



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente



# EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD ERUPTIVA DEL VOLCÁN SABANCAYA A PARTIR DE DATOS GEOFÍSICOS Y OBSERVACIONES DE CAMPO

(Abril – Noviembre, 2021)

Informe Técnico N°045-2021/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú  
Diciembre, 2021

## **Instituto Geofísico del Perú**

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

### **Informe Técnico**

Evaluación de la actividad eruptiva del volcán Sabancaya a partir de datos geofísicos y observaciones de campo  
(Abril – noviembre, 2021)

#### **Autores:**

Nino Puma  
Riky Centeno  
Katherine Vargas  
Ivonne Lazarte  
José Luis Torres  
Marco Rivera  
José Del Carpio

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

**EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD ERUPTIVA DEL VOLCÁN  
SABANCAYA A PARTIR DE DATOS GEOFÍSICOS Y  
OBSERVACIONES DE CAMPO**

**(Abril – Noviembre, 2021)**

Lima – Perú  
Diciembre, 2021

## **RESUMEN**

Se evalúa el comportamiento dinámico del volcán Sabancaya para el periodo abril a noviembre de 2021, estando en un nivel de actividad explosiva moderada; sin embargo, fue posible identificar el desarrollo de cuatro episodios caracterizados por el incremento y disminución temporal de las explosiones y la altura de las fumarolas. Asimismo, por el registro variado en número de señales de periodo largo que evidencian el movimiento de magma en el interior del volcán. Estos resultados se corroboran con las variaciones en las anomalías térmicas. Las columnas de gases y cenizas expulsados alcanzaron alturas de hasta 4 km sobre la cima del volcán, siendo luego dispersadas en dirección de los distritos de Achoma, Maca, Lari, Madrigal, Ichupampa, Yanque, Chivay, Coporaque, Tuti y Lluta. En ocasiones, las cenizas también fueron dispersadas en dirección de las localidades de Huambo y Huanca ubicados en dirección oeste, suroeste y sur del volcán. A futuro, el volcán Sabancaya continuaría desarrollando erupciones explosivas de tipo vulcanianas (IEV 2) con la emisión de columnas de gases y cenizas que pueden superar los 3 km de altura. Un escenario menos probable considera, la formación y crecimiento de un nuevo domo de lava en el cráter que podría generar flujos piroclásticos que desbordarían del cráter pudiendo alcanzar distancias menores a 8 km y afectar únicamente terrenos de pastizales y bofedales

## **CONTENIDO**

### **RESUMEN**

#### **1.- INTRODUCCIÓN**

#### **2.- CARACTERÍSTICAS DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA**

##### **2.1.- Monitoreo sísmico**

###### **2.1.1.- Análisis de familias sísmicas**

##### **2.2.- Monitoreo geodésico**

##### **2.3.- Monitoreo visual y satelital**

###### **2.3.1.- Emisión de cenizas**

###### **2.3.2.- Emisiones térmicas**

###### **2.3.3.- Monitoreo satelital**

##### **2.4.- Espesor de la capa de ceniza**

##### **2.5.- Monitoreo geoquímico**

###### **2.5.1.- Flujos de SO<sub>2</sub>**

###### **2.5.2.- Flujos termales**

#### **3.- INTERPRETACION GEOFISICA**

#### **4.- ESCENARIOS ERUPTIVOS FUTUROS**

##### **4.1.- Primer escenario**

##### **4.2.- Segundo escenario**

### **CONCLUSIONES**

### **RECOMENDACIONES**

### **BIBLIOGRAFIA**

## **1.- INTRODUCCIÓN**

El volcán Sabancaya, ubicado a 18 km al sur del valle del Colca (Caylloma, Arequipa) y a 70 km al NO de la ciudad de Arequipa, es el segundo volcán más activo del sur peruano. Desde noviembre de 2016 hasta la actualidad continúa en proceso eruptivo y diariamente viene generando decenas de explosiones volcánicas acompañadas de constantes emisiones de cenizas y gases. Este proceso continuo pone en riesgo alrededor de 20 mil personas que habitan en los distritos de Chivay, Achoma, Cabanaconde, Callalli, Maca, Lari, Madrigal, Ichupampa, Yanque, Coporaque, Tapay, Lluta, Huambo y Huanca.

A lo largo de su actual proceso eruptivo, el volcán Sabancaya ha desarrollado significativas variaciones en su comportamiento dinámico, con periodos de mayor actividad sísmica y procesos de deformación cortical, así como, periodos más explosivos. Asimismo, entre los años 2019 y 2020, se evidenció el emplazamiento de dos domos de lava en la superficie de su cráter, el primero de ellos observado en octubre de 2019 (Del Carpio et al., 2019) y el segundo en noviembre de 2020 (Puma et al., 2020) que, a consecuencia de la propia actividad explosiva, fueron destruyéndose entre diciembre de 2020 y enero de 2021 (Puma et al., 2021).

En el presente informe se analiza la actividad eruptiva y el comportamiento dinámico del volcán Sabancaya durante el periodo de abril a noviembre de 2021, haciendo uso de la información generada por las redes de monitoreo (Figura 1) operadas por el Instituto Geofísico del Perú y su análisis en el Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL). Asimismo, debido al continuo proceso eruptivo del volcán, se realizó una

campana de campo en el mes de septiembre de 2021 para evaluar in situ las áreas afectadas por las cenizas. Finalmente, se detallan los tipos de peligros a los que estuvo expuesta la población del valle del Colca durante el actual proceso eruptivo del volcán Sabancaya y los escenarios futuros a presentarse.

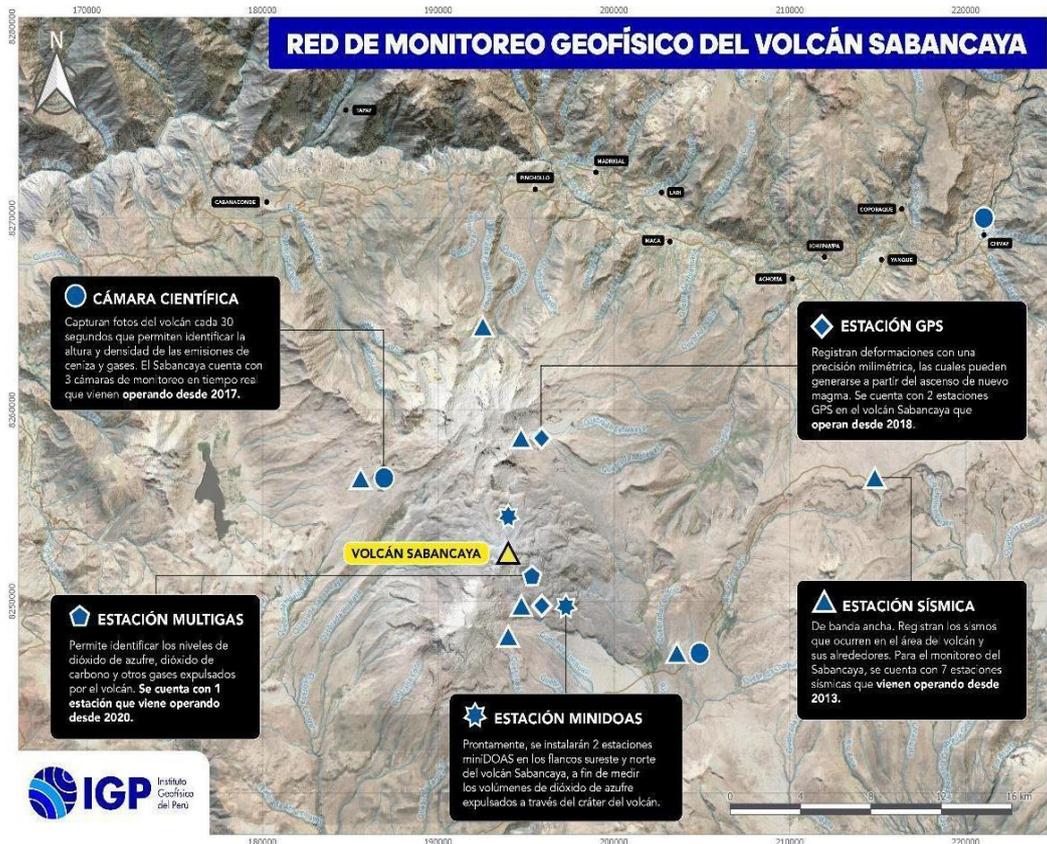


Figura 1.- Red de monitoreo volcánico operada por el IGP en el volcán Sabancaya

## **2.- CARACTERÍSTICAS DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA**

El actual proceso eruptivo del volcán Sabancaya, presenta un comportamiento dinámico activo, con la ocurrencia diaria de explosiones volcánicas y la consecuente emisión de cenizas y gases; así como la construcción y destrucción de domos de lava en la superficie del cráter. A continuación, se detalla el nivel de actividad que ha presentado el volcán Sabancaya durante el periodo abril – noviembre 2021, en base al monitoreo multiparamétrico (sísmico, geodésico, visual, sistemas satelitales y campañas de campo para medidas de concentración del gas SO<sub>2</sub>) que se realiza desde el CENVUL, usando datos provenientes de la Red Geofísica de Volcanes que opera el IGP.

### **2.1.- Monitoreo sísmico**

El análisis temporal de la actividad sísmica ocurrida en el volcán Sabancaya evidencio cuatro episodios con las siguientes características:

**Episodio 1:** Desarrollado entre el 1 de abril y 15 de mayo 2021, en el cual se detectó la ocurrencia promedio de 81 explosiones diarias, siendo 113 explosiones el valor máximo registrado en 24 horas (4 de abril), con energías del orden de 131 Mega Joule (MJ) (Figura 2A). Además, se registraron sismos de tipo Largo Periodo (LP), asociados al movimiento de fluidos volcánicos, con un promedio de 115 eventos por día y con valores de energía por debajo de 20 MJ (Figura 2B). Asimismo, se registró, en promedio, la ocurrencia de 4 sismos Volcano-Tectónico (VT) diarios, asociados a la ruptura de rocas y que se distribuyen en un radio de hasta 9 km desde el cráter del Sabancaya.

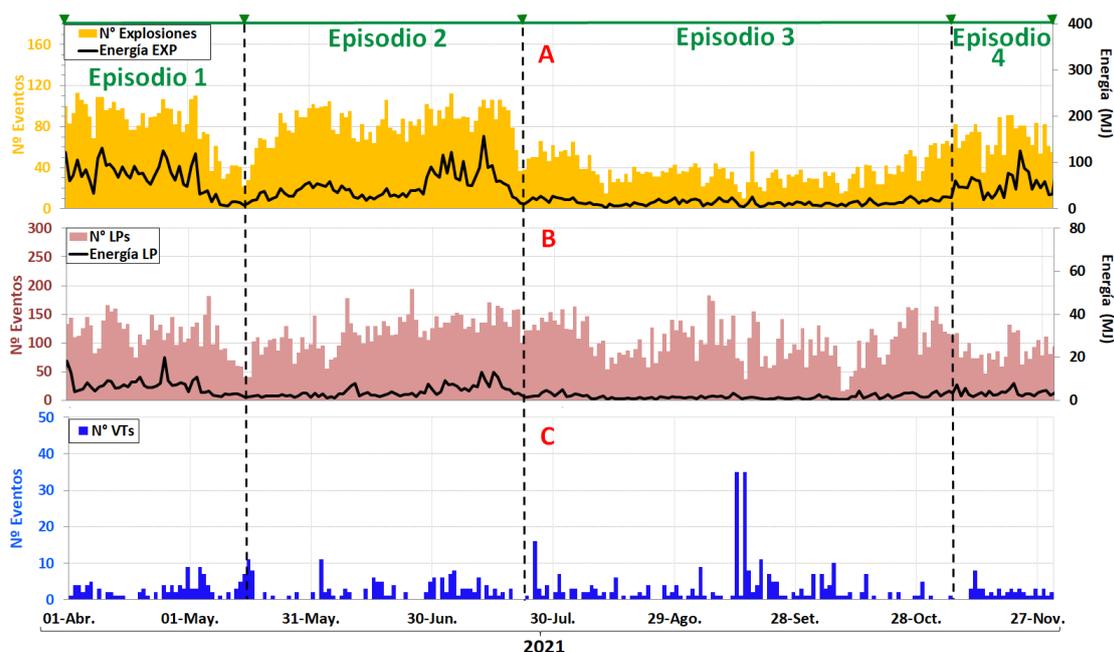


Figura 2.- Estadística de señales sísmicas registradas por la red de monitoreo del IGP en el volcán Sabancaya: sismos de tipo VT (barras de color azul), sismos de tipo LP (barras de color marrón) y explosiones (barras de color amarillo). La línea negra es la energía sísmica registrada en el periodo abril a noviembre de 2021. La línea negra discontinua vertical divide los episodios 1, 2, 3 y 4.

**Episodio 2:** Se desarrolló entre el 16 de mayo al 22 de julio, en el cual se observa un ligero incremento de la actividad explosiva con respecto al episodio anterior. En efecto, en este episodio se registró un promedio de 83 explosiones diarias, con una energía máxima de hasta 157 MJ (Figura 2A). Del mismo modo, se registró un promedio de 120 sismos de tipo Largo Periodo (LP) por día, con un máximo de 194 eventos (25 de junio) con energías menores a 13 MJ (Figura 2B). Por otro lado, los sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) han presentado la ocurrencia de 3 eventos por día, similar al periodo anterior (Figura 2C).

**Episodio 3:** Desarrollada entre el 23 de julio al 4 de noviembre, en el cual la actividad explosiva disminuyó en número y energía, observándose en promedio 37 explosiones por día con energías que alcanzaron hasta 27 MJ (Figura 2A). Las señales sísmicas LP ocurrieron en un número de 104 eventos por día con energías

inferiores a 4 MJ. Por otro lado, se registró un promedio de 4 sismos de tipo VT por día (similar al periodo anterior).

**Episodio 4.** Se desarrolló entre el 5 al 30 de noviembre, en el cual la actividad explosiva muestra un ligero incremento respecto al episodio 3. Se registraron en promedio 70 explosiones por día y un máximo de 91 explosiones, con energías de hasta 125 MJ (22 de noviembre). Asimismo, se observaron, en promedio, 88 sismos de tipo LP por día, lo que representa una disminución del 15% con respecto al periodo anterior. Por su parte, los sismos VT registraron 2 eventos diarios, en promedio. Dicho episodio continúa en progreso.

#### **2.1.1. Análisis de familias sísmicas**

El análisis de secuencias de sismos repetitivos o también conocido como familias sísmicas (Multiplets), es importante porque permite pronosticar erupciones volcánicas. Asimismo, ayuda a comprender e interpretar ciertos procesos asociados con el crecimiento y colapso de domos de lava, que pueden estar ligados o no a la actividad eruptiva (White et al., 1998; Umakoshi et al., 2008; DeShon et al., 2010; Varley et al., 2010; Thelen et al., 2011; Ketner y Power, 2013; Rodgers et al., 2016; Bell et al., 2017). Los multiplets son señales sísmicas bastante parecidas entre sí; lo cual sugiere un mecanismo fuente muy similar o próxima a su origen.

En ambientes volcánicos, es común observar este tipo de actividad. En el caso del volcán Sabancaya, en el periodo de análisis se han observado secuencias de sismos repetitivos de baja frecuencia (LF, por sus siglas en inglés) asociadas con la dinámica del

magma (gas volcánico, ceniza y vapor de agua). Así como, esporádicos episodios de crecimiento de domos endógenos en superficie. Por otro lado, la sismicidad de tipo alta frecuencia está directamente relacionada con la activación de fallas o fracturas preexistentes próximas al complejo volcánico Ampato-Sabancaya y al volcán Hualca Hualca.

Para este análisis, se utilizó el software REDPy (Repeating Earthquake Detector; Hotovec-Ellis y Jeffries, 2016) y las formas de onda registradas en la componente vertical de la estación sísmica “SAB”; mientras que, para la segmentación y detección de eventos se empleó el algoritmo STA/LTA recursivo con una ventana mínima de 0.8 segundos y una máxima de 30 segundos y con un umbral de activación de 3 y 0.5 de corte. El coeficiente de correlación empleado fue de 0.85% de similitud y un número mínimo por familia de 19 eventos.

Entre abril y noviembre del 2021 (Figura 3), se observan 113 secuencias de familias sísmicas: 102 de alta frecuencia (HF) y 11 de baja frecuencia (LF), esta última se mantiene durante casi todo el periodo de estudio, la cual está directamente relacionada a la actividad volcánica del Sabancaya. En cambio, la tasa de ocurrencia de familias sísmicas HF, sugiere la formación de 7 agrupaciones de sismos, de los cuales 4 son los más importantes (ES1, ES2, ES3, ES4): ES1 ocurrido el 17 de abril, ES2 el 4 de setiembre, ES3 el 19 de setiembre y ES4 ocurrido el 8 de octubre del 2021. Todas estas familias están asociadas a la reactivación de fallas tectónicas del sistema Huambo – Cabanaconde.

## 2.2.- Monitoreo geodésico

Para cuantificar la deformación de la estructura del volcán Sabancaya asociada a la actividad volcánica, se analizó datos satelitales DInSAR y datos provenientes de la estación GNSS SB01, ubicada a 6 km al norte del volcán. Ambas técnicas permiten evaluar la deformación asociada a una fuente principal ubicada entre 12 y 15 km al sur del volcán Hualca Hualca, tal como ha sido propuesto anteriormente por MacQueen et al. (2020) y Boixart et al. (2020).

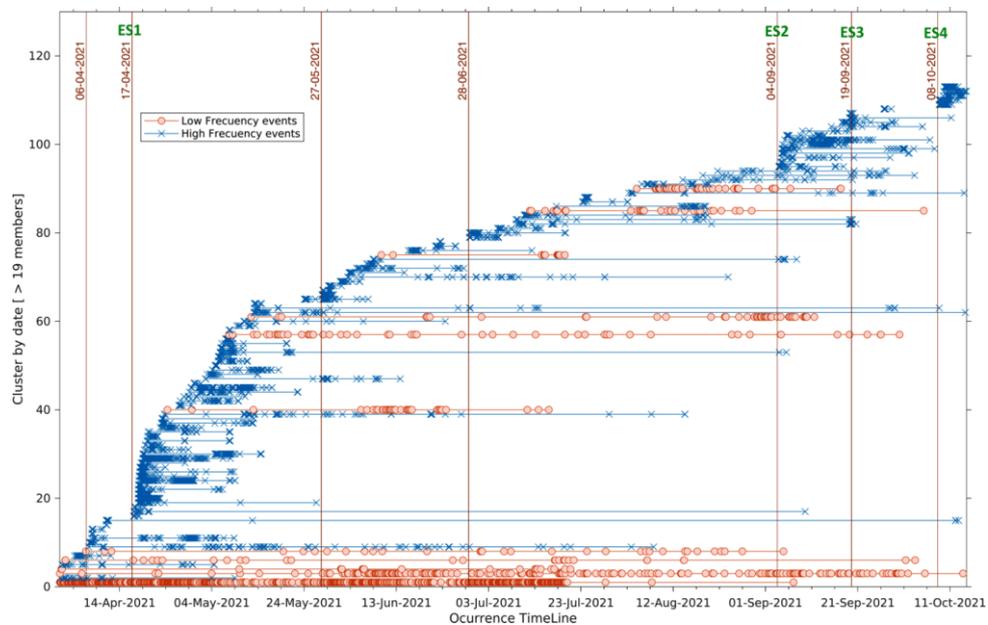


Figura 3.- Familias sísmicas durante los meses de abril y noviembre de 2021. Las líneas verticales de color rojo identifican la formación de familias sísmicas asociadas al emplazamiento de material volcánico en el cráter y la reactivación de diversas fallas tectónicas del sistema Huambo - Cabanaconde.

Los mapas de deformación obtenidos con el método DINSAR evidencian la deformación asociada únicamente a la reactivación de fallas tectónicas del sistema Huambo - Cabanaconde ubicadas al norte del volcán Sabancaya (Figura 4, líneas de color rosado). Estas fallas generaron una crisis sísmica que termino con la ocurrencia de un sismo de magnitud M5.5 (Tavera et al., 2021) y cuyos bloques experimentaron desplazamientos horizontales (distinto color en la pasada ascendente y descendente), con

valores máximos de ~5 cm en LOS. En la estación GNSS SB01, para el mismo periodo de los interferogramas (septiembre a octubre de 2021), se ha observado una inflación de ~1.0 cm (Figura 4d, flecha rosada) y una deformación hacia el SSE de ~2.2 cm (Figura 4d, flecha morada).

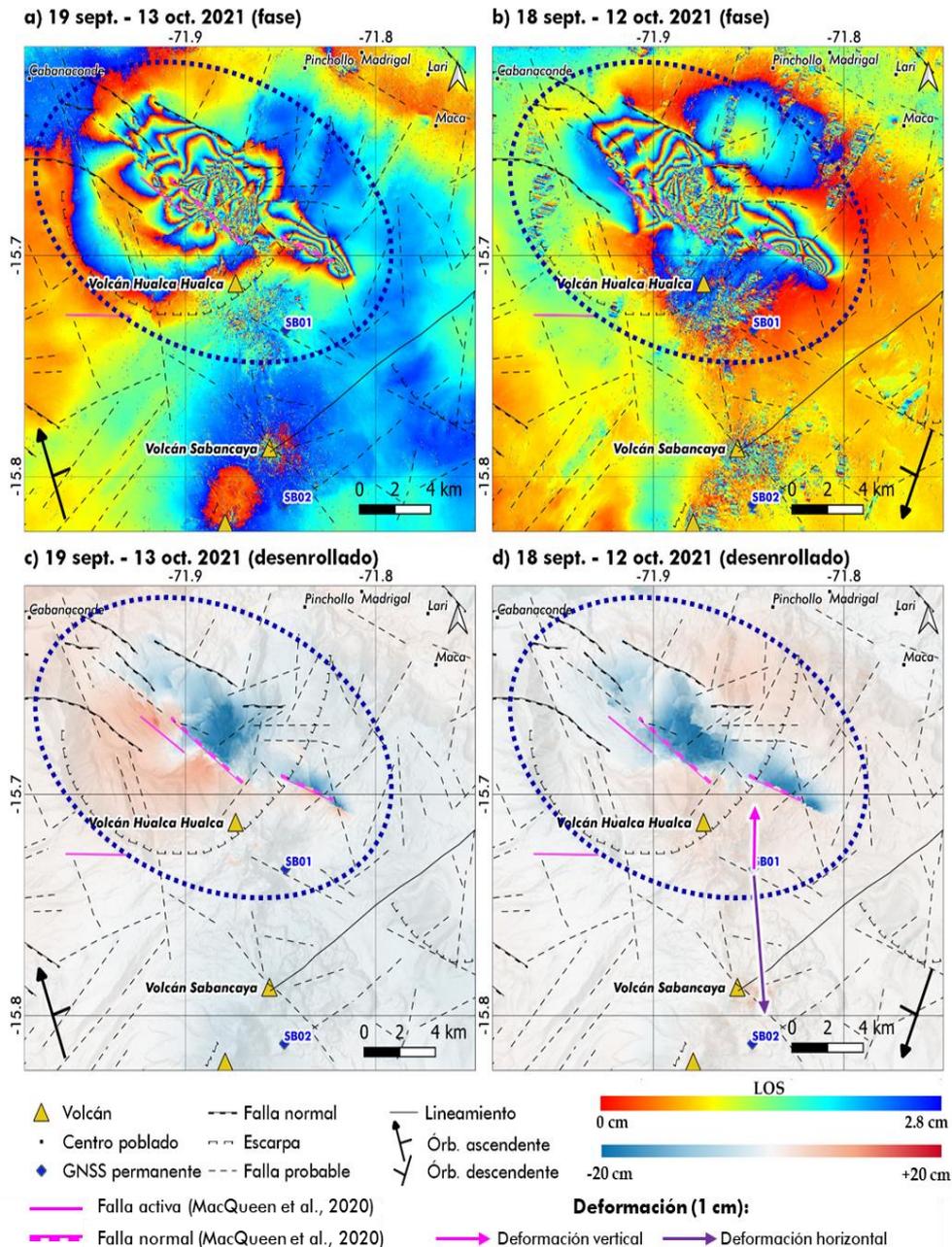


Figura 4.- a) Interferograma con imágenes de radar en órbita ascendente de septiembre y octubre de 2021, b) interferograma con imágenes del mismo periodo en órbita descendente, c) y d) desenrollado de fase de interferogramas a y b respectivamente. Las flechas de color rosado y morado indican la deformación vertical y horizontal registrada en la estación GNSS SB01 (ubicada a 6 km al norte del Sabancaya) en el mismo periodo de los interferogramas.

Los datos de deformación de la estación GNSS SB01 fueron correlacionados con la frecuencia de eventos sísmicos ocurridos en su entorno, lo cual permitió identificar cuatro episodios de deformación cortical (Figura 5), siendo sus características las siguientes:

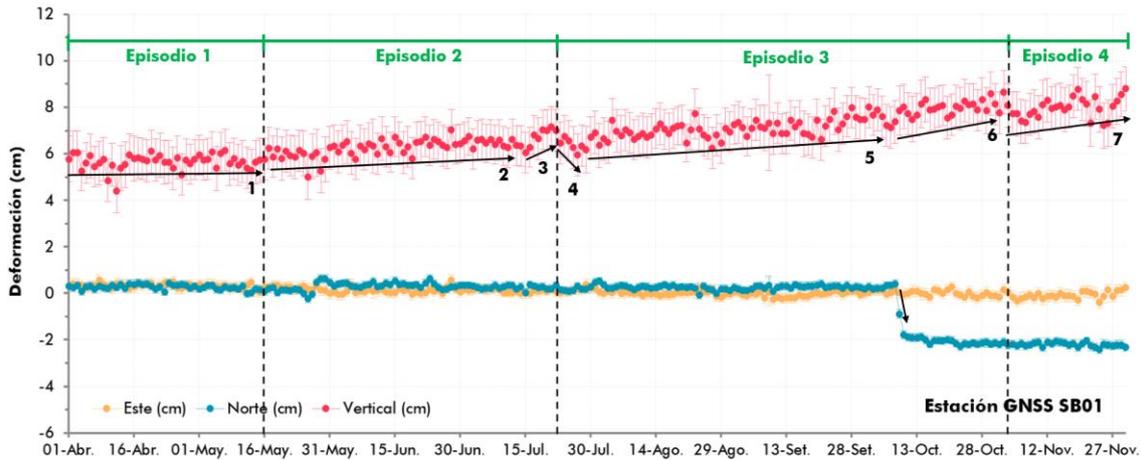


Figura 5.- Series de tiempo de la estación GNSS SB01 para las componentes este (punto naranja), norte (punto verde) y vertical (punto rojo) registradas entre el 1 de abril y el 30 de noviembre de 2021. Las líneas discontinuas de color negro indican los episodios de actividad definidas para este periodo de tiempo. Las flechas indican periodos de incremento o disminución de la deformación.

**Episodio 1:** Desarrollado entre el 1 de abril y 15 de mayo, en el cual se observa una mínima inflación estimada en 0.1 cm/mes (Figura 5, flecha 1).

**Episodio 2:** Se desarrolló entre el 16 de mayo al 22 de julio, en la cual se observa un incremento en la inflación a una tasa de 0.2 cm/mes (Figura 6, flecha 2). A finales de este episodio, entre el 15 al 21 de julio de 2021, la inflación aumentó considerablemente a 0.1 cm/día (Figura 5, flecha 3).

**Episodio 3:** Desarrollada entre el 23 de julio y el 4 de noviembre. Al inicio de este episodio, entre el 22 al 27 de julio, se observa una deflación o hundimiento de -0.2 cm/día (Figura 5, flecha 4). Posterior a ello se registra una inflación con una

velocidad ligeramente mayor que la registrada durante los episodios 1 y 2 con una tasa de 0.3 cm/mes (Figura 5, Flecha 5). Seguidamente, se observa un incremento abrupto de la velocidad de inflación a una tasa de 0.9 cm/mes y una deformación negativa de la componente norte de ~2.2 cm (hacia el sur) justo después del 8 de octubre de 2021, fecha en la que inicia la detección de una agrupación de sismos cercanos a la localidad de Pinchollo (Figura 5, Flecha 6), por lo cual este desplazamiento estaría asociado a la actividad de las fallas activas.

**Episodio 4:** Se desarrolla entre el 5 al 30 de noviembre, continúa la inflación con una velocidad de 0.7 cm/mes, la cual fue mayor a la registrada previa al enjambre de sismos en Pinchollo, pero menor a la registrada durante el enjambre (Figura 5, Flecha 7).

### **2.3.- Monitoreo visual y satelital**

El monitoreo visual y satelital considera el seguimiento de las cenizas expulsadas por el volcán, así como la aparición de nuevas zonas con fumarolas, cuerpos de lava, aumento de temperatura en fuentes termales, la aparición de puntos calientes o anomalías térmicas, entre otros parámetros.

#### **2.3.1.- Emisión de cenizas**

La actual actividad eruptiva del volcán Sabancaya viene siendo observada y registrada por tres cámaras de vigilancia permanente instaladas en los sectores noreste

(Chivay), sureste (Cajamarca) y noroeste (Mucurcca) del volcán Sabancaya. Durante el periodo de análisis, la emisión de cenizas presento las siguientes características:

- Entre el 1 de abril y el 22 de julio, se visualizó mayor cantidad de explosiones volcánicas que generaron columnas de gases y cenizas que, en promedio, alcanzaron hasta 2000 m de altura sobre la cima del volcán Sabancaya (Figura 6).
- Posteriormente, a partir del 23 de julio y hasta finales de noviembre, las explosiones y emisiones de cenizas disminuyeron en número, pero se incrementaron en altura. La columna de gases alcanzo alturas de hasta 4 km sobre el cráter y elevaciones promedio de 3 km sobre la cima del volcán (Figura 6).
- Se identificó días en los cuales las columnas de gases y cenizas alcanzaron alturas de hasta 4 km sobre la cima del volcán. Esto ocurrió el 12 de septiembre, el 1 de octubre y el 23 de noviembre de 2021.

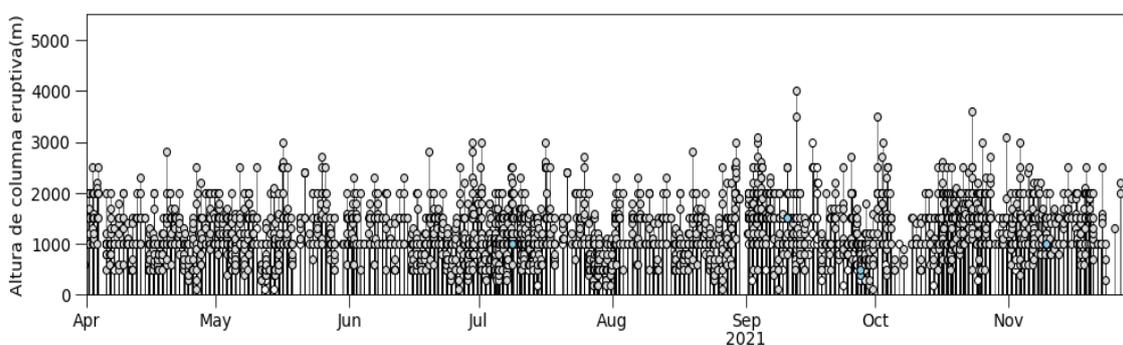


Figura 6.- Alturas de las columnas eruptivas o gases debido al proceso eruptivo del volcán Sabancaya para el periodo entre abril y noviembre de 2021

Por otro lado, la dirección predominante de la dispersión de cenizas, observada entre abril y noviembre, fue hacia el este, norte y noreste del volcán (Figura 7). En estas direcciones las cenizas alcanzaron distancias de hasta 30 km desde el cráter afectando a las localidades de Achoma, Maca, Lari, Madrigal, Ichupampa, Yanque, Chivay, Coporaque y Tuti. Durante los meses de septiembre y octubre, las cenizas también fueron

dispersadas a más de 42 km de distancia en dirección oeste, suroeste y sur del volcán Sabancaya; teniendo reportes de caídas de ceniza en las localidades de Lluta, Huambo y Huanca.

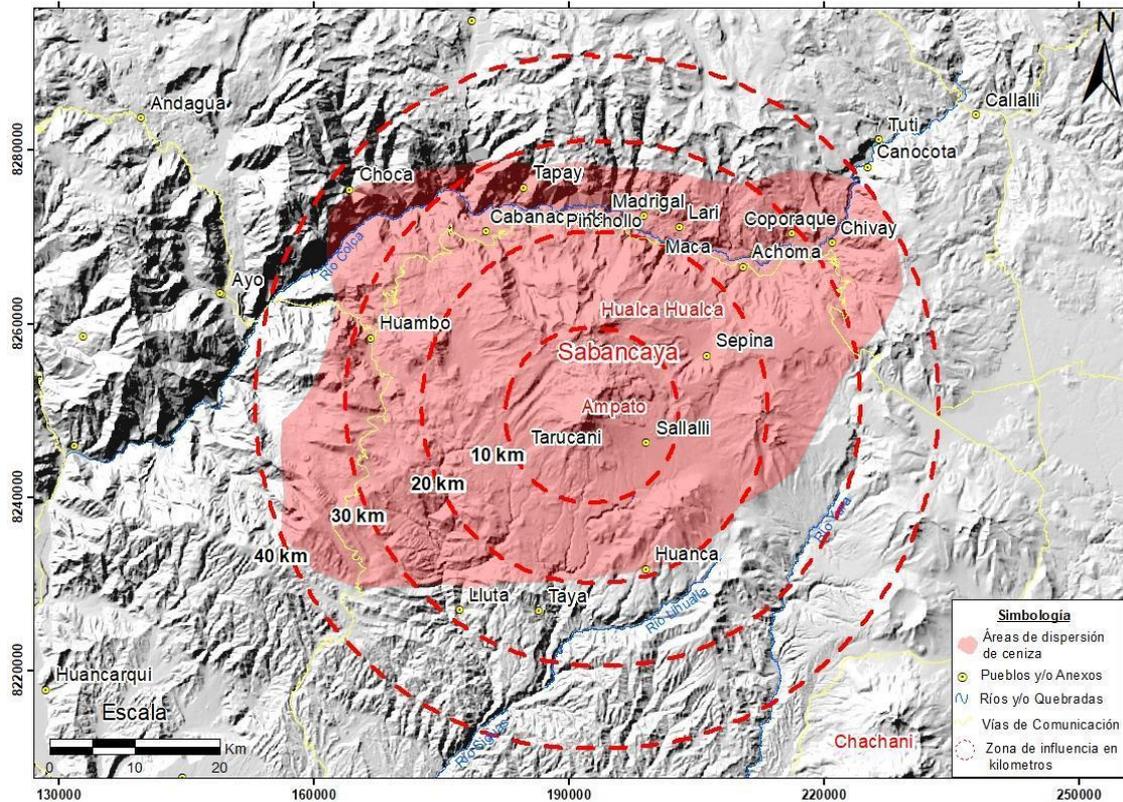


Figura 7.- Zona de afectación por caída de cenizas del volcán Sabancaya para los meses de abril a noviembre de 2021 (área de color rojo). Los círculos con líneas discontinuas indican radios de cada 10 km des del cráter del volcán.

### 2.3.2. Emisiones térmicas

A medida que el magma asciende hacia la superficie, el flujo de calor en el cráter de un volcán aumenta, lo que se traduce en el incremento de emisiones de los gases, incremento de temperatura en los gases, la aparición de nuevos focos de fumarolas, nuevos de cuerpos de lava, aumento de temperatura en las fuentes termales, derretimiento de nieve y hielo, etc. El monitoreo térmico realizado tiene como finalidad caracterizar las fuentes de calor visibles en la superficie del volcán, las que pueden variar de acuerdo al

estado o nivel de la actividad volcánica. Para ello, se utiliza una cámara FLIR, equipada con lentes de  $f=83.4\text{mm}$ ,  $f=36\text{ mm}$  y  $f=21.2\text{ mm}$ , las cuales presentan ángulo de visión de  $12^\circ$ ,  $28^\circ$  y  $45^\circ$ , respectivamente (Figura 8).



*Figura 8.- Cámara FLIR instalada al noreste del volcán Sabancaya para la observación de emisiones térmicas.*

Los datos sobre emisiones térmicas para la zona norte del volcán Sabancaya fueron adquiridos el día 26 de septiembre, utilizando una cámara FLIR instalada a 4.7 km al noreste del volcán (Figura 9). Las imágenes fueron adquiridas de manera automática cada 10 segundos y ellas muestran que la temperatura de los productos expulsados desde el cráter del volcán superó los  $160\text{ }^\circ\text{C}$  (Figura 9).

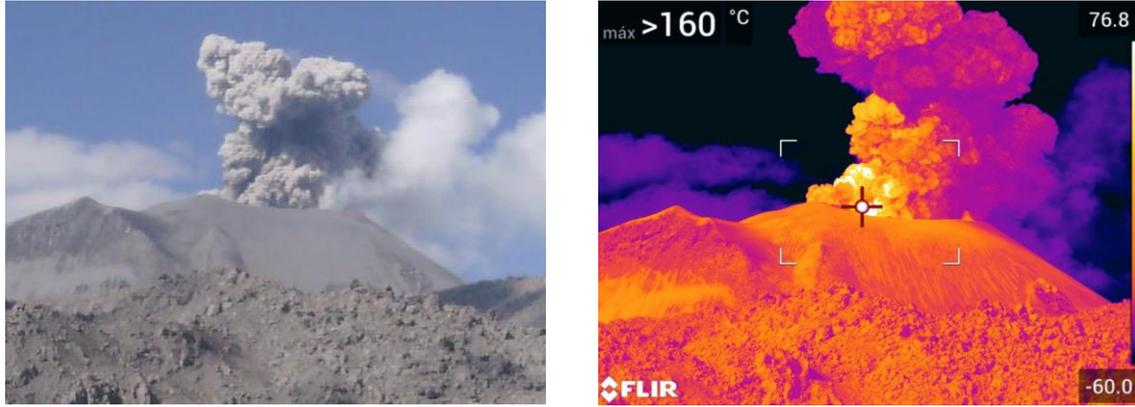


Figura 9. Imágenes en el espectro visible (derecha) y térmico (izquierda) adquiridas el 26 de septiembre desde la zona noreste del volcán Sabancaya. El puntero señala la temperatura máxima de la imagen térmica ( $T^{\circ} > 160\text{ C}^{\circ}$ ).

### 2.3.3.- Monitoreo Satelital

Para realizar el monitoreo satelital en el volcán Sabancaya, se ha considerado el sistema MIROVA para el seguimiento de puntos calientes; las imágenes de radar TerraSAR-X para observar la morfología del cráter y las imágenes Sentinel S-2 y WorldView para observar las anomalías térmicas.

**Sistema MIROVA:** Respecto al seguimiento de puntos calientes o anomalías térmicas a nivel del cráter del volcán Sabancaya, el sistema satelital MIROVA (Observación infrarroja media de la actividad volcánica) identificó la presencia de anomalías térmicas con valores menores de 95 MegaWatt MW (Figura 10), asociados a la presencia cuerpos de lava visible en la superficie del cráter del volcán.

**Imágenes de radar TerraSAR-X:** El análisis multitemporal de la intensidad de imágenes de radar TerraSAR-X ha permitido disponer de una secuencia de imágenes del cráter del volcán Sabancaya para el periodo comprendido entre abril y noviembre de 2021 (Figura 11). Este tipo de imágenes satelitales de radar penetra

las nubes y columnas eruptivas, además es independiente de las condiciones atmosféricas y de la emisión de materiales volcánicos, lo que permite apreciar las condiciones morfológicas de la superficie del volcán.

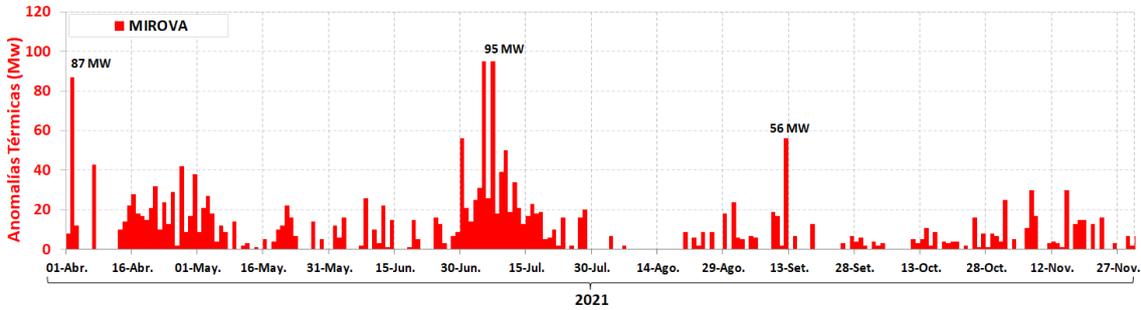


Figura 10.- Serie de tiempo de las anomalías térmicas detectadas por el sistema MIROVA en el volcán Sabancaya durante el periodo abril a noviembre de 2021.

En las imágenes TerraSAR-X (Figura 11), se observan cambios en la morfología del cráter, principalmente en el sector norte, zona donde se localiza el domo de lava reciente. En efecto, durante el periodo de análisis se ha observado cambios considerables del sector noreste del cráter, como los de fechas 29 de junio y 14 de septiembre, lo que indicaría la acumulación de lava joven en poco volumen; sin embargo, no hay evidencias concluyentes de la formación de un nuevo domo de lava.

**Imágenes Sentinel S-2 y WorldView:** Las imágenes satelitales Sentinel-2 del 19 de abril al 26 de octubre, muestran la presencia de anomalías térmicas que ocupan la misma área en donde se observan cambios morfológicos. Estas anomalías se deberían a la presencia de orificios o cavidades con presencia de lava (Figura 12). Durante los cuatro episodios identificados anteriormente, correlacionados con la presencia de anomalías térmicas, se observa lo siguiente:

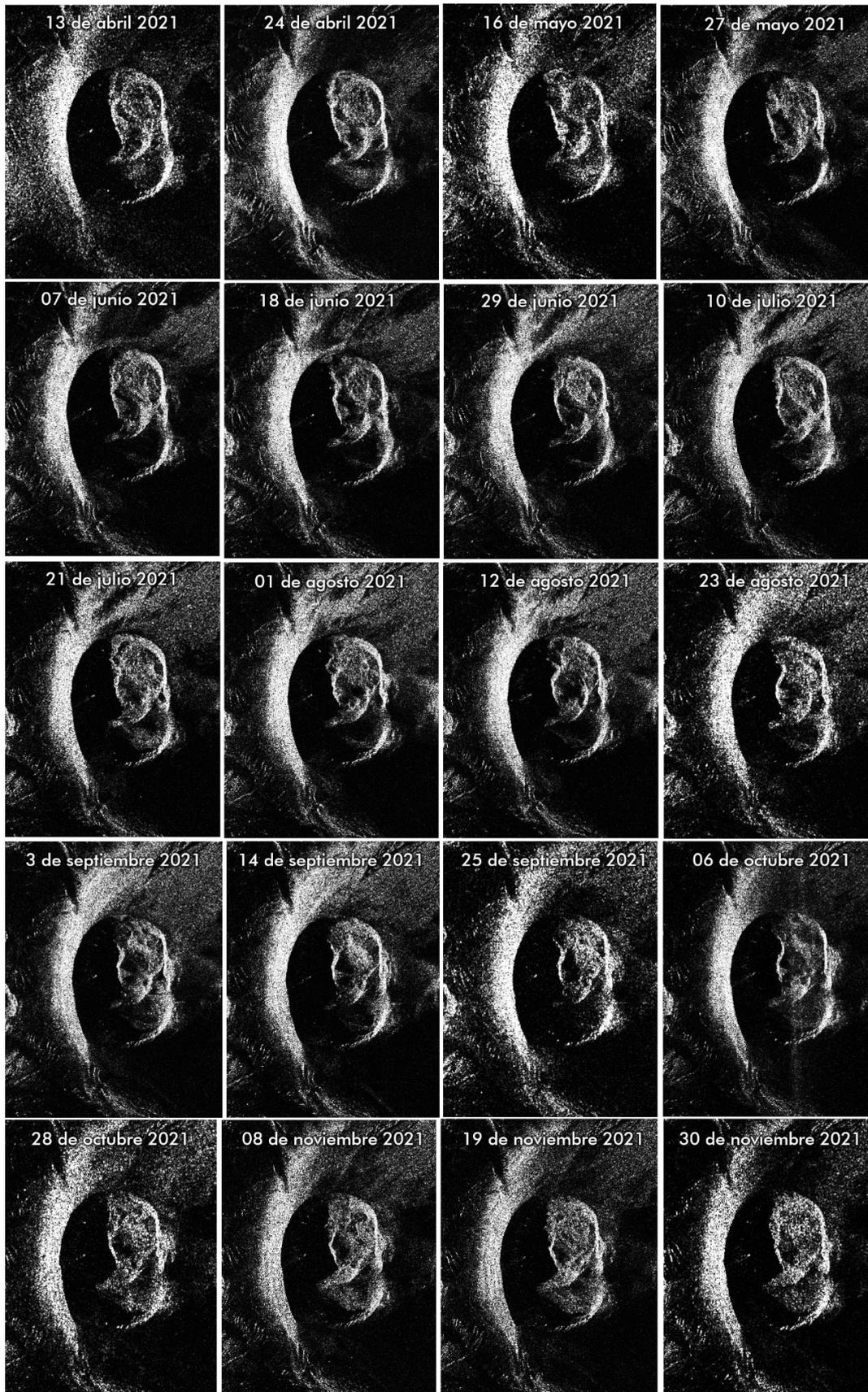


Figura 11.- Secuencia de imágenes TerraSAR-X del cráter del volcán Sabancaya para el periodo de abril a noviembre de 2021.

En las imágenes TerraSAR-X (Figura 11), se observan cambios en la morfología del cráter, principalmente en el sector norte, zona donde se localiza el domo de lava reciente. En efecto, durante el periodo de análisis se ha observado cambios considerables del sector noreste del cráter, como los de fechas 29 de junio y 14 de septiembre, lo que indicaría la acumulación de lava joven en poco volumen; sin embargo, no hay evidencias concluyentes de la formación de un nuevo domo de lava.

**Imágenes Sentinel S-2 y WorldView:** Las imágenes satelitales Sentinel-2 del 19 de abril al 26 de octubre, muestran la presencia de anomalías térmicas que ocupan la misma área en donde se observan cambios morfológicos. Estas anomalías se deberían a la presencia de orificios o cavidades con presencia de lava (Figura 12). Durante los cuatro episodios identificados anteriormente, correlacionados con la presencia de anomalías térmicas, se observa lo siguiente:

- Episodio 1: las anomalías ocupan el sector norte del cráter.
- Episodio 2: las anomalías persisten en el sector norte, pero ocupan un área más extensa.
- Episodio 3: disminución considerable del área que ocupaban las anomalías térmicas, presentándose únicamente sobre zonas puntuales del cráter.
- Episodio 4: las anomalías persisten en el sector norte, ocupando la misma área en donde se observan cambios morfológicos con las imágenes TerraSAR-X.

Por otro lado, en la imagen WorldView del 19 de octubre (Figura 13), no se observa ningún cambio significativo durante el último mes, ya que los ventos u orificios

observados en el 2020 continúan activos. Además, el cuerpo de lava permanece en el sector norte del cráter.

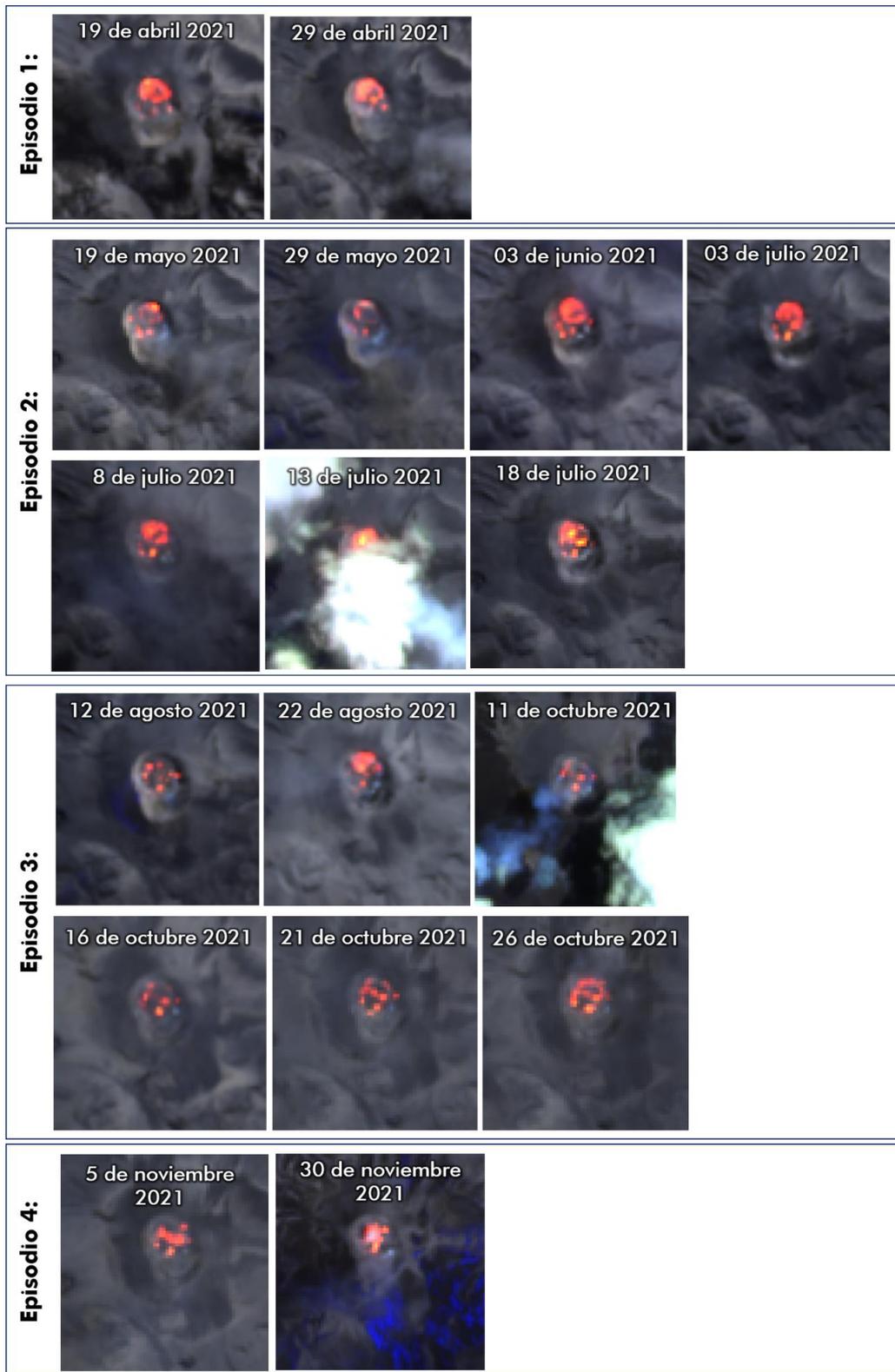


Figura 12.- Anomalías térmicas observadas a través de imágenes satelitales Sentinel 2 en el cráter del volcán Sabancaya para el periodo de abril a noviembre de 2021.

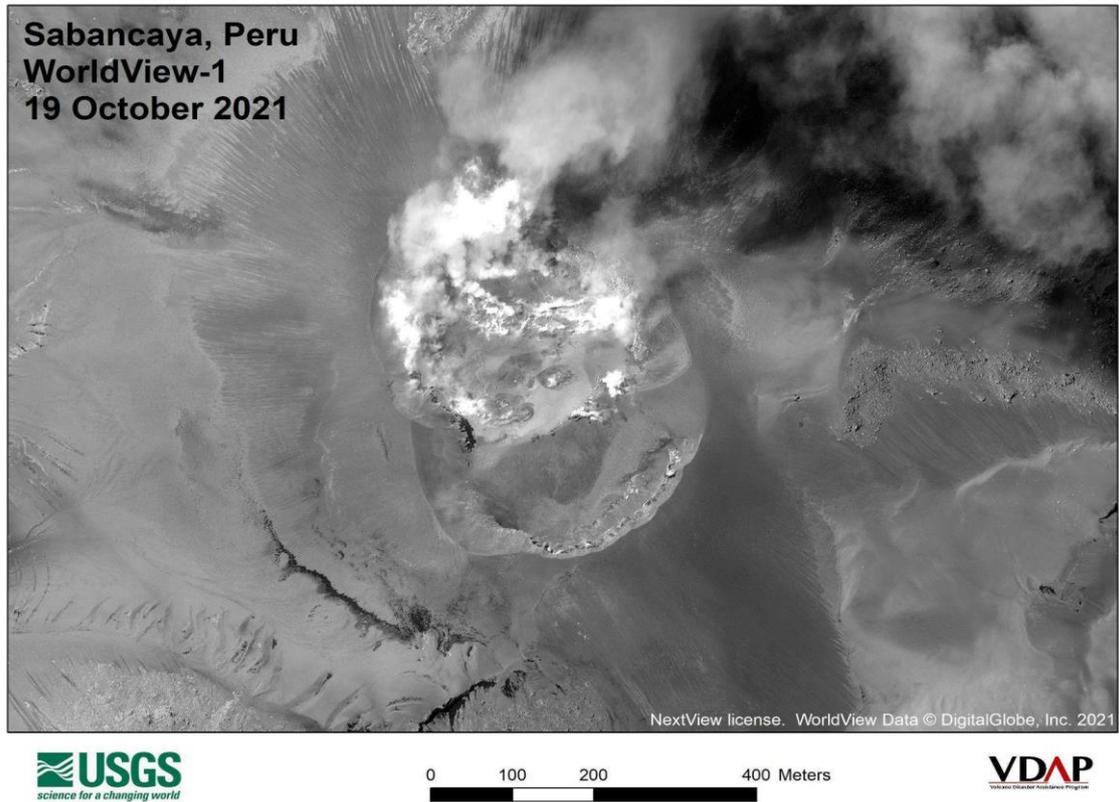


Figura 13. - Imagen WorldView de la zona del cráter del volcán Sabancaya del 19 de octubre de 2021, en el cual se identificó los respiraderos que continúan activos y alteran la superficie alrededor del domo anterior. Cortesía del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

#### 2.4.- Espesor de la capa de ceniza

Durante los días 24 al 28 de septiembre se realizaron 24 medidas de los espesores de las capas de ceniza en la zona del volcán Sabancaya y sus alrededores (Tabla 2). Estas mediciones fueron adquiridas a distancias de entre 3 y 25 km alrededor del volcán Sabancaya (Tabla 3 y Figura 14). A continuación, se indican los diferentes puntos donde se realizaron las medidas:

Tabla 2.- Resultado de mediciones de espesores de las capas de ceniza del volcán Sabancaya observado en la campaña de monitoreo en septiembre de 2021.

Fecha	Lat	Long	Cota	Codigo	Espesor ceniza (mm)	Lugar
24/09/2021	-15.761	-71.712	4713	PT1	2 mm	15 km NE del cráter del Sabancaya
24/09/2021	-15.757	-71.724	4692	PT2	20 mm	14 km NE del cráter del Sabancaya
24/09/2021	-15.755	-71.666	4818	P03	10 mm	20 km NE del cráter del Sabancaya
25/09/2021	-15.800	-71.735	3958	S01	25 mm	13 km SE del cráter del Sabancaya
25/09/2021	-15.824	-71.843	5040	S02	40 mm	4 km SE del crater del Sabancaya
25/09/2021	-15.859	-71.810	4503	S03	20 mm	9 km SE del crater del Sabancaya
25/09/2021	-15.845	-71.767	4382	S04	15 mm	11 km SE del crater del Sabancaya
26/09/2021	-15.751	-71.836	5164	S05	30 mm	4 km NE del cráter del Sabancaya
26/09/2021	-15.750	-71.835	5029	S06	30 mm	4 km NE del cráter del Sabancaya
27/09/2021	-15.757	-71.844	5202	S07	40 mm	3 km NE del cráter del Sabancaya
27/09/2021	-15.660	-71.697	3500	A01	0.5 mm	Achoma
27/09/2021	-15.660	-71.717	3383	A02	<0.5 mm	Achoma
27/09/2021	-15.643	-71.758	3296	M01	<0.5 mm	Maca
27/09/2021	-15.637	-71.785	3203	M02	<0.5 mm	Maca
27/09/2021	-15.617	-71.846	3347	P01	<0.5 mm	Pinchollo
27/09/2021	-15.674	-71.862	4406	P02	<0.01 mm	Pinchollo
27/09/2021	-15.611	-71.906	3891	P03	<0.05 mm	Pinchollo
27/09/2021	-15.627	-71.972	3701	C01	0.5mm	Cabanaconde
27/09/2021	-15.629	-72.001	3506	C02	0.5mm	Cabanaconde
27/09/2021	-15.621	-72.026	3396	C03	<0.5mm	Cabanaconde
27/09/2021	-15.675	-72.081	3859	C04	0.5 mm	Cabanaconde
27/09/2021	-15.691	-72.085	3902	H01	0.5 mm	Huambo
27/09/2021	-15.660	-71.699	3416	A03	0.5 mm	Achoma
27/09/2021	-15.669	-71.667	3532	Y01	<0.5 mm	Yanque

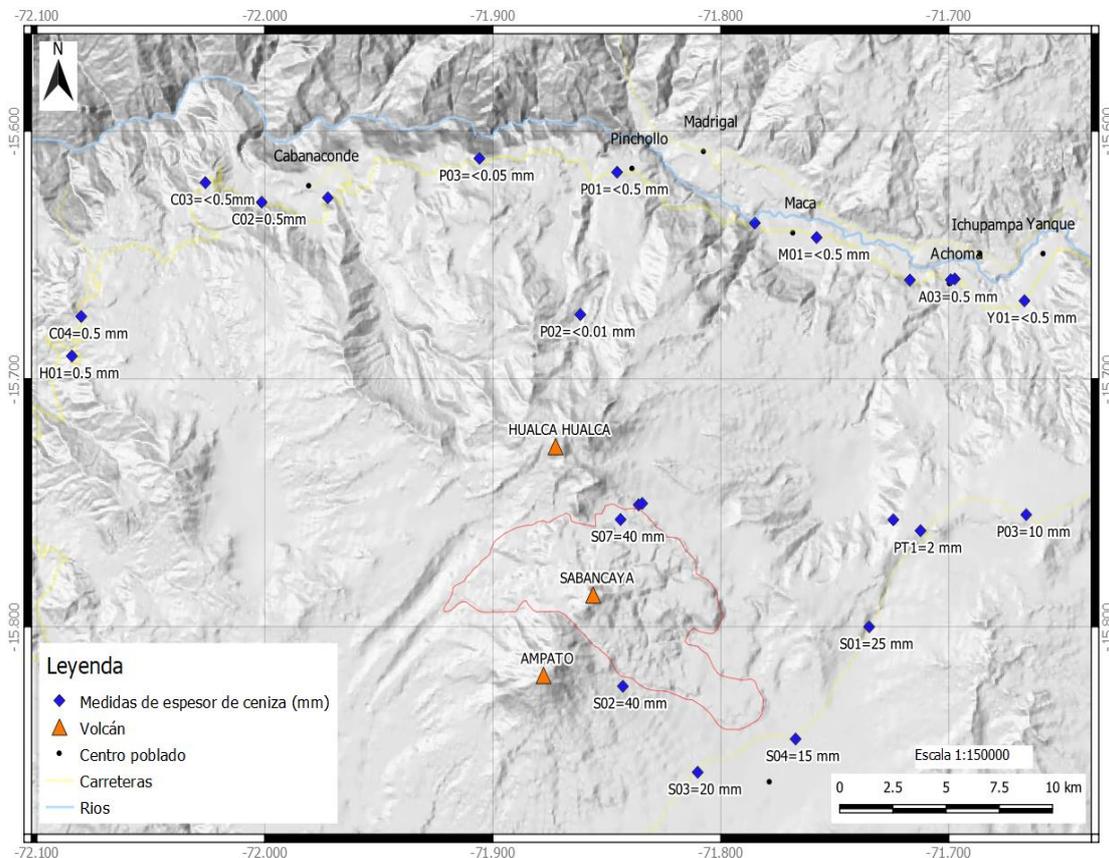


Figura 14.- Mapa de ubicación de puntos de medición de espesores de ceniza (rombos azules) depositados en zonas próximas y distales del volcán Sabancaya

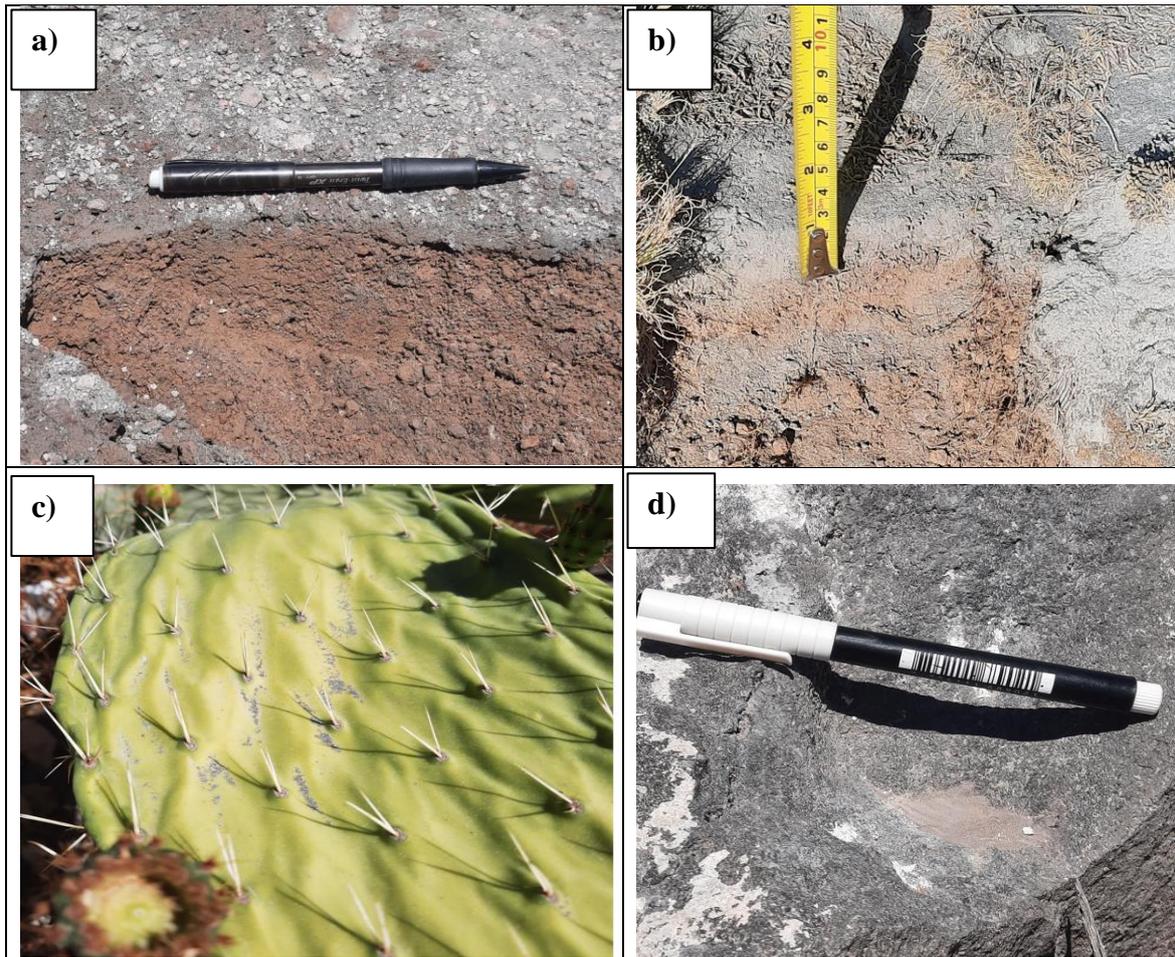


Figura 15.- Fotografías de depósitos o restos de ceniza observadas en inmediaciones del volcán Sabancaya. a) capa de ceniza al sureste del cráter del volcán (PT1). b) capa de ceniza al sureste del cráter del volcán (S01). c) ceniza sobre restos de cactus próximos al centro poblado de Cabanaconde, noroeste del volcán (C02). d) ceniza acumulada próxima al centro poblado de Huambo, al noroeste del volcán Sabancaya (C04).

## 2.5.- Monitoreo Geoquímico

### 2.5.1. Flujos de SO<sub>2</sub>

La cantidad de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) emitido por el volcán Sabancaya, fue medido con el espectrómetro DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy). Este equipo fue instalado al sureste del cráter del Sabancaya a una distancia de aproximadamente 4.3 km (Figura 16). La velocidad del viento durante el periodo de adquisición de datos del flujo SO<sub>2</sub> no superó los 4 m/s (<http://ready.arl.noaa.gov/ready2-bin/wndrose2a.pl>), llegando a realizarse 3 escaneos de la pluma volcánica. Según la Tabla

3, las emisiones de flujo de SO<sub>2</sub> presentaron valores de entre 515 Tn/día a 610 Tn/día entre las 9:17 am a 9:28 am del día 25 de septiembre.



Figura 16.- Equipo DOAS de campaña instalado al sureste del volcán Sabancaya.

Tabla 3.- Mediciones realizadas con el espectrómetro DOAS en setiembre de 2021.

Fecha	Hora local	Concentración máxima de SO <sub>2</sub> (ppm-m)	Flujo de SO <sub>2</sub> (Tn/día)
25/09/2021	9:17	413	610
	9:24	306	515
	9:28	280	535

### 2.5.2. - Fuentes termales

En la zona de Sabancaya, la actividad hidrotermal se manifiesta con la presencia de fuentes termales, fuentes de vapor y pozos de lodo ácido, que alcanzan temperaturas de hasta 93°C (Cruz y Matsuda, 2012). La mayoría de las fuentes están ubicadas a lo largo del valle de Colca y algunas al norte, noreste y sureste, a distancias de entre 9 km a 30 km del volcán Sabancaya. Según estudios realizados por Cruz y Matsuda (2012), en zonas

próximas al volcán Sabancaya fueron inventariadas hasta 20 fuentes termales que presentan temperaturas promedio de 14°C a 93°C (Figura 17).

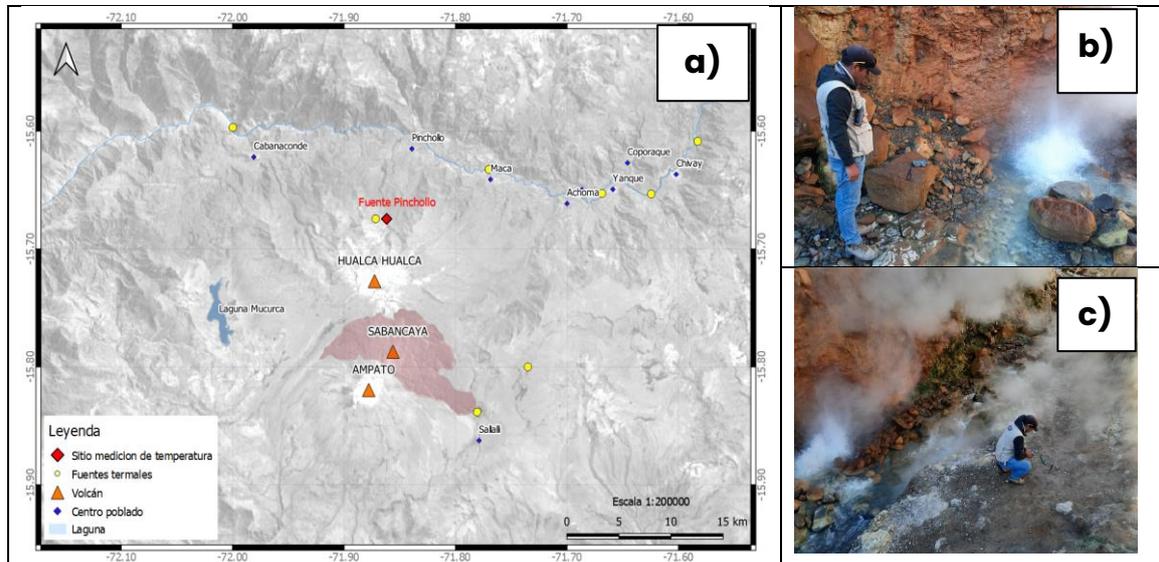


Figura 17.- a) Mapa de localización de las fuentes termales (círculos amarillos) en la zona del volcán Sabancaya (Cruz y Matsuda, 2012). b) y c) Fotografías de la fuente termal Pinchollo, ubicada a 12 km al norte del volcán Sabancaya.

Como parte de los trabajos de monitoreo volcánico, el 27 de septiembre de 2021 se realizaron medidas de temperatura de la fuente termal Pinchollo. El equipo utilizado es un Termómetro Tipo K digital e impermeable (marca HANNA) que permite mediciones con alta precisión ( $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ) y para ello, se utilizaron dos sondas tipo K denominadas HI766C y HI766Z. En la Tabla 4, se presenta las medidas de temperatura realizadas en la fuente termal de Pinchollo, indicando el lugar, dirección y código de la fuente, fecha de adquisición, coordenadas geográficas y los resultados de mediciones de Temperatura en  $^\circ\text{C}$ . En la fuente termal de Pinchollo, se las temperaturas presentaron un valor mínimo de  $72.1^\circ\text{C}$  y máximo de  $86.1^\circ\text{C}$ .

Tabla 4.- Temperaturas en la fuente termal de Pinchollo.

Fuente	Código	Fecha	Longitud	Latitud	Altura	Temp ( $^\circ\text{C}$ )
Pinchollo (Norte del volcán Sabancaya)	P01	27/09/2021	-71.861	-15.674	4379	72.1
	P02	27/09/2021	-71.861	-15.674	4379	86.1

### 3.- INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA

De acuerdo con el análisis realizado en este estudio, se ha observado que el volcán Sabancaya mantiene un nivel de actividad explosiva moderada; sin embargo, durante todo el periodo de observación se ha identificado el desarrollado cuatro episodios resumidos en la Figura 18 y sus características son:

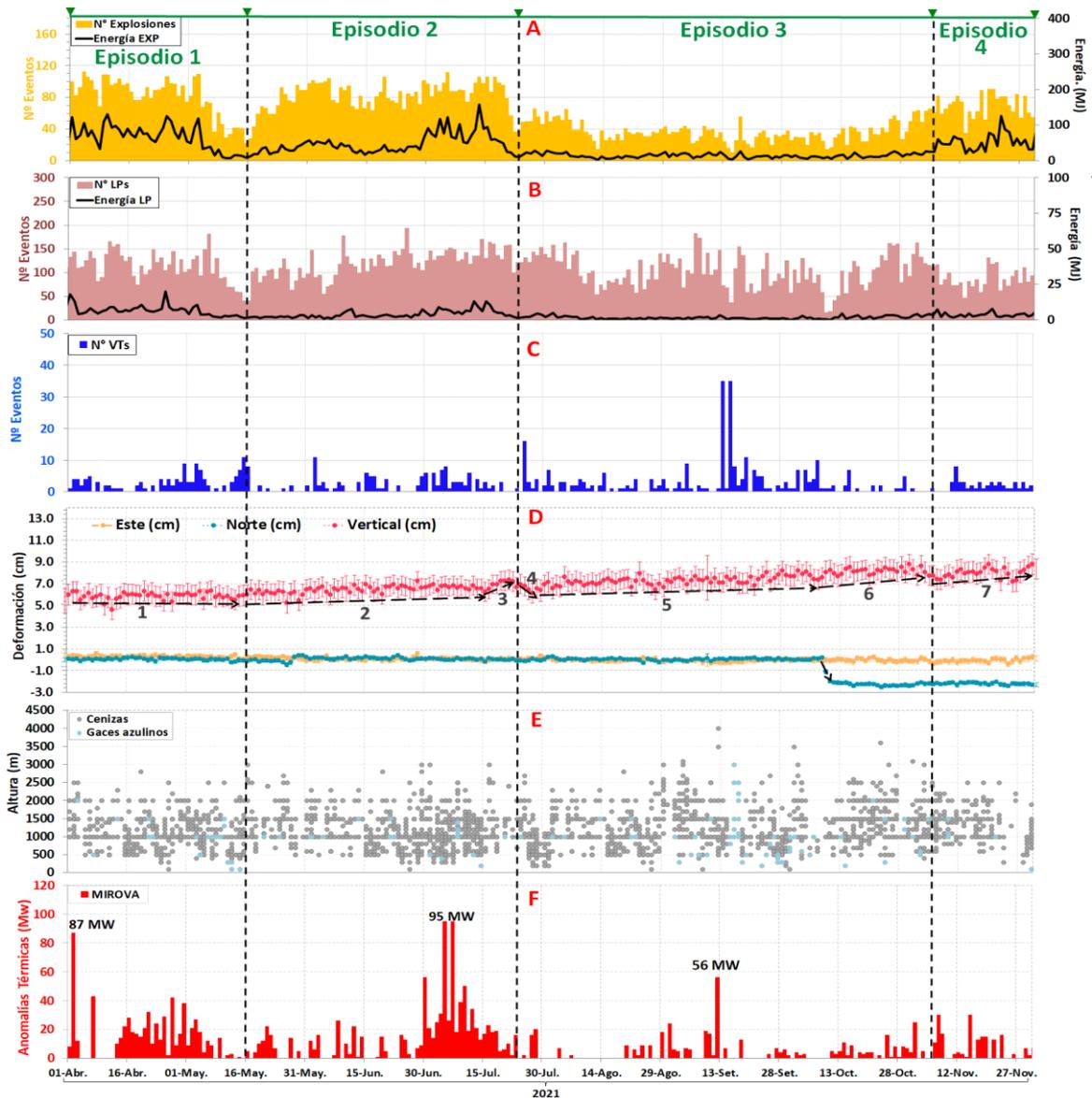


Figura 18.- Correlación entre la sismicidad (A, B y C), deformación cortical(D), altura de las columnas de gases y ceniza (E) y anomalías térmicas (F). La línea punteada, indica los 4 episodios.

**Episodio 1** (1 de abril - 15 de mayo): se observó la ocurrencia promedio de 81 explosiones por día (Figura 18A). No se ha observado evidencias sobre el crecimiento de un nuevo domo de lava o emplazamiento de flujos de lava, lo cual es corroborado con una tasa de deformación menor (inflación con tasa de 0.1 cm/mes) en comparación con las medidas observadas entre el 2019 y 2020, durante la formación del primer y segundo domo de lava.

**Episodio 2** (16 de mayo - 22 de julio): se observó la ocurrencia diaria de 83 explosiones, 120 sismos de tipo LP y menos de 3 sismos VT (Figura 18A). Por otro lado, se observó cambios en la morfología del cráter que indicaría el emplazamiento de un bajo volumen de lava, sustentado con la presencia de anomalías térmicas de hasta 99 MW (Figura 18C).

**Episodio 3** (23 de julio - 4 de noviembre): se observó una notable disminución de la actividad explosiva, registrándose en promedio 36 explosiones por día (Figura 18A). Así mismo, el número de anomalías térmicas disminuyó a valores menores de 56 MW. Las imágenes TerraSAR-X mostraron ligeros cambios en la superficie del cráter; sin embargo, la deformación volcánica continuó con la misma tendencia que el episodio 2; es decir, una ligera tasa de inflación de 0.3 cm/mes, antes de la ocurrencia de los sismos en el sistema de fallas Huambo - Cabanaconde y 0.9 cm/mes días después de los sismos (Figura 18D).

**Episodio 4** (5 al 30 de noviembre): se observa un ligero incremento en la dinámica del volcán con 70 explosiones por día (Figura 18A). Las imágenes TerraSAR-X, muestran cambios morfológicos en el sector norte del cráter, ocupando la misma

área observada meses antes. Las anomalías térmicas muestran valores bajos de 30 MW (Figura 18F). Por otro lado, se registró una velocidad de deformación positiva en la vertical o una inflación con tasa de 0.7 cm/mes, mayor al registrado antes de los sismos ocurridos en el sistema de fallas Huambo - Cabanaconde (Figura 18D).

Finalmente, en estos cuatro episodios se ha presentado una constante actividad al nivel del cráter con el emplazamiento y la destrucción de cuerpos de lava, así como importante actividad explosiva con la ocurrencia de fumarolas con alturas de hasta 4 km. Asimismo, la deformación cortical a nivel de la superficie estuco controlada por la reactivación del sistema de fallas Huambo – Cabanaconde ubicada a aproximadamente 13 km en dirección norte del volcán.

## **4.- ESCENARIOS ERUPTIVOS FUTUROS**

A continuación, se presentan dos probables escenarios eruptivos que podrían presentarse en el volcán Sabancaya en base al comportamiento dinámico pasado, presente y al monitoreo geofísico continuo que realiza el IGP sobre esta estructura volcánica.

### **4.1.- Primer escenario**

Caracterizado por una erupción vulcaniana (IEV 2), ya que el volcán Sabancaya viene generando explosiones que consecuentemente emiten cenizas, gases y, eventualmente, bloques balísticos que caen en áreas próximas al volcán, típico de una actividad eruptiva vulcaniana. Estas columnas eruptivas han alcanzado alturas del orden de 4 km sobre la cima del volcán, lo que sugiere un continuo aporte de magma a la cámara magmática y su posterior emisión a la superficie. En este contexto, para los siguientes meses no se esperan cambios importantes ya que la actividad explosiva podría continuar durante meses o años generando emisiones de ceniza que, de acuerdo con las características de los vientos, podrían ser dispersadas a más de 30 km de distancia alrededor del volcán.

### **4.2.- Segundo escenario**

Considera el desarrollo de una actividad explosiva con crecimiento y colapso de domo ya que, en la actualidad, en el cráter del volcán Sabancaya se identifica la presencia de una zona de ventos por donde son emitidos cenizas y gases. Este proceso estaría destruyendo el domo de lava; sin embargo, no se descarta que a futuro se cuente con un

nuevo domo en la zona noreste del cráter del Sabancaya que podría generar flujos piroclásticos (flujos incandescentes de bloques y cenizas) que desbordarían del cráter para emplazarse principalmente al norte del volcán. Estos flujos alcanzarían distancias menores a 8 km afectando únicamente terrenos de pastizales y bofedales.

## CONCLUSIONES

Realizando el análisis de los datos geofísicos recolectados por la red geofísica de volcanes operada por el Instituto Geofísico del Perú para el periodo abril – noviembre 2021, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- La actividad eruptiva del volcán Sabancaya se mantiene en un nivel de actividad explosiva moderada; sin embargo, fue posible identificar el desarrollo de cuatro episodios caracterizados por el incremento y disminución temporal de las explosiones y la altura de las fumarolas. Asimismo, por el registro variado en número de señales de periodo largo que evidencian el movimiento de lava en el interior del volcán. Estos resultados se corroboran con las variaciones en las anomalías térmicas.
  
- La deformación cortical observada en superficie mediante el método DINSAR, fue debido a la reactivación temporal del sistema de fallas Huambo – Cabanaconde con el desarrollo de una crisis sísmica que concluyó con la ocurrencia de un sismo de magnitud M5.5.
  
- Las columnas de gases y cenizas expulsados alcanzaron alturas de hasta 4 km sobre la cima del volcán, siendo luego dispersadas en dirección de los distritos de Achoma, Maca, Lari, Madrigal, Ichupampa, Yanque, Chivay, Coporaque, Tuti y Lluta. En ocasiones, las cenizas también fueron dispersadas en dirección de las localidades de Huambo y Huanca ubicados hacia el oeste, suroeste y sur del volcán.

- A futuro, el volcán Sabancaya continuaría desarrollando erupciones explosivas de tipo vulcanianas (IEV 2) con la emisión de columnas de gases y cenizas que pueden superar los 3 km de altura. Un escenario extremo considera, la formación y crecimiento de un nuevo domo de lava en el cráter que podría generar flujos piroclásticos que desbordarían del cráter pudiendo alcanzar distancias menores a 8 km y afectar únicamente terrenos de pastizales y bofedales.

## **RECOMENDACIONES**

A las autoridades de INDECI, CENEPRED, Gobiernos Regionales y Locales, ONGs, entre otros, se les solicita considerar las siguientes recomendaciones:

- De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, mantener el nivel de alerta volcánica en color NARANJA.
- No acercarse a un radio menor de 12 km del cráter y en caso de caída de ceniza, la población debe evitar el contacto con este material, cubrirse la nariz y boca con paños húmedos o mascarillas. Mantener cerradas las puertas y ventanas de las viviendas.
- Debido a la proximidad de la temporada de lluvias, la generación de lahares es latente. Evitar acercarse a las quebradas o cruzar vías de comunicación que puedan verse afectadas.
- Implementar acciones de prevención y mitigación ante el incremento de la actividad volcánica y mantenerse informado en todo momento sobre la actividad volcánica del Sabancaya mediante los boletines emitidos por el IGP: (<http://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/>).

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Bell, A. F., S. Hernandez, H. E. Gaunt, P. Mothes, M. Ruiz, D. Sierra, and S. Aguaiza (2017). The rise and fall of periodic ‘drumbeat’ seismicity at Tungurahua volcano, Ecuador, *Earth Planet. Sci. Lett.* 475, 58–70, doi: 10.1016/j.epsl.2017.07.030.
- Boixart, G.; Cruz, L.F.; Miranda Cruz, R.; Evillades, P.A.; Evillades, L.D.; Battaglia, M. (2020) Source Model for Sabancaya Volcano Constrained by DINSAR and GNSS Surface Deformation Observation. *Remote Sens.*, 12, 1852.
- Cruz Paucara, V., & Matsuda, K. (2012). Caracterización geoquímica de las manifestaciones geotermales en el valle del Colca, Chivay, Arequipa.
- Del Carpio, J., Rivera, M., Puma, N., Cruz, J., Torres J., Vargas, K., Lazarte, I., Machacca, R., y Concha, J., (2019). Evaluación geofísica del comportamiento dinámico actual del volcán Sabancaya, periodo enero-octubre de 2019. Repositorio Geofísico Nacional, <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4713>, 35 p.
- DeShon, H.R., C.H. Thurber, and J. Power (2010), Earthquake waveform similarity and evolution at Augustine volcano, Alaska, from 1993-2006, The 2006 Eruption of Augustine Volcano, Alaska. USGS Professional Paper 1769 p. 103-118.
- Hotovec-Ellis, A.J.; Jeffries, C. (2016). Near Real-time Detection, Clustering, and Analysis of Repeating Earthquakes: Application to Mount St. Helens and Redoubt Volcanoes – Invited, presented at Seismological Society of America Annual Meeting, Reno, Nevada, 20 Apr.
- Ketner, D., and J. Power (2013). Characterization of seismic events during the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska, *J. Volcanol. Geoth. Res.* 259, 45–62, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.10.007.

- MacQueen, P.; Delgado, F.; Reath, K.; Pritchard, M.; Bagnardi, M.; Milillo, P.; Lundgren, P.; Macedo, O.; Aguilar, V.; Ortega, M.; Anccasi, R.; Lazarte, I.; Miranda, R. (2020) Volcano-Tectonic Interactions at Sabancaya Volcano, Peru: Eruptions, Magmatic Inflation, Moderate Earthquakes, and Fault Creep. *JGR Solid Earth*.
- Puma, N., Del Carpio, J., Rivera, M., Vargas, K., Machacca, R., Lazarte, I., (2021)- Evaluación geofísica del comportamiento dinámico del volcán Sabancaya (diciembre, 2020 – marzo, 2021). Repositorio Geofísico Nacional, <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4938>.
- Puma, N., Rivera, M., Tavera, H., Centeno, R., Machacca, R., Vargas, K., Lazarte, I., Velarde, L., Del Carpio, J. (2020)- Evaluación geofísica del comportamiento dinámico del volcán Sabancaya (febrero-noviembre de 2020). Repositorio Geofísico Nacional, <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4895>, 40 p.
- Rodgers, M., P. J. Smith, T. A. Mather, and D. M. Pyle (2016). Quiescent-explosive transitions during dome-forming volcanic eruptions: Using seismicity to probe the volcanic processes leading to the 29 July 2008 Vulcanian explosion of Soufrière Hills Volcano, Montserrat, *J. Geophys. Res.* 121, 8453–8471, doi: 10.1002/2016JB013180.
- Tavera, H., Centeno, E., (2021). Sismo de Cabanaconde – Pinchollo del 8 de octubre, 2021 (m5.5) (Región Arequipa). Informe Técnico N°026-2021/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA.
- Thelen, W., Malone, S., & West, M. (2011). Multiplets: Their behavior and utility at dacitic and andesitic volcanic centers. *Journal of Geophysical Research*, 116 (B8).
- Umakoshi, K., N. Takamura, N. Shinzato, K. Uchida, N. Matsuwo, and H. Shimizu (2008). Seismicity associated with the 1991–1995 dome growth at Unzen Volcano,

Japan, J. Volcanol. Geoth. Res. 175, no. 1, 91–99, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.030.

Varley, N., R. Arámbula-Mendoza, G. Reyes-Dávila, R. Sanderson, and J. Stevenson (2010). Generation of Vulcanian activity and long-period seismicity at Volcán de Colima, Mexico, J. Volcanol. Geoth. Res. 198, no. 1, 45–56, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.08.009.

White, R. A., A. D. Miller, L. Lynch, and J. Power (1998). Observations of hybrid seismic events at Soufriere Hills volcano, Montserrat: July 1995 to September 1996, Geophys. Res. Lett. 25, no. 19, 3657–3660, doi: 10.1029/98GL02427.

