

Evaluación geofísica del comportamiento dinámico del volcán Sabancaya (febrero-noviembre de 2020)

Informe Técnico n.º 005-2020/IGP



Instituto Geofísico del Perú

Presidente ejecutivo: Hernando Tavera

Director científico: Danny Scipión

Informe técnico

Evaluación geofísica del comportamiento dinámico del volcán Sabancaya (febrero-noviembre de 2020)

Autores:

Nino Celestino Puma Sacsí

Marco Rivera Porras

Hernando Tavera

Riky Centeno Quico

Roger Machacca Puma

Katherine Andrea Vargas Alva

Ivonne Alejandra Lazarte Zerpa

Lizbeth Velarde Quispe

José Del Carpio Calienes

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú

Calle Badajoz 169 Mayorazgo

Teléfono: 51-1-3172300

RESUMEN

En el presente año (febrero-noviembre de 2020), el comportamiento dinámico del volcán Sabancaya se caracterizó por la ocurrencia de hasta un máximo de 69 explosiones en 24 horas, aunque en promedio se presentaron 23 explosiones por día. Estos eventos fueron acompañados de emisiones de ceniza que afectaron recurrentemente a los centros poblados del valle del Colca y aquellos localizados al sur y suroeste del Sabancaya. Durante este periodo se ha desarrollado hasta cuatro fases de actividad eruptiva, siendo las fases 1, 3 y 4 caracterizadas por el incremento en el número y energía de las explosiones volcánicas y la consecuente emisión de cenizas. La fase 2 se caracterizó por presentar dos importantes enjambres sísmicos asociados al ascenso, dentro de la estructura volcánica, de un importante volumen de magma ($1\,115\,986\text{ m}^3$) que terminó con el emplazamiento de un nuevo domo de lava a partir del 10 de noviembre, visible en el sector noreste del cráter.

El análisis de la información generada, a partir de los datos obtenidos de la red de monitoreo volcánico implementada por el IGP (sísmico, geodésico, visual y satelital), sugiere dos posibles escenarios eruptivos futuros del Sabancaya: a) La ocurrencia de erupciones explosivas moderadas de tipo vulcanianas (IEV 2) y la formación de columnas de gases y cenizas que pueden superar los 3 km de altura y que podrían dispersarse a más de 30 km del volcán; este escenario es el más probable. b) El crecimiento del nuevo domo de lava hasta desbordar el cráter del volcán y generar flujos piroclásticos de poco volumen que pueden viajar hasta distancias de 8 km desde el volcán. Este escenario es menos posible de ocurrir debido a que la recurrente actividad explosiva del Sabancaya destruye constantemente el domo de lava.

ÍNDICE

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN	5
1. CARACTERÍSTICAS DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA	8
1.1. MONITOREO SÍSMICO	8
1.1.1. <i>Análisis de familias sísmicas (Multiplets)</i>	10
1.1.2. <i>Distribución espacial de la sismicidad</i>	13
1.1.3. <i>Estimación del volumen de magma</i>	14
1.2. MONITOREO GEODÉSICO	15
1.3. MONITOREO VISUAL Y SATELITAL	19
1.3.1. <i>Características de las emisiones de ceniza</i>	19
1.3.2. <i>Orificios de emisión de gases y cenizas</i>	22
1.3.3. <i>Formación del nuevo domo de lava</i>	23
2.- INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA	28
2.1.- ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA	28
2.2. ALERTA DE PELIGROS VOLCÁNICOS EMITIDOS	30
2.2.1. <i>Alertas por dispersión de ceniza</i>	30
2.2.2. <i>Alertas por descenso de lahares</i>	31
2.3. PELIGROS VOLCÁNICOS	31
2.3.1. <i>Peligros por caídas de tefras (cenizas)</i>	32
2.3.2. <i>Peligros por flujos piroclásticos</i>	32
2.3.3. <i>Peligros por lahares (flujos de lodo)</i>	33
2.4. ESCENARIOS ERUPTIVOS FUTUROS	33
2.4.1. <i>Primer escenario: erupción vulcaniana (IEV 2)</i>	33
2.4.2. <i>Segundo escenario: actividad explosiva con crecimiento y colapso de domo</i>	34
CONCLUSIONES.....	35
RECOMENDACIONES.....	37
BIBLIOGRAFÍA	38

INTRODUCCIÓN

El Sabancaya se ubica a 18 km al sur del valle del Colca (Caylloma, Arequipa) y es considerado como el segundo volcán más activo del sur peruano, edificado al menos durante los últimos 8000 años (Samaniego et al., 2016). La última erupción del volcán Sabancaya ocurrió entre los años 1990 y 1998 (Gerbe y Thouret, 2004), con un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) igual a 2-3, en una escala que va del 0 al 8. Luego de casi 15 años de calma, en febrero de 2013, el Sabancaya empezó a producir emisiones de gases, importante actividad sísmica y anomalías de deformación de la superficie entorno al volcán hasta el mes de noviembre de 2016, fecha en la que inicia un nuevo proceso eruptivo que perdura hasta la actualidad.

El Sabancaya se ubica en una zona con presencia de fallas activas, volcanes y recurrente actividad sísmica que afecta diversos poblados, ubicados en el valle del Colca (Tavera, 2016). En un radio de 30 km alrededor del volcán Sabancaya habitan aproximadamente 20 mil personas distribuidos en los distritos de Chivay, Coporaque, Yanque, Ichupampa, Achoma, Lari, Madrigal, Maca, Cabanaconde, Tapay, Huanca, Lluta y Huambo: Toda esta población se dedica principalmente a la agricultura y ganadería; por lo tanto, vienen siendo afectadas por las cenizas emitidas por el Sabancaya.

Durante los últimos cuatro años, la actividad eruptiva ha variado continuamente, lo que se ha visto reflejado en el registro máximo de 110 explosiones por día (18 de enero de 2017) y otras jornadas en las cuales no se han producido explosiones (por ejemplo, el 23 de junio de 2020). En lo que va del año 2020, se ha registrado en promedio 23 explosiones diarias acompañadas por constantes emisiones de gases y cenizas dispersadas en un radio mayor a los 30 km de distancia respecto al cráter del volcán.

El Instituto Geofísico del Perú (IGP), a través del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), realiza el monitoreo permanente del comportamiento dinámico del volcán Sabancaya mediante redes geofísicas, geodésicas y visuales instaladas en zonas aledañas al volcán (Figura 1). Este monitoreo se ve reforzado también gracias al empleo de sistemas satelitales disponibles, tales como TROPOMI (permite analizar la concentración del gas volcánico SO_2), MIROVA (detección de anomalías térmicas), Sentinel-1 (evaluación de deformación volcánica a través del método InSAR) y otros. Asimismo, se emplean imágenes satelitales PlanetScope que permiten visualizar de manera diaria el volcán y la fenomenología que presenta. Toda la información, tanto proveniente de campo como de los sistemas satelitales, es procesada, analizada y emitida de manera oportuna a través de alertas, reportes, boletines e informes vulcanológicos a las autoridades de los diversos niveles de gobierno para la toma de decisiones.

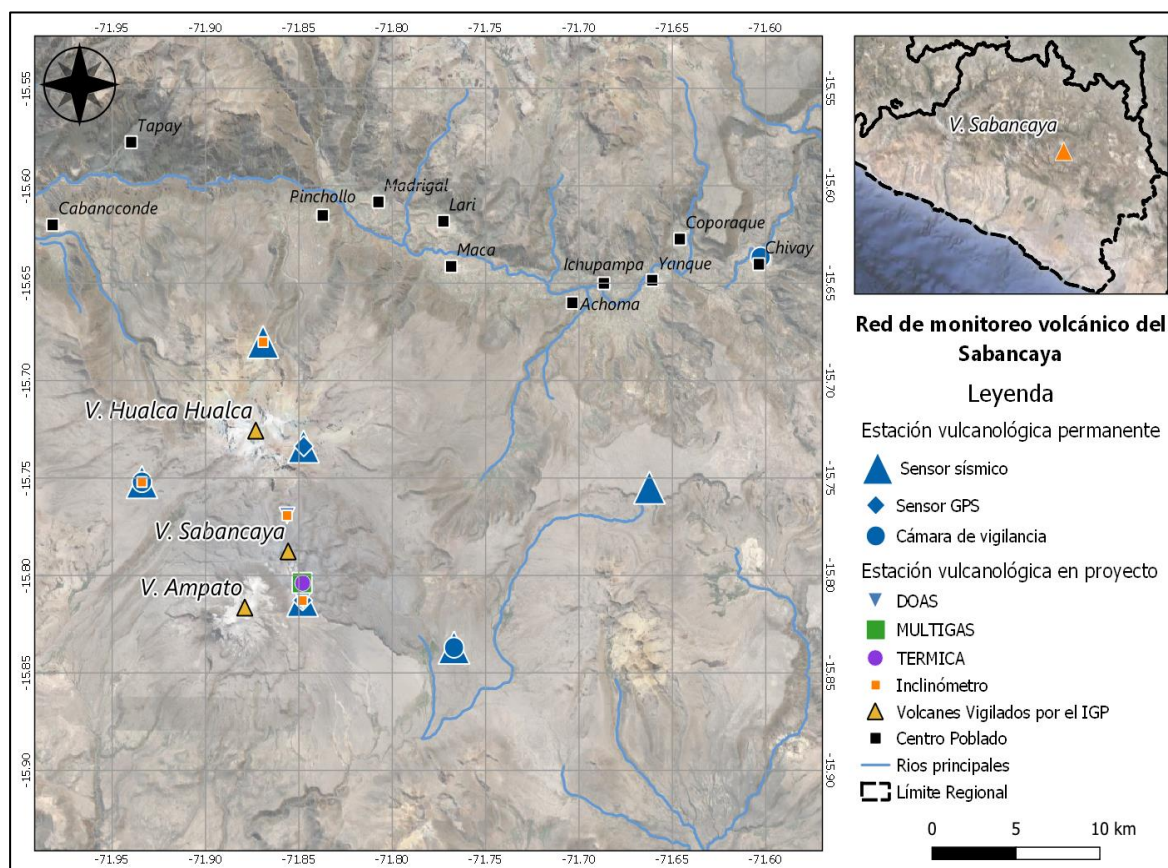


Figura 1.- Red de monitoreo volcánico instalada por el IGP en el volcán Sabancaya, la cual transmite información en tiempo real al CENVUL en Arequipa.

El presente informe técnico detalla el tipo de comportamiento dinámico que viene desarrollando el volcán Sabancaya entre los meses de febrero a noviembre de 2020, con base en el monitoreo geofísico permanente que efectúa el CENVUL. Durante este periodo se ha identificado la ocurrencia de explosiones recurrentes que han destruido el primer domo de lava formado en 2019, además del emplazamiento de un segundo domo de lava en superficie durante la segunda semana de noviembre de 2020. Asimismo, en este informe se detallan los tipos de peligros a los que está expuesta la población del valle del Colca durante la actual erupción y los escenarios eruptivos futuros del Sabancaya.

1. CARACTERÍSTICAS DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA

El volcán Sabancaya, desde el inicio de su actual proceso eruptivo (noviembre de 2016), continúa presentando actividad explosiva moderada con la ocurrencia diaria de explosiones volcánicas y la consecuente emisión de cenizas que, en ocasiones, alcanzan alturas de hasta 4 km sobre la cima del volcán. Asociada a esta actividad explosiva, en el año 2017 se identificó la formación de un primer domo de lava al interior del cráter del volcán durante la primera semana de octubre de 2019 (Puma et al., 2019). En el año 2020, a raíz de las continuas explosiones del Sabancaya, dicho domo fue parcialmente destruido o pulverizado. Posteriormente, el Sabancaya continuó presentando actividad explosiva recurrente con la continua emisión de cenizas, gases y, eventualmente, la eyección de bloques balísticos incandescentes.

A continuación, se detalla el nivel de actividad que viene presentado el volcán Sabancaya entre febrero y noviembre de 2020, determinado por el CENVUL con base a los datos propios del monitoreo sísmico, geodésico, visual y a través de sistemas satelitales de manera permanente y en tiempo real.

1.1. Monitoreo sísmico

De acuerdo al análisis de la información sísmica, entre febrero y noviembre de 2020 se han identificado cuatro fases de actividad eruptiva y cuyas características son las siguientes:

- Primera fase: presente entre los meses de febrero a marzo de 2020, con la ocurrencia promedio de 18 explosiones diarias y una energía máxima de 59 Megajoules (MJ). El máximo de explosiones por día llegó a un número de 33 (Figura 2A).

- Segunda fase: desarrollada entre abril y agosto de 2020, con la ocurrencia de hasta 13 explosiones por día y una energía máxima de 15 MJ, es

decir, el Sabancaya presentó una ligera disminución con respecto al número de explosiones presentado en la primera fase (Figura 2A). En esta fase se registraron dos enjambres sísmicos de eventos de tipo Volcano-Tectónico (VT): el primero ocurrió entre el 13 y 17 de abril y el segundo se produjo entre el 14 y 17 de agosto (Figura 2C).

- Tercera fase: desarrollada entre septiembre y noviembre de 2020, con el incremento en el número de explosiones de hasta 38 eventos por día (Figura 2A) y energía máxima de 54 MJ. Del mismo modo, se observó el incremento de hasta un 50 % de señales sísmicas de tipo Largo Periodo (LP), asociadas al movimiento de fluidos volcánicos (gases y magma). Por su parte, la actividad de tipo Volcano-Tectónico (VT), ligada al fracturamiento de rocas al interior del volcán, se mantuvo en niveles bajos hasta la ocurrencia de un tercer enjambre sísmico desarrollado el 22 de octubre con el registro de 222 eventos sísmicos, alcanzando el mayor de ellos una magnitud de M3.3 (Figura 2C). Esta fase de incremento de actividad está ligada al inicio de formación de un segundo domo de lava.

-Cuarta fase: desarrollada desde el mes de noviembre y que permanece hasta la actualidad. Desde el inicio de esta fase se viene produciendo un ligero incremento en el número de explosiones hasta un máximo de 51 eventos por día y con energías máximas de 216 MJ (Figura 2A). Asociada a esta actividad, el 10 de noviembre de 2020, se observó la formación de un segundo domo de lava en el sector noreste del cráter del volcán Sabancaya y, posterior al 16 de noviembre, la energía decayó rápidamente para luego volver a incrementarse. El número de explosiones continúa por encima de 45 eventos por día. Durante el mismo periodo de tiempo se incrementa el número y la energía de las señales sísmicas de tipo Largo Periodo (LP) hasta un máximo de 239 MJ (Figura 2B). En esta fase se ha alcanzado los mayores niveles de energía sísmica liberada durante el presente año.

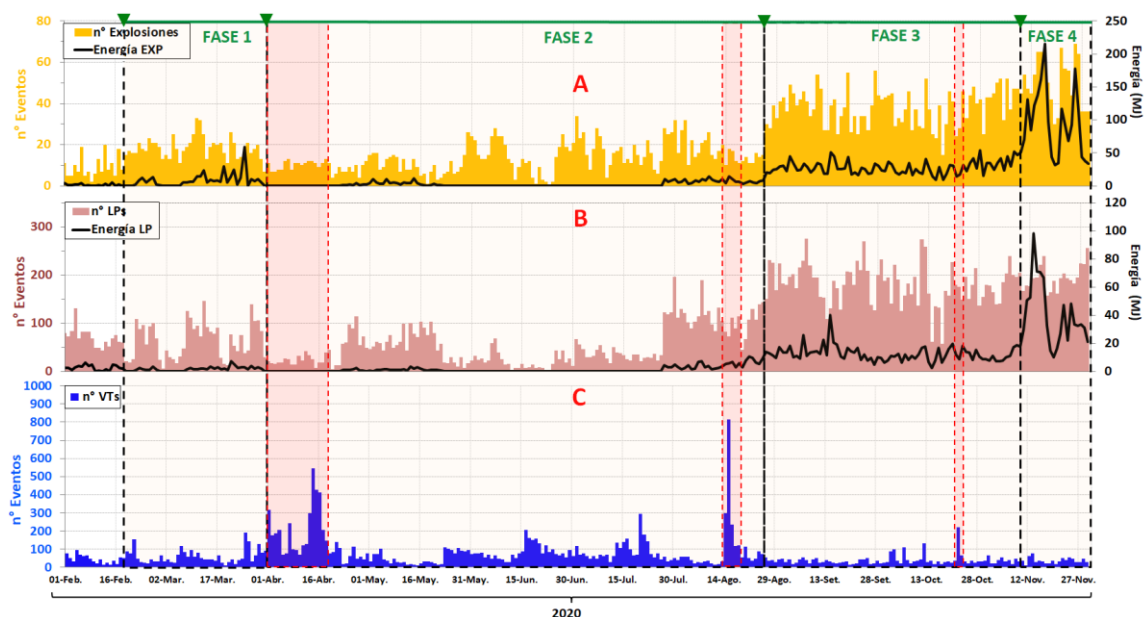


Figura 2.- Número de eventos sísmicos (barras de color) y energía sísmica (línea negra continua) registradas en el volcán Sabancaya en el periodo de febrero a noviembre de 2020. Las líneas discontinuas negras muestran el inicio de las fases de actividad eruptiva, las sombras rojas limitadas por líneas discontinuas muestran los periodos durante los cuales ocurrieron los enjambres sísmicos.

1.1.1. Análisis de familias sísmicas (*Multiplets*)

Las familias sísmicas o *multiplets*, son sismos casi idénticos en sus formas de onda y características espectrales (Hamaguchi y Hasegawa, 1975). En ambientes volcánicos, los *multiplets* se observan comúnmente durante el ascenso y formación de domos de lava (p. ej., Rowe et al., 2004; Power y Lalla, 2010), así como durante erupciones basálticas (p. ej., Battaglia et al., 2003; Saccorotti et al., 2007) y también durante periodos no eruptivos (p. Ej., Roman y Powet, 2011; Passarelli et al., 2018).

El análisis de sismos *multiplets* se ha vuelto cada vez más importante en la sismología volcánica y se han desarrollado varios enfoques para identificarlos. Uno de estos es el programa REDPy (*Repeating Earthquake Detector in Python*; Hotovec-Ellis y Jeffries, 2016), el cual permite detectar eventos, calcular la correlación cruzada de las formas de onda y guardar las señales sísmicas como parte de una familia; de lo contrario, se define como un evento aislado.

El análisis de familias sísmicas en el volcán Sabancaya se realizó mediante el programa REDPy y señales sísmicas de la estación sísmica SABA (componente Z) filtradas en la banda 1-10 Hz. La ventana promedio de largo plazo se estableció en 8 segundos y de corto plazo en 0.8 segundos. La relación STA/LTA para activar un disparador fue de 3.0 y 2.0; para desactivar el disparador, se utilizó un umbral de coeficiente de correlación (CC) de 0.85. Entre los meses de agosto y noviembre de 2020, se identificaron un total de 638 familias sísmicas. En la figura 3 se muestra la forma de onda de algunas de estas familias.

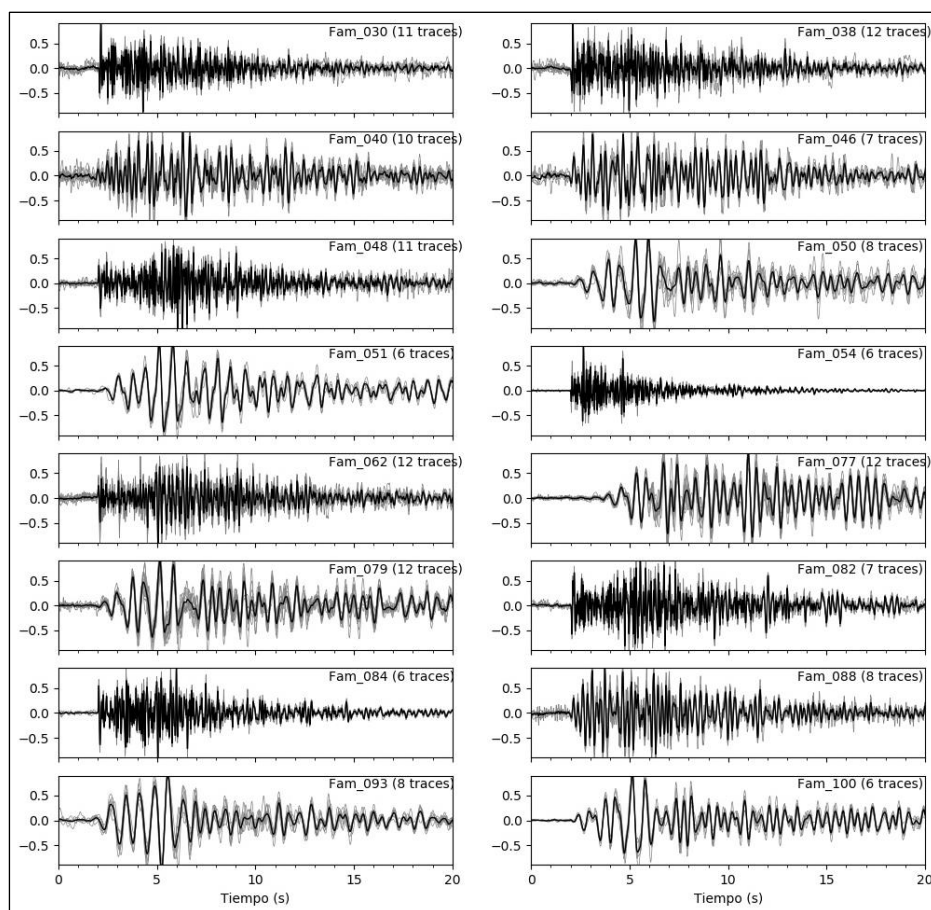


Figura 3.- Formas de onda de 16 familias sísmicas observadas entre los meses de agosto y noviembre de 2020 con datos de la estación SABA del volcán Sabancaya. En color gris se presentan los elementos de cada familia y, en color negro, el apilamiento de cada una.

En la Figura 4a, se muestra la ocurrencia de las primeras 100 familias con mayor cantidad de miembros o elementos, observándose tres periodos de

tiempo durante el cual se aceleró la formación de familias sísmicas: el 15 de agosto, 2 de octubre y 13 de noviembre (líneas rojas verticales). La presencia de estas familias sísmicas estaría ligadas a episodios de mayor ascenso o aportes de magma.

En efecto, tal como se observa en muchos ambientes volcánicos tras la inyección de fluidos magmáticos en la corteza, comúnmente se genera la activación de fallas o fracturas preexistentes próximos a un volcán (p. ej., Deichmann & Giardini, 2009; Dorbath et al., 2009; Flóvenz et al., 2015; White & McCausland, 2016; Juncu et al., 2018). Estos procesos generarían una alta sismicidad de tipo Volcano-Tectónico (*HF multiplets*), con la formación de tres episodios de formación de familias sísmicas (Figura 4b). La ocurrencia de estos eventos *HF multiplets* continúa en el tiempo hasta la aparición de una nueva familia sísmica con señales de baja frecuencia (*LF multiplets*), la cual estaría asociada a la llegada del magma al cráter y la consecuente formación o crecimiento del nuevo domo en superficie, disminuyendo así la presión interna próxima al volcán y la ocurrencia de eventos sísmicos de tipo VT de alta frecuencia, tal como sugiere Thelen et al. (2011).

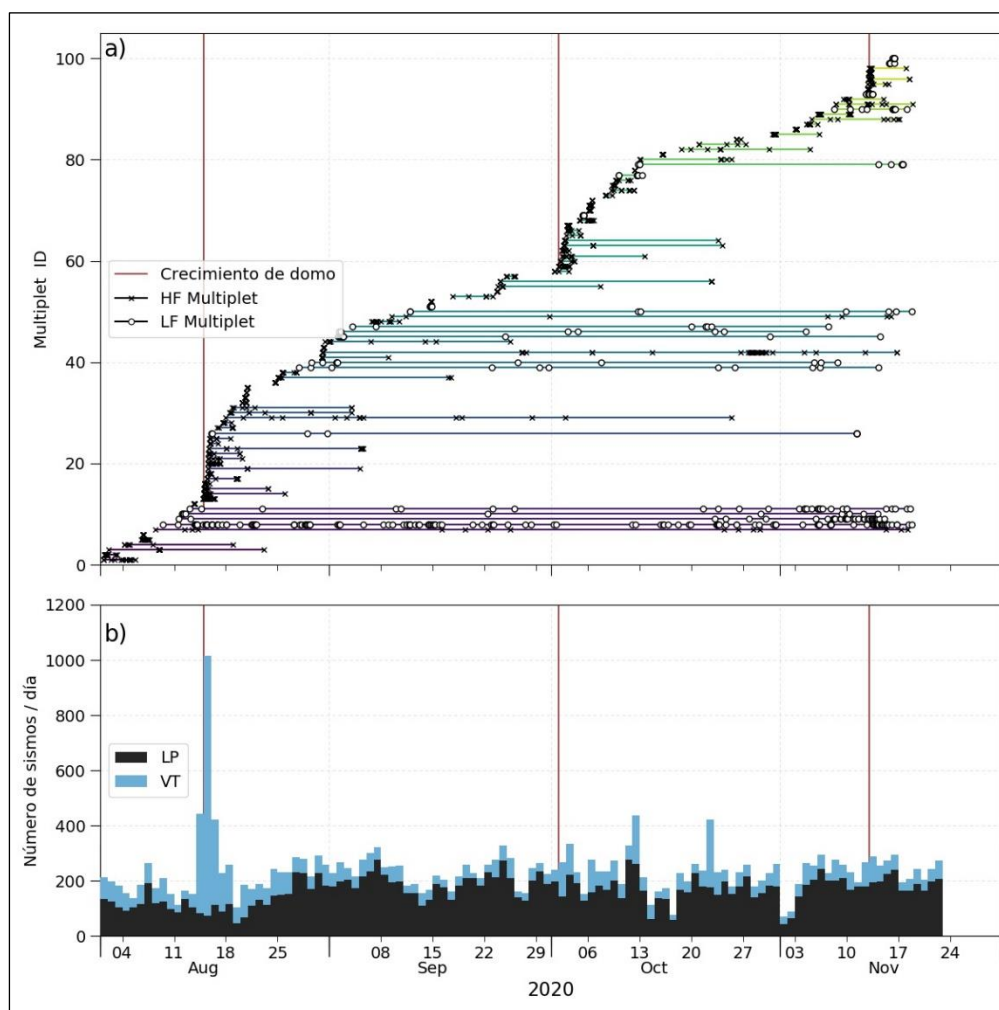


Figura 4.- Ocurrencia de familias sísmicas registradas en el volcán Sabancaya durante agosto a noviembre de 2020. Se observa, además, episodios de incrementos en la ocurrencia de familias sísmicas (líneas rojas).

1.1.2. Distribución espacial de la sismicidad

Durante el periodo de análisis, la sismicidad de tipo Volcano-Tectónico se ha distribuido en inmediaciones del volcán Hualca Hualca, al norte del volcán Sabancaya, en un sector donde se identifica la presencia de numerosas fallas activas. Según estudios realizados por McQueen et al. (2020) y Boixart et al. (2020), el Sabancaya tendría dos cámaras magmáticas: una profunda y otra superficial. La cámara magmática profunda se ubicaría entre 12 y 15 km

de profundidad debajo del volcán Hualca Hualca, y su dinámica podría estar generando la intensa actividad sísmica que ocurre en la zona.

Entre febrero y noviembre de 2020, la sismicidad ocurrió principalmente a 8 y 18 km al norte, noreste y noroeste del cráter del Sabancaya (Figura 5), con focos de entre 3 km y 19 km de profundidad y magnitudes entre M2.0 y M4.4. El sismo de mayor magnitud (M4.4) ocurrió el 14 de agosto a las 20:34 hora local y a una profundidad de 7 km.

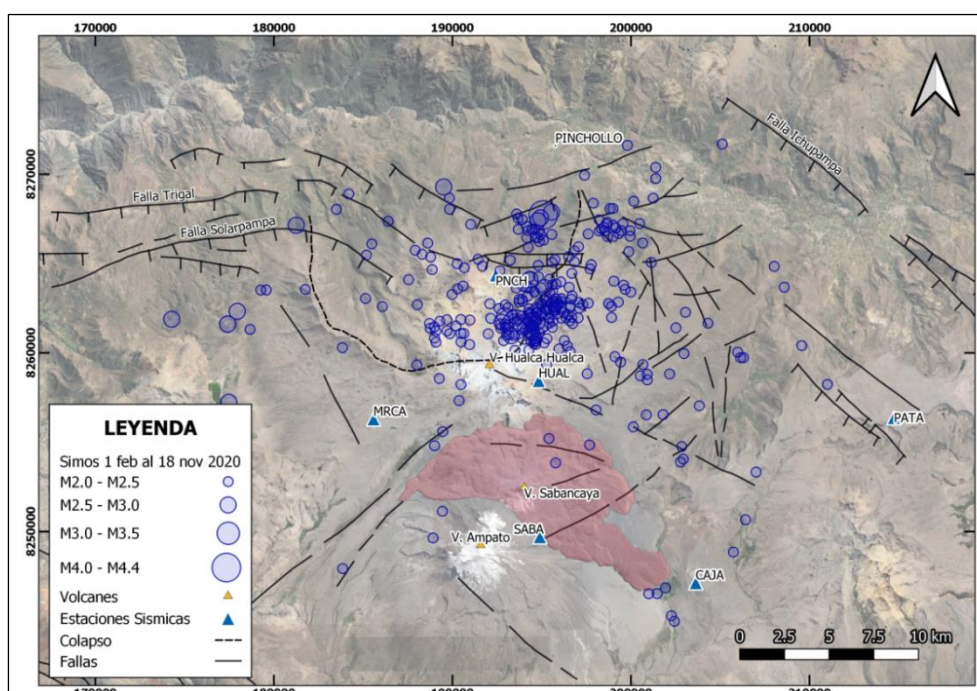


Figura 5.- Localización de eventos sísmicos registrados entre febrero y noviembre de 2020 en el entorno del volcán Sabancaya. Los epicentros han sido localizados entre 8 y 18 km de distancia al norte, noroeste y noreste del cráter del volcán Sabancaya.

1.1.3. Estimación del volumen de magma

Con base en la información sísmica ocurrida en las inmediaciones del volcán Sabancaya, se realizó la estimación del volumen de magma que ascendió a través del sistema volcánico aplicando la formulación propuesta por White y McCausland (2016). Durante el periodo de análisis se registró un total de 22 641 sismos de tipo Volcano-Tectónico; de acuerdo a la

metodología de White y McCausland (2016), habría ascendido hasta la cámara magmática un volumen de magma del orden de $2\,207\,985\text{ m}^3$. Los aportes de magma más importantes ocurrieron entre el 1 al 18 de abril con un volumen de $79\,871\text{ m}^3$ y entre el 14 y 17 de agosto con un volumen de $1\,115\,986\text{ m}^3$ (Figura 6), siendo este último el más voluminoso. Debido a ello, en noviembre se manifestó en superficie el nuevo domo de lava.

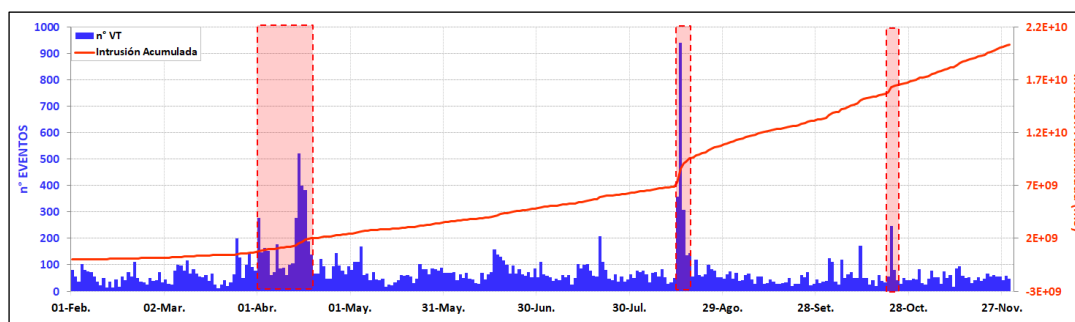


Figura 6.- Estimación del volumen de magma que ascendió a la cámara magmática del volcán Sabancaya entre el 1 de febrero al 30 de noviembre de 2020. La línea roja corresponde a la intrusión magmática acumulada. Se resalta el registro de las dos principales inyecciones de magma, ocurridas entre el 1 al 18 de abril y entre el 14 al 17 de agosto (sombra roja).

1.2. Monitoreo geodésico

Para cuantificar la deformación de la estructura del volcán Sabancaya asociada a la actividad volcánica, se empleó datos satelitales de radar de apertura sintética (SAR) y datos provenientes de dos estaciones GNSS ubicadas a 6 km al norte (SB01) y 3 km al sureste (SB02) del cráter del volcán Sabancaya (Figura 7). Ambas técnicas permiten evaluar la deformación asociada a una fuente principal ubicada entre 12 y 15 km por debajo del volcán Hualca Hualca, tal como ha sido propuesto por MacQueen et al. (2020) y Boixart et al. (2020). Dicha fuente tiene efecto directo en la activación de fallas y en el desarrollo de la actividad eruptiva del Sabancaya.

En la Figura 7 se muestra un mapa que indica la deformación registrada con el método INSAR durante los cuatro años del proceso eruptivo del volcán Sabancaya (imágenes del 8 de noviembre de 2016 y 30 de octubre de 2020,

en órbita ascendente), la cual es coherente con tasas anuales de deformación calculadas mediante el uso de la técnica GNSS. La mayor deformación vertical (inflación) se registra en la estación GNSS SB01, instalada próxima al volcán Hualca Hualca, con una velocidad de 3.6 cm/año (estación cercana a la fuente de deformación). Asimismo, se registra una inflación de menor magnitud en la estación GNSS SB02 (la más cercana al Sabancaya), con una velocidad de 2.7 cm/año. El análisis de los desplazamientos GNSS horizontales (Figura 7), permite confirmar la ubicación de la fuente principal de deformación, cercana al volcán Hualca Hualca.

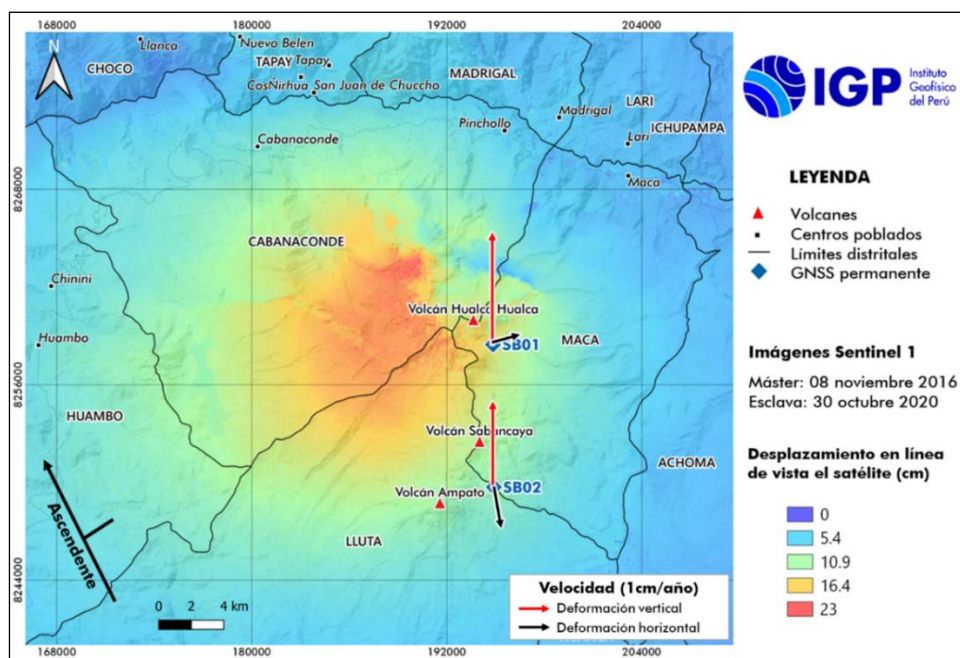


Figura 7.- Desenrollado de fase interferométrica elaborada con dos imágenes de radar del 8 de noviembre de 2016 y 30 de octubre de 2020 (comparando los 4 años desde el inicio del proceso eruptivo). Los colores indican las tasas de deformación en la línea de vista del satélite. Las flechas de color rojo y negro indican la deformación vertical y horizontal registradas en las estaciones GNSS SB01 (6 km al norte del Sabancaya) y SB02 (flanco sureste).

El análisis de la deformación medida con GNSS para el periodo febrero-noviembre de 2020 muestra que en la estación SB01 se registró una deformación vertical positiva (inflación) de 3.5 ± 0.9 cm (Figura 8A).

Por otro lado, en la estación SB02 (la más cercana al volcán Sabancaya) se ha registrado una deformación positiva de 2.1 ± 0.98 cm en la componente vertical (Figura 8B).

Los resultados obtenidos muestran que la componente vertical (elevación) de las estaciones GNSS (SB01) y (SB02) presenta una tendencia positiva, lo que sugiere un proceso de inflación del volcán Sabancaya y del sector sureste del Hualca Hualca. En el caso del volcán Sabancaya, este proceso estaría asociado probablemente al emplazamiento del domo de lava.

Los análisis de datos GNSS, al igual que los datos sísmicos, han permitido distinguir cuatro fases de deformación:

En la fase 1, febrero a marzo, se observa el incremento en la velocidad de la inflación (Figura 8, flecha 1), registrada con mayor claridad por la estación SB01, esto probablemente debido a su ubicación próxima a la fuente principal de deformación ubicada entre 12 y 15 km por debajo del volcán Hualca Hualca.

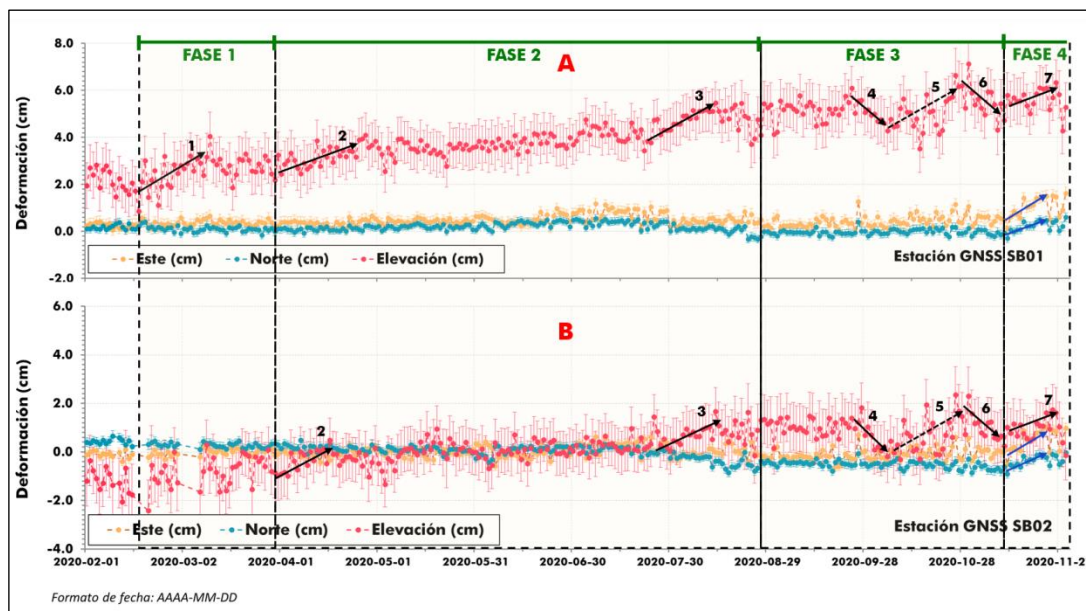


Figura 8.- Series de tiempo de las estaciones GNSS para las componentes este, norte y vertical (elevación) registradas entre el 1 de febrero y el 30 de noviembre de 2020: A) Medidas de deformación de la estación GNSS "SB01", ubicada a ~6 km al norte del cráter del Sabancaya, y B) Medidas de deformación de la estación GNSS "SB02", ubicada a ~3 km al sureste del cráter. Las líneas discontinuas de color negro indican las fases de actividad definidas para este periodo de tiempo. Las flechas indican periodos de incremento o disminución de la velocidad.

En la fase 2 (abril y agosto) se registraron dos importantes procesos de deformación en dirección vertical o inflación del volcán. El primer incremento en la velocidad de la inflación se registró desde el 1 de abril y la segunda ocurrió entre el 23 de julio y el 13 de agosto (Figura 8A y 8B, flechas 2 y 3), previo al incremento del número de sismos (enjambre) producido entre el 14 y 17 de agosto de 2020.

En la fase 3 (septiembre y noviembre), contrario a los episodios de mayor velocidad en la deformación vertical observada durante las fases 1 y 2, se ha registrado al menos dos episodios bien marcados de deflación (hundimiento). El primero ocurrió entre el 21 de septiembre al 4 de octubre de 2020 y el segundo entre el 25 de octubre al 7 de noviembre 2020 (Figura 8A y 8B, flechas 4 y 6). Entre estos dos episodios se ha registrado un proceso de inflación (Figura 8A y 8B, flecha 5), así como el incremento en el número y la energía de las explosiones.

Similares fluctuaciones en la deformación (deflación e inflación) ocurrieron durante el crecimiento del domo de lava del volcán Chaitén en Chile (Piña-Gauthier et al., 2013), donde las fluctuaciones se correlacionaron con el rápido crecimiento del domo. En ese sentido, se puede asumir que el reciente domo visible en el cráter del volcán Sabancaya ha podido estar creciendo desde inicios de la fase 3 (finales de septiembre), lo cual es corroborado por la intensidad de las imágenes de radar que definen el levantamiento de la zona del cráter (Figura 13, imagen de fecha 16 de septiembre de 2020) y por la ocurrencia de familias sísmicas (Figura 4). Además, el domo tuvo una mayor tasa de crecimiento entre el 25 de octubre y el 7 de noviembre de 2020.

Finalmente, dentro de la fase 4, desarrollada entre el 8 y 23 de noviembre, se observa un incremento en la velocidad de deformación de las componentes horizontales, con una deformación en dirección noreste registrada en ambas estaciones (Figura 8A y 8B, flecha 7), algo inusual, ya que la

deformación de esos dos puntos en el volcán Sabancaya durante este periodo de análisis es hacia el sureste (estación SB01) y sur (estación SB02). El inicio de esta deformación coincide con el crecimiento del segundo domo de lava emplazado en el cráter del volcán Sabancaya. A partir del 24 de noviembre se observa una tendencia estable en las componentes horizontales y, a partir del 27 de noviembre, una ligera deflación en la componente vertical.

1.3. Monitoreo visual y satelital

La actividad eruptiva actual viene siendo registrada con la ayuda de tres cámaras de vigilancia permanentes instaladas en los sectores noreste (Chivay), sureste (Cajamarca) y noroeste (Muccurca) del volcán Sabancaya (Figura 9). Además, la información obtenida es corroborada con datos de campo e imágenes satelitales PlanetScope, Sentinel I y II.

1.3.1. Características de las emisiones de ceniza

Durante el periodo de análisis, las explosiones del volcán Sabancaya generaron columnas de gases y cenizas de hasta 4000 m de altura sobre la cima del volcán, con promedios de 2500 m de altura. En los meses de febrero a mayo de 2020, durante la temporada de alta nubosidad que limitó parcialmente la visualización del volcán, la altura de las columnas de gases y cenizas no superaron los 3500 m de altura sobre la cima del volcán (Figura 9). En este periodo, las cenizas fueron dispersadas por el viento, preferentemente hacia los sectores sur, sureste (Figura 10) y suroeste del Sabancaya, en dirección de los poblados de Lluta y Huanca.

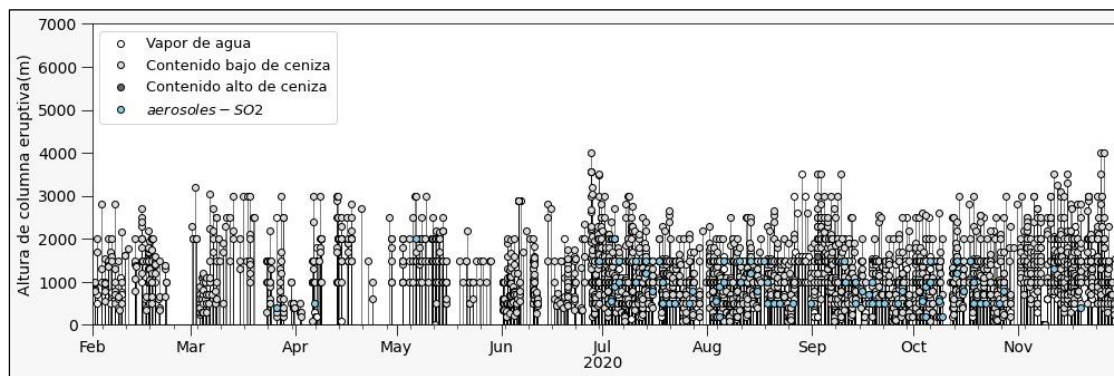


Figura 9.- Características y alturas de las columnas de gases y cenizas emitidas por el volcán Sabancaya durante el periodo del 1 de febrero y 30 noviembre de 2020.

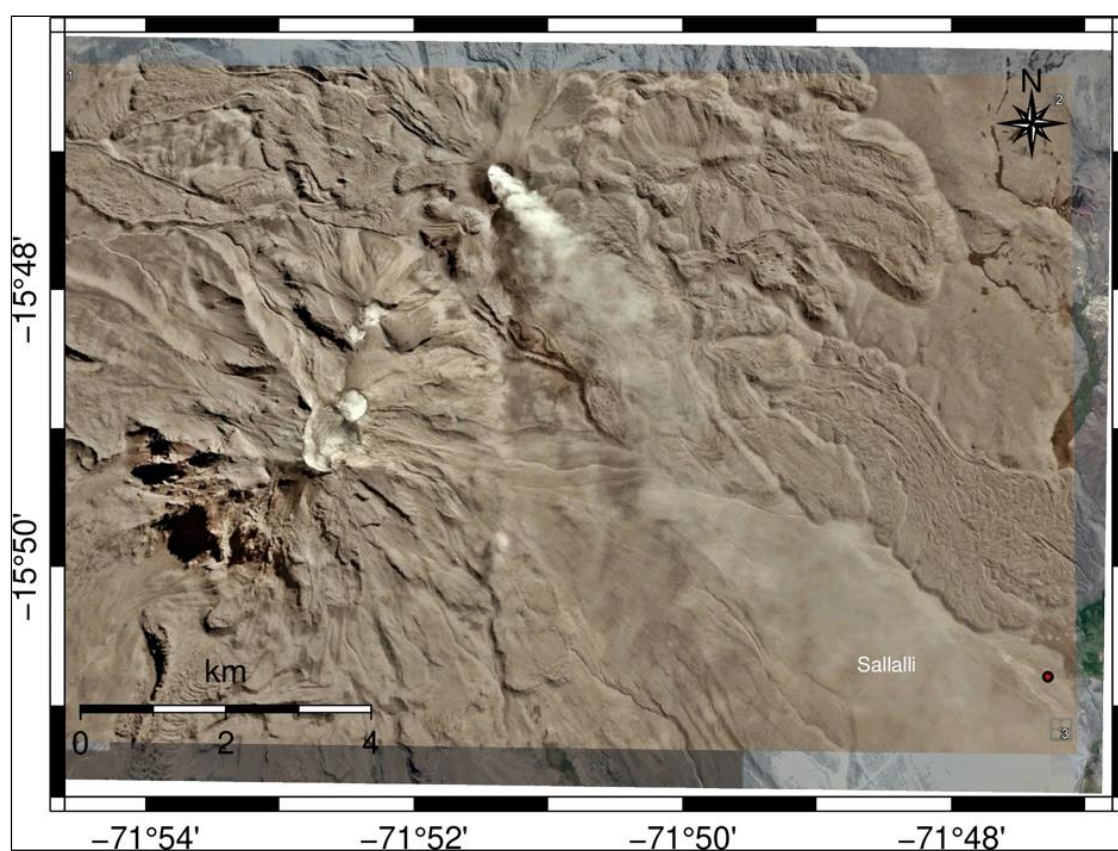


Figura 10.- Imagen satelital PlanetScope del 30 de mayo de 2020, en la cual se observa que la dispersión de ceniza del volcán Sabancaya es hacia el sureste, mayor a 20 km, en dirección de estancias, bofedales y zonas de pastoreo.

Posteriormente, durante los meses de junio y noviembre de 2020, las explosiones del volcán Sabancaya generaron columnas de gases y cenizas de hasta 4000 m de altura sobre la cima del volcán (Figuras 9 y 11) y que fueron

dispersadas a más de 20 km de distancia. Asimismo, a partir del 10 de noviembre, se observó un ligero incremento en la densidad de las emisiones de ceniza, es decir, un incremento en la cantidad de material expulsado y la duración en el tiempo de la expulsión de los materiales volcánicos (Figura 11c). En este tiempo, las cenizas se dispersaron, principalmente, hacia el sector noreste en dirección de los centros poblados de Achoma, Maca, Lari, Madrigal, Ichupampa, Yanque, Chivay, Coporaque y Tuti; y los sectores oeste, suroeste y sur del Sabancaya, disponiendo de reportes de caídas de ceniza en las localidades de Lluta, Huambo y Huanca, localizadas a distancias de 27 a 30 km desde el volcán.

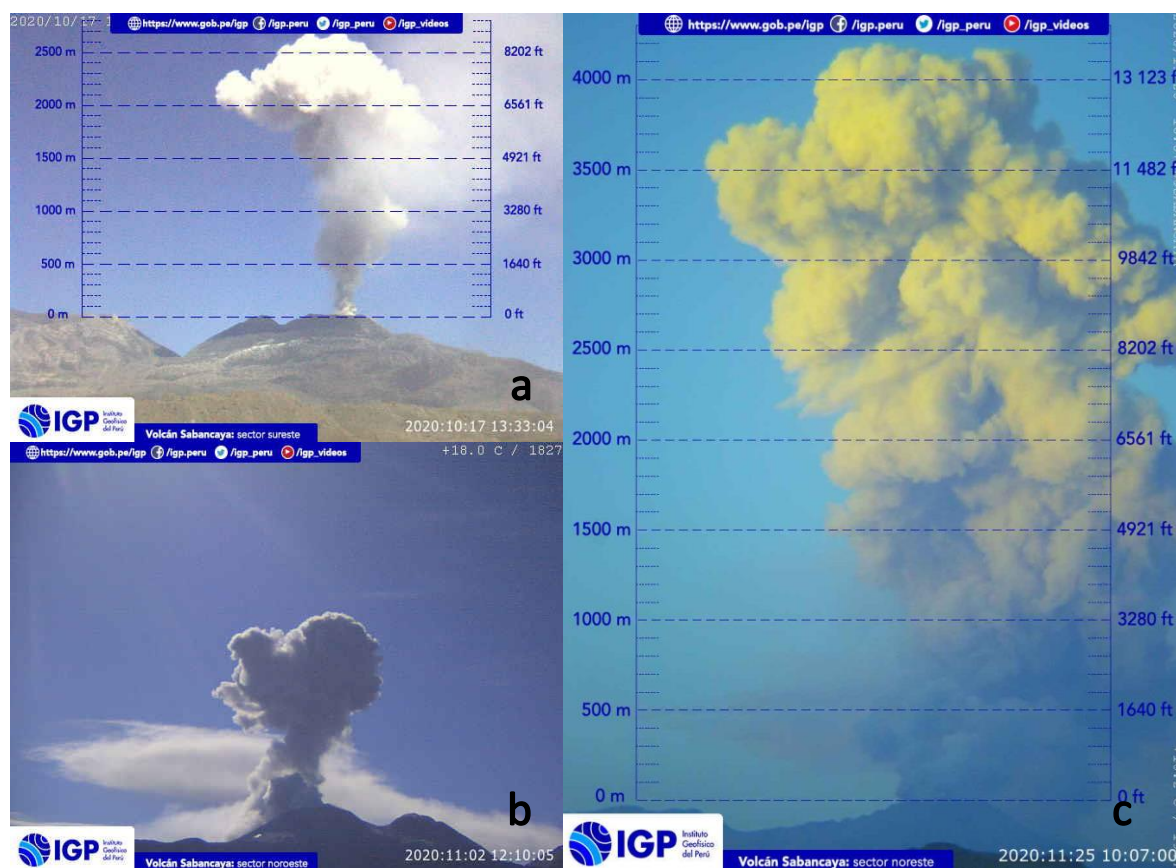


Figura 11.- Imágenes de las cámaras de vigilancia permanente del volcán Sabancaya: (a) Explosión del 17 de octubre registrada por la cámara de vigilancia Cajamarcana. b) Explosión del día 2 de noviembre registrada por la cámara de vigilancia Muccurca y c) Explosión del día 25 de noviembre registrada por la cámara de vigilancia de Chivay.

1.3.2. Orificios de emisión de gases y cenizas

Realizando el análisis de imágenes satelitales PlanetScope, se ha podido apreciar, desde junio de 2020, la formación en el interior del cráter del volcán Sabancaya de dos orificios o ventos. El viento 1 se encuentra ubicado en la zona este del cráter, mientras que el viento 2 en su zona oeste. Ambos ventos están ubicados en los extremos del primer domo de lava emplazado en octubre de 2019 (Figura 12) y, actualmente, vienen emitiendo constantemente gases, cenizas y proyectiles balísticos como parte del proceso eruptivo del Sabancaya.

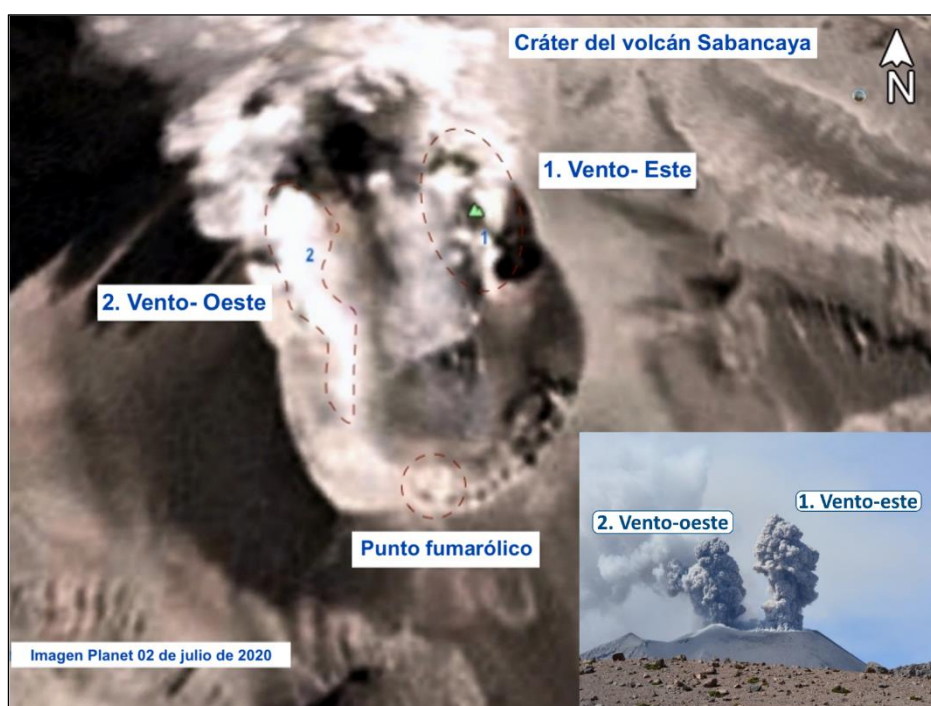


Figura 12.- Imagen PlanetScope de la zona del cráter del volcán Sabancaya del 2 de julio de 2020, en la cual se identificó la presencia del viento 1 al este del cráter y el viento 2 al oeste del mismo. Además, en el sector sur del cráter, se ha identificado una zona por donde son emitidas las fumarolas.

A pesar del emplazamiento de un nuevo domo de lava ocurrido el 13 de noviembre, actualmente ambos orificios o ventos siguen emitiendo materiales volcánicos.

1.3.3. Formación del nuevo domo de lava

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 desde el mes de febrero a noviembre de 2020 (Figura 13). Este tipo de imágenes satelitales emite una señal de radar que penetra nubes y columnas eruptivas, y es independiente de las condiciones atmosféricas y de la emisión de materiales volcánicos.

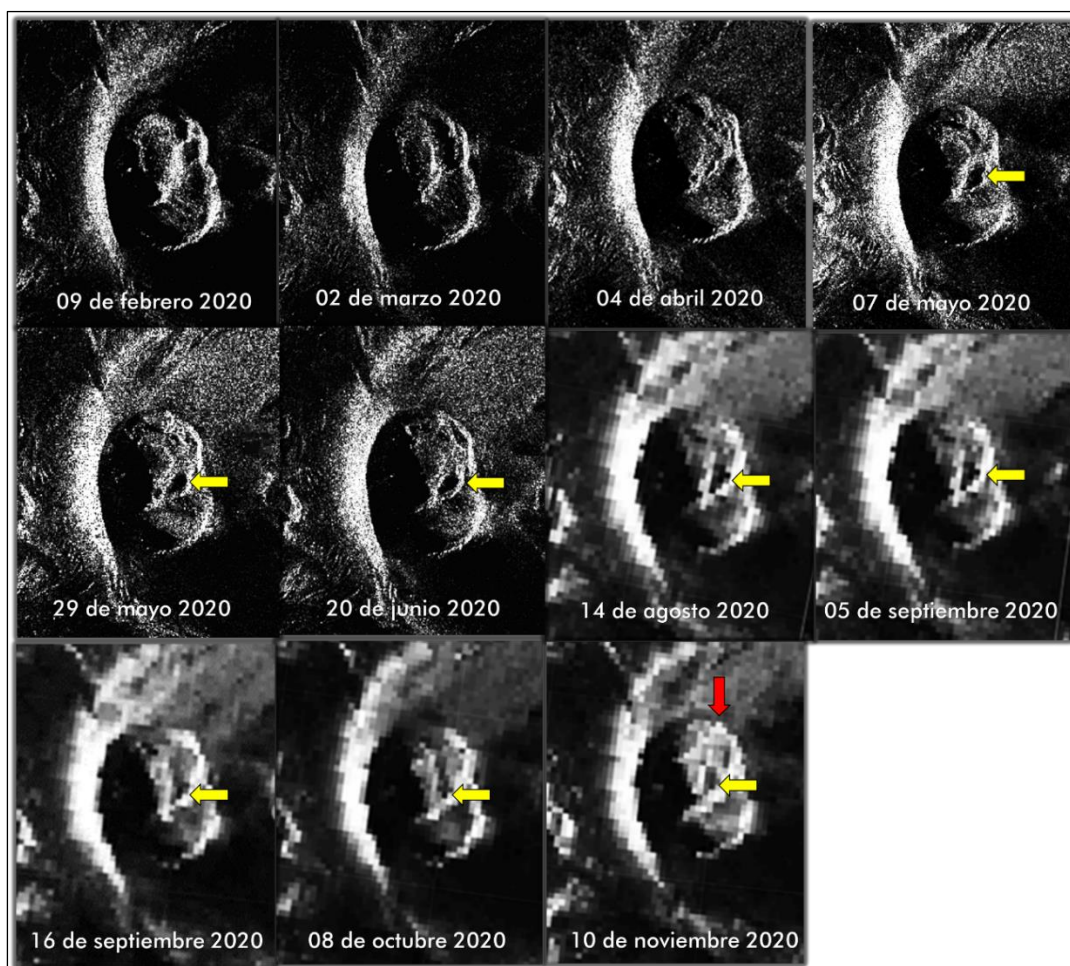


Figura 13.- Intensidad de imágenes TerraSAR-X de la zona del cráter del volcán Sabancaya. La imagen del 10 de noviembre muestra la presencia del nuevo domo de lava. Las imágenes satelitales fueron proporcionadas por CONIDA y las de vista preliminar de la web de AIRBUS.

De acuerdo a ello se ha visualizado la destrucción del primer domo y la formación del segundo en el siguiente orden:

- Las imágenes del 9 de febrero al 4 de abril 2020 muestran de manera progresiva la destrucción parcial del primer domo de lava.
- En las imágenes del 7 de mayo al 5 de septiembre se observa la presencia de una zona de color negro (Figura 13, señalada con una flecha de color amarillo) que evidencia la presencia de una concavidad (sombra) como resultado de la destrucción del primer domo de lava.
- Las imágenes del 16 de septiembre y 8 de octubre muestran que la zona cóncava ubicada en el sector norte del cráter ocupa un área menor, por lo que se infiere el desarrollo de un ligero levantamiento de la zona norte del cráter (Figura 13), puesto en evidencia con los periodos de inflación y deflación registrados por los equipos GNSS y que fueron interpretados como el crecimiento del domo en el interior del cráter.
- En la última imagen disponible, de fecha 10 de noviembre de 2020, se observa el inicio de formación del domo en el sector noreste del cráter del volcán Sabancaya (Figura 13, señalada con una flecha de color rojo), como parte de la fase 4 de actividad eruptiva del volcán.

Asimismo, a partir de las imágenes satelitales Sentinel II se observaron anomalías térmicas al interior del cráter del Sabancaya de acuerdo al siguiente proceso (Figura 14):

(i) entre los meses de abril a junio de 2020, se observaron la presencia de anomalías térmicas en el extremo noroeste del cráter del Sabancaya.

(ii) Posteriormente, entre los meses de julio a agosto, se registraron anomalías térmicas en el extremo norte del cráter.

(iii) finalmente, entre septiembre y noviembre de 2020, las anomalías térmicas fueron observadas en el extremo noreste del cráter del volcán Sabancaya sobre el nuevo domo de lava.

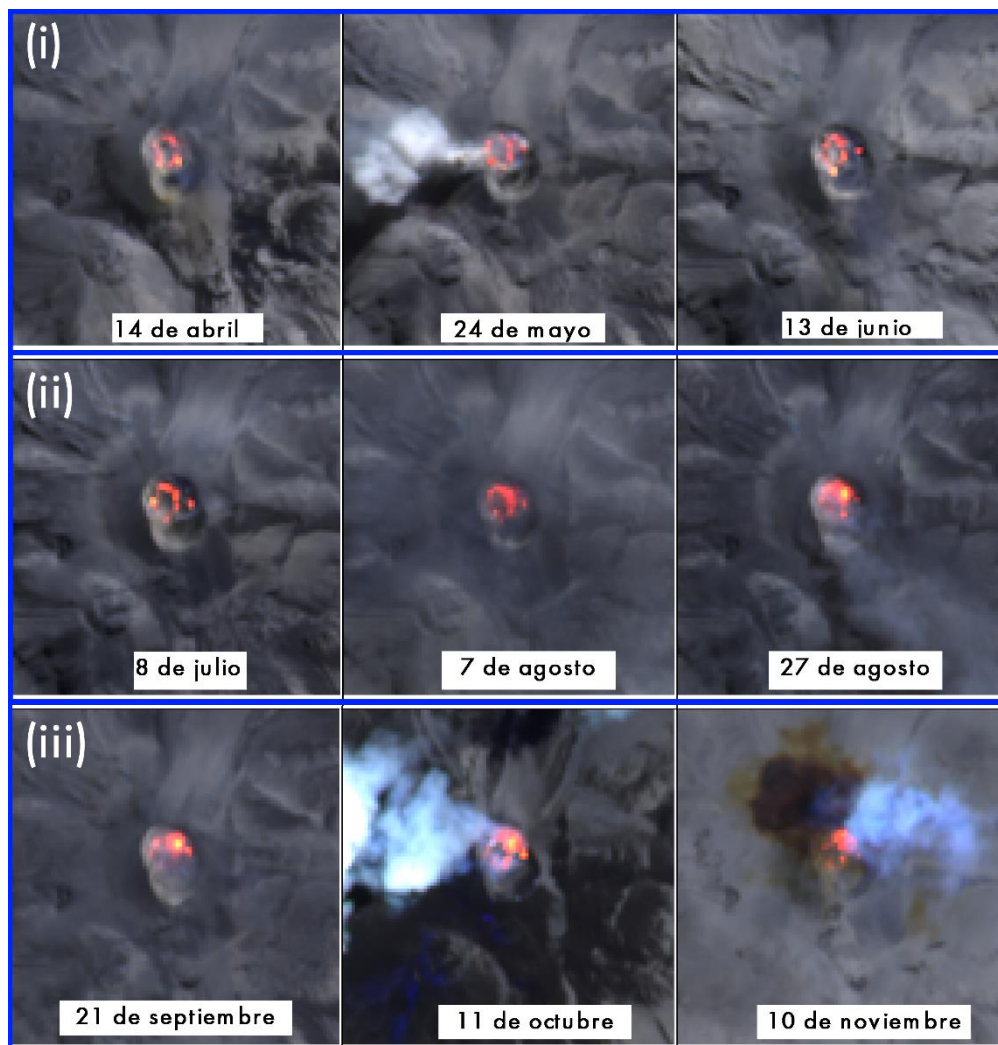


Figura 14. Anomalías térmicas observadas a través de las imágenes satelitales Sentinel II, originadas en gran parte por el emplazamiento del segundo domo de lava en el cráter del volcán Sabancaya.

Además, mediante el sistema satelital de monitoreo de puntos calientes en zonas volcánicas “MIROVA” de la Universidad de Torino (Italia), se observó en el mes de noviembre de 2020 un incremento en el número de anomalías térmicas y de energía irradiada, con un valor de hasta 63 Megavatios (MW) (Figura 15). La presencia de estas anomalías térmicas está

relacionada con la aparición de un nuevo domo de lava en el cráter del Sabancaya.

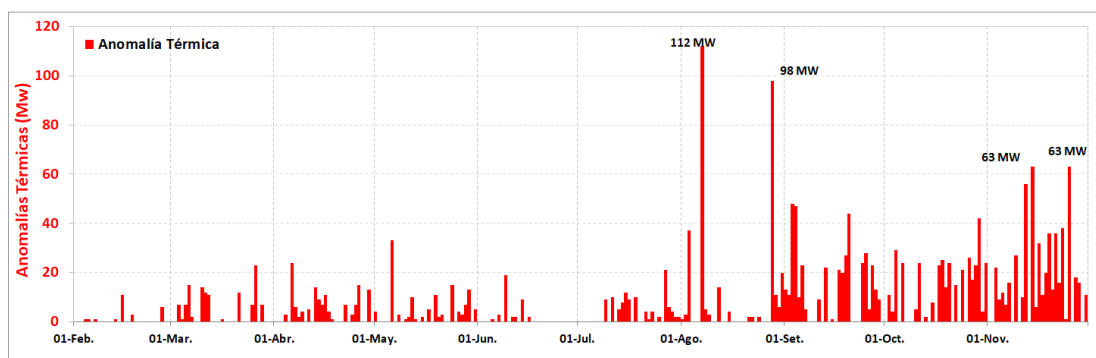


Figura 15.- Características de las anomalías térmicas detectadas en el volcán Sabancaya durante el periodo entre el 1 de febrero al 30 noviembre de 2020.

Finalmente, mediante el análisis de imágenes PlanetScope, obtenidas el 14 de noviembre del 2020, y en colaboración con el Servicio Geológico Colombiano, se corroboró la formación de un nuevo domo de lava en el extremo noreste del cráter del volcán Sabancaya. Este domo tiene una longitud de 110 m en dirección E-O, y 130 m en dirección N-S, ocupando un área aproximada de 11 700 m² (Figura 16).

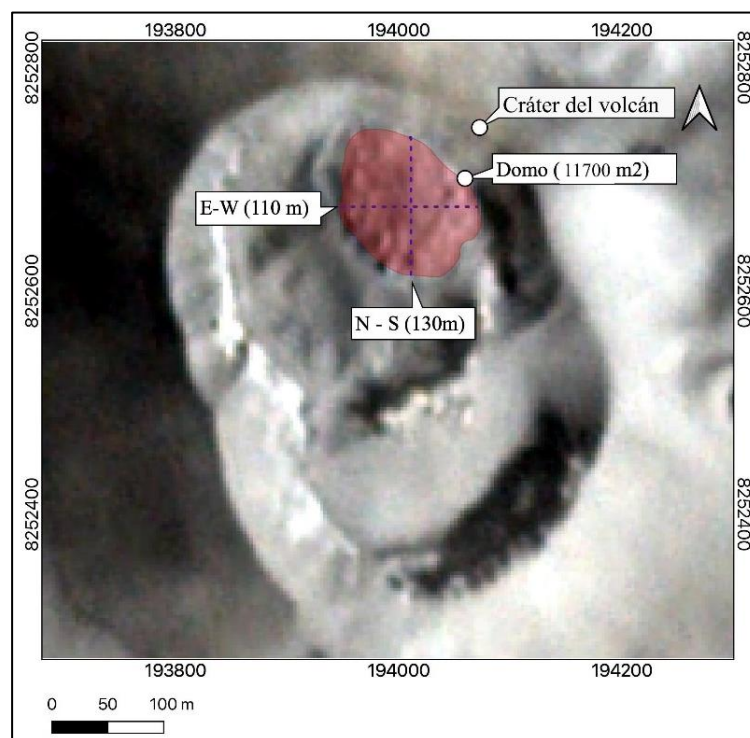


Figura 16.- Imagen PlanetScope del 14 de noviembre de 2020 del cráter del volcán Sabancaya, en la cual se observa el nuevo domo de lava (sombra roja) emplazado al norte del cráter.

2.- INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA

2.1.- Análisis de la actividad volcánica

A partir del monitoreo sísmico, deformación, visual y satelital efectuado en el periodo de análisis entre febrero y noviembre de 2020, se han identificado 4 importantes fases de actividad volcánica del Sabancaya, tal como se observa en la Figura 17.

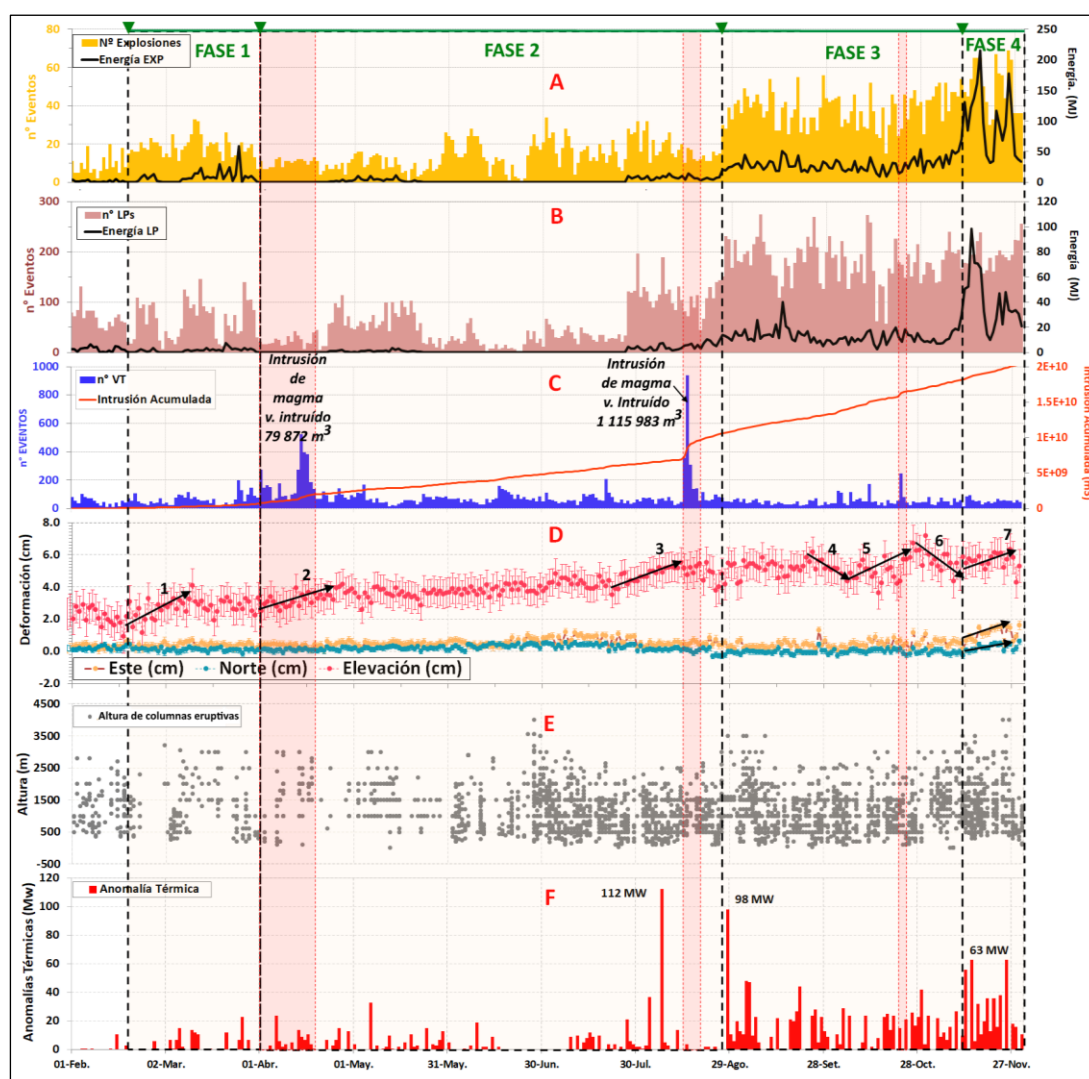


Figura 17.- Correlación de los registros sísmicos (A, B y C), las series de tiempo de la estación GNSS SB01 (D), altura de las columnas eruptivas (E) y anomalías térmicas detectadas por el sistema MIROVA (F). Las líneas discontinuas de color negro identifican el inicio de las cuatro fases de actividad eruptiva. La sombra roja muestra los periodos durante los cuales se infieren se produjeron nuevas intrusiones de magma de acuerdo al registro de enjambres sísmicos.

Las fases de actividad volcánica 1, 3 y 4 se caracterizaron por presentar un incremento importante en el número y energía de las explosiones volcánicas (Figura 17A), con la consecuente emisión de cenizas que fueron dispersadas en las diferentes direcciones entorno del volcán, siendo las poblaciones localizadas al sur, suroeste y valle del Colca las principales afectadas. Durante la fase 2, se produjeron 2 importantes enjambres sísmicos: el primero entre el 13 y 18 de abril y el segundo entre el 14 y 17 de agosto (Figura 17B), durante los cuales habría ascendido un volumen de magma de aproximadamente $1\,115\,986\text{ m}^3$ a la cámara magmática del Sabancaya, ubicada a profundidades entre 12 y 15 km.

Posteriormente, los datos de las componentes verticales de dos estaciones GNSS permiten inferir el desarrollo de un proceso de inflación de la superficie del volcán (Figura 17D), en correlación con los episodios de mayor ocurrencia de familias sísmicas (*multiplets*). Los resultados de ambos análisis indican la formación y el emplazamiento de un nuevo domo a partir del 10 de noviembre ubicado en el sector noreste del cráter del Sabancaya. De acuerdo a la imagen PlanetScope del 14 noviembre, este cuerpo de lava presenta las siguientes dimensiones: 110 m de diámetro en dirección E-O, 130 m de diámetro en dirección N-S y ocupa un área aproximada de $11\,700\text{ m}^2$. El crecimiento y formación de un nuevo domo ha generado el incremento en el número de anomalías térmicas (Sentinel II y MIROVA), con el registro de un pico de hasta 63 MW el 14 de noviembre de 2020 (Figura 17F), fecha en la cual el domo de lava ya era completamente visible en el cráter del volcán.

A partir del día 8 y hasta el 30 de noviembre de 2020 (fase 4), se observó un incremento en la energía sísmica de las explosiones acompañadas de una constante emisión de cenizas. Finalmente, con base en la información de monitoreo volcánico, se concluye que la actual erupción del volcán Sabancaya continuará durante los próximos meses y, posiblemente, algunos años más.

2.2. Alerta de peligros volcánicos emitidos

Durante el periodo de febrero a noviembre de 2020, el IGP, a través del CENVUL, ha emitido las siguientes alertas:

2.2.1. Alertas por dispersión de ceniza

Durante este periodo, el CENVUL ha emitido cuatro alertas por dispersión de cenizas (días 27 de junio, 9 de julio, 24 de septiembre y 23 de noviembre de 2020), plumas de gases y cenizas que llegaron a superar los 2500 m de altura. Los vientos transportaban los gases hacia las zonas pobladas del valle del Colca.

Las alertas han sido emitidas a través del aplicativo móvil Volcanes Perú y, en paralelo, comunicadas telefónicamente a los responsables del Centro de Operaciones de Emergencia de Caylloma y COER Arequipa (Figura 18).

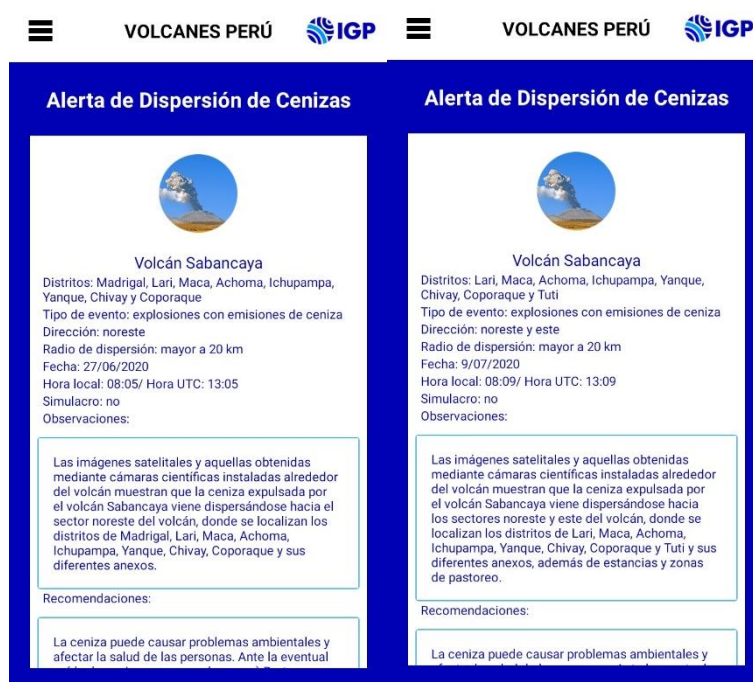


Figura 18.- Alertas de dispersión de ceniza emitidas por el CENVUL a través del aplicativo móvil Volcanes Perú, correspondiente a los eventos registrados por la red de monitoreo volcánico del Sabancaya, los días 27 de junio y 9 de julio de 2020.

2.2.2. Alertas por descenso de lahares

Igualmente, durante el presente periodo de análisis, lahares o flujos de sedimentos volcánicos han sido originados por la ocurrencia de precipitaciones pluviales en la zona del Sabancaya. La red de monitoreo geofísico que opera en las quebradas Huayuray (Pinchollo) y próxima al río Sallalli detectó hasta en cuatro oportunidades el descenso de lahares (días 24, 26, 27 y 28 de febrero). Debido a ello (Figura 19), el CENVUL emitió 4 alertas por descenso de lahares en el volcán Sabancaya que discurrieron por la quebrada Huayuray (norte del volcán Hualca Hualca) en dirección del río Colca.



Figura 19.- Alertas de lahar emitidas por el CENVUL a través del aplicativo móvil Volcanes Perú. Corresponde a los flujos registrados por la red de monitoreo volcánico del Sabancaya los días 24, 26, 27 y 28 de febrero de 2020.

2.3. Peligros volcánicos

Con base en el análisis de la actividad volcánica del Sabancaya se han identificado peligros que pueden ser generados por la continua actividad explosiva. Estos peligros son la caída de tefras (cenizas), flujos piroclásticos y lahares (flujos de lodo), los cuales se detallan a continuación:

2.3.1. Peligros por caídas de tefras (cenizas)

Las erupciones explosivas del Sabancaya vienen emitiendo cenizas que son expulsadas de manera violenta hacia la atmósfera para posteriormente dispersarse en todos los sectores entorno al volcán hasta distancias que superan los 20 km del cráter. Desde el inicio del proceso eruptivo en noviembre de 2016, el Sabancaya emite cenizas de manera casi permanente. Las cenizas corresponden a partículas finas (<2 mm) de magma pulverizado o fragmentos pequeños de roca, las cuales pueden causar serios problemas en la salud de los pobladores del valle del Colca y poblados localizados al sur y suroeste del volcán (Huanca, Taya, Lluta) en caso incrementa o perdure por varios años la actividad. Actualmente, la ceniza viene afectando también los pastos naturales, bofedales, fuentes de agua, etc., localizados próximos al Sabancaya.

2.3.2. Peligros por flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos son mezclas calientes (300 °C a 800 °C) de ceniza, fragmentos de roca y gases (Nakada, 2000) que descienden por los flancos del volcán al ras de la superficie y a grandes velocidades, entre 100 y 300 m/s (Hoblitt et al., 1995). Dependiendo de su volumen, estos flujos pueden desplazarse por las laderas del volcán para luego encauzarse por el fondo de las quebradas o valles y alcanzar importantes distancias del volcán. Estos flujos por ser densos y calientes pueden destruir y calcinar todo lo que encuentren a su paso.

Aunque las imágenes de satélite del cráter del volcán Sabancaya muestran la presencia de un nuevo domo de lava, es poco probable que este pueda generar flujos piroclásticos debido a que es pequeño con relación al domo de lava formado en octubre de 2019 y, además, porque viene siendo destruido por las constantes explosiones que presenta el volcán. Sin embargo,

de ocurrir un flujo piroclástico, el volumen de este sería de poco a moderado volumen (menos de 0.0001 km^3), y recorrería hasta 6 u 8 km de distancia del volcán. Dado que dentro de un radio de 8 km del volcán no existen poblados u obras de infraestructura, el riesgo por este peligro es bajo.

2.3.3. Peligros por lahares (flujos de lodo)

Los lahares (flujos de lodo) son mezclas de fragmentos de rocas volcánicas y cenizas de tamaños diversos movilizados por el agua y que fluyen a velocidades de 20 a 60 km/h. En el Sabancaya, comúnmente, se registran lahares en periodos de lluvia (diciembre a marzo) y en este próximo periodo es muy posible la ocurrencia de lahares. Si ocurriesen lahares, descenderían por las quebradas que drenan del volcán Sabancaya (quebradas Mollebaya, Colihuiri, Sallalli y Sahuancaya-Pujro Huayjo) e, incluso, por quebradas que drenan por los volcanes Ampato y Hualca Hualca. Los lahares causarían daños en terrenos de cultivo, carreteras, puentes, sobre todo si descienden por las quebradas que drenan del volcán Hualca Hualca, entre ellas la quebrada Mollebaya-Río Sepina (Achoma), río de Hualca Hualca, quebrada Japo, quebrada Huayuray, entre otros.

2.4. Escenarios eruptivos futuros

A continuación, se presentan los probables escenarios eruptivos que podrían presentarse en el volcán Sabancaya con base en el comportamiento dinámico pasado, presente y al monitoreo de la actividad volcánica actual realizado por el IGP.

2.4.1. Primer escenario: erupción vulcaniana (IEV 2)

Actualmente, 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 vulcaniana. Como resultado de estas explosiones se generan columnas eruptivas de gases y cenizas que, en ocasiones, superan los 3.5 km de altura. En este contexto, la actividad explosiva actual del Sabancaya puede erosionar y destruir parte del nuevo domo de lava formado en noviembre de 2020 en el cráter del volcán, con la posterior ocurrencia de actividad explosiva moderada.

En este escenario también es muy probable, a partir del mes de diciembre a marzo, la formación de lahares (flujos de lodo) que podrían causar daños en terrenos de cultivo, puentes, tramos de carreteras como la vía Chivay-Huambo, especialmente si estos flujos descienden del volcán Hualca Hualca. Los lahares pueden descender por la quebrada Mollebaya-Río Sepina (Achoma), el río de Hualca Hualca y la quebrada Huayuray.

2.4.2. Segundo escenario: actividad explosiva con crecimiento y colapso de domo

Actualmente, en el cráter del Sabancaya se visualiza el emplazamiento de un nuevo domo de lava de 130 m x 110 m de diámetro y a pesar de su presencia, las emisiones de gases y ceniza siguen ocurriendo a través de orificios ubicados en los extremos oeste y suroeste del domo y en el borde oeste del mismo, lo que contribuye a evitar el desencadenamiento de un evento explosivo mayor.

El continuo crecimiento del nuevo domo en el volcán Sabancaya puede generar flujos piroclásticos (flujos incandescentes de bloques y cenizas) que desbordarían del cráter para emplazarse principalmente al norte del volcán hasta alcanzar distancias de menos de 8 km, afectando terrenos de pastizales y bofedales.

Dado que dentro de un radio de 8 km del volcán no existen poblados u obras de infraestructura, el riesgo por este peligro es bajo.

CONCLUSIONES

- Entre febrero y noviembre 2020, la actividad volcánica del Sabancaya se manifestó con la ocurrencia promedio de 23 explosiones por día, y con máximos de hasta 69 explosiones, con la consecuente emisión de cenizas que afectaron recurrentemente los centros poblados del valle del Colca y aquellos localizados al sur y suroeste del Sabancaya.
- Durante el periodo de estudio, el proceso eruptivo del volcán Sabancaya presentó cuatro fases, siendo la fase 2 (31 de marzo-25 de agosto de 2020) la más importante debido a que se produjeron 2 importantes enjambres sísmicos: el primero entre el 13 y 17 de abril y el segundo entre el 14 y 17 de agosto. Dichos enjambres sugieren el ascenso de magma con un volumen de aproximadamente $1\,115\,986\text{ m}^3$ hacia la cámara magmática del Sabancaya. Este proceso es corroborado con los episodios de ocurrencia de familias sísmicas (*multiplets*) y procesos de inflación de la estructura volcánica.
- Las imágenes satelitales TerraSAR-X y PlanetScope han permitido observar la evolución y estimar las dimensiones del nuevo domo de lava en 110 m de diámetro en dirección E-O y 130 m de diámetro en dirección N-S, ocupando un área aproximada de $11\,700\text{ m}^2$. El emplazamiento del nuevo domo se habría producido a partir del 10 de noviembre.
- Luego de producirse las explosiones en el Sabancaya, los gases y cenizas expulsados en forma de columnas eruptivas alcanzaron alturas de hasta 4 km respecto a la cima del Sabancaya y que fueron dispersadas predominantemente en dirección sur, sureste y suroeste, hacia los distritos de Huanca y Lluta (entre febrero y junio). A partir del mes de julio hasta noviembre 2020, las cenizas emitidas fueron dispersadas principalmente hacia el sector norte y noreste, en dirección de los distritos de Achoma, Maca, Lari, Madrigal, Ichupampa, Yanque, Chivay, Coporaque y Tuti. Asimismo, también en este periodo, las cenizas fueron dispersadas en dirección oeste, suroeste y sur del Sabancaya, teniéndose

reportes de caídas de ceniza en las localidades de Lluta, Huambo y Huanca localizadas entre 27 y 30 km de distancia del volcán.

- Respecto a la actividad futura del volcán Sabancaya, se han identificado dos posibles escenarios eruptivos: a) escenario que tienen mayor probabilidad de presentarse corresponde a la ocurrencia de erupciones explosivas moderadas de tipo vulcanianas (IEV 2), con columnas de gases y cenizas que pueden superar los 3.5 km de altura, como las que actualmente viene presentándose en el Sabancaya; b) el segundo es menos probable y está asociado al crecimiento del nuevo domo de lava que puede desbordar el cráter y generar flujos piroclásticos de poco volumen sobre el sector norte del Sabancaya.

RECOMENDACIONES

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

- Mantener el nivel de alerta volcánica en color naranja.
- No acercarse a un radio menor de 12 km del cráter. Toda aproximación o ascenso al volcán es de muy alto riesgo.
- Implementar acciones de prevención y mitigación ante un incremento de la actividad volcánica.
- Ante el registro de precipitaciones pluviales, la probabilidad de generación de lahares es latente. En ese escenario, se recomienda mantener distancia de los lechos de ríos y quebradas que descienden del volcán Sabancaya.
- 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.
- 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

- Battaglia, J.; Got J. L.; Okubo, P. (2003). Location of long-period events below Kilauea Volcano using seismic amplitudes and accurate relative relocation, *J. Geophys. Res.*, 108(B12), 2553.
- Boixart, G.; Cruz, L.F.; Miranda Cruz, R.; Euillades, P.A.; Euillades, L.D.; Battaglia, M. (2020) Source Model for Sabancaya Volcano Constrained by DInSAR and GNSS Surface Deformation Observation. *Remote Sens.*, 12, 1852.
- Deichmann, N., Ernst, J. (2009). Earthquake focal mechanisms of the induced seismicity in the 2006 and 2007 below Basel (Switzerland). *Swiss J. Geosci.* 102,457–466.
- Dorbath, L., Cuenot, N., Genter, A., Frogneux, M. (2009). Seismic response of the fractured and faulted granite to massive water injection at 5 km depth at Soultz-sous-Forêts (France). *Geophys. J. Int.*
- Flóvenz, O. G., Ágústsson, K., Guðnason, E. Á., & Kristjánssdóttir, S. (2015). Reinjection and Induced Seismicity in Geothermal Fields in Iceland. In *Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 19–25 April 2015*.
- Gerbe, M.C.; Thouret, J.C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of lavas erupted through the 1990–98 explosive activity of Nevado Sabancaya in south Peru. *Bull. Volcanol.* 66, 541–561.
- Hamaguchi, H.; Hasegawa, A. (1975). Recurrent Occurrence of the Earthquakes with Similar Wave Forms and Its Related Problems. *Journal of the Seismological Society of Japan* 28: 153-169.
- Hoblitt, R.P.; Walder, J.S.; Driedger, C.L.; Scott, K.M.; Pringle, P.T. & Vallance, J.W. (1995) - *Volcano Hazards from Mount Rainier, Washington*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 95-273, 10 p.
- 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.

- Juncu, D., Arnadóttir, T., Geirsson, H., Guðmundsson, G. B., Lund, B., Gunnarsson, G. et al. (2018). Injection-induced surface deformation and seismicity at the Hellisheidi geothermal field, Iceland. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*
- 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*.
- Nakada, S. (2000). Hazards from pyroclastic flows and surges. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer, H. & Stix, J., eds. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 945-955.
- Passarelli, L.; Heryandoko, N.; Cesca, S.; Rivalta, E.; Rasmid Rohadi, S.; Milkereit, C. (2018). Magmatic or Not Magmatic? The 2015–2016 Seismic Swarm at the Long-Dormant Jailolo Volcano, West Halmahera, Indonesia. *Frontiers in Earth Science*, 6.
- Piña-Gauthier, M.; Lara, L.E.; Bataille, K.; Tassara, A.; Báez, J.C. (2013). Co-eruptive deformation and dome growth during the 2008-2009 Chaitén eruption, Southern Andes. *Andean Geology* 40 (2): 310-323.
- Power, J. A.; Lalla, D. J. (2010). Seismic observations of Augustine Volcano, Alaska; 1970-2007, in *The 2006 Eruption of Augustine Volcano, Alaska*, edited by J. A. Power, M. L. Coombs, and J. T. Freymueller, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1769, 3–40.
- Puma, N.; Del Carpio, J. (2019) – Evaluación del proceso eruptivo del volcán Sabancaya: situación actual a partir de observaciones de campo (diciembre, 2019). Repositorio Geofísico Nacional, <http://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/4724>, 14 p.

- Roman, D. C.; Power, J. A. (2011). Mechanism of the 1996–97 non-eruptive volcano-tectonic earthquake swarm at Iliamna Volcano, Alaska. *Bulletin of Volcanology*, 73(2), 143–153.
- Rowe, C. A.; Thurber C. H.; White, R. A. (2004). Dome growth behavior at Soufriere Hills Volcano, Montserrat, revealed by relocation of volcanic event swarms, 1995–1996, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 134(3), 199–221.
- Tavera, H. (2016). *Análisis de los Principales Peligros Naturales en el Valle del Colca – Arequipa*. Instituto Geofísico del Perú. Lima, Perú.
- White, R.; McCausland, W. (2016). Volcano-tectonic earthquakes: a new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 309 (2016) 139-155, 17 p.