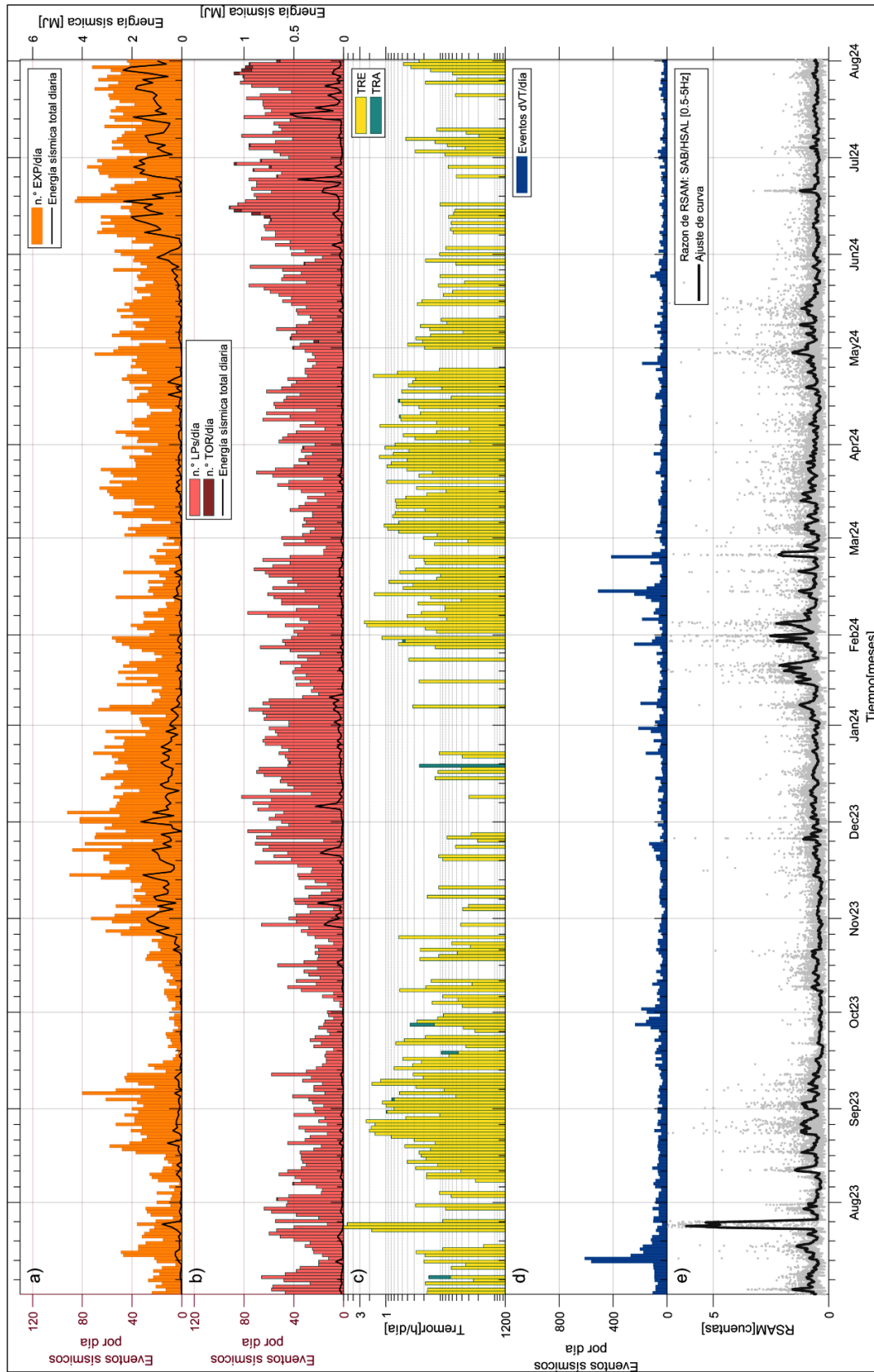


Figura 2.- Distribución temporal del número y energía de a) explosiones volcánicas, b) sismos de tipo LP, c) duración total diaria de episodios tremóricos (TRE y TRA), d) sismos de tipo dVT y e) la curva promedio de amplitud sísmica (RSAM).

La Figura 3 muestra la distribución de la sismicidad localizada en la zona de influencia del volcán Sabancaya durante el período de estudio, revelando un patrón complejo y dinámico. En efecto, los eventos sísmicos se distribuyeron en un radio aproximado de 30 km alrededor del complejo volcánico Ampato-Sabancaya, con una notable concentración de sismos en el sector norte del Sabancaya, extendiéndose hacia el este.

La profundidad de los eventos sísmicos varía, con una predominancia de sismos superficiales (0 – 33 km), especialmente cerca del edificio volcánico, mientras que sismos más profundos (>33 km) se distribuyen en un área más amplia. La magnitud de los sismos es menor M2.8, con algunos eventos de mayor magnitud (<M4.1) dispersos, particularmente hacia el noreste del Sabancaya.

Directamente bajo el volcán Sabancaya no se observa una concentración de sismos superficiales. Sin embargo, la actividad sísmica se extiende hacia el norte, en dirección del volcán Hualca Hualca, pero es menos pronunciada al sur, alrededor del volcán Ampato.

Es notable la presencia de una zona de baja sismicidad al sur y suroeste del Sabancaya, contrastando con otras zonas de alta sismicidad. La distribución de los sismos parece estar influenciada por la presencia de fallas y fracturas existentes en la zona, con muchos eventos alineados a lo largo de estas.

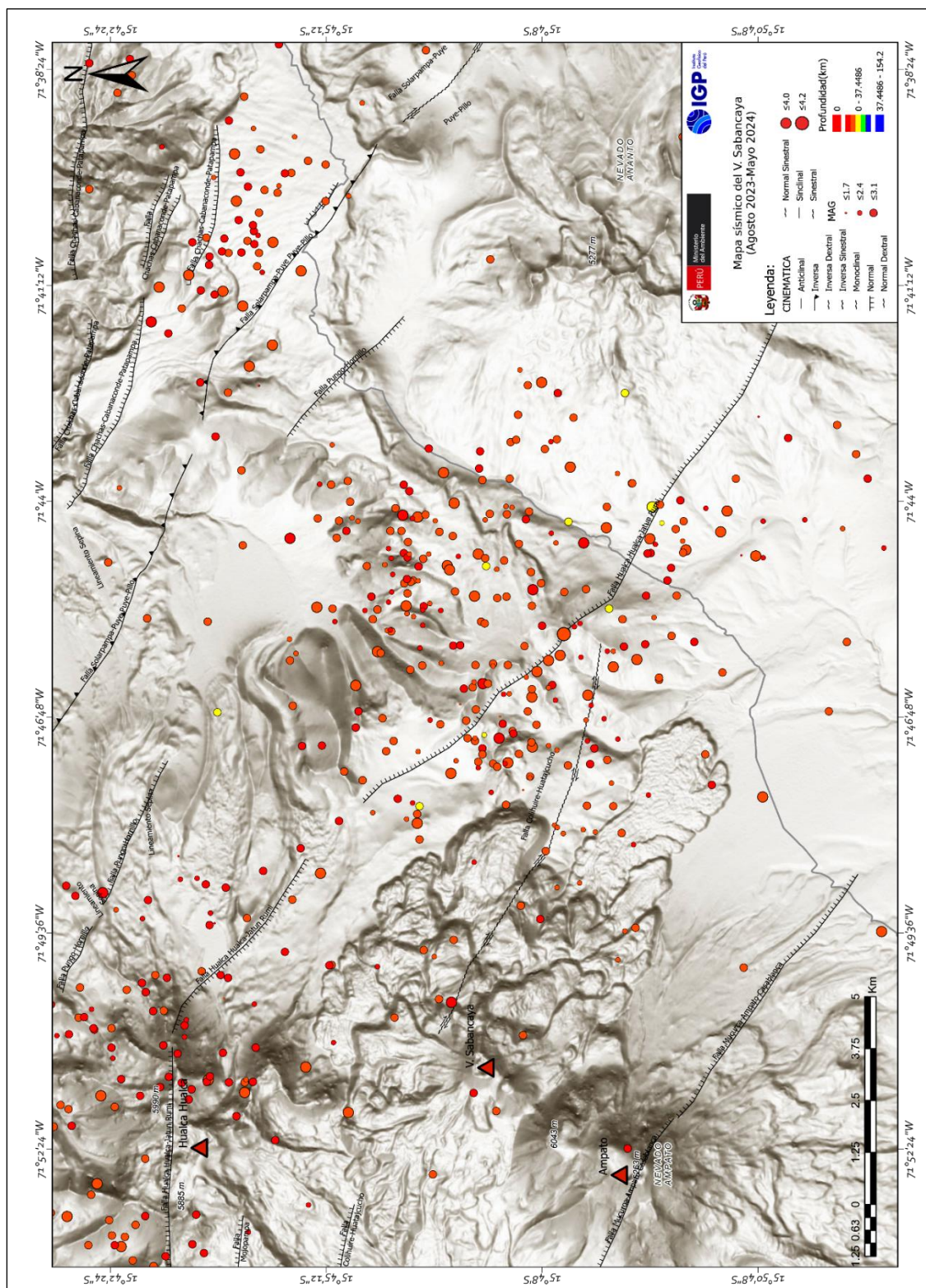


Figura 3.- Distribución espacial de la sismicidad en los alrededores del volcán Sabancaya reportadas por el CENSIS, durante el periodo de estudio.

3.2. Actividad superficial y satelital

3.2.1. Deformación del terreno

3.2.1.1. Datos GPS/GNSS

La estación GNSS "SB01" fue instalada para monitorear la deformación del edificio volcánico. Esta estación se encuentra ubicada a 6 km al norte del volcán Sabancaya, en un área donde previamente se ha identificado la principal zona de deformación de dicho volcán. Durante el período de estudio antes mencionado, se documentó un incremento vertical de 1.5 ± 0.3 cm/año, el cual resultó ser inferior a la media de 3 cm/año, observada a partir del año 2014 (Vargas et al., 2023). Los movimientos laterales registrados fueron de magnitud reducida, con una dirección de 0.2 ± 0.1 cm/año hacia el este y 0.5 ± 0.1 cm/año hacia el norte, tal como se ilustra en la Figura 4a. La Figura 4b muestra el desplazamiento relativo del sector norte del volcán Sabancaya a lo largo del tiempo, lo cual confirma que la deformación principal tuvo lugar en la componente vertical.

El análisis de la deformación muestra cuatro fases de evolución detalladas en la Figura 4a: 1) en una primera fase, desde agosto hasta mediados de octubre de 2023 (flecha 1), se registró un periodo de inflación constante. 2) En una segunda fase, desde octubre de 2023 hasta febrero de 2024 (flechas 2-15), se presentaron oscilaciones entre inflación y deflación. 3) En una tercera fase, desde abril hasta principios de julio de 2024 (flecha 16 y 18) se identificó una nueva etapa de inflación constante, la cual fue interrumpida por un breve periodo de inflación entre el 6 y 13 de mayo de 2024 (flecha 17). 4) Una cuarta fase, ocurrida desde la

segunda semana de julio hasta fines de agosto de 2024 (flechas 19-25), se detectó una deflación seguida de una inflación gradual.

Las oscilaciones entre inflación y deflación son típicamente vinculadas al crecimiento de un domo de lava en el interior del cráter del volcán Sabancaya, reflejando la interacción continua entre el ascenso de magma y la liberación de presión en el volcán.

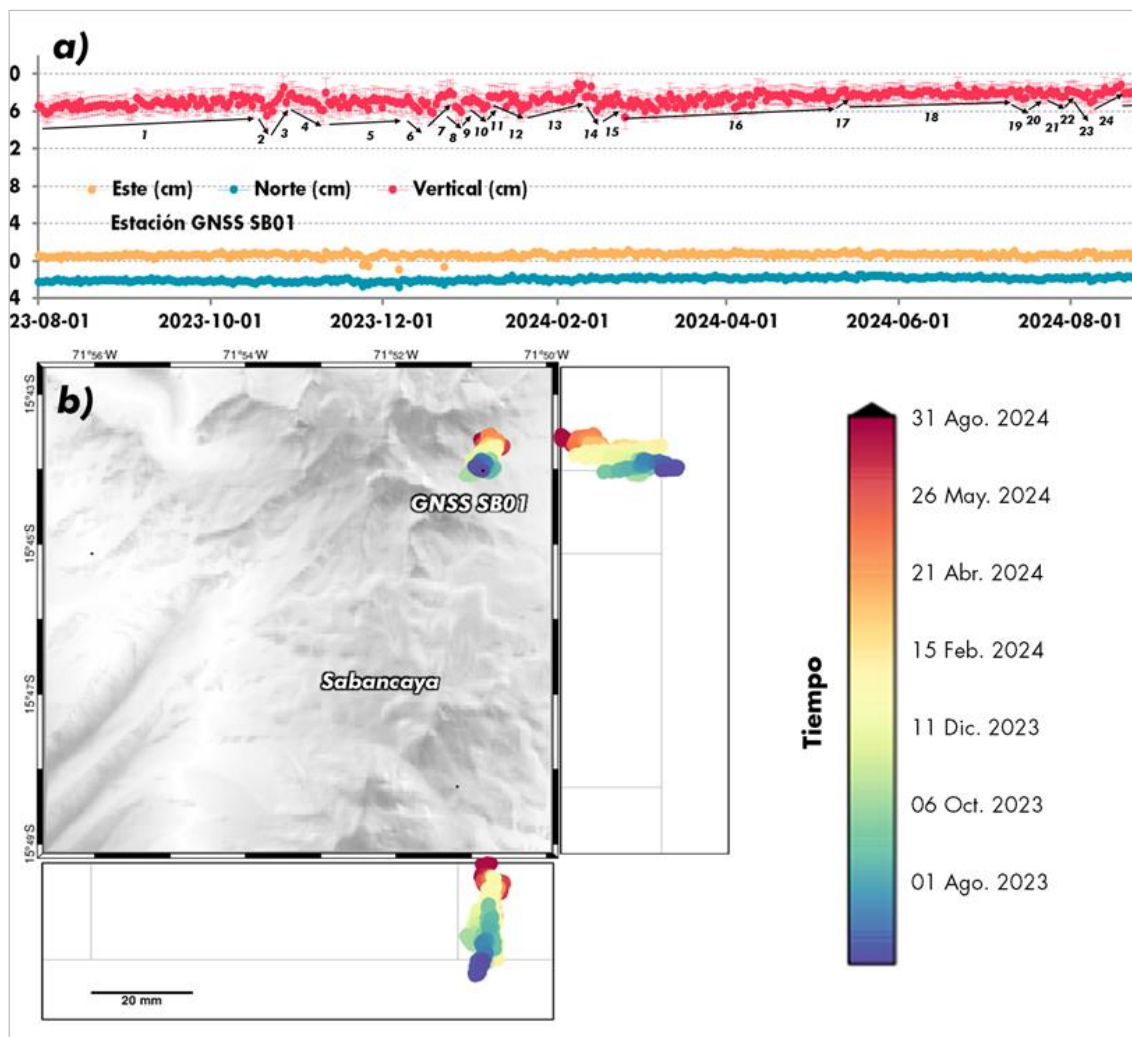


Figura 4.- a) Serie de tiempo de deformación detectada en la estación GNSS SB01 para las componentes Este (puntos amarillos), Norte (puntos celestes) y Vertical (puntos rojos) registradas entre agosto de 2023 y agosto de 2024. Las flechas indican periodos de incremento o disminución de la deformación en la componente vertical. b) Mapa del desplazamiento relativo de la estación GNSS SB01 a lo largo del tiempo, generado en sistema web WebObs (<https://ipgp.github.io/webobs/>).

3.2.1.2. Datos de interferometría

Esta técnica se basa en la comparación de múltiples imágenes de radar para generar un mapa de velocidad de deformación y series temporales. Para este análisis, se examinaron 33 imágenes satelitales de radar Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea (ESA), adquiridas entre el 10 de agosto de 2023 y el 28 de agosto de 2024, en órbita ascendente, con una resolución temporal de una imagen cada 12 días. Luego, a partir 71 interferogramas se obtuvo un mapa de velocidad de deformación en la línea de vista del satélite "LOS", que revela una inflación o levantamiento recurrente, centrado en el sector noroeste del volcán Sabancaya (Figura 5a, círculo rojo). La serie temporal en la ubicación del punto del GNSS SB01 (Figura 5b) indica una velocidad de 1.8 ± 0.3 cm/año, y que es comparable con los datos obtenidos con el equipo GNSS (Figura 4a).

3.2.1.3. Análisis de imágenes de radar

Las imágenes TerraSAR-X son proporcionadas por el Centro Aeroespacial Alemán (Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V.) como parte del proyecto «CEOS Volcano Demonstrator». A partir del empleo de la metodología de Coppola et al. (2022), en los últimos 12 meses se han estimado cambios en profundidad del cráter del volcán Sabancaya empleando la silueta de las sombras de las imágenes TerraSAR-X (Figura 6). Dicha profundidad se refiere a la distancia vertical desde el borde superior del cráter del volcán Sabancaya hasta el nivel del domo de lava en su interior. Esta medida es negativa porque se mide respecto al borde superior del cráter, considerado para los cálculos como nivel cero.

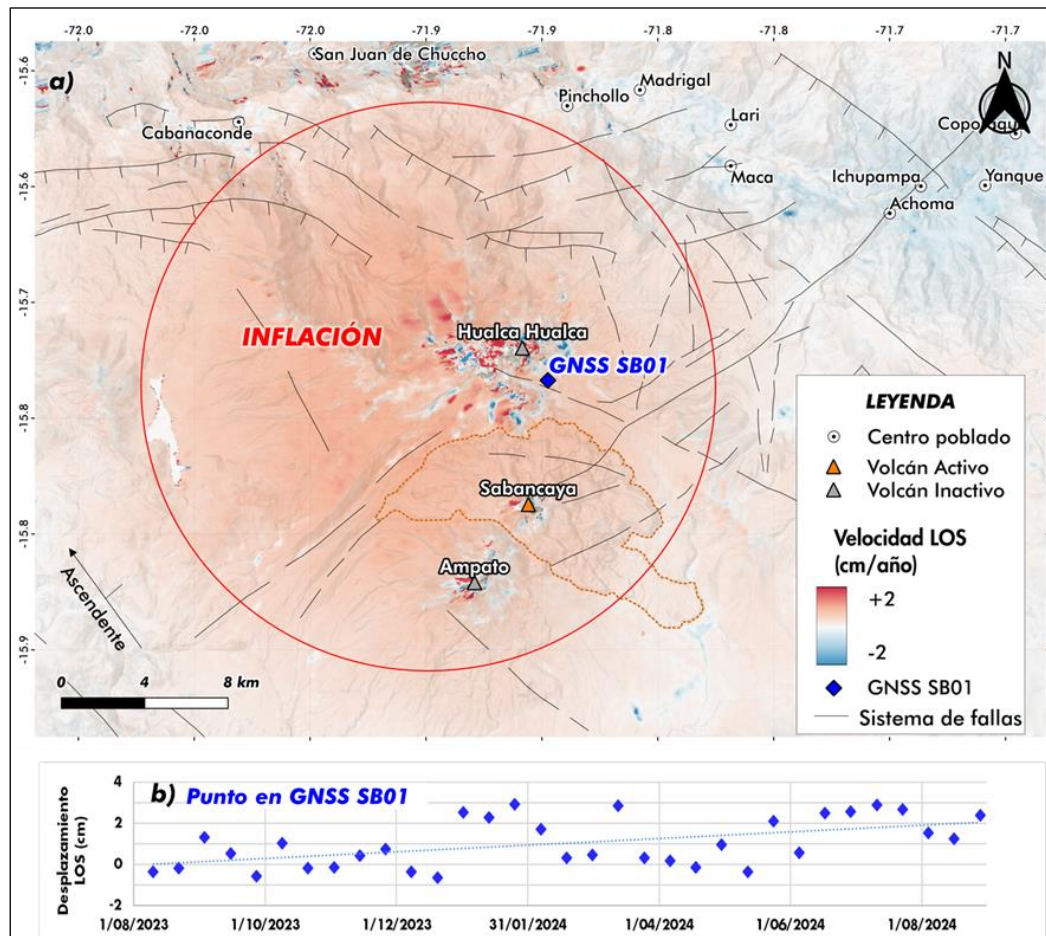


Figura 5.- a) Mapa de velocidad de deformación LOS, obtenido a partir de 33 imágenes de radar, durante el periodo de estudio en órbita ascendente, así como b) la serie temporales en el punto GNSS SB01.

Entre agosto y diciembre de 2023 (Figura 6, escenas 1-11), no se observaron cambios significativos en la morfología del cráter, manteniendo una profundidad promedio de -78 m con respecto al borde superior del cráter del volcán Sabancaya (Figura 7). Seguidamente, entre diciembre de 2023 y marzo de 2024 (Figura 6, escenas 12-19) se observa un desnivel positivo en el domo, con una profundidad promedio de -67 m, respecto al borde superior del cráter (Figura 7). Este cambio de profundidad de -78 m a -67 m indica que la altura del material volcánico dentro del cráter incrementa en 11 m respecto al nivel promedio anterior, y que adicionalmente se puede corroborar por tonalidades claras en las escenas 12-19 de la Figura 6, y que coincide con periodos de

oscilación entre inflación y deflación del GNSS SB01 (Figura 4a). Dicho leve crecimiento del domo de lava ha sido cuantificado en un incremento de volumen de material de aproximadamente 0.6 millones de m^3 , respecto a los meses previos a diciembre de 2023.

Posteriormente, entre abril y mayo de 2024 (Figura 6, escenas 20-23), se observa que el domo de lava ocupa una menor área, evidenciada por los tonos más oscuros en el borde oeste del área que ocupa el domo, alcanzando una profundidad de -86 m (Figura 7), es decir, un desnivel negativo de 19 metros que indica una disminución en la altura del domo. Esto se interpreta como una pérdida de material debido a la destrucción del domo de lava ligada a las explosiones, lo que representa una reducción de volumen de aproximadamente 1.1 millones de m^3 .

Finalmente, con las últimas imágenes disponibles de julio de 2024 (Figura 6, escenas 24-25), específicamente del 25 de julio, se observa un nuevo crecimiento del domo de lava, alcanzando una profundidad de -52 m, con respecto al borde superior del cráter del volcán Sabancaya (Figura 7), y que también coincide con periodos de oscilación entre inflación y deflación detectada por la estación GNSS SB01 (Figura 4a). Esta nueva elevación del domo corresponde a un desnivel positivo de 34 m (incremento en la altura del domo), respecto a la profundidad media alcanzada entre abril y mayo de 2024 (-86 m), y que representa un incremento de volumen de alrededor de 1.9 millones de m^3 . Este crecimiento es evidenciado incluso con fotografías de campo obtenidas en agosto de 2024 (Figuras 8b y 8c) en el que es posible observar el domo desde el sector norte del volcán debido a la cota inferior del borde del cráter en este sector.

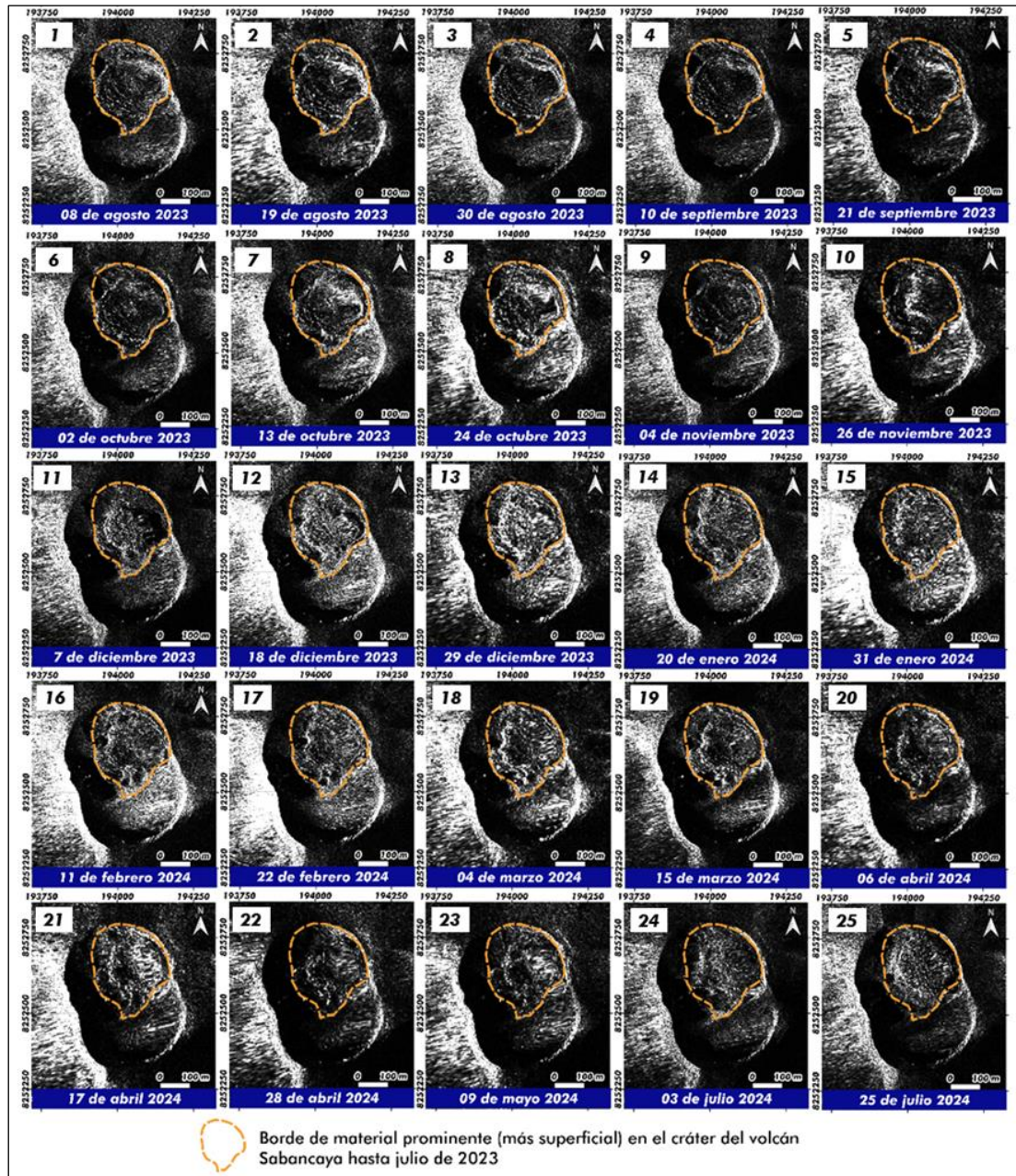


Figura 6.- Secuencia de imágenes de radar TerraSAR-X de agosto de 2023 a junio 2024. El borde de línea discontinua color naranja, representa el material prominente en el cráter del volcán. A partir de la metodología de Coppola et al. (2022), se ha estimado cambios en profundidad del cráter del volcán Sabancaya, entre agosto de 2023 a junio 2024, utilizando la silueta de las sombras de las imágenes TerraSAR-X (Figura 6).

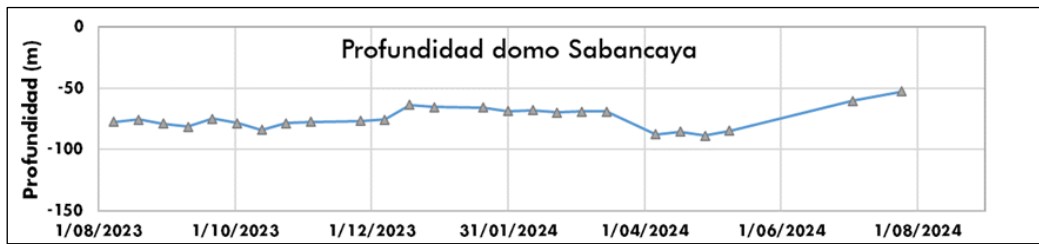


Figura 7.- Perfil de profundidad del cráter del volcán Sabancaya a partir de imágenes TerraSAR-X.

Previamente, en mayo de 2022, el área del domo ocupaba aproximadamente un área de 44500 m² (Centeno et al., 2022); mientras que, en julio de 2023 dicha área se calculó en 56100 m² (Centeno et al., 2023). Hasta julio de 2024, el domo alcanzó un área aproximada de 69100 m² (Figura 8a).

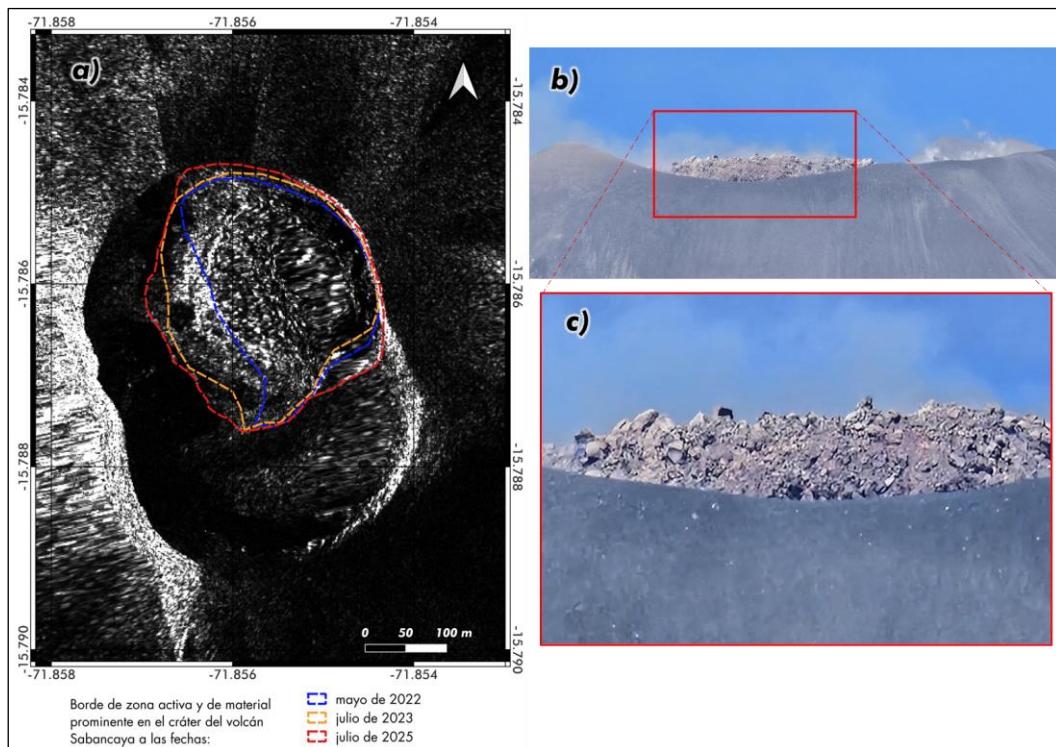


Figura 8.- a) Comparación del borde de zona activa del cráter del volcán Sabancaya para mayo de 2022, julio de 2023 y julio de 2024, representados sobre la imagen más reciente del 25 de julio de 2024. b) y c) fotografías adquiridas el 8 de agosto de 2024 del domo del Sabancaya desde el sector norte.

3.2.2. Caracterización de las emisiones volcánicas

3.2.2.1. Altura de las columnas y dispersión de cenizas

Según la Figura 9, durante el periodo de análisis la actividad eruptiva del volcán Sabancaya se caracterizó por la emisión constante de gases, en forma de columnas eruptivas que alcanzaron entre 100 y 1500 m de altura sobre el cráter. Por otro lado, las columnas de ceniza mostraron una mayor variabilidad, alcanzando alturas frecuentemente entre 1500 y 3000 m, con picos ocasionales que superaron los 3500 m.

Durante el período de agosto a diciembre de 2023, así como de abril a agosto de 2024, se registraron columnas de gases y cenizas volcánicas que alcanzaron alturas superiores a 3000 m. Durante los meses de octubre a diciembre de 2023, se observó una disminución en la altura y frecuencia de las columnas de gases y cenizas. Por otro lado, en los meses de enero y marzo de 2024, predominaron las emisiones de gases.

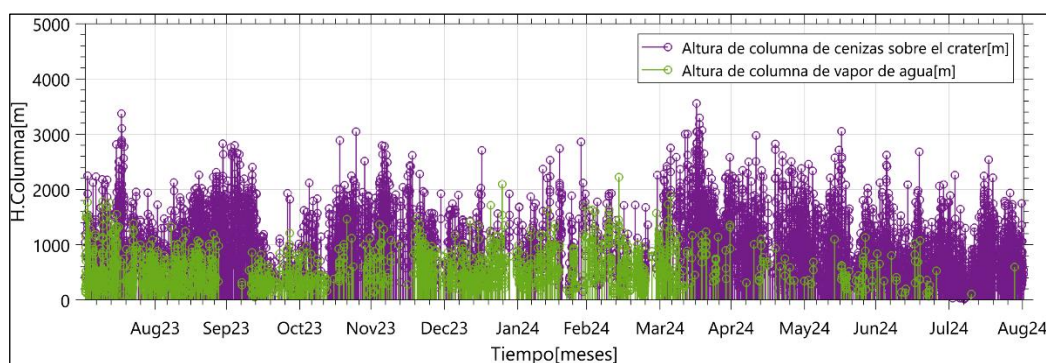


Figura 9.- Altura de columna de ceniza sobre el cráter. Los diferentes colores se refieren a la emisión de gases (verde) y cenizas (violeta), para el periodo de agosto 2023 a agosto 2024.

El 15 de abril de 2024, se registró la columna de ceniza más alta, que alcanzó una altura aproximada de 3600 m sobre el cráter.

La dispersión de cenizas del volcán Sabancaya fue principalmente en dirección este y sureste, alcanzando las localidades de Huambo y Lluta. Estas zonas albergan estancias, terrenos agrícolas, áreas de pastoreo y ganado. La variabilidad en la altura y frecuencia de las columnas de gases y ceniza evidencia cambios significativos en la intensidad de la actividad volcánica.

3.2.2.2. Medidas de espesor de cenizas

Como se aprecia en la Figura 10, entre el 16 y el 20 de agosto de 2023 se realizaron mediciones del espesor de cenizas acumuladas emitidas por el volcán Sabancaya. El área de estudio abarcó un radio de 36 km alrededor del volcán, incluyendo los sectores oeste, noroeste, norte, noreste, este y sureste, así como los poblados de Chivay, Achoma, Yanque, Maca, Pinchollo y Huambo. Los resultados revelan una distribución del espesor de cenizas que varía según la distancia del cráter. En la zona más cercana, de 2 a 10 km, se registraron espesores de ceniza entre 4 y 20 mm. A distancias de 10 a 20 km del volcán, los espesores oscilaron entre 4 mm y menos de 1 mm. Más allá de los 20 km del volcán Sabancaya, los espesores fueron inferiores a 1 mm. Un cenizómetro instalado a 2 km del cráter registró una acumulación de 0.6 mm de ceniza entre junio y agosto de 2023, indicado con un círculo verde en la Figura 10. Los espesores y volumen de ceniza emitida por el Sabancaya son característicos de un estilo eruptivo de tipo vulcaniano. Estos datos proporcionan información valiosa sobre la distribución y alcance de las cenizas volcánicas, crucial para evaluar el impacto en las comunidades circundantes.

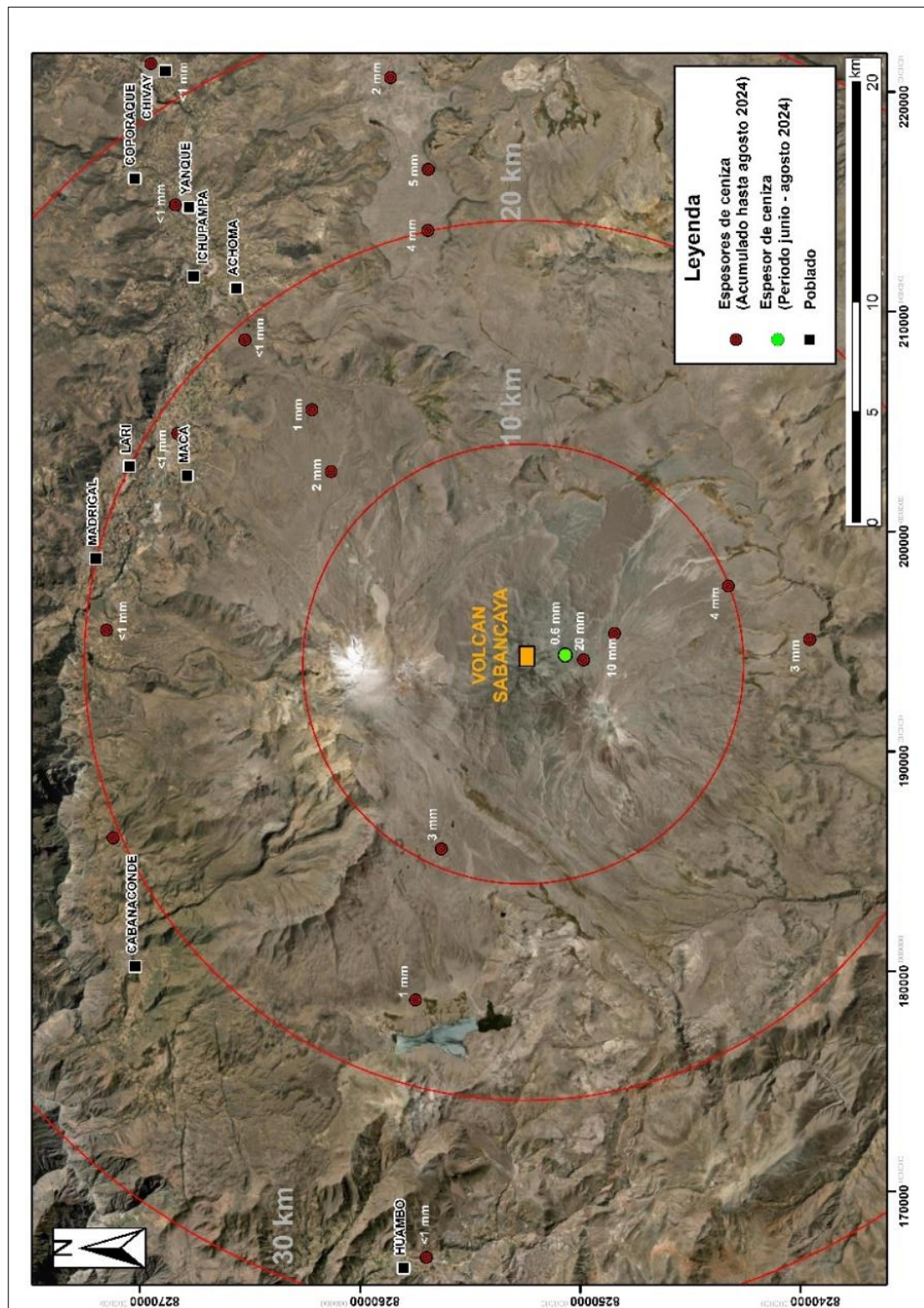


Figura 10.- Mapa de ubicación de puntos de medición de espesores de ceniza (puntos rojos) depositados desde el 2016 hasta agosto de 2023 en áreas aledañas al volcán Sabancaya. El punto verde es una medida del periodo junio – agosto de 2023. Los círculos rojos son los radios de distancia de 10, 20 y 30 km respecto al cráter del Sabancaya.

Posteriormente, entre los días 25 y 27 de marzo de 2024, se llevaron a cabo nuevas mediciones del espesor de cenizas acumuladas emitidas por el volcán Sabancaya. El área de estudio abarcó un radio de 36 km alrededor del volcán, realizando medidas en los poblados de Maca, Yanque, Ichupampa, Lari y Marigal obteniendo espesores mayores a 1 mm, como se muestra en la Figura 11.

Adicionalmente, se recolectaron datos de los cenizómetros instalados a distancias de 2 a 10 km del cráter del Sabancaya (Figura 11). El cenizómetro RS-01 registró una acumulación de ceniza de 0.5 mm durante el período de junio de 2023 a marzo de 2024. En los cenizómetros RS-02 y RS-04 se encontraron acumulaciones de ceniza de 0.8 mm y 0.1 mm, respectivamente, durante el período de agosto de 2023 a marzo de 2024.

Estas mediciones proporcionan información crucial sobre la distribución y acumulación de cenizas volcánicas en un período de tiempo extenso, permitiendo una evaluación más completa del impacto de la actividad eruptiva del Sabancaya en las áreas circundantes. Los datos obtenidos son esenciales para comprender los patrones de dispersión de cenizas a lo largo del tiempo y para evaluar los riesgos potenciales para las comunidades y ecosistemas de la región.

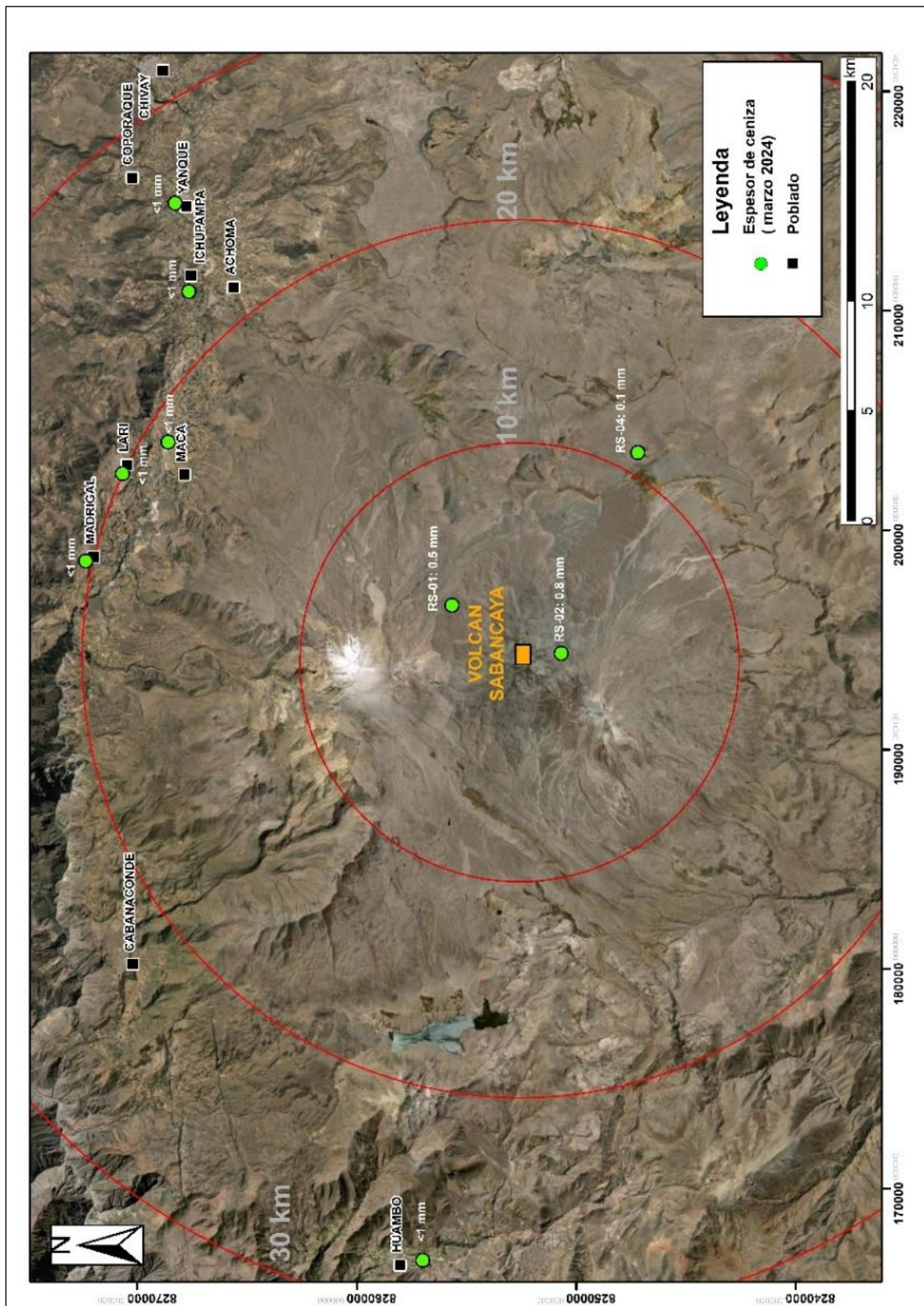


Figura 11.- Mapa de ubicación de puntos de medición de espesores de ceniza (puntos verdes) depositados en áreas aledañas al volcán Sabancaya desde junio de 2023 a marzo de 2024. Los círculos rojos con los radios de distancia de 10, 20 y 30 km respecto al cráter del Sabancaya.

3.2.2.3. Flujo de gas SO₂

Tal como se aprecia en la Figura 12, durante el período de estudio se monitorearon los flujos de SO₂ emitidos por el volcán Sabancaya, utilizando el sistema "MOUNTS PROJECT" y datos de campo empleando un instrumento DOAS (Espectroscopia de absorción óptica diferencial, por sus siglas en inglés). El flujo promedio de SO₂ registrado fue de 807 toneladas por día, con varios episodios de desgasificación intensos que superaron significativamente este promedio.



Figura 12.- Flujos de gas dióxido de azufre (SO₂) para el periodo agosto 2023 a agosto 2024 (Fuente: sistema "MOUNTS").

En el 2023 se observaron flujos notables de SO₂ en distintas fechas. Los eventos más significativos ocurrieron el 23 de agosto (4293 ton/día), el 5 de octubre (4547 ton/día), el 12 y 29 de noviembre (2643 y 2663 ton/día, respectivamente), y el 30 de diciembre, con emisiones que alcanzaron 3660 ton/día.

En el año 2024 también se detectaron episodios de intensa desgasificación. El pico más alto del período se registró el 3 de marzo con 3892 ton/día, seguido por otros eventos significativos el 7 de marzo (3641 ton/día), el 30 de marzo (3014 ton/día), y el 1 y 2 de abril (3108 y 3038 ton/día, respectivamente).

Estos picos de emisión de SO_2 , que superaron las 2500 ton/día, indican episodios de desgasificación más intensa, sugiriendo aportes continuos de magma y mostrando que la actividad explosiva aún se mantiene vigente. Estos datos son cruciales para comprender la dinámica del volcán y evaluar posibles cambios en su comportamiento eruptivo.

3.2.3. Mediciones de radiación térmica satelital

Durante el período de análisis, los datos de temperatura del volcán Sabancaya, obtenidos por satélite, indica la presencia de una actividad volcánica constante, aunque variable en intensidad. Los datos de anomalías térmicas detectadas por el sistema MIROVA revelan una Potencia de Radiación Térmica (FRP) en Megavatios (MW) que varían entre 4 MW y 30 MW. Se observan picos significativos en noviembre de 2023 y abril de 2024, con valores que alcanzan o superan los 55 MW. La intensificación de la actividad térmica se observó al final del período, como se evidencia en la Figura 13.

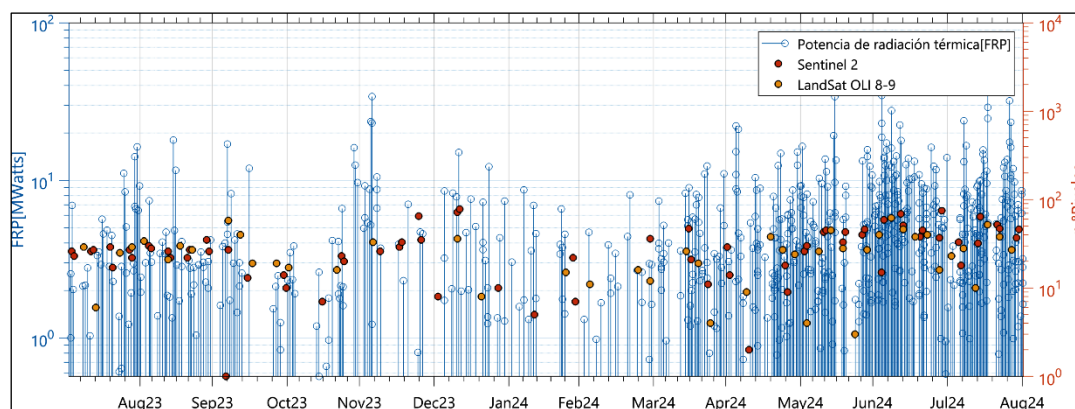


Figura 13.- Serie de tiempo de las anomalías térmicas detectadas por el sistema FIRMS (Fire Information for Resource Management System) de la NASA, en el volcán Sabancaya durante el periodo agosto de 2023 a agosto de 2024.

Adicionalmente, los datos recopilados por los satélites Sentinel 2 y Landsat 8-9, aunque menos frecuentes, respaldan dichos patrones, al identificar entre 1 y 100 píxeles con anomalías térmicas, mostrando una correlación significativa con los datos de incremento de la temperatura superficial del suelo. Durante los meses de noviembre y diciembre de 2023, el sistema FIRMS identificó un incremento significativo en la actividad térmica, la cual se correlacionó con niveles elevados de Índice de Radiación de Térmica (FRP).

Entre los meses de agosto y octubre de 2023 se registraron anomalías térmicas moderadas, seguidas por un notable aumento en los valores durante noviembre y diciembre del mismo año. Durante los meses de enero y marzo de 2024, se observó una disminución relativa en la presencia de anomalías térmicas. Sin embargo, a partir de abril y hasta agosto de 2024, se volvieron a detectar anomalías con valores significativos, alcanzando picos destacados en el mes de abril.

La existencia de anomalías térmicas importantes sugiere la persistencia de material con altas temperaturas en la superficie del volcán, posiblemente vinculado a la formación de un domo de lava o a una actividad fumarólica intensa. La integración de diversas fuentes de datos térmicos ofrece una perspectiva completa de la actividad volcánica en la superficie, mostrando que el volcán Sabancaya mantuvo una actividad considerable y cambiante a lo largo de todo el periodo estudiado. Se observaron períodos de aumento en la actividad que podrían estar relacionados con modificaciones en su comportamiento eruptivo.

4.- DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Evolución temporal de la actividad según análisis multiparamétrico

Los datos de monitoreo recopilados entre agosto de 2023 y agosto de 2024 revelan una dinámica compleja y fluctuante del volcán Sabancaya. La Figura 14 muestra correlaciones significativas entre los diversos indicadores de la actividad volcánica.

4.1.1 Sismicidad

La actividad sísmica, estuvo caracterizada por sismos de tipo LP y explosiones diarias, junto con su energía asociada (Figura 14a), que en ocasiones se intensificaron en número y energía. Estos se observaron principalmente desde noviembre de 2023 hasta febrero de 2024, y nuevamente desde finales de junio hasta agosto de 2024. La curva de energía sísmica total diaria (representada por una línea negra) presenta picos que coinciden con estos períodos de mayor actividad. Estudios recientes (Coppola et al., 2022; Machacca et al., 2023; Centeno et al., 2023) han relacionado directamente las variaciones significativas en la energía sísmica de las explosiones y la sismicidad LP con la formación de domos de lava en el cráter del Sabancaya.

4.1.2 RSAM

La curva de RSAM evidencia cambios significativos en agosto de 2023, seguidos por fluctuaciones sostenidas durante septiembre y octubre de 2023, así como de febrero a junio de 2024 (Figura 14b). Estas variaciones están estrechamente vinculadas con la actividad de tipo tremor volcánico. En el caso específico del Sabancaya, la ausencia de una correlación directa entre el tremor y la formación del domo de lava

sugiere un sistema complejo donde diversos procesos ocurren simultáneamente a diferentes profundidades. Es posible que la extrusión del domo se produzca de manera relativamente "silenciosa" en términos de tremor, mientras que otras actividades en el sistema, como el movimiento de fluidos en niveles más profundos, podrían ser las principales fuentes de este fenómeno sísmico.

4.1.3 Deformación del terreno

La deformación del terreno, monitoreada por la estación GNSS SB01, mostró una tendencia general ascendente, con fluctuaciones que se correlacionaron con los períodos de mayor actividad sísmica (Figura 14c). Este patrón sugiere episodios de intrusión magmática o presurización del sistema hidrotermal. Los datos de interferometría DInSAR corroboraron esta tendencia, revelando una inflación centrada en el sector noroeste del volcán.

4.1.4 Evolución del domo de lava

A través del análisis de imágenes de radar TerraSAR-X se identificaron tres fases principales de crecimiento del domo de lava: 1) la primera, desde finales de noviembre de 2023 hasta marzo de 2024, donde el nivel del domo se elevó aproximadamente 11 m; 2) la segunda, caracterizada por una fase de destrucción parcial entre abril y mayo de 2024; y 3) la tercera, marcada por un nuevo crecimiento significativo en julio de 2024, con una elevación de 34 m respecto a la fase anterior. Estos cambios en la morfología del domo coincidieron con períodos de oscilación entre inflación y deflación detectados por el GNSS, así como con incrementos en la actividad sísmica y en las emisiones de gases y cenizas (Figura 14d).

4.1.5 Anomalías térmicas

Las anomalías térmicas detectadas por satélite corroboraron la actividad superficial del volcán. Se observaron picos de actividad térmica que generalmente coincidieron con los períodos de mayor actividad sísmica y explosiva, particularmente notables desde abril hasta agosto de 2024 (Figura 14e). Estos datos térmicos son consistentes con la presencia y evolución del domo de lava en el cráter.

4.1.6 Emisiones volcánicas

Las emisiones volcánicas mostraron una variabilidad considerable durante el período de estudio. Las columnas de ceniza alcanzaron alturas entre 1500 y 3000 m, con picos ocasionales que superaron los 3500 m de altura (Figura 14f). Los flujos de SO₂ también presentaron fluctuaciones significativas, con un promedio de 807 toneladas por día y máximos que superaron las 4000 toneladas diarias. Estos episodios de desgasificación intensa coincidieron con los períodos de mayor actividad sísmica y crecimiento del domo, lo que sugiere una conexión directa entre el ascenso de magma fresco y la liberación de gases.

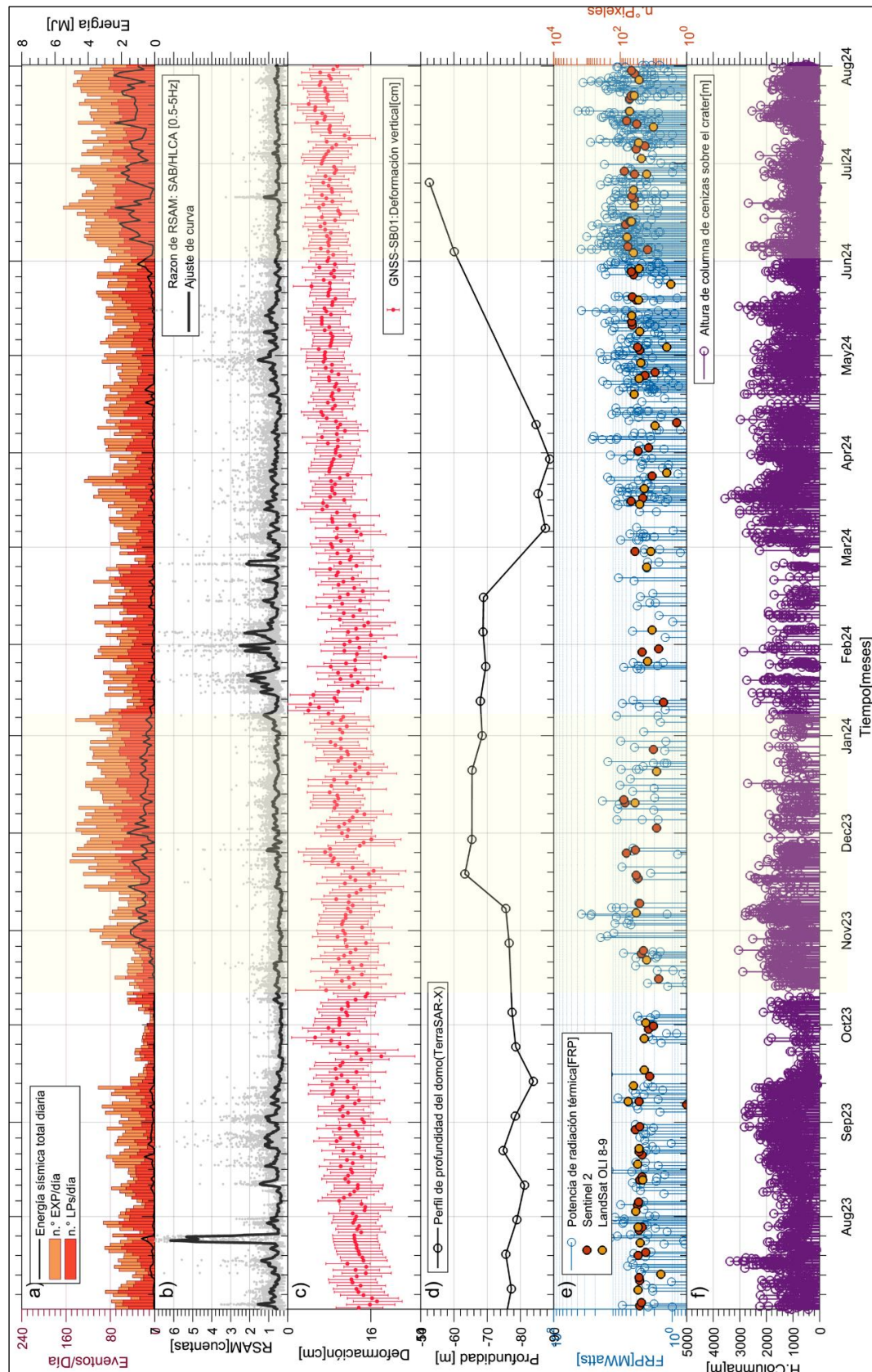


Figura 17.- Correlación entre la sismicidad (A, B y C), deformación de la superficie del volcán(D), altura de las columnas de gases y ceniza y (E) anomalías térmicas FIRMS (F). La franja amarilla, resalta el proceso de extrusión de domo de lava.

4.2 Los datos multiparamétricos y sus implicaciones sobre la dinámica eruptiva

La integración y evaluación de los datos multiparamétricos sugiere que el sistema magmático del Sabancaya durante el período de agosto 2023 a agosto 2024, se mantiene activo y variable, caracterizado por ciclos de presurización y despresurización. Los períodos de mayor actividad volcánica fueron evidenciados por el aumento simultáneo de la sismicidad, deformación de la superficie del terreno, presencia de importantes anomalías térmicas y altura considerable de las columnas de ceniza, indicando episodios continuos de ascenso de magma y desgasificación desde niveles más profundos.

Un aspecto crucial de esta dinámica fue la formación y evolución de domos de lava en el cráter. En efecto, a través de los datos de monitoreo se identificaron tres fases principales de crecimiento del domo: 1) una fase de diciembre 2023 a marzo 2024, en la cual el nivel del domo se elevó aproximadamente 11 m; 2) una fase de destrucción parcial entre abril y mayo 2024; y 3) una nueva fase de crecimiento significativo en julio 2024, con una elevación de 34 m respecto a la fase anterior. Estos cambios en la morfología del domo coincidieron con períodos de oscilación entre inflación y deflación detectados por el GNSS, así como con aumentos en la actividad sísmica y en las emisiones de gases y cenizas.

La evolución e incremento de la energía de los eventos sísmicos de Largo Periodo (LP) y Explosiones (EX) mostró una correlación directa con el crecimiento del domo. Este patrón sísmico sugiere un proceso continuo de ascenso y extrusión de magma, acompañado de desgasificación y eventos explosivos asociados a la liberación de presión.

La deformación del sector norte del Sabancaya, observada mediante la técnica DInSAR, refuerza esta interpretación, mostrando cambios sutiles pero

significativos que coincidieron con los períodos de crecimiento del domo. La inflación vertical de 1.5 ± 0.3 cm/año, aunque menor que en años anteriores, presentó fluctuaciones que se correlacionaron con los períodos de mayor actividad sísmica.

La persistencia de anomalías térmicas, con valores de VRP entre 4 MW y 30 MW y picos que alcanzaron los 55 MW, confirmó la presencia continua de material caliente en la superficie. Las fluctuaciones en la altura de las columnas de ceniza, que frecuentemente alcanzaron entre 1500 y 3000 m sobre el cráter, con picos ocasionales superando los 3500 m, reflejan variaciones en la presión del sistema magmático relacionadas con la energía de las explosiones. Los flujos de SO₂, con un promedio de 807 toneladas por día y picos que superaron las 4000 toneladas diarias, indican episodios de desgasificación intensa, coincidiendo con períodos de mayor actividad sísmica y crecimiento del domo.

La formación y evolución de domos de lava sugiere que el sistema magmático del Sabancaya mantiene su capacidad de alimentar cuerpos de magma, pero con variaciones en la tasa de ascenso y extrusión. La presencia de estos domos tiene implicaciones importantes para la evaluación de riesgos. Aunque de tamaño variable, siguen representando una fuente potencial de peligros, incluyendo la posibilidad de colapsos parciales que podrían generar flujos piroclásticos incandescentes o un aumento repentino en la actividad explosiva.

En resumen, la actividad del Sabancaya durante este período refleja un comportamiento dinámico complejo, con ciclos de crecimiento y destrucción de domos de lava que requieren un monitoreo continuo y multidisciplinario para la detección temprana de cambios significativos en su comportamiento eruptivo.

5.- PRONÓSTICO Y ESCENARIOS FUTUROS

El monitoreo multidisciplinario del volcán Sabancaya entre agosto 2023 y agosto 2024 proporciona una base sólida para evaluar su comportamiento futuro. El análisis de datos de la sismicidad, deformación del terreno, emisiones de SO_2 , altura de columnas de ceniza y anomalías térmicas permite proyectar escenarios eruptivos a corto y mediano plazo. Estas proyecciones se fundamentan en la dinámica observada, la formación intermitente de domos de lava y los ciclos de presurización-despresurización del sistema magmático (Coppola et al., 2022; Machacca et al., 2023; Centeno et al., 2023).

El escenario más probable anticipa la continuación de la actividad eruptiva actual, caracterizada por la ocurrencia de explosiones vulcanianas moderadas (IEV 1-2) y emisiones de ceniza en forma de columnas eruptivas que alcanzan alturas de 1000 a 3500 m sobre el cráter. Este escenario implica el crecimiento de domo de lava, con episodios de destrucción parcial, emisiones persistentes de gases volcánicos, como SO_2 (fluctuantes entre 500 y 4000 toneladas por día), y una actividad sísmica dominada por sismos de tipo LP y explosiones. La deformación del edificio volcánico se mantendría en niveles moderados, reflejando ciclos de presurización del sistema magmático. Este escenario es consistente con el comportamiento observado en volcanes andesíticos con actividad de larga duración, como Merapi en Indonesia o Soufrière Hills en Montserrat (Pallister et al., 2013).

Un escenario menos probable, involucraría un incremento significativo de la actividad volcánica. Este podría manifestarse como un aumento en la frecuencia y magnitud de las explosiones, potencialmente alcanzando Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de 3, un crecimiento acelerado del domo de lava con mayor riesgo de colapsos parciales y generación de flujos piroclásticos, y un incremento notable en las emisiones de gases y en la

deformación del edificio volcánico. Tal escenario podría ser precedido por cambios detectables en los parámetros monitoreados, como un aumento sostenido en la energía sísmica o en las tasas de deformación.

En ambos escenarios, es crucial mantenerse informado y no descuidar las acciones de prevención o mitigación por parte de las autoridades y población asentada en áreas aledañas al volcán Sabancaya. La comunicación efectiva con autoridades y comunidades locales sigue siendo esencial para la mitigación de riesgos, considerando los impactos potenciales por caída de ceniza, flujos piroclásticos y lahares en las áreas circundantes al volcán Sabancaya.

CONCLUSIONES

- El volcán Sabancaya entre agosto 2023 y agosto 2024 mantuvo una actividad eruptiva sostenida, caracterizada por ciclos de presurización y despresurización del sistema magmático. Esto se evidenció en los datos de la sismicidad, deformación, emisiones de gases y cenizas, y anomalías térmicas obtenidos a través del monitoreo volcánico. La formación y evolución de domos de lava en el cráter fue un aspecto central de esta dinámica, con tres fases principales de crecimiento, reflejando un importante aporte de magma y su extrusión en la superficie.
- La actividad sísmica, estuvo dominada por eventos de tipo Largo Período (LP) y explosiones, la cual tuvo una relación directa con el crecimiento de domos de lava observados en el cráter del Sabancaya. Los períodos de mayor actividad sísmica coincidieron con aumentos en la deformación del terreno, emisiones importantes de SO_2 y el registro de anomalías térmicas. Este patrón sugiere un proceso continuo de ascenso de magma, desgaseificación y extrusión de lava en la superficie, con variaciones en la intensidad que reflejan cambios en la presurización del sistema volcánico.
- La deformación del terreno, aunque menos pronunciada que en años anteriores, siguió mostrando una tendencia inflacionaria con fluctuaciones que coincidieron con los períodos de mayor actividad. Las técnicas de monitoreo como GNSS y DInSAR fueron cruciales para detectar estos cambios sutiles, proporcionando información valiosa sobre la dinámica interna del volcán y su relación con la actividad superficial observada, especialmente en lo que respecta a la formación y evolución de los domos de lava.
- La persistencia de anomalías térmicas y emisiones de gases, junto con la variabilidad en la altura de las columnas eruptivas, confirman la naturaleza

dinámica y continua de la actividad del Sabancaya. Estos parámetros, en conjunto asociados a una sismicidad con predominancia de eventos LP y registro de deformación, indican que el volcán mantiene un sistema magmático activo capaz de sostener una actividad eruptiva a largo plazo. La comprensión de esta dinámica es fundamental para la evaluación de riesgos volcánicos y la implementación de estrategias de mitigación efectivas.

- Basándose en el análisis de la actividad observada, se proponen dos escenarios futuros potenciales: el más probable anticipa la continuación de la actividad eruptiva actual con explosiones vulcanianas moderadas (IEV 1-2), mientras que un escenario menos probable pero significativo involucraría un incremento de la actividad volcánica, potencialmente alcanzando un IEV 3. Estos escenarios enfatizan la necesidad de mantener un sistema de monitoreo robusto y por parte de las autoridades e instituciones del SINAGERD continuar con la ejecución de un plan de gestión de riesgos flexible. La comunicación efectiva con autoridades y comunidades locales sigue siendo esencial para la mitigación de riesgos.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda a las autoridades mantener el nivel de alerta volcánica en color naranja y tomar medidas preventivas para mitigar los efectos de la caída de cenizas y proteger la salud pública.
- Es sumamente peligroso acercarse a una distancia menor de 12 km del cráter del volcán. Cualquier intento de aproximación o ascenso al volcán conlleva un riesgo muy elevado para la vida de las personas.
- En caso de que se tenga contacto con la ceniza, se recomienda en lo posible evitarlo. Es importante cubrir la nariz y la boca con paños húmedos o usar mascarillas. Además, se recomienda mantener cerradas las puertas y ventanas de las viviendas para prevenir la entrada de ceniza.
- Se insta a la comunidad a mantenerse informada constantemente acerca de la actividad volcánica del Sabancaya a través del portal web <https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/edicion-especial/2023/sabancaya/>.

GLOSARIO

ASVC: Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya
CVZ: Zona Volcánica Central
CENVUL: Centro Vulcanológico Nacional
DInSAR: Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética
dVT: Eventos Volcano-Tectónicos distales
GNSS: Sistema Global de Navegación por Satélite
GPS: Sistema de Posicionamiento Global
IGP: Instituto Geofísico del Perú
InSAR: Interferometría de Radar de Apertura Sintética
IEV: Índice de Explosividad Volcánica
LP: Eventos sísmicos de Largo Periodo
LOS: Línea de Vista del satélite
MIROVA: Sistema de monitoreo térmico satelital
MODIS: Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada
RSAM: Medición de Amplitud Sísmica en Tiempo Real
SO2: Dióxido de Azufre
TRA: Tremor Armónico
TRE: Tremor Espasmódico
VIIRS: Suite Radiométrica de Imágenes Visible Infrarrojo
VRP: Potencia Radiativa Volcánica

BIBLIOGRAFÍA

- Beck, S. L., Zandt, G., Myers, S. C., Wallace, T. C., Silver, P. G., & Drake, L. (1996). Crustal-thickness variations in the Central Andes. *Geology*, 24(5), 407–410.
- Centeno, R., Vargas, K., Del Carpio Calienes, J. A., Torres, J. L., Lazarte, I., Mamani, J., & Valdivia, D. (2023, September). *Evaluación del comportamiento eruptivo del volcán Sabancaya (mayo 2022 – julio 2023)*. Handle.Net; Instituto Geofísico del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5481>
- Centeno, R., Lazarte, I., Vargas, K., Llerena, J. P., Rivera, M., Del Carpio Calienes, J. A., & Tavera, H. (2022). *Evaluación geofísica de la actividad eruptiva actual del volcán Sabancaya y formación de un domo de lava*. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5227>
- Coppola, D., Valade, S., Masias, P., Laiolo, M., Massimetti, F., Campus, A., Aguilar, R., Anccasi, R., Apaza, F., Ccallata, B., Cigolini, C., Cruz, L. F., Finizola, A., Gonzales, K., Macedo, O., Miranda, R., Ortega, M., Paxi, R., Taipei, E., & Valdivia, D. (2022). Shallow magma convection evidenced by excess degassing and thermal radiation during the dome-forming Sabancaya eruption (2012–2020). *Bulletin of Volcanology*, 84(2), 16.
- Del Carpio, J. A., Rivera, M., Torres, J., Tavera, H., & Puma, N. (2022). Evaluación del peligro volcánico en Perú: una herramienta para la gestión del riesgo de desastres.
- Machacca, R., Lesage, P., Tavera, H., Pesicek, J. D., Caudron, C., Torres, J. L., Puma, N., Vargas, K., Lazarte, I., Rivera, M., & Burgisser, A. (2023). The 2013–2020 seismic activity at Sabancaya Volcano (Peru): Long lasting unrest and eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 435, 107767.
- Pallister, J. S., Schneider, D. J., Griswold, J. P., Keeler, R. H., Burton, W. C., Noyles, C., Newhall, C. G., & Ratdomopurbo, A. (2013). Merapi 2010 eruption—Chronology and extrusion rates monitored with satellite radar and used in eruption forecasting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261, 144–152.
- Vargas Alva, K., Villegas Lanza, J. C., Centeno Quico, R., & Cruz Igme, J. (2023, August). *Deformación en el entorno del volcán Sabancaya y caracterización de la fuente a partir del modelado con datos GNSS y DInSAR del periodo 2014-2021*. Handle.Net; Instituto Geofísico del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5444>

