



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú - IGP



INFORME VULCANOLÓGICO

Evaluación y análisis de la actividad sísmica en el volcán Sabancaya, periodo 1990-2019

Fecha: abril de 2020

2020

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Danny Scipión

Informe vulcanológico

IGP/CENVUL-SAB/IV 2020-0001

Evaluación y análisis de la actividad sísmica en el volcán Sabancaya, periodo 1990-2019

Autores:

Nino Puma Sacsí

José Luis Torres Aguilar

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú

Calle Badajoz n.º 169, Mayorazgo, Ate

Teléfono: 51-1-3172300

RESUMEN

Después de casi 200 años de inactividad, el volcán Sabancaya, localizado en la provincia de Caylloma en la región Arequipa, empieza un periodo de reactivación desde 1986 hasta 1990. A partir de entonces, presentó explosiones e inició un nuevo proceso eruptivo explosivo de tipo "vulcaniano" que perduró durante 8 años y tuvo un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de 2-3. En este proceso eruptivo, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) instaló una red sísmica y obtuvo los primeros registros sísmicos del volcán Sabancaya grabados en papel y en formato digital. Los dos últimos procesos eruptivos (1990-1998 y 2016 hasta la actualidad) han sido anteccedidos cada uno por una etapa preeruptiva, caracterizada por un incremento de actividad sismovolcánica que duró más de 3 años.

En ambos procesos eruptivos se registraron principalmente sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT), ligados a la ruptura de rocas al interior del volcán y localizados en su mayoría en la zona norte del Sabancaya; esta sismicidad estuvo caracterizada por su migración desde zonas distales hacia zonas proximales del volcán. Los sismos de tipo Volcano-Tectónico se correlacionan con la importante deformación calculada con técnicas de interferometría InSAR ocurrida a 7 km al norte del Sabancaya, cuya tasa de deformación es de 2.5 cm/año (Pritchard y Simons, 2002).

Se cuenta con limitada información sísmica en papel (sismograma) y digital respecto al proceso eruptivo 1990-1998, lo que hace difícil realizar gráficos estadísticos y el respectivo tratamiento de datos e interpretación; sin embargo, se ha observado al menos 2 enjambres sísmicos en los periodos de registro (agosto de 1990 y julio de 1993).

Durante el último proceso eruptivo (noviembre de 2016 hasta diciembre de 2019), el volcán Sabancaya ha presentado niveles de actividad moderados. Esta erupción se ha caracterizado por el registro constante de explosiones volcánicas con la consecuente emisión de cenizas dispersadas en todas las direcciones cardinales del volcán. En este proceso eruptivo se han identificado tres etapas de actividad:

Etapa I: caracterizada principalmente por el incremento de la actividad sísmovolcánica. En esta etapa se observó la ocurrencia de numerosas explosiones, con un máximo de 110 eventos registrados el 18 de enero de 2017, con valores de energía de hasta 169 Megajoules (MJ), registrado el 9 de agosto de 2017. Los sismos de tipo Híbrido tuvieron una energía máxima de 41 MJ. Por otro lado, en ocasiones se registraron 317 eventos de tipo Largo Periodo por día con energías bajas (23 de febrero de 2017).

Etapa II: etapa con una actividad constante sin mayor variación. Durante esta etapa se registró en promedio de 21 explosiones por día, con energías del orden de 20 MJ por día. Por otro lado, se registraron sismos de tipo Híbrido que alcanzaron una tasa de 2 eventos por día, con una energía máxima del orden de 2 MJ registrada el 14 de abril de 2018. Los eventos de tipo Largo Periodo experimentaron un incremento en energía de hasta 112 MJ el 4 de septiembre de 2018, probablemente debido al ascenso de magma.

Etapa III: caracterizada por un incremento de la actividad sísmovolcánica ocasionada por nuevos ascensos de magma. En esta etapa se registró una tasa de 24 explosiones por día y un valor máximo de 324 eventos de tipo Largo Periodo el día 28 de mayo de 2019, los que perturbaron la energía de las explosiones. En abril de 2019, se observaron 2 pequeños enjambres sísmicos y, entre mayo y octubre de 2019, 3 importantes enjambres sísmicos. Dicha sismicidad estaría ligada al crecimiento de un domo de lava al interior del cráter del volcán. Este domo, de 90 m de altura y de 280 m de diámetro, es visible en la cima del volcán. La sismicidad muestra un crecimiento notorio del domo desde abril de 2019, el cual se aceleró en octubre de 2019.

ÍNDICE

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	9
1.1. UBICACIÓN	9
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
1.3. OBJETIVOS	11
1.3.1. Objetivo general.....	11
1.3.2. Objetivos específicos.....	11
1.4. JUSTIFICACIÓN	11
CAPÍTULO II: ACTIVIDAD HISTÓRICA Y ESTUDIOS ANTERIORES REALIZADOS SOBRE EL VOLCÁN SABANCAYA.....	14
2.1. ESTUDIOS ANTERIORES.....	15
2.1.1. Estudio del contexto tectónico	15
2.1.2. Estudio de la deformación cortical.....	18
2.1.3. Estudio sísmico	19
CAPÍTULO III: REDES DE MONITOREO VOLCÁNICO.....	20
3.1. REDES SÍSMICAS.....	20
3.1.1. Red de monitoreo temporal de 1990-1992.....	20
3.1.2. Red sísmica telemétrica del volcán Sabancaya (RSTS) de 1993-1995	21
3.1.3. Red de monitoreo temporal de 2002.....	22
3.1.4. Red de monitoreo temporal de 2013.....	23
3.2. REDES DE MONITOREO MULTIPARAMÉTRICAS PERMANENTES.....	24
3.2.1. Red multiparamétrica del Sabancaya (REDSAB).....	24
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA Y DATOS GEOFÍSICOS	26
4.1. METODOLOGÍA.....	26
4.2. CATÁLOGO DE ACTIVIDAD SISMOVOLCÁNICA	27
4.3. MAPAS DE ACTIVIDAD SISMOVOLCÁNICA	27
4.4. CÁLCULO DE LA ENERGÍA SÍSMICA.....	30

4.5.	CÁLCULO DE LA MAGNITUD LOCAL	30
4.6.	RELACIÓN DE VELOCIDADES (V_p/V_s)	31
4.7.	MODELO DE VELOCIDAD	32
CAPÍTULO V: CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA DEL VOLCÁN SABANCAYA Y CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN SISMOVOLCÁNICA		35
5.1.	CLASIFICACIÓN DE DATOS SISMOVOLCÁNICOS	35
5.1.1.	<i>Sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT)</i>	35
5.1.2.	<i>Sismos de tipo Largo Periodo (LP)</i>	36
5.1.3.	<i>Tremor (TRE)</i>	37
5.1.4.	<i>Tornillo (TOR)</i>	39
5.1.5.	<i>Eventos de tipo Híbrido (HIB)</i>	40
5.1.6.	<i>Explosiones (EXP)</i>	41
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN Y RESULTADOS DE LA EVOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA DEL VOLCÁN SABANCAYA		42
6.1.	PROCESO PREERUPTIVO DEL VOLCÁN SABANCAYA DE 1986-1990	42
6.2.	PROCESO ERUPTIVO DEL VOLCÁN SABANCAYA 1990-1998	43
6.2.1.	<i>Características y evolución de la sismicidad</i>	43
6.2.2.	<i>Interpretación del proceso eruptivo 1990-1998</i>	47
6.3.	PROCESO PREERUPTIVO DEL VOLCÁN SABANCAYA 2013-2016	48
6.3.1.	<i>Características y evolución de la actividad preeruptiva</i>	49
6.4.	LA ACTIVIDAD SISMOVOLCÁNICA PERIODO ERUPTIVO 2016-2019	55
6.4.1.	<i>Características, evolución de la sismicidad y otros parámetros</i>	56
6.4.2.	<i>Incremento de actividad sísmica registrada en 2019</i>	59
6.4.3.	<i>Evolución de otros parámetros de monitoreo</i>	61
6.5.	INTERPRETACIÓN DEL PROCESO ERUPTIVO 2016-2019	63
CONCLUSIONES		66
RECOMENDACIONES		68
BIBLIOGRAFÍA		69

INTRODUCCIÓN

El volcán Sabancaya ($15^{\circ}47'S$; $71^{\circ}51'O$; 5960 m s.n.m.) es el segundo volcán más activo del Perú. Tiene una edad menor a los 10 000 años y pertenece al complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Se encuentra ubicado a 76 km al noroeste de la ciudad de Arequipa. En un radio de 30 km alrededor del volcán Sabancaya se encuentran las localidades de Chivay, Coporaque, Yanque, Achoma, Maca, Lari, Madrigal, Pinchollo; Tapay, Cabanaconde, Huambo, Huanca, entre otros, donde habitan aproximadamente 30 mil personas.

La última erupción del volcán Sabancaya ocurrió entre los años 1990 y 1998 (Gerbe y Thouret, 2004), la cual tuvo un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) igual a 2 y 3, en una escala que va del 0 al 8. Luego de casi 15 años de calma, en febrero de 2013, el volcán Sabancaya empezó a registrar un incremento de las emisiones de gases. Paralelamente, se registró actividad sísmica también en áreas cercanas al volcán y en el valle del Colca (Caylloma). Los sismos más importantes ocurrieron en febrero de 2013 (Tavera et al., 2013a), julio de 2013 (Tavera et al., 2013b) y el 14 de agosto de 2016. Este último tuvo una magnitud de M5.3 y fue seguido de numerosas réplicas (Tavera et al., 2016). Si bien estos sismos tuvieron su origen en la actividad de fallas activas locales preexistentes, es probable que también tengan un componente volcánico, ya que los epicentros de estos eventos se localizaron próximos al complejo volcánico.

En agosto de 2015, se reportó la presencia de emisiones fumarólicas en la parte superior del domo suroeste del volcán Sabancaya, actividad que hasta la actualidad viene siendo registrada. Desde abril de 2016, se detectaron 7 nuevas zonas con emisiones fumarólicas localizadas al pie del flanco norte, a una distancia de 600 m del cráter, aproximadamente. Finalmente, un mes antes del inicio del proceso eruptivo, es decir en octubre de 2016, se registró un incremento en la energía de los eventos sísmicos. Los sismos de tipo Híbrido, asociados a ascenso de magma, se tornaron muy energéticos durante la primera semana de noviembre. El 2 de noviembre se registraron sismos con energías de 85 MJ. Finalmente, el 6 de noviembre se registraron sismos con energías de hasta 41 MJ. Horas

más tarde, a las 20:40 h, ocurrió una explosión en el volcán Sabancaya, luego de la cual se registraron emisiones continuas de ceniza con columnas eruptivas que tuvieron alturas entre 1000 m y 3000 m sobre la cima del volcán. Este evento marca el comienzo de una nueva fase eruptiva del volcán Sabancaya.

Desde el 2016 hasta diciembre de 2019, el volcán Sabancaya ha presentado niveles de actividad moderada, es decir, el registro constante de explosiones volcánicas con la consecuente emisión de cenizas dispersadas en todas las direcciones cardinales del volcán.

El presente informe técnico recolecta y analiza toda la información sísmica disponible de los últimos 30 años de trabajos de monitoreo e investigación realizados por el IGP sobre el comportamiento dinámico del volcán Sabancaya. Los resultados de este estudio buscan definir el comportamiento dinámico del Sabancaya, antes, durante y después de una crisis eruptiva con fines de prevención y/o mitigación de desastres.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1. UBICACIÓN

El volcán Sabancaya ($15^{\circ}47'S$; $71^{\circ}51'O$; 5960 m s.n.m.) es el más joven del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Se encuentra ubicado a 18 km de la localidad de Maca y a 76 km al noroeste de la ciudad de Arequipa (Figura 1). En el área de influencia del volcán Sabancaya, en un radio de 30 km, habitan alrededor de 30 mil personas, en los pueblos de Chivay, Coporaque, Yanque, Achoma, Maca, Lari, Madrigal, Pinchollo, Tapay, Cabanaconde, Huambo, Huanca, entre otros.

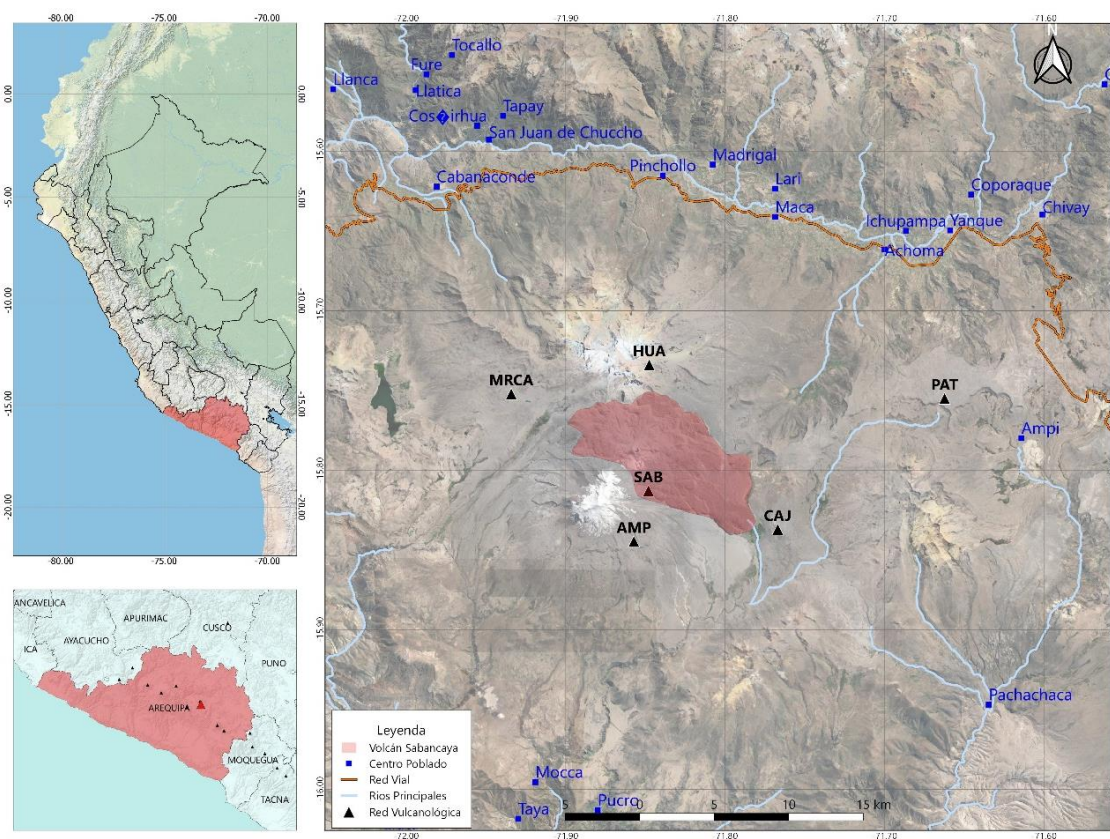


Figura 1.- Mapa de ubicación del complejo volcánico Ampato-Sabancaya y los principales centros poblados alrededor del Sabancaya.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una erupción volcánica implica el ascenso del magma desde interior de la Tierra hacia la superficie terrestre. Antes de culminar dicho ascenso, el magma debe abrirse camino en medio del entorno rocoso encajonante. Partiendo de este conocimiento, si se logra reconocer las perturbaciones que este magma ocasiona durante su ascenso, como generación de sismicidad, deformación, activación de fallas, calentamiento del sistema hidrotermal, etc., se podrá pronosticar la ocurrencia de una erupción volcánica o el desencadenamiento de un proceso eruptivo con horas o días de anticipación.

Para el estudio y monitoreo de la dinámica interna de un volcán se usa la sismología, ya que los eventos sismovolcánicos están directamente relacionados al movimiento de fluidos magmáticos en el interior, así como a la apertura de conductos volcánicos, a la actividad de fallas, etc. Según estudios realizados por White y McCausland (2016), antes del inicio de un proceso eruptivo, las señales sísmicas ocurren preferentemente bajo 3 formas y de manera secuencial: 1) eventos de alta frecuencia o de tipo Volcano-Tectónico (VT) que ocurren en un inicio en zonas distales (30 km de distancia del cráter) y se van aproximando hacia la zona del cráter del volcán; 2) eventos de baja frecuencia o de Largo Periodo (LP), asociados a movimiento de fluidos en los conductos volcánicos; y, 3) eventos de tipo Híbrido, ligados al ascenso de magma por el conducto volcánico en los últimos kilómetros de la superficie. Estos patrones sísmicos están condicionados a diferentes factores como la edad del volcán, tipo de volcán, tiempo transcurrido desde la última erupción, tamaño del sistema hidrotermal, tipo de magma, volumen de magma intuido, etc. Identificar cada una de estas etapas de actividad sismovolcánica es imprescindible, ya que permite realizar un adecuado monitoreo y pronóstico acertado de una erupción volcánica.

Este estudio analiza la actividad sismovolcánica y su variación espacio-temporal registrada a lo largo de los dos procesos eruptivos 1990-1998 y 2016-actualidad del volcán Sabancaya, con el fin de determinar y caracterizar un patrón sísmico y la evolución de la actividad volcánica, tomando en cuenta que en áreas aledañas existen sistemas de

fallas activas que dificultan la caracterización de la actividad sísmica ligada al proceso eruptivo.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1.Objetivo general

Caracterizar la actividad sismovolcánica de los dos últimos periodos de actividad eruptiva (1990-1998 y 2016-actualidad) del Sabancaya con el objetivo de identificar patrones de sismicidad que contribuyan a la comprensión del funcionamiento del sistema dinámico interno del Sabancaya y el pronóstico de futuras erupciones.

1.3.2.Objetivos específicos

- Recopilar la información de la actividad sismovolcánica desde el inicio de la intervención del Instituto Geofísico del Perú (IGP) en el monitoreo de la actividad del volcán Sabancaya.
- Analizar la actividad sismovolcánica del Sabancaya del periodo 2013-2019 mediante el análisis espectral y la forma de onda de la señal sísmica.
- Localizar y determinar fuentes sísmicas en el área del volcán Sabancaya.
- Identificar y explicar la migración de las fuentes sísmicas a lo largo del tiempo, antes y durante los procesos eruptivos 1990-1998 y 2016-actualidad.
- Determinar el patrón sísmico e indicar en qué etapa o fase del modelo se encuentra el proceso eruptivo actual.

1.4. JUSTIFICACIÓN

El Sabancaya es el segundo volcán más activo del Perú debido a que en los últimos 500 años ha presentado 3 erupciones explosivas leves a moderadas (Thouret and Gerbe, 2004). El último proceso eruptivo se desarrolló entre 1990-1998, con un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de 2 - 3 (Siebert et al., 2010). Desde el 6 de noviembre de 2016 se encuentra en un nuevo proceso eruptivo, el cual perdura hasta la actualidad.

Según el estudio de evaluación del riesgo realizado por Macedo et al. (2016), el Sabancaya ocupa el primer lugar del ranking dentro del grupo de volcanes de muy alto riesgo.

Es importante entender el comportamiento sismovolcánico de un volcán como el Sabancaya, antes y durante un proceso eruptivo, con el objetivo de identificar patrones preeruptivos que conduzcan a realizar pronósticos certeros y oportunos, los cuales serán herramientas fiables para las autoridades, quienes deberán tomar decisiones a fin de evitar tragedias y pérdidas de vidas humanas teniendo en cuenta que en el área del volcán, a menos de 30 km, habitan aproximadamente 30 000 personas en los pueblos de Chivay, Coporaque, Yanque, Achoma, Maca, Lari, Madrigal, Pinchollo, Tapay, Cabanaconde, Huambo, Huanca, entre otros. Además de ello, en el área de influencia del Sabancaya se localizan importantes obras de infraestructura como el canal de agua Majes-Siguas, reservorios de agua, vías, etc. Asimismo, a 20 km al norte del Sabancaya, se localiza el valle del Colca, zona donde se desarrolla una importante actividad turística que actualmente se ve expuesta a la caída de cenizas expulsadas por el volcán.

Las manifestaciones volcánicas superficiales y procesos magmáticos que ocurren en el interior de un volcán se correlacionan, en la mayoría de los casos, perfectamente. Por consiguiente, examinar determinados signos de procesos preeruptivos de un volcán ayudará en gran medida a pronosticar una erupción. Es por eso que en las últimas décadas se ha puesto énfasis en el monitoreo y estudio de los diversos fenómenos físico-químicos que ocurren en las inmediaciones de un volcán activo. Uno de los más importantes es justamente la sismicidad volcánica.

La actividad sísmica en el área del volcán Sabancaya se ve influenciada principalmente por dos factores: el primer factor es el constante aporte de magma hacia la cámara magmática y conductos del Sabancaya, la cual genera cambios de esfuerzos e intensa actividad sísmica a su paso. El segundo factor es la dinámica de las fallas activas por donde se libera la energía en forma de sismos. Los principales sistemas de fallas evidenciados en el valle del Colca son Ichupampa y Huanca, al noreste y suroeste del

Sabancaya, respectivamente; estas fallas tienen una orientación NO-SE (Sébrier et al., 1985; Huamán, 1995). Un segundo sistema de fallas es Trigal y Solarpampa, de orientación E-O, paralelo al valle del Colca y localizado al oeste de la localidad de Cabanaconde. Un tercer sistema es la falla de Sepina que tiene una orientación NE-SO, visible al noreste del Sabancaya.

La identificación de patrones eruptivos parte de la comprensión de la evolución de la actividad sísmica, traducida en la identificación de señales sísmicas correlacionadas con otros parámetros de monitoreo volcánico.

CAPÍTULO II: ACTIVIDAD HISTÓRICA Y ESTUDIOS ANTERIORES REALIZADOS SOBRE EL VOLCÁN SABANCAYA

El volcán Sabancaya, como los demás volcanes activos y potencialmente activos localizados en el sur del Perú, cuenta con una larga historia eruptiva desde su formación hasta su estado actual. Este volcán es el más joven de la cadena volcánica, pues se emplazó hace aproximadamente hace 10 000 años (Samaniego et al., 2016). Durante su evolución ha presentado, principalmente, actividad efusiva con la emisión de flujos de lava y eventuales erupciones explosivas moderadas.

Los registros históricos mencionan erupciones explosivas ocurridas hace 8520, 5440 y 1680 años antes del presente (Juvigné et al., 1998; 2008). En los últimos 500 años, la actividad del volcán Sabancaya estuvo caracterizada por erupciones explosivas leves a moderadas (Thouret et al., 1994; Huamán, 1995; Siebert et al., 2010; Samaniego et al., 2016). Existen crónicas que mencionan de episodios eruptivos ocurridos en el año de 1752 (Travada y Córdova, 1752) y 1784-1785 (Zamácola y Jáuregui, 1804). Ambas mencionan sobre la actividad de un volcán denominado Ambato, refiriéndose al complejo Ampato-Sabancaya. En la actualidad, se asume que se trataría del volcán Sabancaya (Rodríguez y Huamán, 1992).

Después de más de 200 años de quietud, el Sabancaya inicia un periodo de reactivación en 1981; posteriormente, entre 1986 y 1990, las emisiones de gases fueron en aumento. El 28 de mayo de 1990 inicia su una actividad explosiva de tipo vulcaniana, la cual perduró hasta 1998 (Guillande et al., 1992; Thouret y Gerbe, 2004).



Figura 2.- Explosión del volcán Sabancaya de 1994. Foto tomada del flanco norte (cortesía de L. Macedo).

2.1. ESTUDIOS ANTERIORES

Respecto al volcán Sabancaya, se han realizado diversos estudios de carácter geológico, tectónico y sísmico. A continuación, se hace una síntesis de los resultados de algunos de estos estudios:

2.1.1. Estudio del contexto tectónico

La actividad tectónica en la zona del volcán Sabancaya y en el valle del Colca es muy activa, debido a la presencia de un sistema de fallas activas localizadas en toda el área. Los principales sistemas de fallas son Ichupampa y Huanca; estas fallas tienen una orientación NO-SE (Sébrier et al., 1985; Antayhua, 2002). Este sistema de fallas fue analizado por medio de imágenes satélite LANDSAT MSS y a través de observaciones de campo realizadas por Huamán et al., (1993) y Huamán (1995), quienes determinaron su dirección y cinética.

Además, se distingue un segundo sistema de fallas Trigal y Solarpampa, de orientación E-O, paralelo al valle del Colca y localizado al oeste de la localidad de Cabanaconde. Un tercer sistema es la falla de Sepina que tiene una orientación NE-SO, visible al noreste del Sabancaya.

En la figura 3 se muestra la distribución de fallas y lineamientos en el área de los volcanes Ampato, Sabancaya y Hualca-Hualca, presentada por Huamán et al., (1993) y revisada por Mering et al. (1996) con base en el análisis de imágenes satelitales SPOT y LANDSAT MSS, donde resalta el "lineamiento Sepina". Para Huamán et al. (1993), el lineamiento de Sepina es el elemento de deformación más representativo en esta área, el mismo que parte del volcán Sabancaya, pasa por Pampa Sepina y por las localidades de Achoma, Yanque, Coporaque e Ichupampa hasta llegar a cortar a la falla de Ichupampa. Claire (2007) realizó un análisis sismotectónico detallado del valle del Colca y evidenció que los mecanismos de ruptura coinciden totalmente con la disposición de los principales sistemas de fallas reconocidas en el valle del Colca.

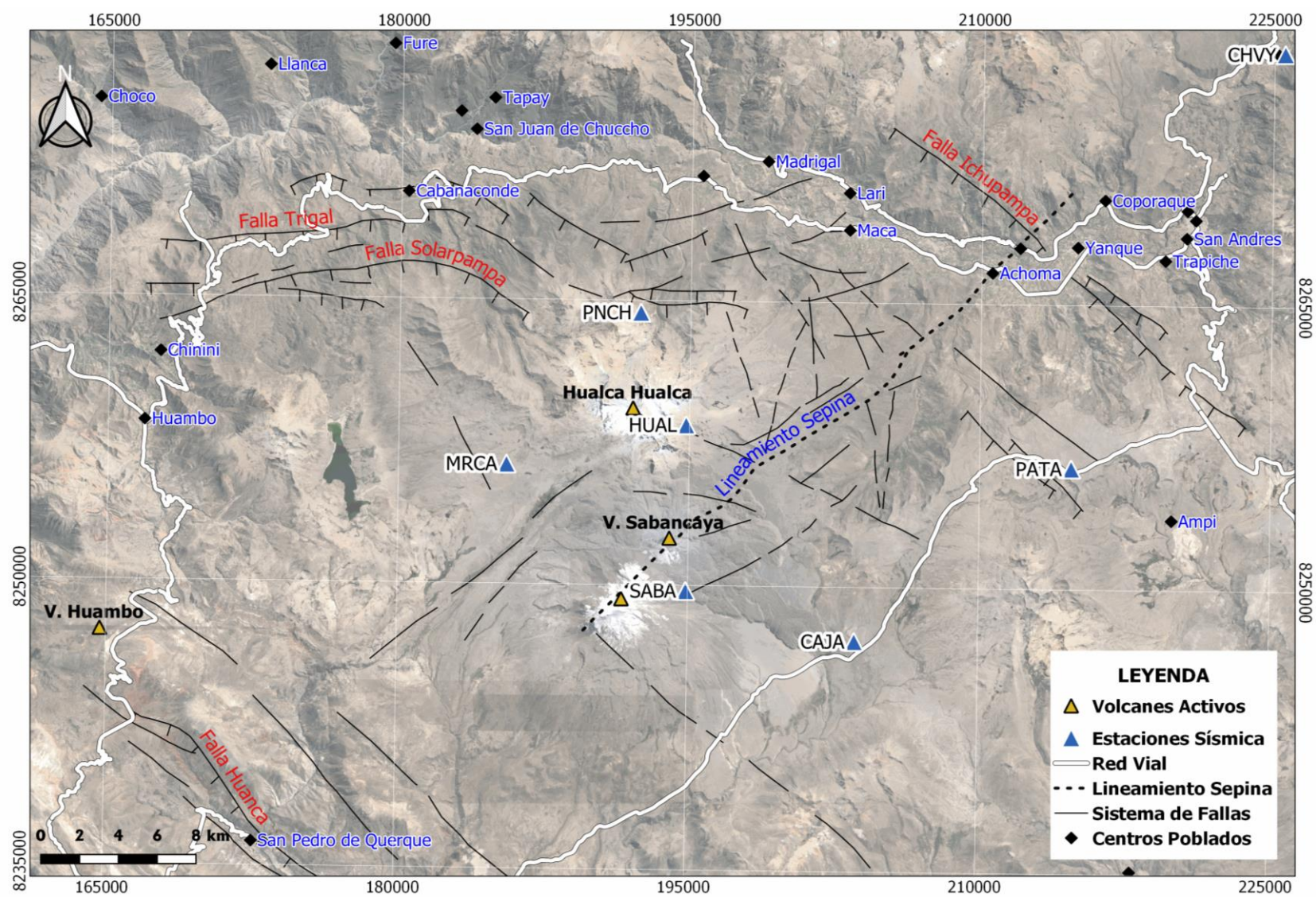


Figura 3.- Principales fallas y lineamientos visibles en la zona del volcán Sabancaya y el valle del Colca según Mering et al. (1996); Sébrier et al. (1985); Antayhua et al. (2013). Los triángulos azules señalan la ubicación de las estaciones sísmicas que actualmente operan.

2.1.2. Estudio de la deformación cortical

En el área del volcán Sabancaya y del valle del Colca se han evidenciado zonas de deformación, observadas, principalmente, mediante técnicas de interferometría radar InSAR haciendo uso de imágenes satelitales de junio de 1992 y abril de 1996. Pritchard & Simons (2002) identificaron una deformación a 2.5 km al este del volcán Hualca-Hualca y a 7 km al norte del Sabancaya, con una tasa de inflación de 2 cm/año (Figura 4), probablemente asociada al proceso eruptivo de 1990-1998 del volcán Sabancaya. Gonzáles et al. (2009) también utilizaron la misma técnica; emplearon imágenes de diciembre de 2002 y de septiembre de 2003 y observaron una deformación al NO del volcán Sabancaya (margen izquierda del cañón del río Colca), asociada a la actividad de fallas normales Solarpampa y Trigal, probablemente influenciada por la actividad del volcán Sabancaya.

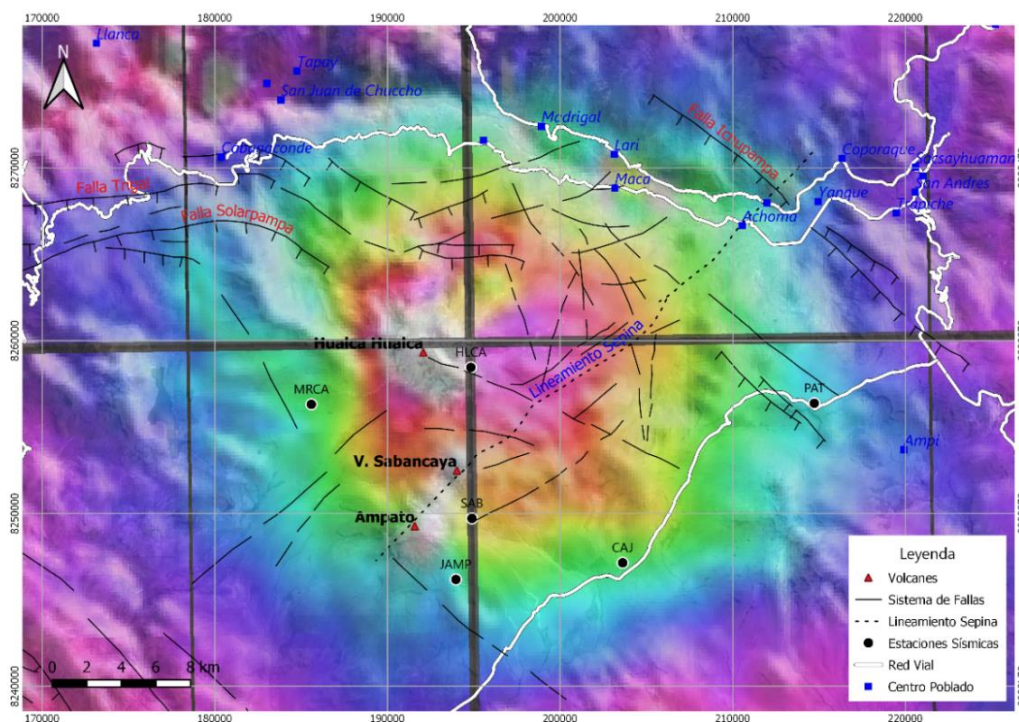


Figura 4.- Deformación hallada mediante la técnica InSAR en la región del volcán Sabancaya mediante el procesamiento de imágenes obtenidas en junio de 1992 y abril de 1996 (Pritchard and Simons, 2002).

2.1.3. Estudio sísmico

Se han desarrollado varios estudios sobre la sismicidad registrada en la zona del volcán Sabancaya. Los primeros estudios de sismicidad fueron desarrollados por Rodríguez y Huamán (1992), quienes concluyeron que los sismos ocurridos en inmediaciones del Sabancaya estarían asociados a la actividad tectónica local. Sin embargo, Antayhua (2002) concluyó que los sismos ocurridos en el sector de Pampa Sepina tuvieron su origen en los esfuerzos resultantes de la presión del magma sobre las capas superficiales del volcán Sabancaya; además, indicó que los sismos ocurridos en Cabanaconde tuvieron origen en la reactivación de las fallas Huambo-Cabanaconde. Posteriormente, Gonzáles et al. (1996), Paxi (2012) y Torres (2013), explicaron que la deformación y la sismicidad se originan por los esfuerzos generados por la presión del magma durante su movimiento por los conductos del volcán Sabancaya. Estos esfuerzos son los que probablemente originan la intensa sismicidad en forma de enjambre en los alrededores del volcán Sabancaya y, a su vez, la constante deformación en el norte del Sabancaya.

CAPÍTULO III: REDES DE MONITOREO VOLCÁNICO

El IGP tuvo operativa la primera red sísmica en el volcán Sabancaya en el proceso eruptivo de 1990-1998. Posteriormente, a raíz de un nuevo periodo de actividad volcánica iniciado en 2013, se instala una red de estaciones sísmicas temporales conformada por 9 estaciones sísmicas. El 24 de marzo de 2013, se instala la red sísmica permanente del Sabancaya REDSAB que, en un inicio, constó de 3 estaciones sísmicas. Actualmente, la red está integrada por 7 estaciones sísmicas y otros equipos complementarios de monitoreo como GPS, cámaras de video, etc. A continuación, se detallan las características de cada una de estas redes instaladas y operadas por el IGP.

3.1. REDES SÍSMICAS

3.1.1. Red de monitoreo temporal de 1990-1992

En 1986, el volcán Sabancaya inicia una etapa de reactivación con la manifestación de una intensa actividad fumarólica y sísmica que duró casi 4 años. En mayo de 1990 se inicia el proceso eruptivo con la ocurrencia de explosiones y emisiones de ceniza que se prolongó hasta 1998.

Entre los periodos de julio a septiembre de 1990 y mayo a junio de 1991, se realizó el monitoreo temporal de la actividad sísmica mediante la instalación de 5 estaciones sísmicas. En la figura 5 se muestra la ubicación de las estaciones instaladas entre 11 km y 25 km del cráter: 2 de estas fueron estaciones analógicas (Cajamarcana [CAJA] y Pinchollo [PNCH]) y 3 estaciones digitales (Achoma [ACHM], Chinini [CHIN] y Cabanaconde [CABA]). Las dos primeras estaciones fueron de tipo *Sprengnether* MEQ-800, con un sensor vertical de periodo natural de 1 segundo; las 3 últimas fueron de tipo *Kinematics*, con registro de casete y sensor de tipo SS-1 (Antayhua y Tavera, 2003).

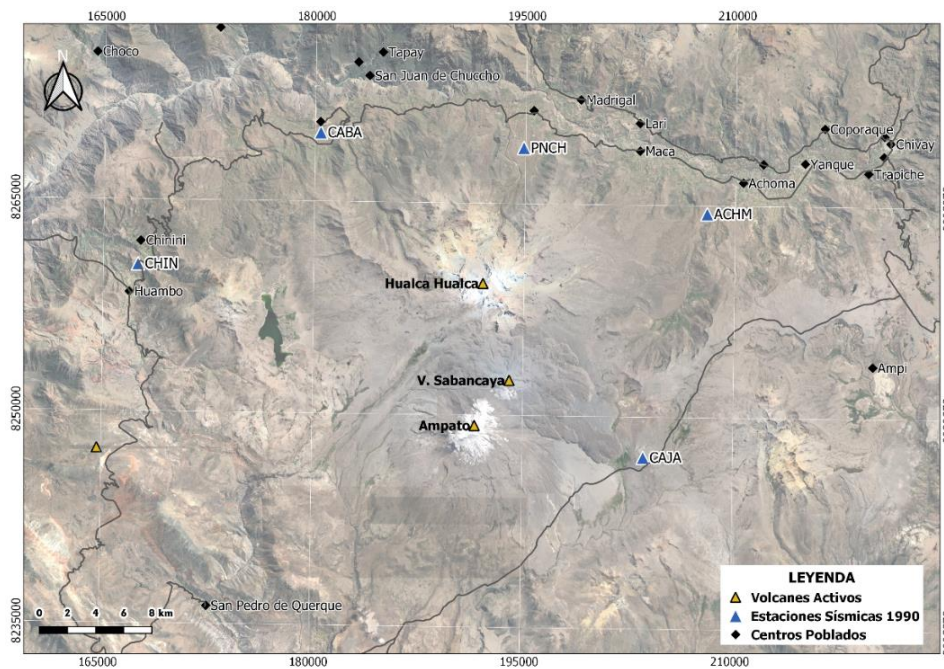


Figura 5.- Estaciones sísmicas pertenecientes a la red temporal instaladas sobre el volcán Sabancaya en el periodo 1990-1992.

3.1.2. Red sísmica telemétrica del volcán Sabancaya (RSTS) de 1993-1995

En julio de 1993, la red sísmica temporal fue reemplazada por una red sísmica telemétrica del volcán Sabancaya (RSTS), compuesta por 3 estaciones denominadas Patapampa (PAT), Pucarilla (PUC) y Jollo-Jello (JOL), instaladas a distancias de 14 km, 16 km y 20 km del cráter, respectivamente (Tabla 1 y Figura 6). Esta red estuvo compuesta de estaciones con digitalizadores de tipo *Sprengnether* y sensores de periodo corto tipo SS-1 (periodo natural de 1 segundo) y componente vertical con una sensibilidad variable de 16 a 36 decibeles (dB). Los datos fueron registrados en papel ahumado en sus inicios; posteriormente, en papel térmico. La transmisión de la señal se efectuó por radio telemetría en tiempo real hasta la repetidora en el distrito de Sachaca, para posteriormente llegar a la oficina del IGP en el distrito de Cayma, Arequipa. La RSTS funcionó todo el año de 1993 y sufrió interrupción durante 1994 y julio de 1995 debido a la falta de mantenimiento por el difícil acceso a la zona. Estas estaciones funcionaron hasta finales de 1995.

ESTACIÓN	CODIGO	SENSOR	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (m.s.n.m)	SENSIBILIDAD (decibeles)
Patapampa	PAT	SS-1-1911	15.747°	71.672°	4900	32
Pucarilla	PUC	SS-1-1914	15.793°	71.980°	1750	36
Jollo-Jello	JOL	SS-1-1913	15.913°	71.786°	5038	16

Tabla 1. Características de las estaciones sísmicas que integraron la RSTS.

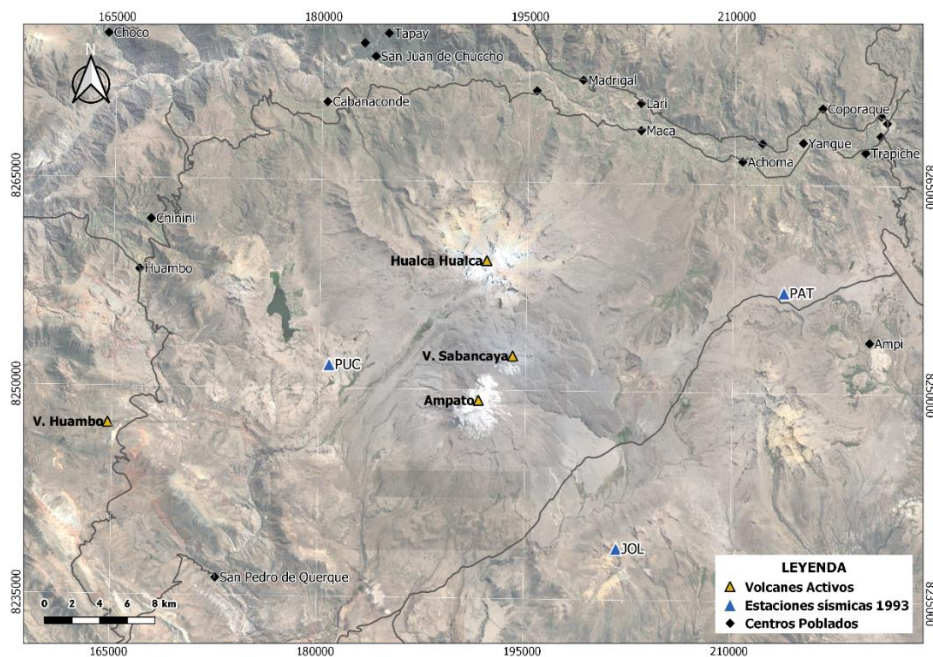


Figura 6.- Red de estaciones sísmicas telemétricas del volcán Sabancaya (RSTS) instaladas en 1993.

3.1.3. Red de monitoreo temporal de 2002

Después de 6 años, el IGP instaló nuevamente una red sísmica temporal en los alrededores del volcán Sabancaya compuesta por 4 estaciones, todas ellas de banda ancha, con el fin de monitorear y conocer el estado de la actividad sismovolcánica del Sabancaya después de ocurrido el terremoto en la región sur del Perú el 23 de junio de 2001 (M7.9). Este terremoto produjo importantes derrumbes y deslizamientos de rocas y suelo en la cadena volcánica del sur del Perú, tal como ocurrió con los volcanes Misti y Ubinas, volcanes que en aquel entonces presentaron ligeros incrementos en sus emisiones fumarólicas. Las estaciones de esta red sísmica estuvieron

ubicadas en los puntos denominados como SABA-1, SABA-2, SABA-3 y SABA-4, a distancias de 4 km, 2.5 km, 14 km y 20 km del cráter, respectivamente (Figura 7). Dichas estaciones estuvieron constituidas de registradores *Reftek*, modelo 72A-07 y sensores marca *Guralp*, modelo CMG-40T. El control de tiempo estuvo sincronizado con equipos GPS. Estas estaciones estuvieron operativas por un periodo comprendido entre el 1 y el 15 de julio de 2002, tiempo durante el cual se registró una variedad de señales sísmicas probablemente de origen tectónico y volcánico (Antayhua & Tavera, 2002).

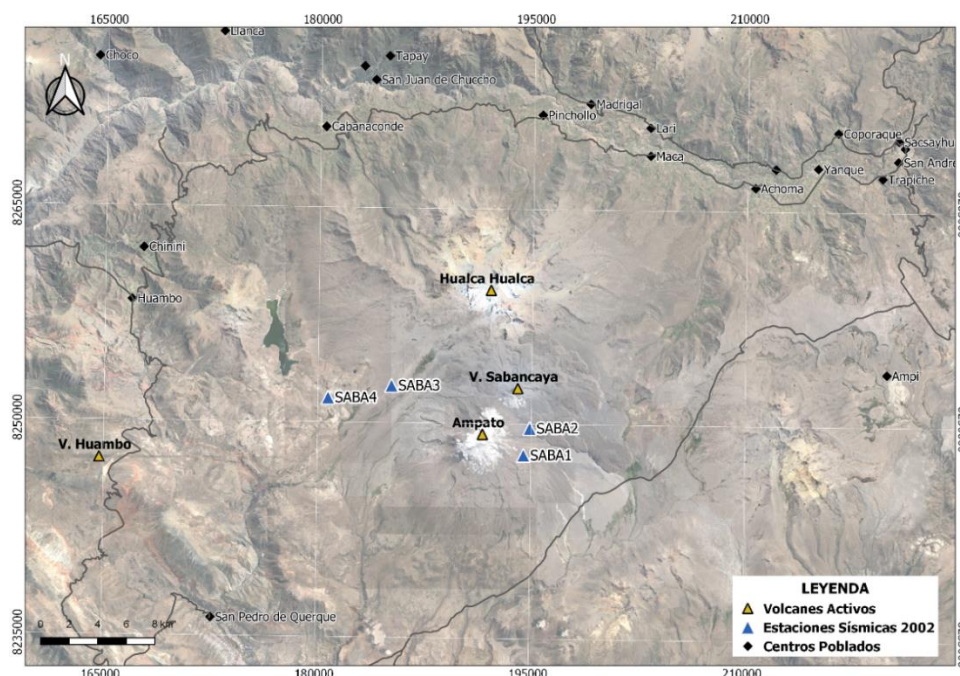


Figura 7.- Imagen que muestra la red de estaciones sísmicas del volcán Sabancaya (RSTS) instaladas en el año 2002.

3.1.4.Red de monitoreo temporal de 2013

El 22 de febrero de 2013, a consecuencia de la intranquilidad sismovolcánica observada en la zona del volcán Sabancaya, el IGP decide instalar una red de 9 estaciones sísmicas digitales portátiles de banda ancha y de 3 componentes: 8 de las estaciones fueron de banda ancha y 1 estación de periodo corto. La instalación de esta red se realizó en 2 campañas: la primera

se realizó durante los días 20 y 22 de febrero, donde se instalaron las estaciones de SABA (Sabancaya), CAJA (Cajamarca) y PATA (Patapampa), equipadas con sensores de tres componentes modelo Guralp-40T (0.033-50 Hz) y digitalizadores *Reftek*. Estas 3 primeras estaciones, posteriormente, pasaron a formar parte de la red sísmica permanente del Sabancaya. En la segunda campaña (19 abril al 22 junio) se instala la estación ACHM (Achoma), con sensor Lennartz-3Dlite de periodo corto (1 Hz, 3C), acoplada con un digitalizador CMG-DM24. Asimismo, se instalaron las estaciones TRKN (Tarucani), LMUC (Laguna Muccurca), CBN2 (Cabanaconde), OCHN (Ochenca) y SLL2 (Sallalli), las cuales operaron con sensores de banda ancha CMG-6TD (0.03-100 Hz) y digitalizadores *Reftek* (Fig8).

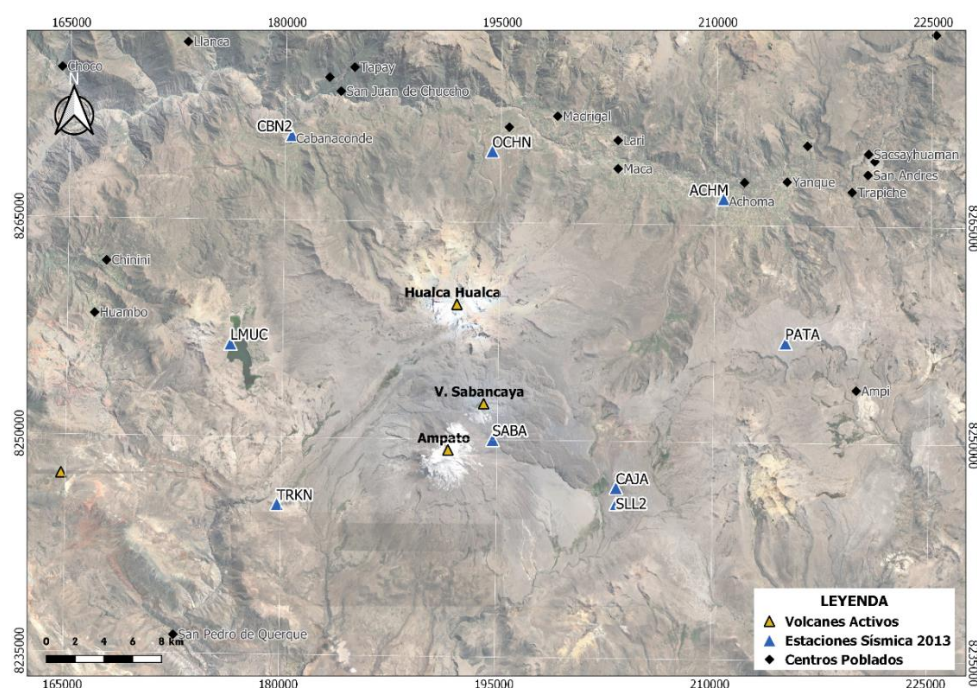


Figura 8. Imagen que muestra la red de estaciones sísmicas temporales instaladas en 2013 en el volcán Sabancaya.

3.2. REDES DE MONITOREO MULTIPARAMÉTRICAS PERMANENTES

3.2.1. Red multiparamétrica del Sabancaya (REDSAB)

Con la red temporal en operatividad, el 24 de marzo de 2013 se instala adicionalmente la red multiparamétrica del Sabancaya (REDSAB). Esta red estuvo conformada en un inicio de 3 estaciones sísmicas: SABA (Sabancaya), CAJA (Cajamarcana) y PATA (Patapampa), las cuales están equipadas con sensores de banda ancha marca *Guralp*, modelo CMG-40T. La REDSAB está distribuida de manera estratégica alrededor del volcán, a una distancia de 3 km (SAB), 10.9 km (CAJA) y 21.3 km (PATA) del cráter.

Desde su implementación en 2013, la red sísmica REDSAB ha sido reforzada con la instalación de nuevas estaciones y otros equipos de monitoreo volcánico. A noviembre de 2019, la REDSAB constaba de 7 estaciones sísmicas de banda ancha en tiempo real, 2 cámaras científicas instaladas a 27 km al NE y 11 km al SE del volcán, además de una estación GPS a 6 km al norte del volcán Sabancaya. Toda la información es enviada vía telemetría hacia la sede del IGP en Arequipa para su procesamiento, correlación e interpretación (Figura 9).

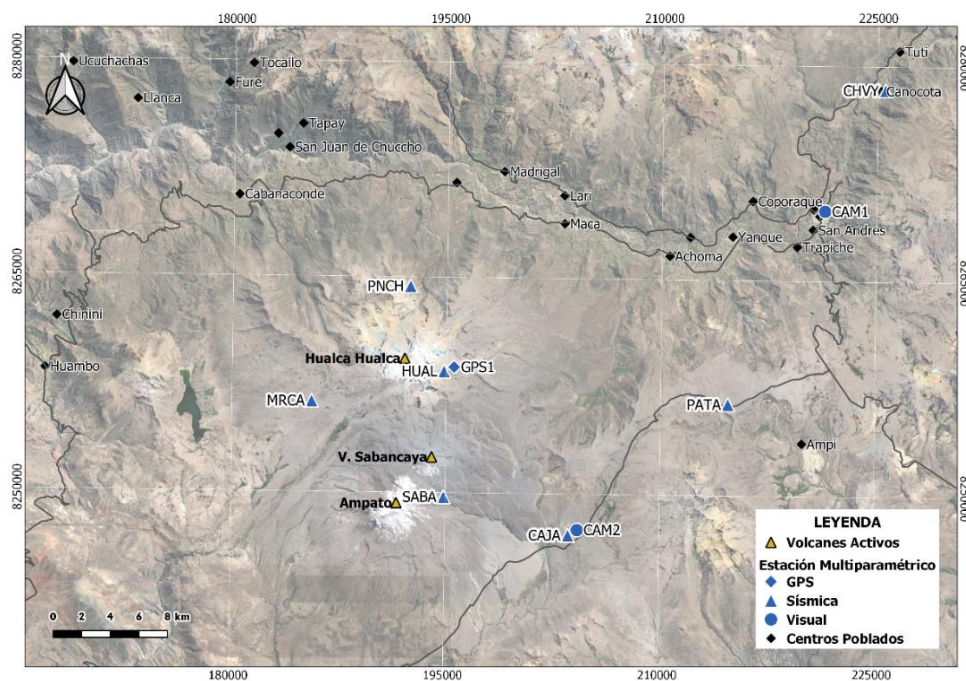


Figura 9. Imagen que muestra la distribución de las estaciones que conforman la red multiparamétrica que funciona desde el 2013 hasta la actualidad en el volcán Sabancaya.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA Y DATOS GEOFÍSICOS

El presente trabajo ha sido realizado con los datos sismovolcánicos registrados por la REDSAB que viene funcionando desde el 24 de marzo de 2013. Los datos sísmicos obtenidos son procesados de manera permanente y presentados en catálogos de actividad sismovolcánica, donde se detallan la energía sísmica, la relación V_p/V_s , el modelo de velocidades y el cálculo de la magnitud. Asimismo, con la información se elaboran mapas sísmicos. Los datos GPS proporcionan las series temporales de deformación y las cámaras nos permiten observar el registro de las explosiones y la dispersión de cenizas. Toda esta información multidisciplinaria es analizada, correlaciona e interpretada para determinar el estado y situación del volcán.

4.1. METODOLOGÍA

La metodología del presente trabajo consta fundamentalmente de 4 fases:

- (1) Procesamiento y análisis de las señales sísmicas a partir de la clasificación de los sismos volcánicos, forma de onda y contenido espectral, utilizando las metodologías ya existentes de clasificación de señales e identificación de fuentes sísmicas (Shimozuru, 1971; Minakani, 1974; McNutt, 2000; Chouet, 1996; Ibañez, 2000).
- (2) Cálculo y análisis de la energía de cada evento sísmico utilizando la metodología propuesta por Johnson & Aster (2005), información que es correlacionada con las imágenes obtenidas de las cámaras de video.
- (3) Análisis de las fuentes sísmicas, es decir, la localización de sismos a través del uso del algoritmo de *Hypoellipse* (Lahr, 1999).
- (4) Correlación de datos sísmicos con datos de GPS, imágenes satelitales, imágenes térmicas (MIROVA), InSAR y fotogrametría.

4.2. CATÁLOGO DE ACTIVIDAD SISMOVOLCÁNICA

El catálogo de actividad sísmica del Sabancaya es actualizado de manera permanente a partir de la clasificación y análisis manual de cada evento sísmico registrado por la red de monitoreo del volcán Sabancaya. Los catálogos contienen información acerca del tipo de evento, la fecha y hora del evento, frecuencia principal, amplitud pico, duración y energía sísmica del evento. Recientemente, en algunos casos, muestra la magnitud local, desplazamiento reducido, así como coordenadas y altitud de los sismos que fueron localizados.

Los catálogos de actividad sismovolcánica son un producto del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), servicio oficial del Estado peruano desarrollado y administrado por el IGP. Estos se publican anualmente. El análisis utilizado en este estudio involucra a los catálogos elaborados a partir de 2013, después del inicio de la intranquilidad del Sabancaya, hasta noviembre de 2019, con datos acerca del proceso eruptivo en curso. No se cuenta con registros del proceso eruptivo de 1990-1998, solo se tiene información de los estudios realizados. Los sismos registrados en el proceso eruptivo 2016-2019, incluso aquellos registrados durante la etapa preeruptiva (2013-2016), suman un total de 273 313 eventos clasificados y analizados. Según los resultados obtenidos, la fuente sísmica está localizada en el interior del volcán y en áreas aledañas que se prolongan hasta 25 km o 30 km del cráter del volcán. El seguimiento de la actividad sísmica muestra una migración de sismos distales hacia áreas próximas al volcán.

4.3. MAPAS DE ACTIVIDAD SISMOVOLCÁNICA

Los mapas de actividad sismovolcánica permiten conocer la distribución espacial de la sismicidad bajo el edificio volcánico y en áreas aledañas (Figura 10). Para elaborar este producto es preciso identificar claramente las fases P y S de los eventos de tipo Volcano-Tectónico (VT) o de fractura. En el Sabancaya, estos eventos fueron localizados desde febrero de 2013 hasta octubre de 2019.

Respecto al proceso eruptivo de 1990-1998, solo se cuenta con información de estudios realizados.

La figura 10 muestra círculos en color amarillo que corresponden a los sismos del periodo preeruptivo (2013-2016); en color rojo, la sismicidad del periodo eruptivo 2016-2019. Como se puede apreciar en el mapa, la sismicidad de tipo Volcano-Tectónico (VT) se localizó principalmente en la zona norte del Sabancaya, precisamente en la zona donde se ubica el sistema de fallas activas Huambo-Cabanaconde, Ichupampa y Huanca. Además, se observa que los eventos de tipo Volcano-Tectónico predominan en el periodo preeruptivo.

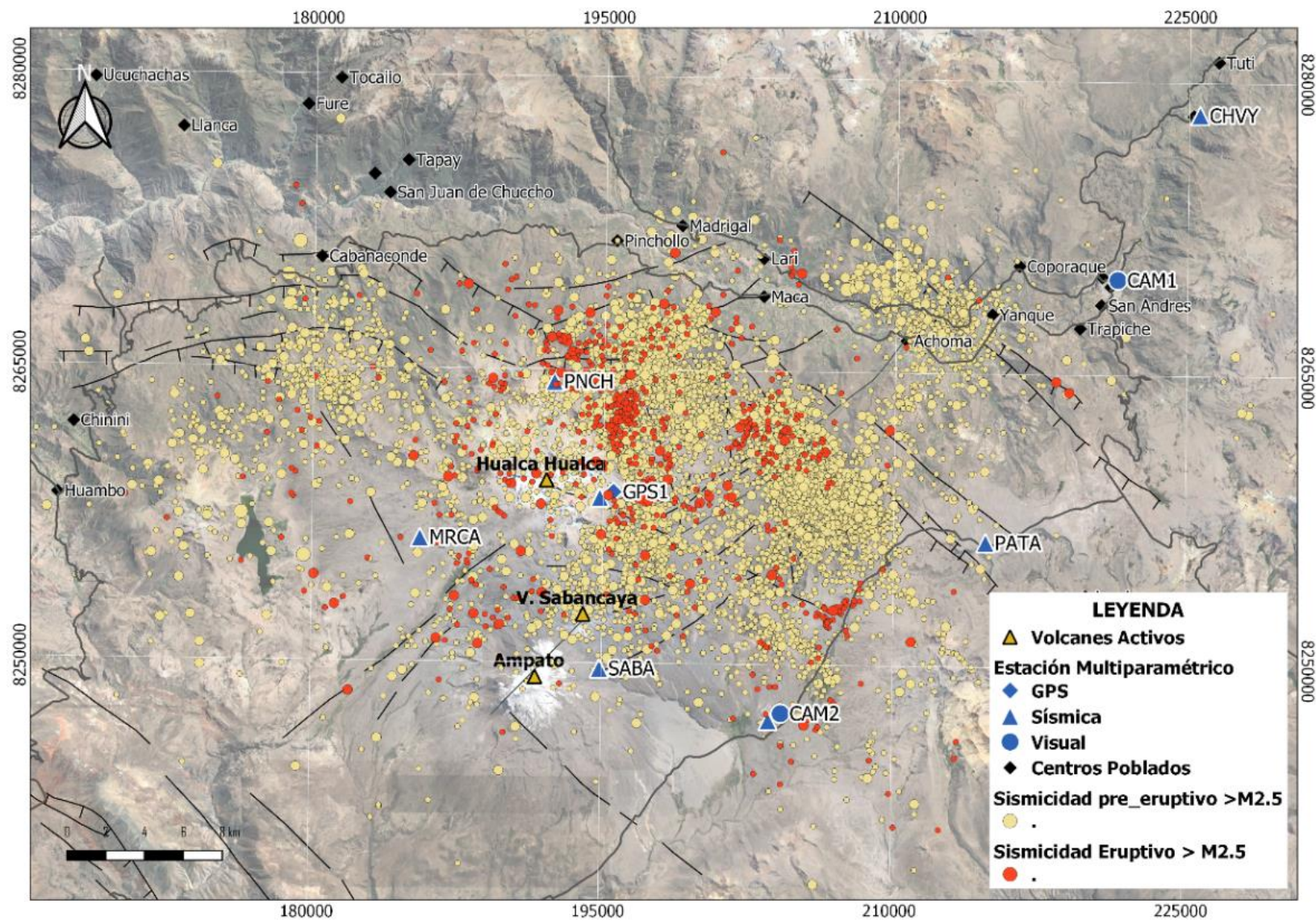


Figura 10.- Mapa de sismicidad del periodo preeruptivo febrero de 2013– 5 noviembre de 2016 (círculos en color amarillo) y sismos del periodo eruptivo 6 noviembre de 2016-octubre de 2019 (círculos en color rojo). Los tamaños de los sismos están en función de sus magnitudes (sismos mayores a M2.5).

4.4. CÁLCULO DE LA ENERGÍA SÍSMICA

La energía sísmica está relacionada a la magnitud de un sismo. Por su parte, la magnitud es entendida como la medida del tamaño de un sismo en términos de energía sísmica liberada por la fuente.

En el presente estudio solo se realizó el cálculo de la energía sísmica para el periodo 2013-2019, ya que de los anteriores años no se cuenta con información digital. Los niveles de energía sísmica liberada en el volcán Sabancaya, durante el periodo de análisis 2013–2019, fueron calculados con base en la estación de referencia SAB, localizada a 3 km en el flanco sur del volcán. El cálculo se formula por integración de la señal sísmica, según método propuesto por Johnson & Aster (2005). La ecuación aplicada fue la siguiente:

$$E_{seismic} = 2\pi r^2 \rho c \frac{1}{A} \int S^2 U(t)^2 dt$$

Donde:

r: distancia Fuente-estación

p: densidad del medio

c: velocidad de la onda P

A: corrección de atenuación

S: corrección por respuesta de sitio (estación)

U(t): velocidad de partícula

4.5. CÁLCULO DE LA MAGNITUD LOCAL

La magnitud Richter de sismos locales puede ser convenientemente estimada a partir de la duración de la señal usando la siguiente formula empírica:

$$\dot{M} = -0.87 + 2.00 \log(\tau) + 0.0035 \Delta$$

Donde:

$\dot{M}$: estimación de la magnitud de Richter.

T : duración de la señal en segundos.

Δ : distancia epicentral en kilómetros.

Esta escala de magnitud fue establecida analizando la relación entre la magnitud Richter, duración de la señal y la distancia epicentral (Lee et al., 1972).

Los cálculos de energía se realizaron para el periodo 2013 en adelante, esto debido a que se cuenta con la información en formato digital para poder realizar dicho cálculo.

4.6. RELACIÓN DE VELOCIDADES (V_p/V_s)

Uno de los parámetros importantes para hallar el modelo de velocidades es la relación de velocidades V_p/V_s . Para el área del volcán Sabancaya se estuvo utilizando el $V_p/V_s = 1.65$, hallado por Antayhua (2002) con datos obtenidos entre 1993 y 1995 (Figura 11). En este estudio se recalculó la relación V_p/V_s con la técnica de Wadati y Riznichenko.

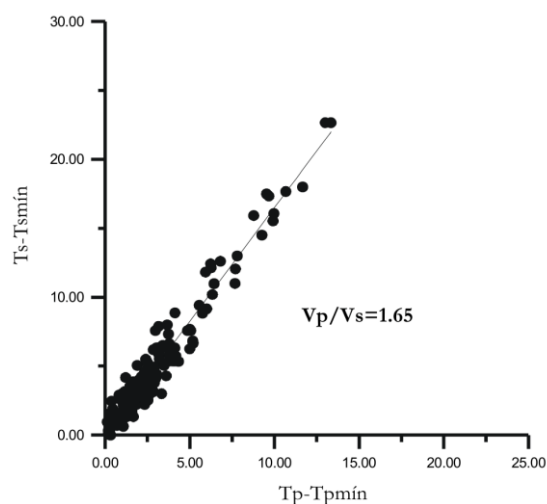


Figura 11. Curva de Wadati para sismos registrados entre 1993 y 1995 en la región del volcán Sabancaya. T_p y T_s , son los tiempos de llegada de las ondas P y S; V_p y V_s es la velocidad de la onda P y S (Antayhua, 2002).

Para hallar la relación V_p/V_s se utilizaron 1510 lecturas de las fases P y S. Los valores utilizados en el ajuste corresponden a la diferencia de tiempo de llegada del sismo a cada estación (arreglo de estaciones). Para cada grupo de estaciones que han detectado el evento sísmico se halla el tiempo mínimo de llegada de la fase P (T_{pmin}) y se realiza la diferencia ($T_p - T_{pmin}$) para cada estación, del mismo modo se realiza para la fase S ($T_s - T_{smin}$). Conocidos estos valores, se construye el gráfico (Figura 12), cuyo ajuste de la tendencia sigue una recta con pendiente igual a 1.68.

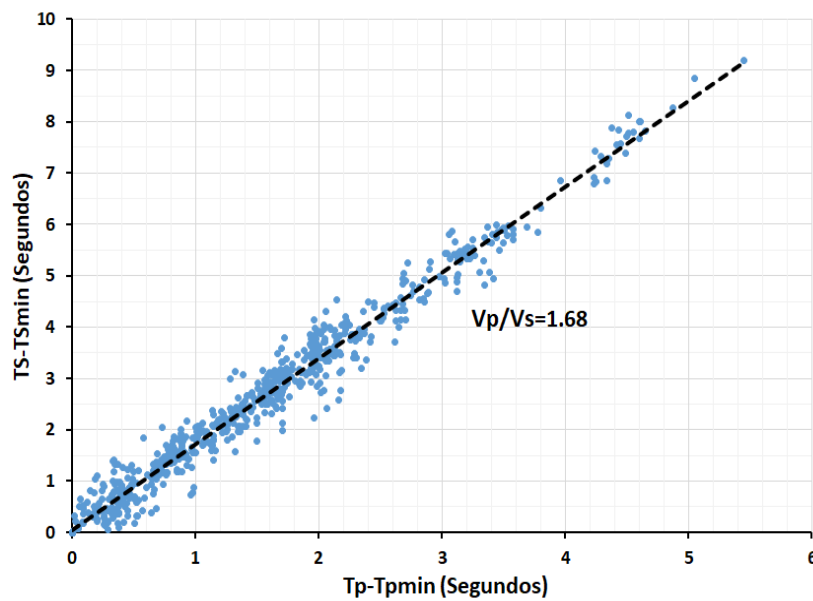


Figura 12.- Curva de Wadati para los sismos ocurridos en el periodo 2013 en la región del volcán Sabancaya. T_p y T_s son los tiempos de llegada de las ondas P y S; mientras que V_p y V_s es la velocidad de la onda P y S, respectivamente.

4.7. MODELO DE VELOCIDAD

Es importante contar con un modelo de velocidades propio de una zona para la reducción del error en la localización epicentral e hipocentral de los eventos sísmicos. Los datos sísmicos utilizados para realizar el modelo de velocidades en la zona del volcán Sabancaya corresponden a la campaña sísmica realizada en 2013, donde operaron estratégicamente 9 estaciones sísmicas denominadas SABA, PATA, CAJA, OCHN, ACHM, TRKN, LMUC, SLL2 y CBN2.

Para determinar un modelo de velocidades de una determinada zona, es necesario considerar toda la información necesaria de las capas iniciales que se introducirán al programa. Con ese objetivo, se han utilizado 3 modelos de velocidades propuestos por Dorbath (1991), Villegas (2009) y Ma y Clayton (2014)**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Estos autores hallaron modelos de velocidades a escala regional con profundidades que alcanzaron entre 50-60 km. Con estos 3 modelos de velocidades se ha realizado el promedio de capas y, además, se añadieron otras capas intermedias con valores similares que usará el programa VELEST como modelo inicial (Figura 13).

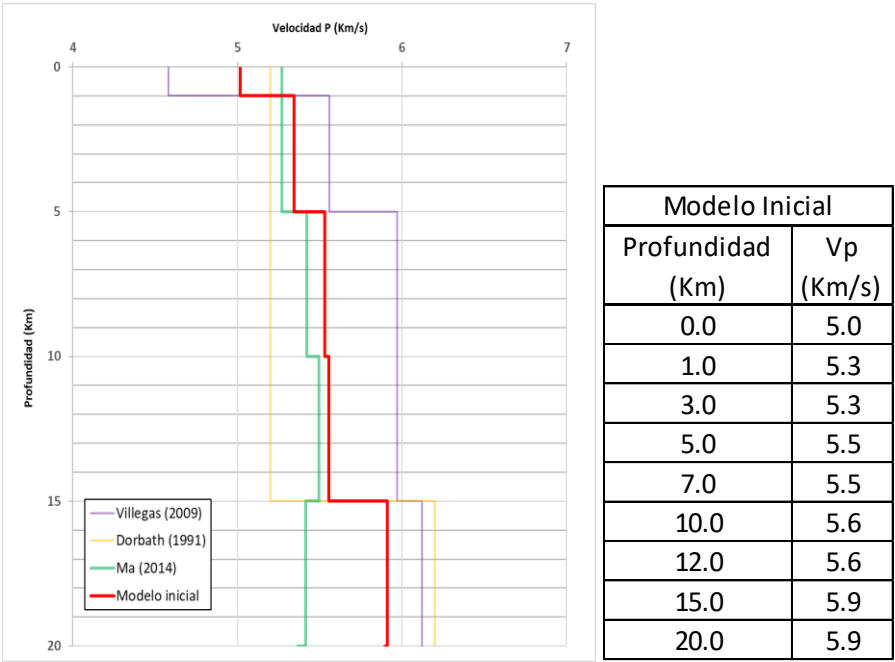


Figura 13.- La línea roja corresponde el modelo inicial planteado para el volcán Sabancaya hasta los 20 km. Las líneas amarilla, verde y morada representan las velocidades de las ondas P de Villegas (2009), Dorbath (1991) y Ma y Clayton (2014), respectivamente.

Es importante indicar que el programa VELEST no determina las capas, solo ajusta las velocidades de las ondas que atraviesan estas capas y acepta 3 capas como mínimo (2 capas y el semiespacio). En ese sentido, el promedio de capas del modelo inicial de la figura 13 fue modificado con el objetivo de tener mayores capas y mejorar la resolución para las localizaciones. Estas modificaciones se realizaron principalmente entre los 5 km y 15 km de profundidad, esto gracias a la mayor cantidad de sismos que se localizaron a esa profundidad (Figura 14).

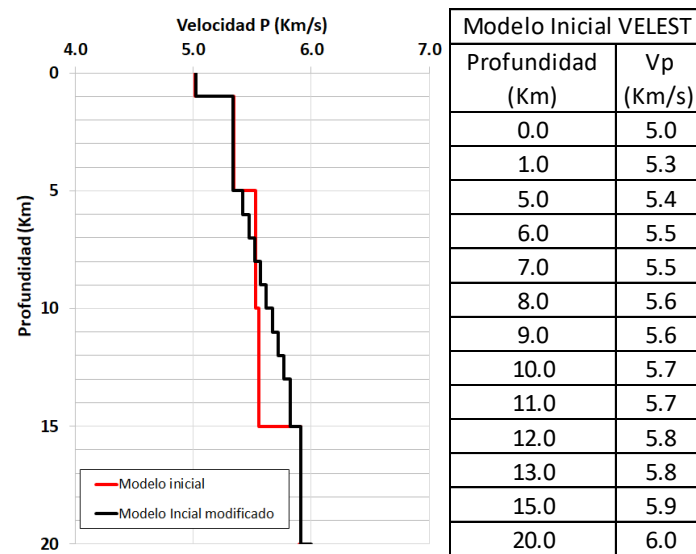


Figura 14.- Variación de la velocidad de la onda P en profundidad. La línea roja indica la velocidad inicial y la línea negra indica la velocidad modificada que ingresó al programa VELEST, con 13 capas y hasta 20 km de profundidad.

En la figura 14, en líneas grises, se observa el número de inversiones de velocidad realizado por el programa VELEST. En total, se realizaron 60 iteraciones, de las cuales el mejor resultado fue con $RMS < 0.37$, en línea azul (Figura 15). Una vez planteado el modelo inicial de 13 capas hasta los 20 km (línea negra en figura 15), se procedió a realizar las pruebas de inversión con ayuda del programa VELEST.

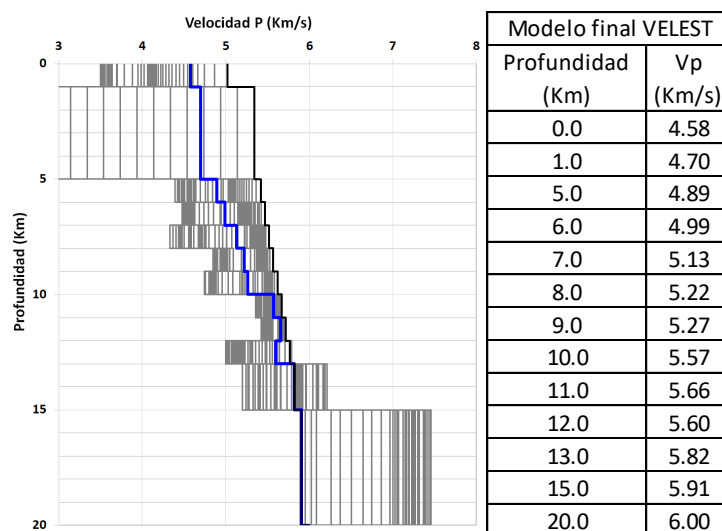


Figura 15.- En líneas grises se muestran las inversiones realizadas con el programa VELEST; en línea azul, el mejor resultado de inversión con $RMS < 0.37$; en línea negra, el modelo inicial.

CAPÍTULO V: CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA DEL VOLCÁN SABANCAYA Y CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN SISMOVOLCÁNICA

Desde la instalación de red multiparamétrica del volcán Sabancaya en febrero de 2013 hasta el inicio del proceso eruptivo ocurrido en noviembre de 2016, el IGP ha logrado registrar diversos eventos sismovolcánicos que fueron caracterizados y asociados a diferentes fuentes de origen.

5.1. CLASIFICACIÓN DE DATOS SISMOVOLCÁNICOS

La clasificación de eventos sismovolcánicos permite caracterizar la actividad de un volcán. Esta caracterización está condicionada al tipo de instrumento usado y al contenido espectral de la señal. La clasificación utilizada para la identificación de las señales sísmicas del volcán Sabancaya está basada principalmente en la clasificación propuesta por Wassermann (2011) y White & McCausland (2016). A continuación, se muestran las características principales de los diferentes tipos de señales y su relación con la actividad volcánica.

5.1.1. Sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT)

Son eventos que presentan altas frecuencias (>5 Hz,) con un ancho de banda que llega hasta los 15 Hz. La señal tiene una duración variable desde pocos segundos hasta algunos minutos. El inicio de la señal es claramente impulsivo; por consiguiente, se distinguen claramente las fases P y S (Figura 16). La aparición de los eventos en regiones volcánicas suele ser en forma de “enjambre sísmico”, es decir, una secuencia de numerosos eventos agrupados en el tiempo, de tamaños similares y que comparten una misma zona epicentral.

El modelo de fuente que genera este tipo de eventos es la acumulación de esfuerzos en una determinada región o zona que, al exceder el límite de

resistencia, se rompe generando ondas sísmicas. En ambientes volcánicos, estos esfuerzos podrían ser asociados al ascenso de magma o al cambio de tensión producto de la apertura de un nuevo conducto por donde se mueven los fluidos y gases presurizados (White y McCausland, 2016).

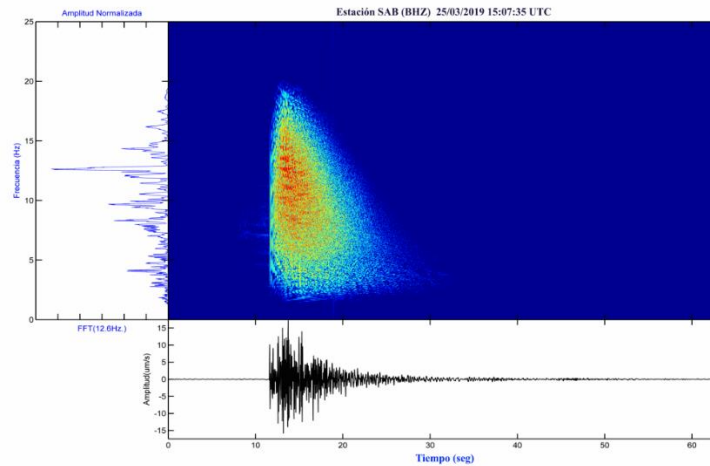


Figura 16.- Ejemplo de un sismo de tipo Volcano-Tectónico (VT) registrado por la estación SAB el 25 de marzo de 2019, perteneciente a la red del Sabancaya (REDSAB).

5.1.2. Sismos de tipo Largo Periodo (LP)

Típicos de ambientes volcánicos. Se caracterizan por tener una duración de pocos segundos hasta algo más de un minuto, con un contenido espectral muy limitado y bandas de frecuencia relativamente estrechas ($0.5 < f < 5$ Hz). El inicio de esta señal es emergente, es decir, no se logra distinguir la fase P ni la S (Figura 17). El contenido espectral de estas señales puede variar en cada volcán e, incluso, dentro del mismo sistema volcánico.

El modelo de fuente para este tipo de señal ayuda a entender el contenido espectral del evento y lo relaciona con la dinámica de los fluidos al interior del volcán. El modelo se llama "modelo de fracturas controladas por fluidos". En este modelo, los eventos de tipo Largo Periodo se generan por resonancia en fracturas cerradas en sus extremos y rellenas de fluidos volcánicos (magma), con un cierto nivel de gas disuelto en ellas, lo que produce una presión momentánea (Chouet, 1996).

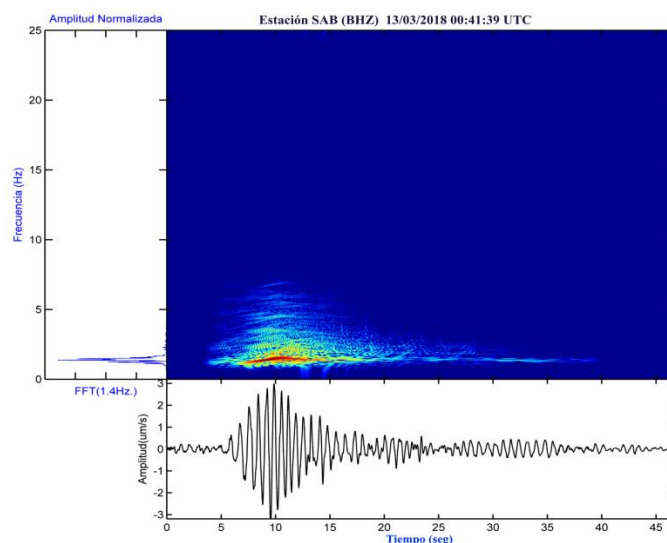


Figura. 17. Ejemplo de un sismo tipo Largo periodo (LP) registrado por la estación SAB el 13 de marzo de 2018, perteneciente a la red del Sabancaya (REDSAB).

5.1.3. Tremor (TRE)

El Tremor volcánico es una señal sísmica caracterizada por mantener la amplitud constante durante un largo periodo de tiempo que puede oscilar entre varios minutos a horas, con contenido espectral centrado en las bandas de frecuencia relativamente estrechas (Ibáñez, 2000).

Su espectro presenta picos dominantes y subdominantes. Por lo general, las frecuencias centrales de los picos dominantes son estables y no suelen ser muy influenciadas por las características de la erupción o la actividad volcánica. No se logran identificar las llegadas de las ondas P o S (Figura 18 y Figura 19). En erupciones, las amplitudes del Tremor están muy bien correlacionadas con la dinámica de las emisiones de ceniza, vapor o gas; en emisiones de flujos de lava, las amplitudes del Tremor suelen ser más bajas (Ibáñez & Carmona, 2000).

Dependiendo de su contenido espectral, existen 2 tipos principales de Tremor: a) **Tremor Armónico**, caracterizado por sucesiones de ondas monocromáticas o cuasimonocromáticas en una banda de frecuencia muy angosta. Es el resultado de una sostenida actividad volcánica debido a un

cambio de presión, producto del flujo de fluidos (gases o magma) dentro del conducto volcánico. b) **Tremor Espasmódico**, corresponde a una señal cuya amplitud o frecuencia varía significativamente. Esta señal no exhibe frecuencias dominantes distinguibles a primera vista y su banda de contenido espectral es más amplia que los tremores armónicos. A veces se produce después de una explosión o debido al paso de un lahar. También puede acompañar a los trenes de explosiones. Es un precursor de erupciones.

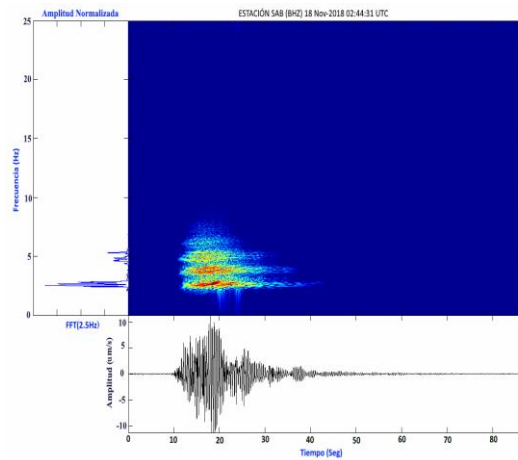


Figura 18.- Ejemplo de un sismo de tipo Tremor Armónico (TRE) registrado por la estación SAB el 18 de noviembre de 2018, perteneciente a la red del Sabancaya (REDSAB).

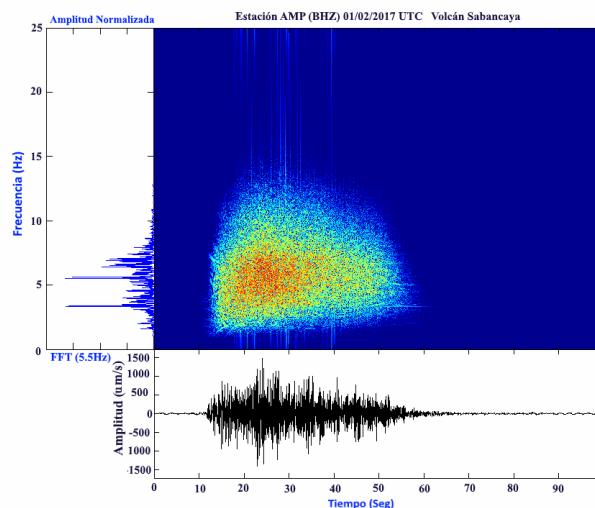


Figura 19. Ejemplo de un sismo de tipo Tremor Espasmódico (TRA) registrado por la estación AMP el 1 de febrero de 2017, perteneciente a la red del Sabancaya (REDSAB).

5.1.4. Tornillo (TOR)

Este evento sísmico tiene las mismas características que los eventos de tipo Largo Periodo, además de su modelo de fuente; sin embargo, por su forma de onda ha recibido un nombre más descriptivo, evento "Tornillo" (e.g. Torres et al., 1996), lo que alude a su forma de onda que es muy similar a la de un tornillo.

Las características principales de un evento de tipo Tornillo son las siguientes:

- Presentan una forma de onda cuasisinusoidal y un decaimiento exponencial relativamente lento de las amplitudes de la señal, que se manifiestan en largas duraciones en comparación con las amplitudes (Figura 20).
- El contenido espectral es cuasimonocromático y resalta uno o pocos picos espectrales agudos, cuyo espectrograma muestra básicamente que el contenido de energía se concentra en una banda de frecuencia estrecha y constante en el tiempo. Generalmente, el inicio de las señales tiene una banda espectral más ancha y rica en altas frecuencias.
- Los registros de sismos de tipo Tornillo en estaciones de periodo corto y banda ancha arrojan resultados similares en los dominios de tiempo y frecuencia, de manera que sus rasgos característicos son independientes de la instrumentación usada (Torres et al., 1996).
- Las frecuencias dominantes no están afectadas por la distancia epicentral, el acimut o el tiempo de viaje (Torres et al., 1996). En la mayoría de los casos, las frecuencias pico son muy diferentes entre los volcanes (Torres et al., 1996).

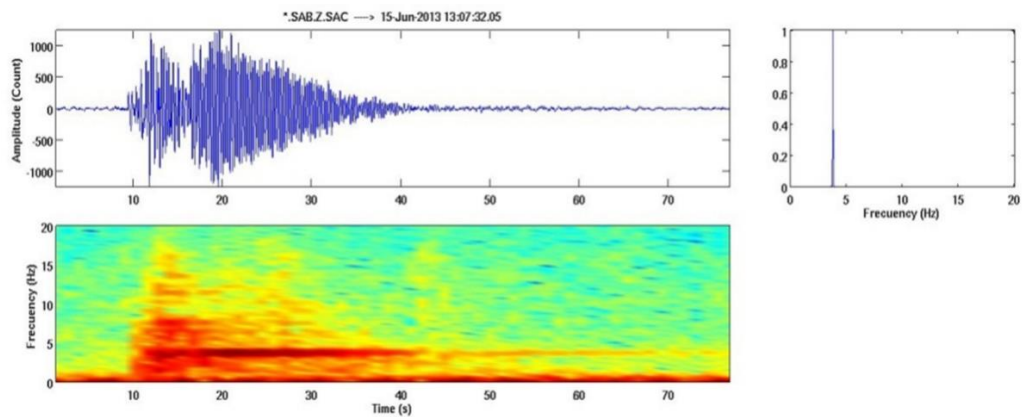


Figura 20.- Ejemplo de un sismo de tipo Tornillo (TOR) registrado por la estación SAB el día 15 de junio de 2013, perteneciente a la red del Sabancaya (REDSAB).

5.1.5. Eventos de tipo Híbrido (HIB)

Los eventos de tipo Híbrido son una mezcla de los eventos de tipo Volcano-Tectónico (VT) y eventos de tipo Largo Periodo (LP). Se caracterizan por tener altas frecuencias en su inicio, seguidos por bajas frecuencias, normalmente con una amplia banda espectral (más de 10 Hz), en la cual, a veces, se pueden identificar las fases P (Figura 21).

Los eventos de tipo Híbrido son eventos que están relacionados al ascenso de magma a través del conducto volcánico. En efecto, el magma en su ascenso va friccionando las paredes del conducto volcánico, lo que origina altas frecuencias seguidas de bajas frecuencias generadas por el avance del magma.

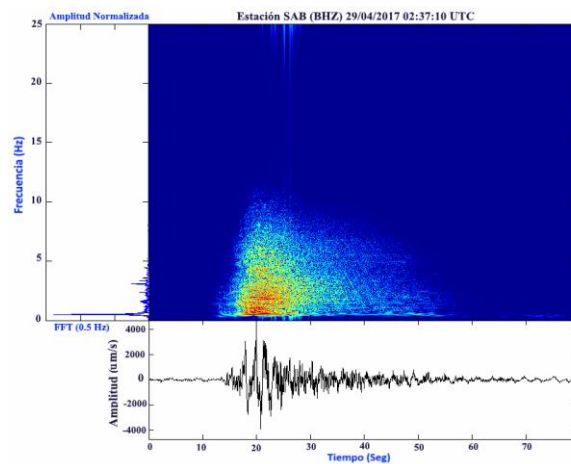


Figura 21.- Ejemplo de un sismo de tipo Híbrido (HIB) registrado por la estación SAB el 29 de abril de 2017, perteneciente a la red del Sabancaya (REDSAB).

5.1.6. Explosiones (EXP)

Las explosiones son identificadas por el aumento brusco en la amplitud de la señal y un incremento en sus frecuencias. De manera general, tienen al menos 2 llegadas diferentes y claras: la primera asociada con la propagación en forma de ondas internas o superficiales de la explosión. La segunda es lo que se conoce como ondas de aire, ondas de choque y ondas sonoras con una velocidad de 340 m/s (Ibáñez, 2000). Las explosiones y el Tremor son las señales más características de un proceso eruptivo (Figura 22).

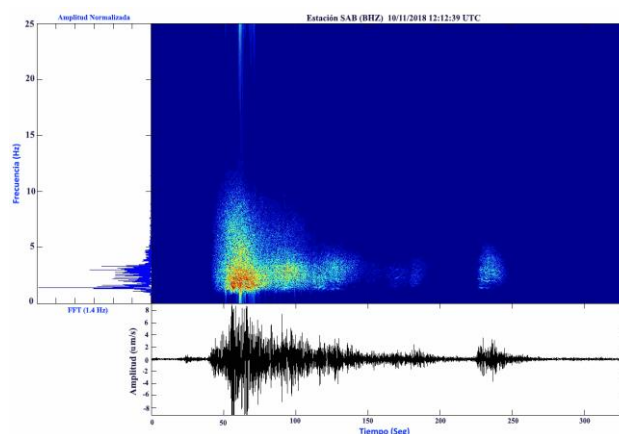


Figura 22.- Ejemplo de una explosión (EXP) registrada el 10 de noviembre de 2018 por la estación SAB del Sabancaya (REDSAB).

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN Y RESULTADOS DE LA EVOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA DEL VOLCÁN SABANCAYA

Lograr entender el comportamiento de un volcán activo conlleva a analizar diferentes tipos de información (sísmica, geodésica, visual, térmica, geoquímica, etc.). Mientras se tengan mayores registros o medidas sobre el grado de actividad volcánica, el conocimiento de su comportamiento presente y futuro será mejor. Científicamente, se sabe que es muy probable que la próxima erupción tendrá características similares a las erupciones pasadas o recientes ocurridas en el volcán en observación.

El volcán Sabancaya inició un proceso eruptivo en el año 1990, a partir del cual el Instituto Geofísico del Perú empezó a realizar el monitoreo de la actividad sísmica. A continuación, se presentan los resultados obtenidos del procesamiento de las señales sismovolcánicas.

6.1. PROCESO PREERUPTIVO DEL VOLCÁN SABANCAYA DE 1986-1990

En la década de 1980, la información sobre la actividad de los volcanes activos del Perú era parcial e incompleta, de modo que las primeras observaciones en 1981 daban cuenta de la presencia de fumarolas y “ruidos” que se observaban en el cráter del Sabancaya, lo cual no causó alarma a las autoridades ni a los pobladores de Arequipa.

Rodríguez et al., (1994) refieren que desde junio de 1986 se observaron notables fumarolas que se emitían desde la cumbre del volcán Sabancaya. Estos reportes de observaciones visuales se incrementaron en los meses siguientes, especialmente desde noviembre de 1986, fecha en la cual el volcán empezó a emitir gases en volúmenes considerables visibles desde grandes distancias.

En junio de 1988, un equipo de vulcanólogos peruanos (IGP e IG-UNSA) y extranjeros (USA y Ecuador) efectuaron misiones de reconocimiento terrestre y aéreo del volcán Sabancaya (Huamán, 1988). Ellos concluyeron que existían grandes indicios de una reactivación del volcán y describieron emisiones de gases en el cráter del volcán, donde registraron acumulación de óxidos, azufre nativo y cenizas. Además, observaron un domo

central recubierto de nieve y hielo, en donde se apreciaban fracturas visibles. Las fumarolas alcanzaban entre 500 m a 1000 m de altura por encima del cráter. Estas emanaciones de gases fueron dispersadas por los vientos a más de 10 km de distancia en dirección noreste.

Huamán (1990a) hace una comparación de fotografías aéreas de 1955 e imágenes satelitales SPOT de 1986, 1989 y 1990, y deduce que la deformación se incrementó al nivel del cráter y también posiblemente la temperatura. Asimismo, las imágenes satelitales también mostraron una disminución del volumen del casquete glaciar visible sobre el Sabancaya.

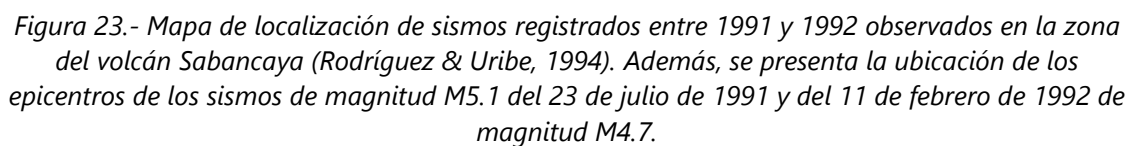
6.2. PROCESO ERUPTIVO DEL VOLCÁN SABANCAYA 1990-1998

El 28 de mayo de 1990 ocurrieron las primeras explosiones con emisión de ceniza en el volcán Sabancaya. Estas explosiones fueron de tipo freático. En las primeras semanas (junio e inicios de julio), las explosiones fueron muy numerosas, registrándose más de una decena por día con intervalos regulares. En esta oportunidad, la altura de la pluma alcanzó los 5 km al inicio (1ra y 2ra semana de junio), disminuyendo posteriormente a 3 km. Las cenizas se dispersaron y llegaron a distancias de hasta 20 km alrededor del volcán. En agosto, la tasa de explosiones diarias disminuyó drásticamente; no obstante, fueron energéticas y se presentaron esporádicamente.

6.2.1. Características y evolución de la sismicidad

Desde julio de 1990, el IGP operó una red de estaciones analógicas y digitales distribuidas en un radio de entre 11 km y 20 km alrededor del volcán (Rodríguez & Uribe, 1994). Los registros obtenidos mostraron la predominancia de sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) o de fractura respecto a la sismicidad de tipo Largo Periodo, ligada a la circulación de fluidos magmáticos. Rodríguez & Uribe (1994) observaron que en julio y agosto de 1990, mayo y junio de 1991, y febrero de 1992, la sismicidad de tipo Volcano-Tectónica se concentró preferencialmente al noreste del cráter,

La figura 23 muestra la zona de sismicidad localizada siempre al norte del Sabancaya, lugar donde se localizaron 2 sismos principales: el primero ocurrido el 23 de julio de 1991 (sismo de Maca), con magnitud de M5.1, que ocasionó la muerte de 15 personas; el segundo sismo, el 1 de febrero de 1992 (sismo de Sepina), con una magnitud de M4.7, en una zona localizada a 6 km al noreste del cráter (Figura 23). Es posible que estos 2 sismos (23 de julio 1991 y 1 febrero de 1992) hayan formado parte de enjambres sísmicos, tal como se observa en la figura 25, donde se muestra la gran cantidad de sismos registrados en esas fechas.



En 1993, el IGP instaló y operó una red de 3 estaciones sísmicas telemétricas que enviaron la señal sísmica hacia las instalaciones de la sede del IGP en Arequipa. Al analizar los datos de agosto y septiembre de 1993, se observó que la sismicidad de tipo Volcano-Tectónico se había trasladado y se ubicaba cerca del cráter, hasta 7 km al sureste, con profundidades de 20 km (Figura 24).

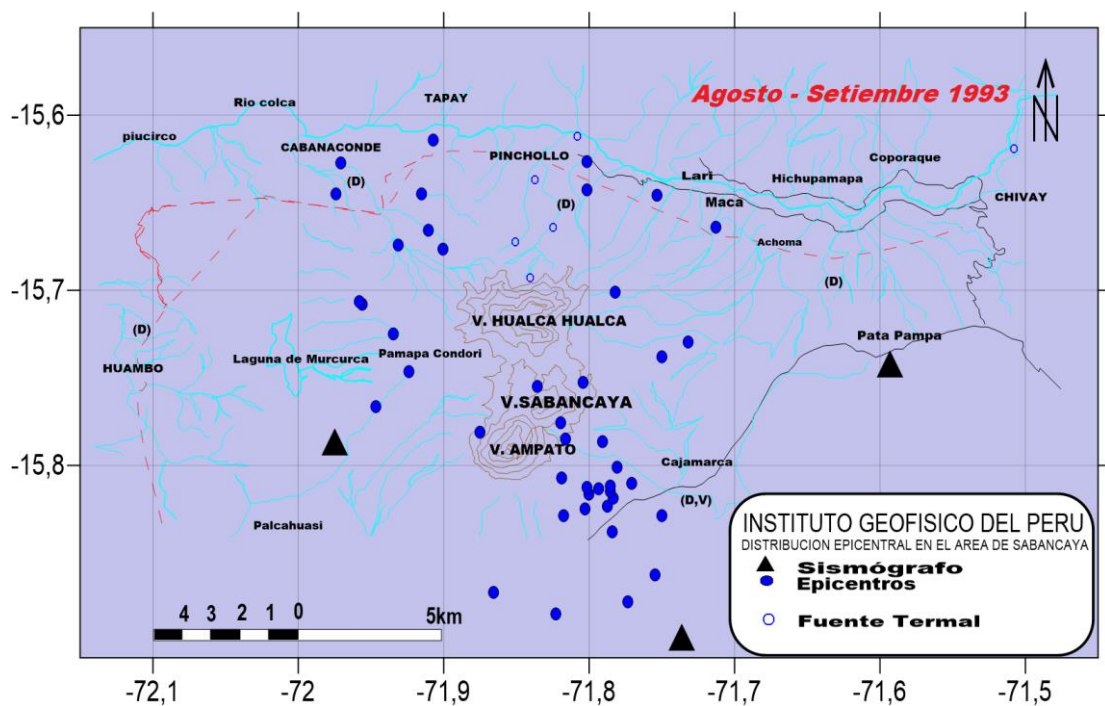


Figura 24.- Mapa de localización de sismos registrados en la zona del volcán Sabancaya entre agosto y septiembre de 1993 (Rodríguez & Uribe, 1994).

En los meses siguientes, es decir en octubre, noviembre y diciembre de 1993, la zona de epicentros se trasladó nuevamente al norte y noreste del Sabancaya, situándose en las estribaciones del volcán Hualca-Hualca y en los pueblos de Maca y Pinchollo, con profundidades cercanas a los 20 km. Además, en los últimos meses de 1993, se registraron sismos de tipo Híbrido. Durante todo el periodo observado, se registraron muy pocos tremores de larga duración.

Los registros de sismos de tipo Largo Periodo y emisiones fumarólicas, así como aquellos ligados a las explosiones, fueron contabilizados a fin de establecer una estadística de la actividad sísmica (Rodríguez & Uribe, 1994). La figura 25 muestra un resumen de los resultados del monitoreo sísmico asociado a la actividad del volcán Sabancaya, efectuado entre agosto de 1990 y julio de 1993.

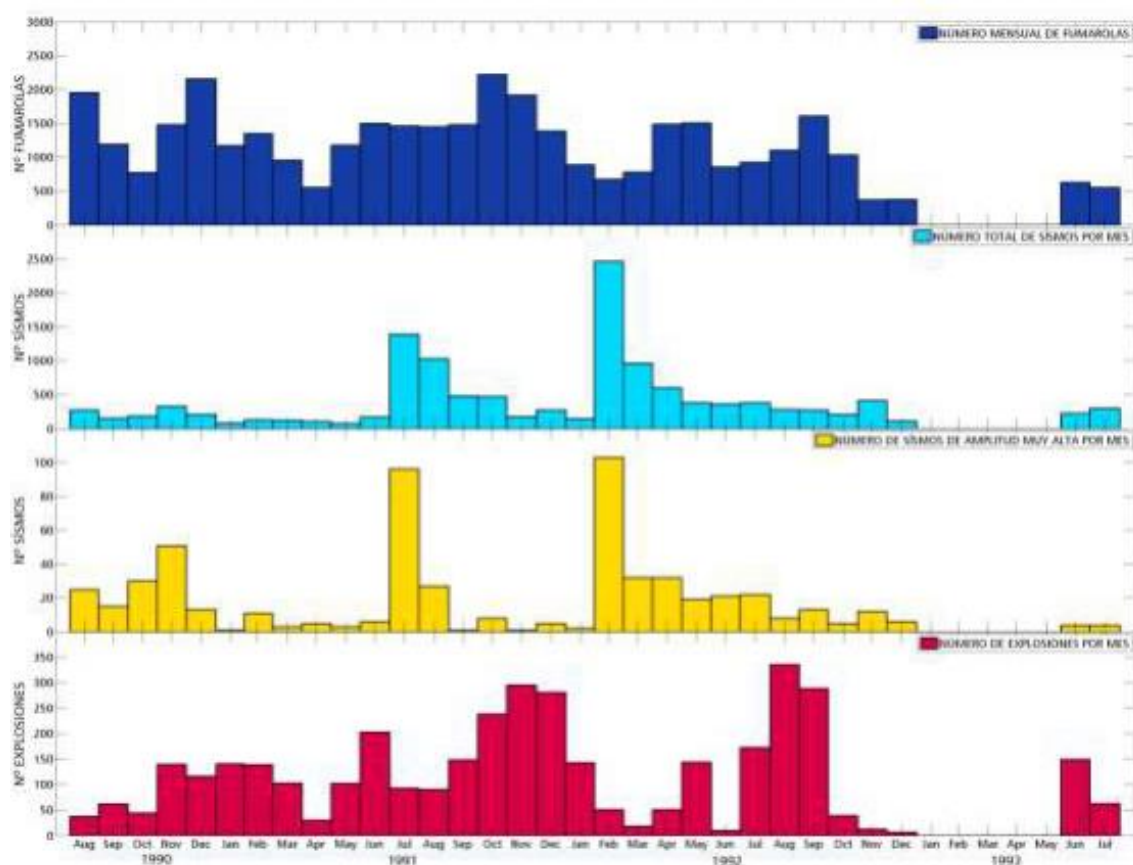


Figura 25.- Diagrama estadístico de la actividad sismovolcánica observada durante la erupción del volcán Sabancaya entre 1990 y 1993 (Rodríguez y Uribe, 1994).

Finalmente, cabe indicar que, con base en los registros sísmicos, así como en observaciones visuales respecto a la actividad del volcán Sabancaya, Rodríguez & Uribe (1994) refieren que muy probablemente la apertura o el destaponamiento de los conductos del volcán Sabancaya se produjo principalmente en octubre de 1990, es decir, aproximadamente cuatro meses después de iniciada la erupción (Macedo et al., 2014). La actividad eruptiva permaneció variable entre 1993 y 1995, pero a partir de 1996 se observó una

tendencia a la disminución. A mediados de 1998, las explosiones y emisiones de ceniza cesaron.

6.2.2. Interpretación del proceso eruptivo 1990-1998

Desde el inicio de la reactivación del volcán Sabancaya, denominado periodo preeruptivo en 1986, transcurrieron 3 años y medio hasta el comienzo del proceso eruptivo en 1990. La etapa preeruptiva se manifestó fundamentalmente por el aumento notable de la sismicidad en zonas alejadas del edificio volcánico, principalmente en la zona norte e incremento de las emisiones de gases a nivel del cráter.

Durante el proceso eruptivo 1990-1998, se evidenció con técnicas InSAR una zona de deformación a 2.5 km al este del volcán Hualca-Hualca, y a 7 km al norte del Sabancaya, con una tasa de inflación de 2 cm/año (Pritchard & Simons, 2002). Otra de las características observadas en el proceso eruptivo fue la sismicidad de tipo Volcano-Tectónico, migrante y localizada siempre en la zona norte del Sabancaya, precisamente donde se halla el sistema de fallas Huambo-Cabanaconde, Ichupampa y Huanca, que es influenciado probablemente por la actividad volcánica. Se han registrado 2 sismos importantes que afectaron la localidad de Maca y otros pueblos del valle del Colca: el primer sismo se registró el 23 de julio de 1991 con una magnitud de M5.1 y 4 km de profundidad, denominado "sismo de Maca", en el cual murieron 15 personas. El segundo sismo se registró el 1 de febrero de 1992, de magnitud M4.7 y 5 km de profundidad, el cual provocó el colapso de algunas viviendas localizadas al noreste del volcán.

La sismicidad fue incrementándose en los primeros meses de la erupción (mayo, junio y julio de 1990); posteriormente, en agosto de ese mismo año, la sismicidad disminuyó en número, pero incrementó en energía. La sismicidad se mantuvo variable hasta 1996. Posteriormente, el proceso eruptivo disminuyó y concluyó 8 años después.

6.3. PROCESO PREERUPTIVO DEL VOLCÁN SABANCAYA 2013-2016

La etapa preeruptiva se inició el 22 de febrero de 2013 con la ocurrencia de un enjambre sísmico que se prolongó hasta el 23 de febrero, durante el cual se produjo un sismo principal de M5.2. Posteriormente, entre los días 16 y 17 de julio de 2013, se registró otro enjambre sísmico con un sismo principal asociado de M5.7. La evolución de la sismicidad durante este periodo vino acompañada del incremento en la altura y frecuencia de emisión de las fumarolas. En efecto, el 6 de agosto de 2014 la altura de las fumarolas alcanzó una altura de hasta 3000 m sobre la cima del volcán. Asimismo, se registró un incremento progresivo y sostenido de la densidad del gas magmático SO₂ (datos del *Global Sulfur Dioxide Monitoring*-NASA) durante todo el periodo (Figura 28D), similar a la tendencia experimentada por los eventos sismovolcánicos. Durante este periodo, febrero de 2013 a noviembre de 2016, se registraron en total 130 537 eventos sísmicos, de los cuales 77 275 (59.2 %) correspondieron a eventos de tipo Volcano-Tectónico; 40 208 (30.8 %), a eventos de tipo Largo periodo y 5383 (4.1 %) a eventos de tipo Híbrido. Además, se registraron 7668 (5.9 %) eventos tipo Tremor y Tornillo. Finalmente, se registraron 3 explosiones freáticas confinadas, la última de ellas de pequeña energía (Figura 26).

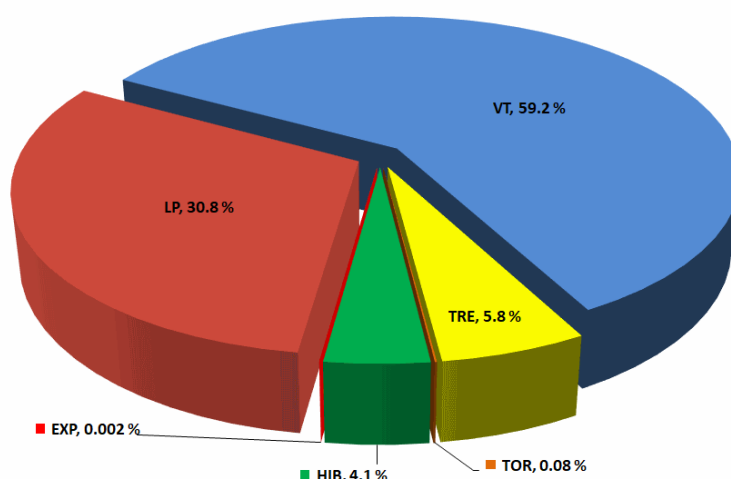


Figura 26.- Eventos sísmicos registrados entre el periodo febrero de 2013 y noviembre de 2016.

6.3.1. Características y evolución de la actividad preeruptiva

Una característica notable del inicio del proceso preeruptivo es que los eventos sísmicos ocurridos entre el 22 y 23 febrero de 2013 tuvieron considerables magnitudes (M4.6, M5.2, M5.0 y M4.5). Asimismo, los eventos sísmicos ocurridos durante los días 16 y 17 de julio del mismo año registraron también magnitudes importantes (M4.9, M4.2 y M5.7). Estos dos grupos de sismos se presentaron a manera de enjambres. White & McCausland (2016) han mostrado que la ocurrencia de sismicidad en forma de enjambre en ambientes volcánicos son señales precursoras de un proceso eruptivo o una erupción volcánica. Según el modelo de White & McCausland (2016), al inicio de una intranquilidad volcánica ocurre sismicidad tipo Volcano-Tectónico (VT) que se sitúa lejos del cráter de un volcán (hasta 30 km de distancia). Además, ocurre un incremento de señales de tipo Largo Periodo, Tremor, emisiones fumarólicas y aparición de eventos de tipo Híbrido y Tornillo.

A continuación, se presentan las características de la sismicidad observada en la fase preeruptiva:

A) Migración de los eventos de tipo Volcano-Tectónico Distales (VTD) a Proximales (VTP)

Desde febrero hasta julio de 2013, los eventos de tipo Volcano-Tectónico fueron migrando hacia la zona del volcán Sabancaya. En efecto, en la figura 27 se aprecia una circunferencia que demarca un radio de 6 km desde el cráter del volcán, lo cual muestra que los eventos de tipo Volcano-Tectónico se aproximaron hacia el cráter. Estos sismos son denominados Volcano-Tectónico Proximales (VTP), mientras que los eventos que se encuentran fuera de este límite son llamados Volcano-Tectónico Distales (VTD). Para una mejor visualización, solo fueron ploteados los sismos con magnitudes mayores e iguales a M2.5.

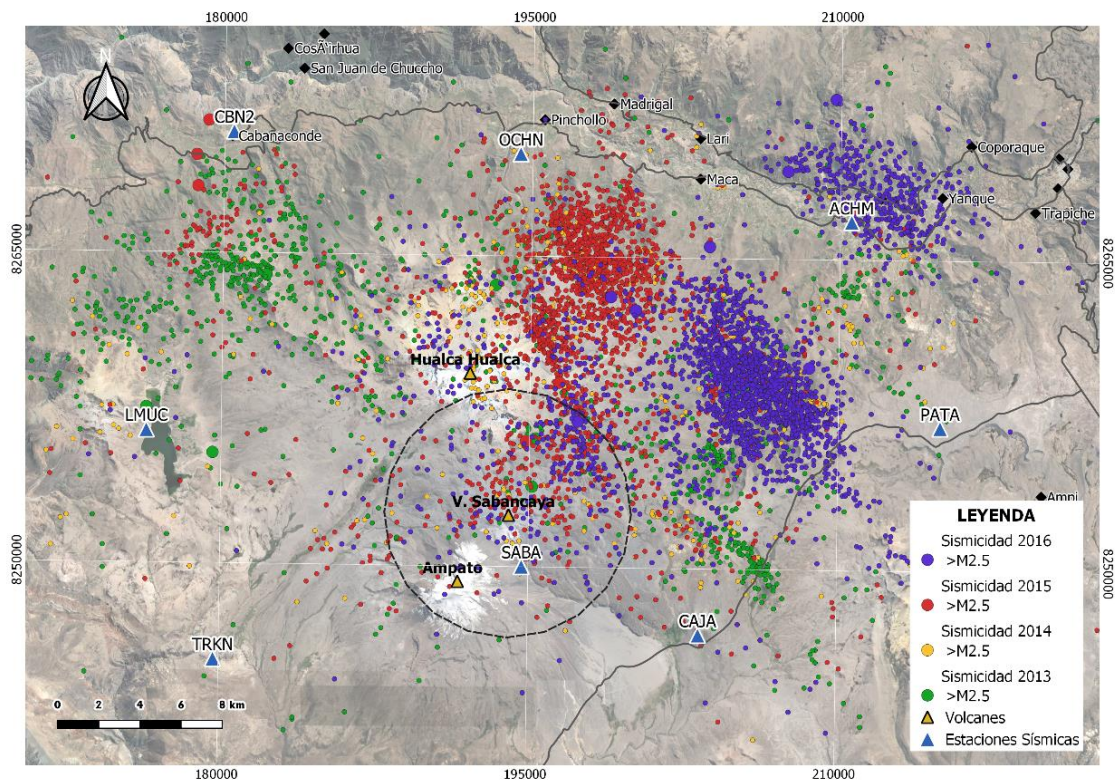


Figura 27.- Localización de sismos de tipo Volcano-Tectónico registrados durante el periodo preeruptivo del volcán Sabancaya. Los epicentros de los sismos del año 2013 están en círculos de color verde; los epicentros de los sismos de 2014, de color amarillo; los epicentros de los sismos de 2015, de color rojo y, finalmente, los epicentros de los sismos de 2016 están de color violeta.

A continuación, se detalla la migración de la sismicidad de tipo Volcano-Tectónico observada en los diferentes años que duró la etapa preeruptiva (Figura 27 y Figura 28C).

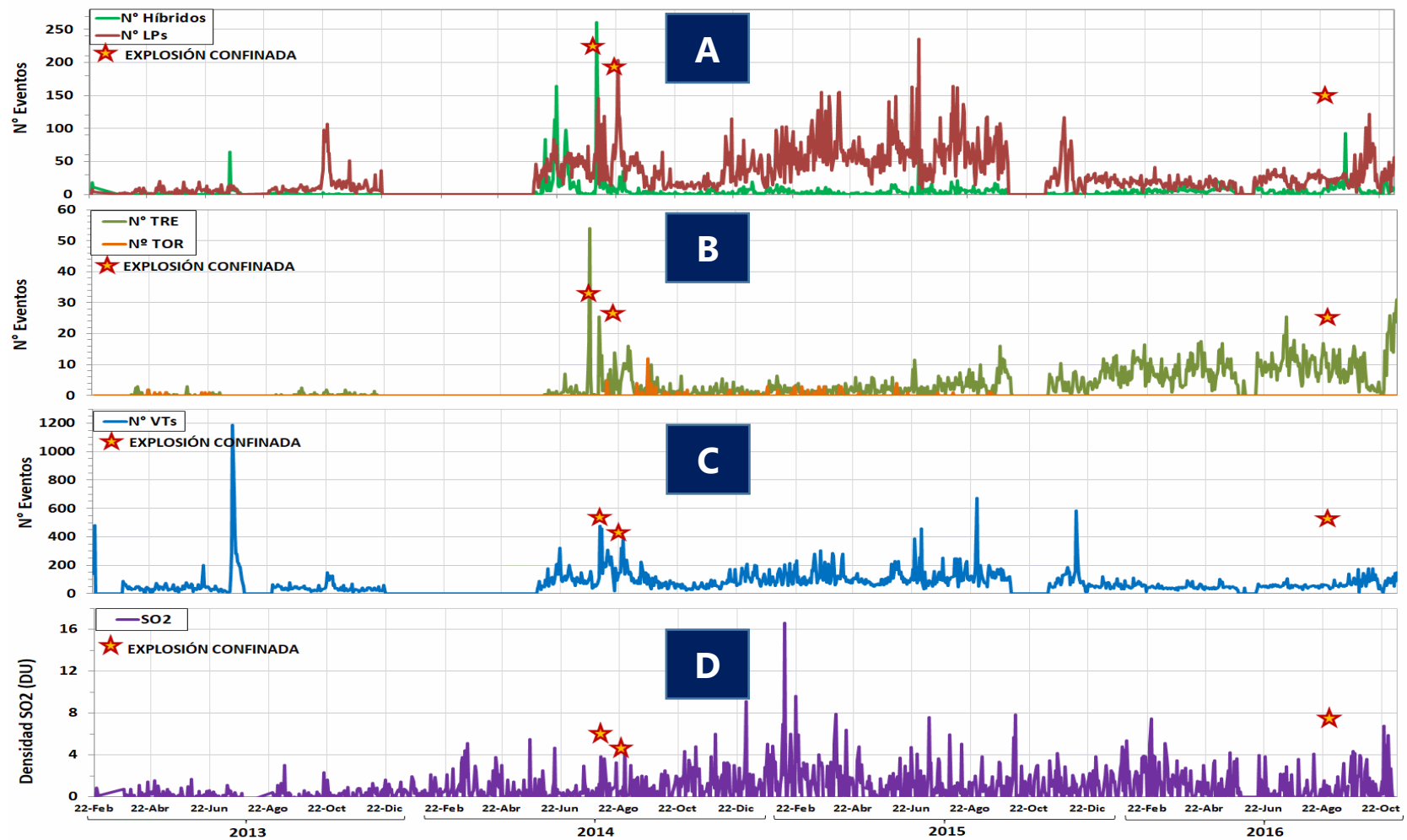


Figura 28.-. Estadística de los eventos registrados durante el periodo preeruptivo entre febrero de 2013 y octubre de 2016.

- Sismicidad de tipo Volcano-Tectónico observada en 2013 (círculos verdes)

La mayoría de los epicentros de los eventos de tipo Volcano-Tectónico se localizaron a 19 km al noroeste del volcán Sabancaya, en un área cercana al pueblo de Cabanaconde. En esta zona, la sismicidad se presentó principalmente en julio de 2013, registrándose un enjambre sísmico los días 16 y 17 julio de 2013; asociado a ello ocurrió un sismo de M5.7. En este periodo, según Jay et al., (2015), se distinguió una deformación importante al norte del volcán Sabancaya. Otros hipocentros, aunque en menor cantidad, se localizaron a 10 km al noreste del cráter. El mayor número de eventos (558 sismos) se registraron durante los meses de agosto a octubre.

- Sismicidad de tipo Volcano-Tectónico observada en 2014 (círculos amarillos)

Durante los primeros meses de 2014, los sismos se presentaron de manera dispersa, mientras que en los meses de agosto y noviembre de 2014 los epicentros de los sismos se agruparon a 12 km al norte del volcán Sabancaya, es decir, al sur de los poblados de Maca y Pinchollo y a 15 km al noreste del cráter. Asimismo, otro grupo de sismos se localizaron al N-NE, entre 5 km y 11 km del cráter. Se registraron sismos de magnitud de hasta M3.4. Se observó un incremento del número de sismos días antes de la primera explosión confinada ocurrida el 9 de agosto de 2014.

- Sismicidad de tipo Volcano-Tectónico observada en el 2015 (círculos rojos)

Los epicentros de los eventos de tipo Volcano-Tectónico, en un grupo numeroso, se localizaron principalmente a 12 km al NNE del cráter del Sabancaya. Dicho agrupamiento sísmico se extendió por el sur, hasta inmediaciones del cráter del volcán Sabancaya, principalmente durante diciembre, mes en el que ocurrieron el mayor número de eventos de tipo Volcano-Tectónico hasta ese momento dentro del periodo preeruptivo. Otro

pequeño grupo de epicentros de eventos de tipo Volcano-Tectónico se ubicó a 20 km al noroeste del cráter del volcán. La magnitud máxima calculada de estos eventos fue de M4.6, registrada el 28 de agosto de 2015.

- Sismicidad de tipo Volcano-Tectónico de enero a octubre de 2016 (círculos violetas)

Durante este periodo, los epicentros de los eventos de tipo Volcano-Tectónico se distribuyeron principalmente en 2 focos: el primero localizado a 13 km al NE del cráter del Sabancaya, lo que puso de manifiesto una posible falla orientada en dirección NO-SE; y el segundo foco localizado a 23 km del cráter, sobre la falla Ichupampa. El sismo de mayor magnitud registrado en este periodo fue de M5.4.

B) Incremento de los eventos de tipo Largo Periodo y emisión de SO₂

Los eventos de tipo Largo Periodo han ido incrementándose sostenidamente entre los años 2013 y 2015, alcanzando promedios de 10 eventos de tipo Largo periodo por día durante el 2013; 41 eventos por día en 2014 (con un pico de 260 eventos el 4 de agosto, cinco días antes de la primera explosión confinada). Después de las 2 explosiones confinadas registradas los días 9 y 26 de agosto de 2014, los eventos de tipo Largo Periodo disminuyeron hasta diciembre de 2014. Durante 2015, se registró un incremento importante y sostenido de la actividad sísmica, con un promedio de 69 eventos de tipo Largo periodo por día, máximo promedio registrado desde el inicio de la intranquilidad. Durante 2016, se distinguió una disminución notoria del promedio de eventos de tipo Largo Periodo (21 eventos por día), desde enero hasta el 6 noviembre. Finalmente, semanas antes de inicio del proceso eruptivo, los eventos de tipo Largo Periodo se incrementaron notoriamente (Figura 28A).

La figura 28D muestra el incremento sostenido y notorio de los valores de densidad del gas magmático SO_2 antes de las 2 explosiones confinadas ocurridas en agosto. Posteriormente, la densidad se incrementó hasta alcanzar un pico de 16.6 DU (Unidades Dobson) en febrero de 2015, tras lo cual fue disminuyendo ligeramente hasta el inicio del proceso eruptivo.

C) Aparición de los eventos de tipo Híbrido (HIB), Tremor (TREM) y Tornillo (TOR)

En la figura 28A y 28B se puede observar que en 2014 los eventos de tipo Híbrido exhibieron un notable incremento. Estos aparecieron en forma de un importante enjambre entre el 6 de junio y el 14 de julio; se destaca un pico de 145 eventos el día 21 de junio. También, se observó un nuevo incremento importante de eventos de tipo Híbrido entre el 2 y 8 de agosto de 2014, con un pico de 255 eventos el día 02 de agosto. Del mismo modo, los tremores se incrementaron notablemente 3 semanas antes de las 2 explosiones confinadas de agosto de 2014. Dos picos, el primero de ellos de 34 tremores equivalente a 4.7 horas de tremor, y el segundo de 52 tremores equivalente a 1.1 horas de tremor, fueron registrados los días 22 de julio y 2 de agosto de 2014, respectivamente. Posteriormente, estos disminuyeron tanto en número y duración hasta el 15 de junio de 2015, fecha a partir de la cual se observó un incremento sostenido de eventos de tipo Tremor e Híbrido hasta semanas antes del inicio del proceso eruptivo en 2016.

Los eventos de tipo Tornillo comenzaron a ser registrados a partir del 10 de agosto de 2014, después de la primera explosión confinada. Se observó un pico de 9 eventos de tipo Tornillo el 21 de septiembre de 2014. Estos eventos finalmente fueron decayendo en número hasta fines de septiembre de 2015, para posteriormente desaparecer (Figura 28B).

D) Registro de las explosiones

Después del incremento de los eventos de tipo Largo Periodo, Tremor y aparición de los eventos de tipo Tornillo, además de la migración de los eventos de tipo Volcano-Tectónico hacia el cráter del volcán, se registraron 2 explosiones freáticas confinadas: la primera ocurrió el 9 de agosto de 2014 a las 09:29 UTC, con energía de 9083 Megajoules (MJ) y una duración de 50 segundos. La segunda explosión se registró dos semanas más tarde, el 26 de agosto de 2014, a la 01:39 UTC, liberó una energía de 1151 MJ y tuvo una duración de 82 segundos. Finalmente, el 11 de noviembre del mismo año se registró una explosión freática confinadas de menor energía (431 MJ), de 170 segundos de duración (Figura 29).

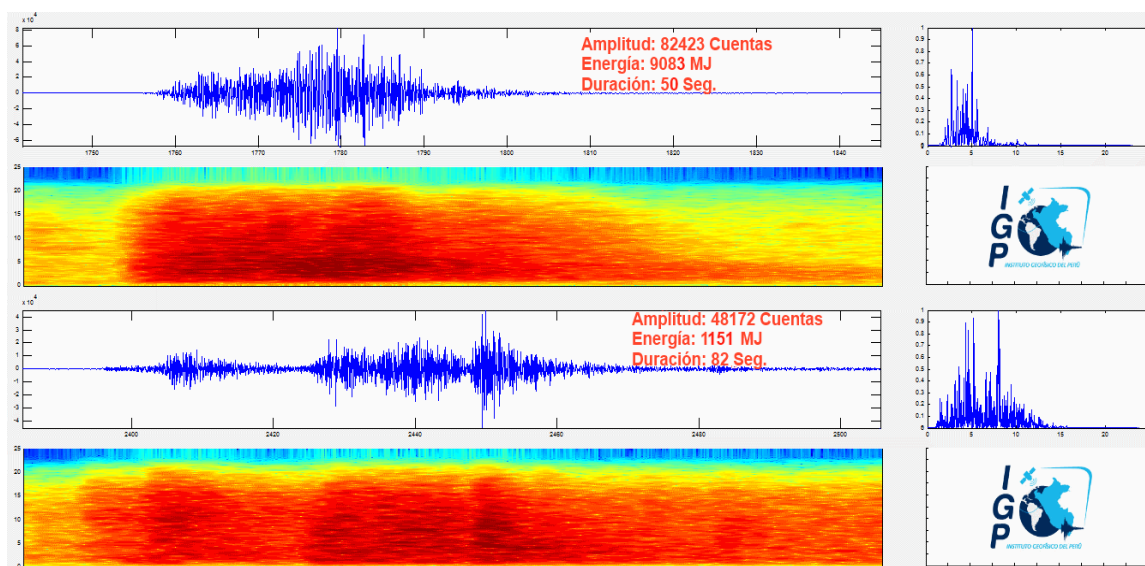


Figura 29.- Registro de las 2 principales explosiones detectadas por la estación SABA ocurridas el 9 y 26 de agosto de 2014.

6.4. LA ACTIVIDAD SISMOVOLCÁNICA PERIODO ERUPTIVO 2016-2019

Un mes antes del inicio de las explosiones del Sabancaya se observó un cambio importante en los parámetros sísmicos, principalmente en las energías de los eventos de tipo Volcano-Tectónico y de Largo Periodo. Durante la primera semana de noviembre, los sismos de tipo Híbrido, asociados al ascenso de magma, se tornaron muy energéticos. El 2 de noviembre se registraron eventos con energías de 85 MJ y el 6 de noviembre con

energías de 41 MJ. Esta actividad devino en la ocurrencia de la primera explosión el 6 de noviembre a las 20:40 hora local (Figura 30C).

6.4.1. Características, evolución de la sismicidad y otros parámetros

El Sabancaya, desde el inicio de su actividad eruptiva ocurrida en noviembre de 2016 hasta octubre de 2019, ha venido registrando numerosas explosiones volcánicas que variaron en número y energía. Con base en el análisis de los eventos sísmicos y a las manifestaciones superficiales, se lograron distinguir 3 etapas (Figura 30):

Etapas I (noviembre de 2016 a enero de 2018). Esta etapa se inicia con el registro de las primeras explosiones (Figura 30C). En esta etapa se registró el mayor número de explosiones. En efecto, el día 18 de enero de 2017 se registraron hasta 110 eventos explosivos. Las energías de estas explosiones fueron experimentando un sostenido incremento hasta fines de esta etapa, con picos de energía de hasta 169 Megajoules (MJ) el 9 de agosto de 2017 (Figura 30). Por otro lado, también se registraron algunos eventos de tipo Híbrido con energías importantes (41 MJ, el 7 de noviembre de 2016), mientras que los eventos de tipo Largo Periodo se incrementaron en número, con un pico de 317 eventos el 23 de febrero de 2017, pero con energías bajas (Figura 30B). Por su parte, los eventos de tipo Volcano-Tectónico fueron disminuyendo en número a lo largo de este periodo, desde 407 sismos registrados el 30 abril de 2017 hasta 5 sismos el 25 de enero de 2018 (Figura 30A).

Etapas II (febrero de 2018 a marzo de 2019). Se observó que tanto el número y la energía de las explosiones se mantuvieron constantes, con un promedio de 21 explosiones por día que generaron energías sísmicas del orden de 20 MJ por día (Figura 30C). La misma tendencia experimentaron los sismos de tipo Híbrido, con un promedio de 2 eventos por día y una energía máxima del orden de 2 MJ, registrada el 14 de abril de 2018. Los eventos de tipo

Largo Periodo experimentaron un incremento en su energía de hasta 112 MJ el 4 de septiembre de 2018 (Figura 30B), posiblemente como consecuencia de pequeñas intrusiones o aportes de magma evidenciadas por los sismos de tipo Volcano-Tectónico registrados entre el 10 mayo al 20 de agosto de 2018 (Figura 30A).

Etapas III (abril de 2019 a noviembre de 2019). En este periodo, se registró un ligero incremento en el número de las explosiones, representado por un promedio de 24 explosiones por día (Figura 30C); asimismo, se observó un aumento de los eventos de tipo Largo Periodo de hasta 324 eventos el 28 de mayo de 2019 (Figura 30B). Las explosiones alcanzaron energías de hasta 373 MJ el 12 de abril de 2019. Lo más destacado de este periodo es el registro de los eventos de tipo Volcano-Tectónico en forma de enjambres sísmicos (Figura 30A).

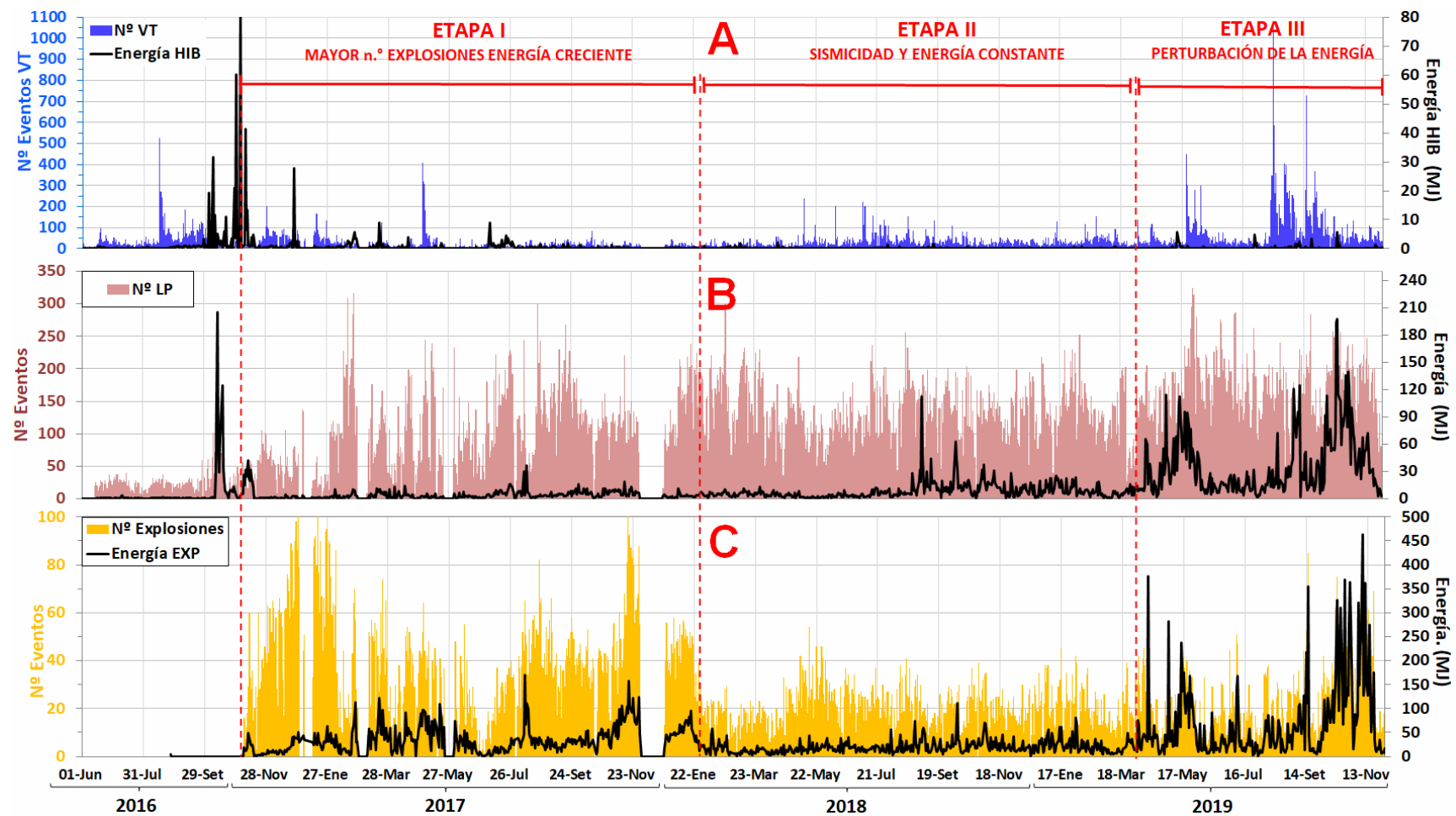


Figura 30.- Sismicidad registrada durante el periodo eruptivo 2016-2019, en la cual se observan tres etapas bien marcadas. De ellas, la etapa III es la de mayor actividad sismovolcánica.

6.4.2. Incremento de actividad sísmica registrada en 2019

Desde abril de 2019, se ha venido observando la ocurrencia de eventos de tipo Volcano-Tectónico en forma de enjambres sísmicos localizados a 6 km al este y a 14 km al noreste del volcán. El más notable y persistente en el tiempo fue el enjambre registrado a 12 km al este del cráter del Sabancaya (Figura 31A, 31B, 31C y 31D). A continuación, se describen los enjambres ocurridos:

a) Inicio de los enjambres (abril de 2019)

La actividad de tipo Volcano-Tectónico (Figura 31A) muestra 2 pequeños grupos de sismicidad (enjambres) registrados del 3 al 5 de abril y del 16 al 19 de abril, con sismos principales de magnitudes M3.6 y M3.8, localizados a 6 km al este y a 14 km al noroeste del volcán, respectivamente. Posterior a estos 2 pequeños enjambres, se registró un incremento de la sismicidad de tipo Híbrido con energías de hasta 5.7 MJ el 12 de mayo de 2019 (Figura 31A y 31B).

b) Primer enjambre (mayo-junio de 2019)

Ocurrió entre el 21 de mayo y 4 de junio. Se registró la ocurrencia de hasta 596 sismos de tipo Volcano-Tectónico el 21 de mayo, con magnitudes de hasta M4.1. Posteriormente, se registraron eventos de tipo Híbrido con energías de hasta 4.7 MJ el 27 de julio (Figura 31A y 31B).

c) Segundo enjambre (agosto-septiembre de 2019)

Ocurrió entre el 12 de agosto y 4 de septiembre. Se registró la ocurrencia de hasta 1090 eventos de tipo Volcano-Tectónico el 14 de agosto, con magnitudes de hasta M3.7. Posteriormente, el 9 de septiembre se registraron sismos de tipo Híbrido durante 5 días con energías de hasta 2.6 MJ (Figura 31A y 31B).

d) Tercer enjambre (septiembre-octubre de 2019)

Ocurrió entre el 15 de septiembre y 4 de octubre. Se registró la ocurrencia de hasta 737 eventos de tipo Volcano-Tectónico el 16 de septiembre, con magnitudes de hasta M3.7. Posteriormente, se registraron sismos de tipo Híbrido con energías de hasta 5.8 MJ el día 16 de octubre (Figura 31A y 31B).

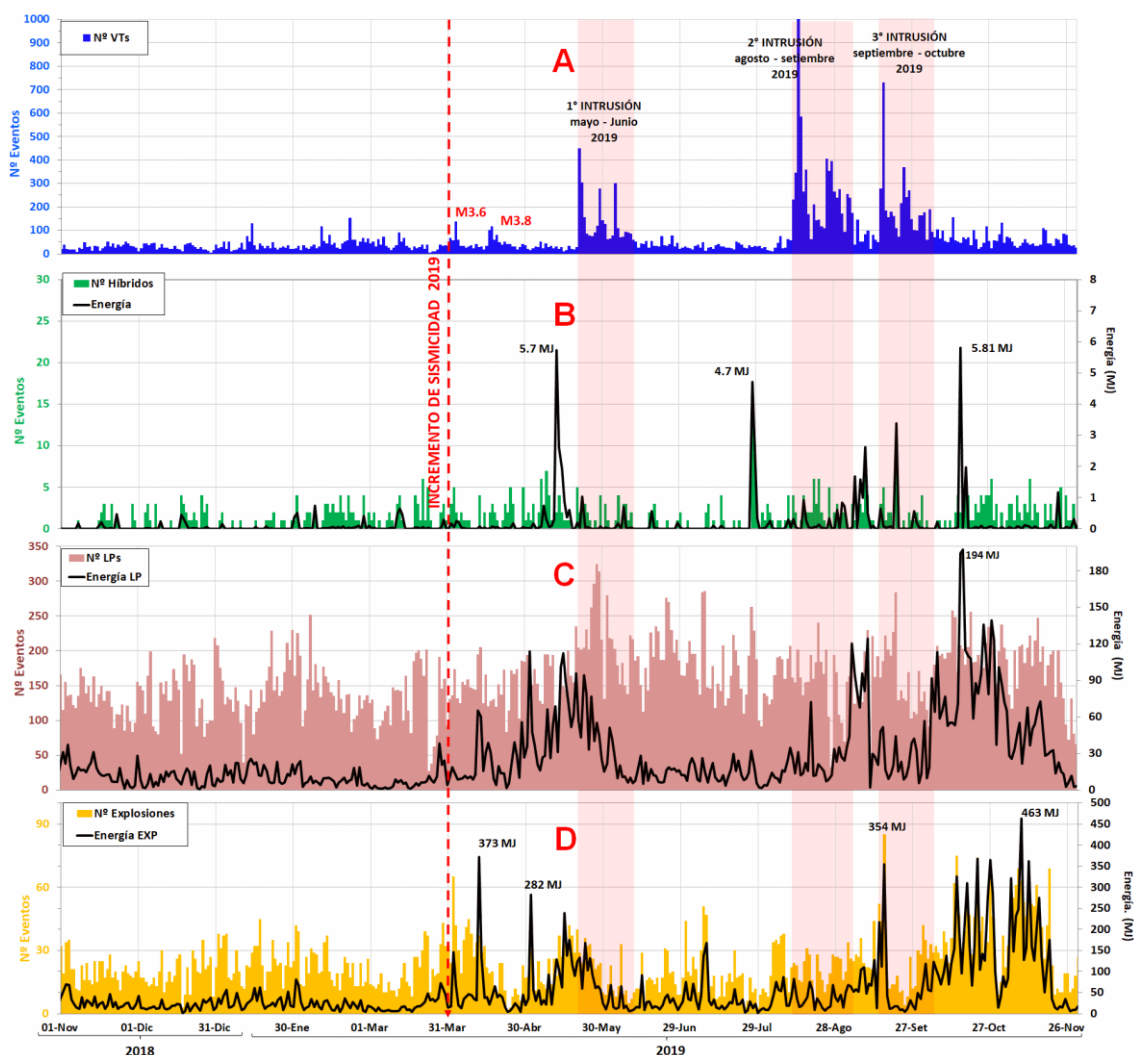


Figura 31.- Estadística de la sismicidad registrada durante 2019 donde se indican los enjambres sísmicos de tipo Volcano-Tectónico y su posterior perturbación en todos los parámetros sísmicos (ETAPA III del proceso eruptivo).

Cabe mencionar que durante e inmediatamente después del incremento de actividad sísmica se registró un incremento en las emisiones de gases y cenizas.

6.4.3. Evolución de otros parámetros de monitoreo

Para lograr comprender el comportamiento dinámico interno del volcán Sabancaya fue necesario correlacionar la sismicidad con otros parámetros de monitoreo, tales como las anomalías térmicas y la deformación medidas con equipos GPS. A continuación, se describe cada uno de estos parámetros.

a) Anomalías térmicas MIROVA

El sistema satelital MIROVA de la Universidad de Torino y Florencia proporciona medidas de valores de Potencia Volcánica Irradiada (VPR), la cual es una medida del calor irradiado por un cuerpo caliente (magma). En la figura 32 se presentan las anomalías registradas durante el periodo eruptivo 2016-2019, donde se distinguen claramente las 3 etapas indicadas líneas arriba (Figura 30). Las anomalías térmicas han experimentado variación durante la etapa I, en la que se registró un valor máximo de 99 megavatios (MW) el día 5 de octubre de 2017. Posteriormente, en la etapa II no se observó mayor variación; se registró un valor máximo de 67 MW el día 24 de agosto de 2018. En la etapa III, a partir del mes de abril, se apreció un incremento notorio de las anomalías con valores de hasta 75 MW, esto último visualizado el 22 de junio de 2019. Este valor es el tercer más alto registrado en lo que va del proceso eruptivo.

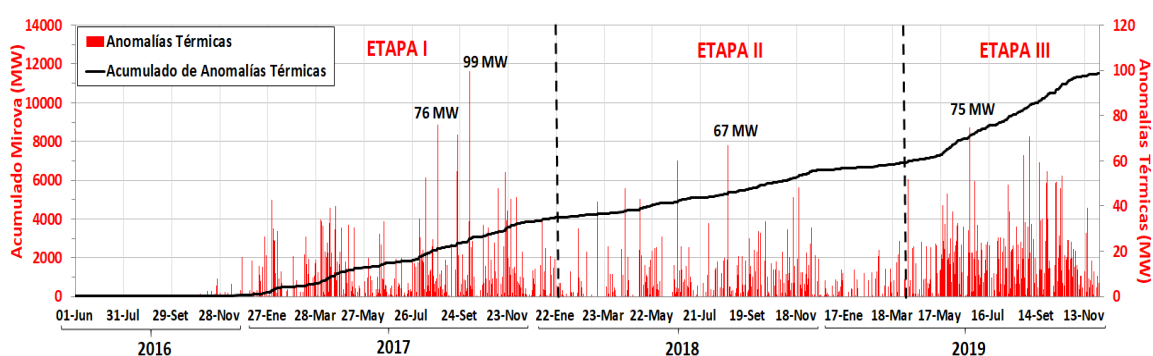


Figura 32.- Cuadro que muestra los valores de las anomalías térmicas (MIROVA) que indican una perturbación desde abril de 2019.

Cabe mencionar que las anomalías térmicas registradas sugieren, en muchos de los casos, el ascenso de magma hacia zonas próximas a la superficie o al fondo del cráter del volcán Sabancaya.

b) Deformación GNSS

Hasta octubre de 2019, el análisis de la deformación del volcán Sabancaya se realizó con 1 estación geodésica GNSS denominada SB01, ubicada a 7 km al norte del volcán Sabancaya que viene operando desde el 15 de diciembre de 2018. Con esta técnica, se ha registrado deformación importante ocurrida desde abril de 2019, representada por una tasa de desplazamiento de aproximadamente 3.3 cm/año en la componente vertical (inflación) y 0.5 cm/año en la componente horizontal, posiblemente ligada al ascenso de magma. Esta deformación ha sido evidenciada también por la actividad sísmica que ocurrió en forma de enjambres. En la figura 33 se observa que la deformación se correlaciona con el registro de la actividad sísmica de tipo enjambre desde abril a octubre de 2019. En ese periodo, se observa una tendencia positiva en los valores de deformación. Este incremento se acentúa con la ocurrencia de los enjambres sísmicos registrados en abril (con sismos de magnitudes máximas de M3.6 y M3.8), mayo-junio (sismo de magnitud máxima de M4.1), agosto-septiembre (sismo de magnitud máxima de M3.5) y el último entre septiembre y octubre de 2019 (sismo de magnitud máxima de M3.7).

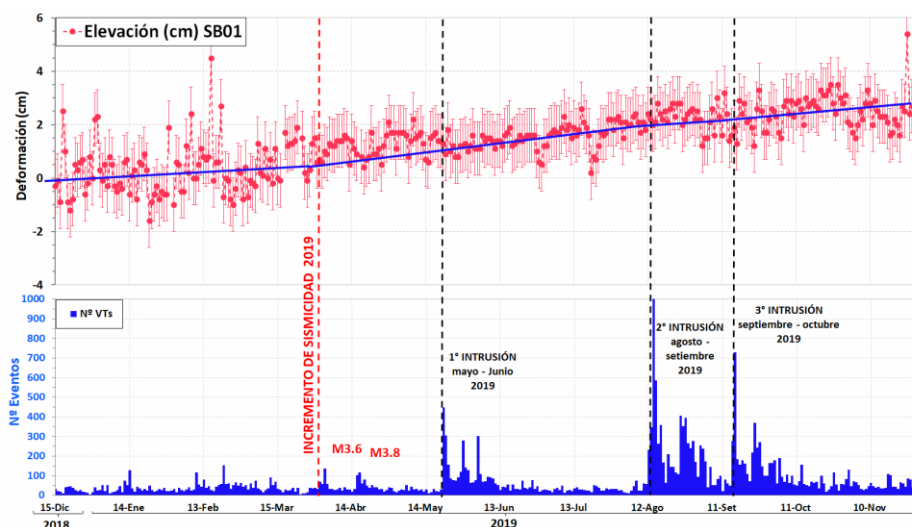


Figura 33.- Gráfico que muestra los resultados de la correlación de la serie de tiempo GNSS respecto a los enjambres de eventos de tipo Volcano-tectónico registrados en las inmediaciones del volcán Sabancaya. La línea azul muestra una tendencia del desplazamiento.

6.5. INTERPRETACIÓN DEL PROCESO ERUPTIVO 2016-2019

La deformación observada en la zona norte del Sabancaya con datos InSAR (Pritchard & Simons, 2002; Jay et al., 2015) y recientes trabajos de deformación con métodos satelitales y el análisis de la sismicidad efectuados por MacQueen et al., (2020, artículo sometido al JGR-Solid Earth), indican que el Sabancaya posiblemente tendría una cámara magmática profunda a ~13 km al noroeste del Sabancaya, bajo el volcán Hualca-Hualca, y otra cámara superficial a menos de ~6 km bajo el volcán Sabancaya. El ascenso de magma hacia la cámara magmática profunda generaría presión en las capas superficiales de las rocas que se fracturarían al exceder su límite de resistencia, produciéndose así los enjambres de sismos de tipo Volcano-Tectónico en las zonas alejadas al volcán, denominados, en muchos de los casos, como sismos de tipo Volcano-Tectónico Distales, según el modelo propuesto por White & McCausland (2016).

La interpretación de los diferentes parámetros de monitoreo indica que los tres enjambres sísmicos importantes registrados entre mayo y octubre de 2019 representarían nuevos ascensos de magmas principalmente hacia la cámara profunda, los que generarían enjambres sísmicos y una perturbación en todo el sistema volcánico, proceso evidenciado en la variación de los parámetros sísmicos (Figura 31), térmicos

(Figura 32) y de deformación (Figura 33). Posteriormente, este magma migraría por los conductos o fisuras hacia la cámara superficial del Sabancaya, lo que provocaría a su paso sismicidad de tipo Volcano-Tectónico; además, por transferencia de presión de fluidos casi al mismo tiempo en los conductos superficiales, se producen eventos de tipo Largo periodo (Figura 31C). Continuando con su trayecto, al llegar a unos kilómetros cerca de la superficie, el magma en ascenso generaría los eventos de tipo Híbrido, algunos con energías de 5.7 MJ, 4.7 MJ, 2.6 MJ y 5.8 MJ. Finalmente, el magma sería expulsado a la superficie en forma de explosiones que se registraron con energías importantes (Figura 31D).

El incremento en el número y la energía de los sismos de tipo Híbrido y el posterior aumento de las explosiones (en número y energía) están relacionados con los aportes de magma hacia la cámara magmática superficial, esto como consecuencia de la presión de fluidos; es decir, mientras mayor volumen tengan las intrusiones, los sismos de tipo Híbrido tendrán mayores energías, lo que generará seguidamente un incremento del número y energía de las explosiones (energía de 463 MJ). Esto explicaría el importante incremento de las explosiones registrado en octubre de 2019 (Figura 31D).

Asociado a esta actividad explosiva, desde el año 2017 viene emplazándose un domo de lava al interior del cráter del Sabancaya. El registro de señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónico observadas a partir de abril de 2019 estarían ligadas a intrusiones de magma, las cuales acentuaron el crecimiento del domo. A partir de octubre hasta noviembre de 2019, el domo aceleró su crecimiento aún más (Figura 31). Además, entre septiembre y octubre de 2019 se observaron eventos de tipo Híbrido con energías importantes de 3.4 MJ y 5.8 MJ. Asimismo, en este periodo ocurrió un incremento del número y energía de las explosiones (Figura 31D). En esa línea, el IGP elaboró en 2018 un Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) de la cima del Sabancaya, de 40 cm de resolución, con el uso de drones y mediante técnicas de fotogrametría. La comparación de este DEM con imágenes satelitales del 2019 permitió distinguir que el crecimiento del domo entre septiembre de 2018 y octubre de 2019 fue de aproximadamente 90 m de altura. Los

análisis realizados arrojaron que el domo posee un diámetro de 280 m (Figura 34A y 34B). En noviembre y diciembre de 2019 el domo se mantuvo estable.

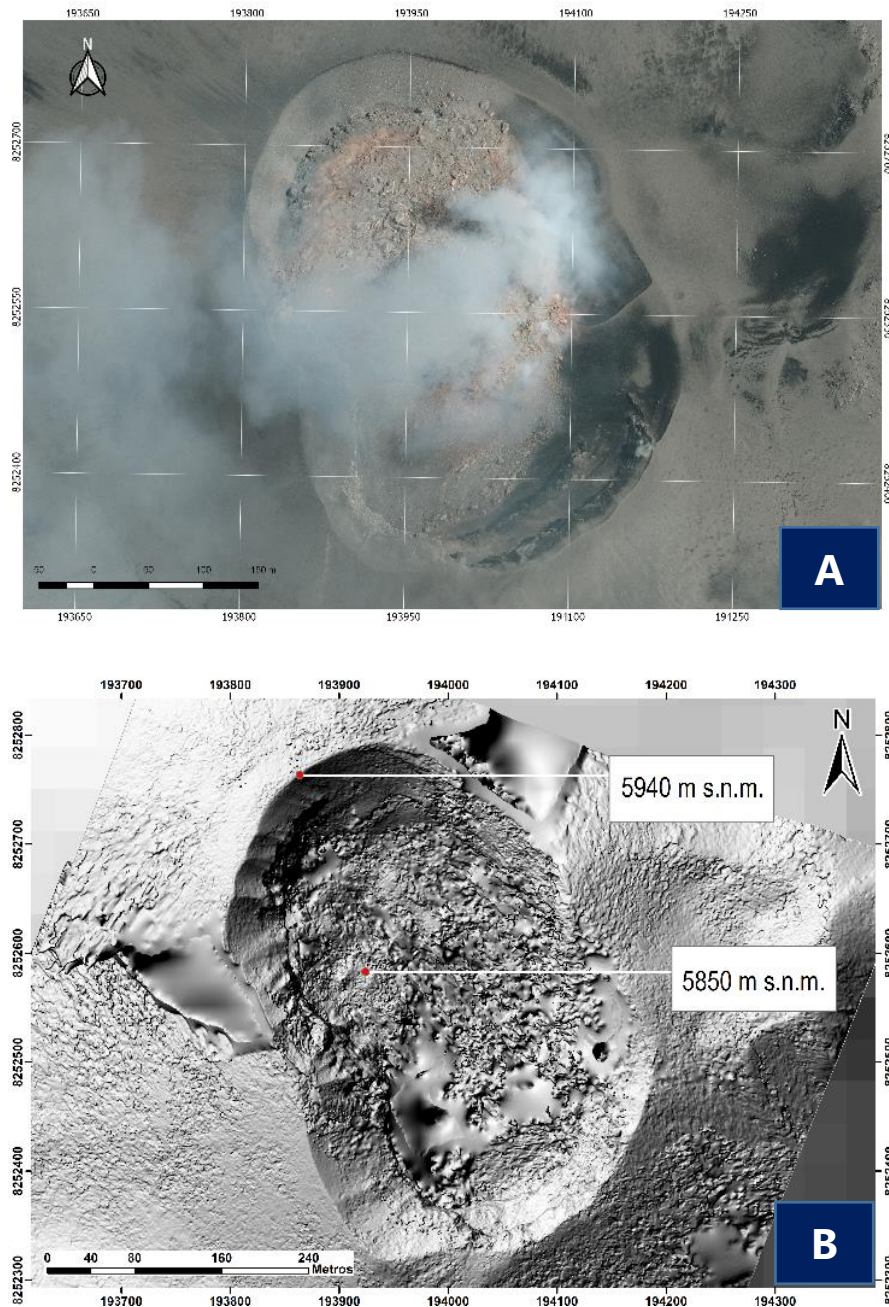


Figura 34- Domo de lava emplazado en el cráter del volcán Sabancaya. A) Imagen satelital cortesía DIGITAL GLOBE de octubre de 2019. B) Modelo de elevación digital de 40 cm de resolución obtenido a partir de levantamiento fotogramétrico en septiembre de 2018.

CONCLUSIONES

- La etapa preeruptiva del periodo 1986-1990 tuvo una duración de 3 años y medio, manifestada en el incremento de la actividad sísmica y fumarólica con el predominio de sismicidad de tipo Volcano-Tectónico. En esta etapa, los sismos estuvieron migrando por toda la zona norte del volcán Sabancaya.
- Durante el proceso eruptivo de 1990-1998, a través de método de InSAR (utilizando imágenes de radar de junio 1992 y abril 1996), se halló una deformación con una tasa de inflación de 2.5 cm/año en una zona muy amplia a 7 km en la zona norte del volcán Sabancaya, inmediaciones del volcán Hualca-Hualca (Pritchard & Simons, 2002).
- El proceso preeruptivo de 2013-2016 tuvo una duración 3 años y 8 meses, durante el cual ocurrió un incremento de sismicidad y de las emisiones fumarólicas; además, hubo un predominio de los eventos de tipo Volcano-Tectónico, siempre localizados en la zona norte del Sabancaya, sobre los sistemas de fallas activas.
- Durante el periodo preeruptivo de 1986-1990 y 2013-2016, en el área del volcán Sabancaya, se ha registrado sismicidad que ha venido siguiendo los patrones indicados por White y McCausland (2016), aunque con cierta ambigüedad, debido a la existencia de las fallas activas que se ven influenciadas por los esfuerzos generados por el arribo de magma.
- A lo largo del proceso eruptivo del Sabancaya iniciado en noviembre de 2016, y que continúa a la fecha, se han identificado 3 etapas de actividad: Etapa I: caracterizada principalmente por el incremento de la actividad sísmovolcánica. En esta etapa se observó la ocurrencia de numerosas explosiones, con un máximo de 110 explosiones ocurridas el 18 de enero de 2017 y con energías en ascenso de hasta 169 Megajoules (MJ), registrada el 9 de agosto de 2017. Los sismos de tipo Híbrido, ligados a la circulación de magma, registrados tuvieron una energía máxima de 41 MJ. También se registraron 308 eventos de tipo Largo Periodo (ligados a la circulación de fluidos magmáticos) con energías bajas.

Etapa II: etapa con una actividad constante sin mayor variación. Durante esta etapa se registró en promedio 21 explosiones por día, con energías del orden de 20 MJ por día. Por otro lado, se registraron sismos de tipo Híbrido que alcanzaron una tasa de 2 eventos por día, con una energía máxima del orden de 2 MJ registrada el 14 de abril de 2018. Los eventos de Largo Periodo experimentaron un incremento en energía de hasta 112 MJ el 4 de septiembre de 2018, probablemente como consecuencia de ascensos de magma que fueron también evidenciados por los sismos de tipo Volcano-Tectónico registrados del 10 de mayo al 20 de agosto de 2018. Etapa III: caracterizada por un incremento de actividad sismovolcánica debido a nuevos ascensos de magma. En esta etapa se registró una tasa de 24 explosiones por día, mientras que los sismos de tipo Largo Periodo alcanzaron hasta 324 eventos por día. Estos habrían incrementado las energías de las explosiones. Dentro de la etapa III, específicamente desde abril de 2019, han ocurrido 2 pequeños enjambres sísmicos con 2 sismos principales de M3.6 y M3.8, respectivamente. Posteriormente, entre los meses de mayo a octubre de 2019 se han registrados 3 notables enjambres sísmicos, posiblemente asociados al ascenso de magma; seguidamente, se registraron eventos de tipo Largo Periodo (asociados a movimiento de fluidos) e Híbrido, ligados al ascenso de magma y su posterior expulsión mediante el incremento de las explosiones.

- Se ha observado un domo de lava de aproximadamente 280 m de diámetro en el cráter del Sabancaya, el cual ha venido creciendo progresivamente desde 2017. Su crecimiento se incrementó desde abril de 2019 y aceleró en octubre de ese mismo año. Actualmente, el domo continúa creciendo, pero de manera muy lenta.
- El proceso eruptivo 2016-2019 continúa. Con estas nuevas intrusiones de magma registradas en 2019, se estima que el proceso eruptivo se prolongue por varios meses o años.

RECOMENDACIONES

- Reforzar los trabajos de educación y sensibilización frente al riesgo volcánico mediante la realización de charlas, conferencias y talleres educativos en las instituciones educativas del valle del Colca. Los frutos que pueden brindar estos esfuerzos son diversos, entre ellos, mejorar el nivel de percepción del riesgo de la población y la calidad de vida de las personas, a fin de que desarrollen sus actividades en ambientes físicos de menor riesgo, lo cual es de vital importancia para el desarrollo del país.
- Se recomienda a las autoridades locales y regionales seguir apoyando con la logística y accesos a la zona del volcán, a fin de lograr instalar mayor número de equipos y realizar el cuidado de los mismos, con los cuales se obtienen datos que son utilizados para el desarrollo de productos de información técnico-científicos beneficiosos para la población.

BIBLIOGRAFÍA

- Antayhua, Y.; Tavera, H.; Bernal, I.; Palza, H. Y Aguilar, V. (2002). Localización hipocentral y características de la fuente de los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998). Región del volcán Sabancaya, Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, V93, P. 63-72.
- Antayhua, Y.; Tavera, H.; (2003). Volcanes y sismicidad en la región del volcán Sabancaya (Arequipa), Monografía, Informe Interno-Instituto Geofísico del Perú. 82p.
- Chouet B. (1996). Long-period volcano seismicity: Its Source and Use in Eruption Forecasting. Nature 380 (6572): 309 - 316.
- Claire D. (2007). Comportamiento Actual del Ante-Arco y del Arco del codo de Arica en la Orogenia de los Andes Centrales. Tesis Doctoral, Universidad de Chile. P. 256-266.
- Dorbath, L., Dorbath, C., Jiménez, E., & Rivera, L. (1991). Seismicity and tectonic deformation in the Eastern Cordillera and the sub-Andean zone of central Perú. Journal of South American Earth Sciences, 4(1-2), 13-24.
- Gonzáles, E.; Kosaka, M. y Minaya, A. (1996). Sismicidad del volcán Sabancaya y el Hualca-Hualca. Segundo Seminario Latinoamericano: Volcanes, Sismos y Prevención.
- Gonzáles K., Froger J. L., Audin I., Macedo O. (2009). Ejemplos de Deformación producto de la Tectónica extensiva en las zonas de Huambo-Cabanaconde en Arequipa y Calacoa-Huaytire en Moquegua de los Andes Centrales vistos por Interferometría Radar – InSAR. Bol. Soc. Geol. Perú 103, p. 109-124.
- Guillande, R.; Thouret, J.-C.; Huamán, D. & Le Guern, F. (1992). - L'activité éruptive actuelle du volcan Nevado Sabancaya (Sud du Pérou) et l'évaluation des menaces et des risques: géologie, cartographie et imagerie satellitaire, informe inédito. Paris: Ministère de L'Environnement et Centre National d'Etudes Spatiales, 120 p.

- Huamán-Rodrigo, D.; Chorowicz, J.; Guíllarnder, R.; Antallaca A.; Cáceres, R.; y Aguilar, A. (1993). – Remote Sensing Contribution on Seismotectonic hazard in a volcanic active area (Nevado Sabancaya Southern Peru). Second ISAG, Oxford (UK). Pp. 373-376.
- Huamán D. (1995). Métodos y aplicaciones de las imágenes de satélite en la cartografía geológica. El caso del seguimiento y evolución de la amenaza volcánica del Sabancaya (región del Colca, Arequipa). Tesis de Ingeniero, Universidad Nacional San Agustín, Arequipa, p.138.
- Ibáñez, J., & Carmona, E. (2000). Sismicidad volcánica. Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica, Serie Casa de los Volcanes, 7, 269-282.
- Jay F, Francisco J. Delgado F, Torres J, Pritchard M, Macedo O y Aguilar V. (2015). Deformation and seismicity near Sabancaya volcano, southern Peru, from 2002 to 2015. *Geophysical Research Letters*, 42, doi: 10.1002/2015GL063589.
- Johnson, J., and R. Aster (2005), Relative partitioning of acoustic and seismic energy during Strombolian eruptions, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 148, 334–354.
- Juvigné, E.; Thouret, J.-C.; Gilot, E.; Leclercq, L. & Gourgaud, A. (1998) - L'activité du volcan Nevado Sabancaya (Pérou) au cours de l'Holocène. *Quaternaire*, 9(1):45-51.
- Lahr, J. C. (1999). HYPOELLIPSE: A computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first motion pattern. Denver, Colorado: US Geological Survey. p. 119.
- Lee, W. H. K., Bennett, R. E., & Meagher, K. L. (1972). A method of estimating magnitude of local earthquakes from signal duration (p. 28). US Department of the Interior, Geological Survey.
- Ma Y., Clayton R. W., (2004). The crust and upper most mantle structure of Southern Peru from ambient noise and earthquake Surface Wave Analysis. *Earth and Planetary Science Letters* 395 (2014) 61-70.
- Macedo O., Puma N., Torres J., Del Carpio J., Centeno R., Chijcheapaza R. (2014). Lecciones de la reciente erupción 1990-98 y características del estado de

“intranquilidad volcánica observada desde febrero 2013”. Reporte Técnico Especial N° 02-2014 COER-Arequipa.

- Macedo O., Taípe E., Del Carpio J., Ticona J., Ramos D., Puma N., Aguilar V., Machacca R., Torres J., Cueva K., Cruz J., Lazarte I., Centeno R., Miranda R., Álvarez Y., Masías P., Vilca J., Apaza F., Chijcheapaza R., Calderón J., Cáceres J., Vela J. (2016). Evaluación del riesgo volcánico en el sur del Perú, situación de la vigilancia actual y requerimientos de monitoreo en el futuro.
- MacQueen, Patricia & Delgado, Francisco & Reath, K. & Pritchard, Matthew & Bagnardi, Marco & Milillo, Pietro & Lundgren, Paul & Macedo, Orlando & Aguilar, Victor & Ortega, Mayra & Ancasi, Rosa & Zerpa, Ivonne & Miranda, Rafael. (2020). Volcano-tectonic interactions at Sabancaya volcano, Peru: eruptions, magmatic inflation, moderate earthquakes, and fault creep. 10.1002/essoar.10501561.1.
- Mering, C.; Huamán, R.; Chorowicz, B.; y Guillande, R. (1996). New data on the geodynamics of southern Perú from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images: Tecton, 259, 153-169.
- McNutt S. (2000). Volcanic seismicity, Encyclopedia of Volcanoes. Ed. H. Sigurdsson, Academic Press, San Diego. Pp. 1015-1034.
- Minakami, T. (1974). Seismology of volcanoes in Japan, Physical Volcanology, Eds. L. Civetta, P. Gasparini, G. Luongo and A. Rapolla, Elsevier, Amsterdam. Pp.1-27.
- Paxi, Z. (2012). Análisis de la actividad del volcán Sabancaya durante el periodo mayo-julio 2009. Tesis Profesional: Ingeniero Geofísico. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 141p.
- Pritchard, M. E & Simons, M. (2002). A satellite geodetic survey of large-scale deformations of volcanic centres in the central Andes. Nature, 418(6894), 167-71.
- Rodríguez, A. & Huamán, D. (1992) – Actividad de los Volcanes Ubinas y Sabancaya. Inf. Int. IGP, 12 p.

- Rodríguez, A. y Uribe, M. (1994). Participación del Instituto Geofísico del Perú en relación con la reactivación del Volcán Sabancaya, provincia de Caylloma, región de Arequipa. Informe interno IGP Oficina de Arequipa, p. 28.
- Sébrier, M.; Mercier, J.; Megard, F. & Laubacher, G. (1985). - Quaternary normal and reverse faulting and the State of Stress in the Central Andes of South Peru. *Tectonics*, vol. 4 p 739-780.
- Siebert, L.; Skim, T.; Kimberly, P. (2010). *Volcanoes of the world*. Third edition. Smithsonian Institution, University of California Press.
- Shimozuru, D. (1971). A seismological approach to the prediction of volcanic eruptions. *The Surveillance and Prediction of Volcanic Activity*. 19-.
- Tavera, H.; Guardia, P.; Condori, C.; Fernandez, E. & Arredondo, L. (2013a) - Sismos de la región del volcán Sabancaya del 22 y 23 de febrero del 2013, informe inédito. Lima: Instituto Geofísico del Perú, Informe Técnico N° 01-2013.
- Tavera, H.; Martínez, J.; Fernández, E.; Arredondo, L.; Flores, C. & Millones, J. (2013b) - Sismo de Huambo-Cabanaconde (Arequipa) del 17 de julio, 2013 (5,7ML), informe inédito. Lima: Instituto Geofísico del Perú, Informe Técnico N° 02-2013.
- Tavera, H., Guzmán, J., Velarde, L., Cuya, A. (2016) - Sismo de Ichupampa del 14 de agosto del 2016 (5.3 ML), informe inédito. Lima: Instituto Geofísico del Perú, 18 p.
- Torres, R., Gómez, D., & Narváez, M. (1996). Unusual seismic signals associated with the activity at Galeras volcano, Colombia, from July 1992 to September 1994. *Annali di Geofísica*, Vol., XXXIX, 2, 299-310.
- Torres, J. (2013). Evaluación De La Actividad Sísmo-volcánica Asociada A La Intranquilidad Del Volcán Sabancaya, Periodo Enero - Julio 2013. Tesis Profesional: Ing. Geofísico. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, 148p.
- Thouret, J.-C.; Guillaude, R.; Huaman, D.; Gourgaud, A.; Salas, G.; Chorowicz J. (1994). "L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques". *Bulletin de la Société Géologique de France*, 1, 165, 49-63.

- Travada y Córdova (1752) - El suelo de Arequipa convertido en cielo (Historia general de Arequipa). Primer festival del libro Arequipeño, edición 1958, 15 p.
- Villegas, J. C., & Tavera, H. (2008). Modelo de velocidad unidimensional para el sur de Perú a partir de datos de sismos locales: Una mejora para la precisión en la localización.
- Wassermann, J. (2011). Volcano Seismology- In: Bormann, P., New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2), Chapter 13, 67 p.
- 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. Published by Elsevier B.V.
- Zamacola Y Jauregui J.D. (1804). "Apuntes para la historia de Arequipa". Primer festival del libro arequipeño, Arequipa. Edición 1958, 15 p.