



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú - IGP



INFORME VULCANOLÓGICO

La actividad sísmica en el volcán Ubinas y su variación temporal (1998-2019) para la identificación de patrones de sismicidad a ser considerados en la gestión del riesgo de desastres

Fecha: abril de 2020

2020

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Danny Scipión

Informe vulcanológico

IGP/CENVUL-UBI/IV 2020-0001

La actividad sísmica en el volcán Ubinas y su variación temporal (1998-2019) para la identificación de patrones de sismicidad a ser considerados en la gestión del riesgo de desastres

Autores:

José Alberto Del Carpio Calienes

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

Durante los últimos veinte años, el volcán Ubinas ha registrado tres periodos eruptivos: 2006-2009, 2013-2017, 2019-actualidad. El Instituto Geofísico del Perú (IGP), gracias a la red de monitoreo implementada en este macizo, ha logrado registrar y analizar un total de 594 705 señales sísmicas, de las cuales el 38 % corresponde a eventos de tipo Volcano-Tectónico (VT), ligadas al fracturamiento de rocas, mientras que el 32.5 % corresponde a eventos de tipo Largo Periodo (LP) y Tornillo que estarían asociados a la circulación de fluidos volcánicos (magma, gases) al interior del volcán. Además, durante todo el periodo de análisis se han registrado un total de 38 979 señales sísmicas de tipo Híbrido que estarían relacionadas al ascenso de magma. En cuanto a las explosiones volcánicas, definidas sísmicamente como señales de gran energía, se han acumulado un total de 852 eventos.

Durante la actividad eruptiva 2006-2009, se han identificado tres periodos de actividad: (i) el primero ligado al inicio de la erupción, durante el cual se registró una mayor actividad explosiva; (ii) un segundo periodo con el registro de explosiones que continuaron ocurriendo debido a nuevos ascensos de magma inferidos por el registro de señales de tipo Híbrido, aunque disminuidas en número; y (iii) leve actividad sísmica, ligada a explosiones esporádicas ocurridas al final de la erupción. Asimismo, durante este periodo eruptivo, se identificaron enjambres de sismos de tipo Largo Periodo (LP) que precedían la ocurrencia de explosiones volcánicas. Este tipo de señal precursora no ha sido identificada en los dos últimos procesos eruptivos de 2013-2017 y 2019, debido probablemente al cambio morfológico del conducto volcánico ligado a la propia actividad volcánica: sellado, destrucción u obstrucción de conducto, grietas, etc.

En el proceso eruptivo 2013-2017, se han identificado cuatro periodos de actividad: (i) el primer periodo comprende el inicio del proceso eruptivo con el registro de explosiones freáticas ocurridas entre el 2 y 7 de septiembre de 2013; (ii) el segundo periodo desarrollado en el año 2014, durante el cual se registró la mayor actividad explosiva. Previo al inicio de esta fase se registraron eventos sísmicos de tipo Tornillo, Volcano-Tectónico (VT) e Híbrido. Esta secuencia

de sismos se repitió antes del inicio de las fases explosivas de los periodos (iii) y (iv), desarrollados en los años 2015 y 2016, respectivamente.

En el último proceso eruptivo del Ubinas, que tuvo lugar en 2019, se han registrado, hasta la fecha de emisión de este informe, 10 explosiones volcánicas. Un mes antes del inicio de la fase explosiva mayor, sucedida el 19 de julio de 2019, se registró la ocurrencia de un enjambre sísmico de tipo Volcano-Tectónico, seguido del incremento de las señales sísmicas tipo Tornillo e Híbrido, asociadas a movimiento de fluidos volcánicos y al ascenso de magma, respectivamente. Entre octubre y diciembre de 2019, el registro de la sismicidad disminuyó hasta alcanzar un promedio de 12 eventos sísmicos por día.

En cuanto a la localización sísmica, se ha elaborado un nuevo modelo de velocidades conformado por 8 capas, el cual permitirá mejorar la estimación de la ubicación de eventos sismovolcánicos de tipo Volcano-Tectónico. El cálculo final ha estimado el valor $RMS < 0.1$, lo que ha permitido disminuir el nivel de error en relación con el anterior modelo, el mismo que constaba de 3 capas. Se realizó la localización sísmica aplicando este nuevo modelo, cuyos resultados evidenciaron la posición del conducto volcánico ligeramente orientado hacia el oeste. Asimismo, la mayoría de los sismos volcánicos localizados se distribuyen a lo largo de un alineamiento de rumbo SE-NO que atraviesa el cráter del volcán Ubinas.

Finalmente, de acuerdo al análisis de los tres últimos procesos eruptivos, se puede indicar que cada uno de ellos presenta características sismovolcánicas particulares entre sí. Esto se debería principalmente a cambios morfológicos en la estructura interna del volcán (nuevos conductos, fisuras, sellado de estos, etc.), es decir, cambios en la fuente donde se originan las señales sísmicas.

ÍNDICE

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN.....	7
CAPITULO I: CONTEXTO GENERAL.....	9
1.1 OBJETIVOS.....	9
1.1.1 <i>Objetivo general</i>	9
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	9
1.2 JUSTIFICACIÓN	9
1.3 UBICACIÓN	10
1.4 ACCESIBILIDAD	11
1.5 ASPECTOS DEMOGRÁFICOS.....	11
CAPITULO II: ACTIVIDAD VOLCÁNICA EN EL SUR DEL PERÚ, CASO VOLCÁN UBINAS.....	12
2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	12
2.2 GEOLOGÍA DEL VOLCÁN UBINAS	13
2.2.1 <i>Actividad volcánica ocurrida desde hace menos de 370 000 años hasta los últimos miles de años</i>	13
2.2.2 <i>Actividad Volcánica registrada desde la época histórica hasta la actualidad</i>	15
CAPITULO III: DATOS GEOFÍSICOS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS.....	18
3.1 DATOS GEOFÍSICOS	18
3.1.1 <i>Catálogos de actividad sismovolcánica</i>	18
3.1.2 <i>Mapas de actividad sismovolcánica</i>	19
3.2 SISMOLOGÍA VOLCÁNICA: MÉTODOS DE ANÁLISIS.....	20
3.2.1 <i>Tipos de Sismicidad</i>	21
3.2.2 <i>Localización de señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónico</i>	28
3.2.3 <i>Cálculo de la energía sísmica</i>	29
3.2.4 <i>Cálculo de la magnitud local</i>	30
CAPÍTULO IV: NUEVO MODELO DE VELOCIDADES Y LOCALIZACIÓN SISMOVOLCÁNICA.....	31
4.1 ESTIMACIÓN DEL NUEVO MODELO DE VELOCIDADES 1D	31
4.2 DATOS SÍSMICOS EMPLEADOS PARA EL CÁLCULO DEL MODELO	31
4.3 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO DE VELOCIDAD	32
4.3.1 <i>Datos sísmicos seleccionados</i>	34
4.3.2 <i>Modelo de referencia y relación V_p/V_s</i>	34
4.3.3 <i>Red sísmica</i>	34

4.3.4	<i>Inversión de los tiempos de arribo y modelo de velocidad</i>	34
4.4	MODELO DE VELOCIDAD INICIAL	34
4.5	NUEVO MODELO DE VELOCIDADES CALCULADO CON EL PROGRAMA VELEST	36
4.6	LOCALIZACIÓN CON EL NUEVO MODELO DE VELOCIDADES	37
CAPÍTULO V: RESULTADOS DE ANÁLISIS SÍSMICOS EFECTUADOS EN EL VOLCÁN UBINAS		39
5.1	ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA DEL PERIODO MARZO-ABRIL DE 1998	39
5.2	ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA ASOCIADA A LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN UBINAS EN 2006-2009	40
5.2.1	<i>Primer periodo:</i>	40
5.2.2	<i>Segundo periodo:</i>	43
5.2.3	<i>Tercer periodo:</i>	43
5.3	ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA ASOCIADA A LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN UBINAS EN 2013-2017	46
5.3.1	<i>Periodo 1:</i>	46
5.3.2	<i>Periodo 2:</i>	48
5.3.3	<i>Periodo 3:</i>	48
5.3.4	<i>Periodo 4:</i>	48
5.4	ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA DEL PERIODO ENERO 2017 - DICIEMBRE 2018	51
5.5	ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA ASOCIADA A LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN UBINAS EN 2019	52
5.5.1	<i>Periodo 1 (18 de junio al 23 de julio de 2019)</i>	53
5.5.2	<i>Periodo 2 (28 de julio y 12 de noviembre de 2019)</i>	54
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS		55
6.1	ACTIVIDAD VOLCÁNICA DE 1998	56
6.2	PROCESO ERUPTIVO 2006-2009	56
6.3	PROCESO ERUPTIVO 2013-2017	58
6.4	PROCESO ERUPTIVO 2019	61
6.5	LÍNEA BASE DE LA ACTIVIDAD SISMOVOLCÁNICA	62
CONCLUSIONES		64
BIBLIOGRAFÍA		66

INTRODUCCIÓN

Ubinas es considerado como el volcán más activo del Perú. Solo en el presente siglo ha desarrollado tres nuevos procesos eruptivos en los años 2006-2009, 2013-2017 y 2019, los cuales han alcanzado un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) igual a 2, en una escala que va del 0 al 8. Estas últimas manifestaciones eruptivas se adicionan a las 23 erupciones de bajo a moderado nivel IEV (1-3), registradas desde el año 1550 (Thouret et al., 2005; Rivera, 1998). En promedio, se desarrollan entre 6 a 7 erupciones por siglo en el volcán Ubinas (Rivera et al., 1998).

El volcán Ubinas ha sido ampliamente estudiado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) y diversos investigadores. Desde hace más de tres décadas se vienen realizando tesis de grado y publicaciones científicas en los campos de la sismología volcánica (Taípe, 2006; Macedo et al., 2007; Monteiller et al., 2008; Macedo et al., 2008; Macedo, 2010; Traversa et al., 2011; Inza, 2011; Machacca et al., 2012; Zandomeneghi et al., 2012; Machaca R., 2012; Macedo et al., 2014; Inza et al., 2014; Del Carpio et al., 2016a, Vargas K., 2017; Del Carpio et al., 2019a), sobre potencial espontáneo (Gonzales K., 2001; Macedo et al., 2002; Gonzales et al., 2014), sensores remotos (Coppola et al., 2015), geología y evaluación de peligros (Rivera, 1998; Thouret et al., 2005), entre otros. Además, desde que se iniciaron los primeros estudios geofísicos en la década de 1990, se han emitido una gran cantidad de informes técnicos que evaluaron continuamente el comportamiento dinámico de este volcán.

Desde el año 2006, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) ha venido implementando una red de monitoreo geofísico en el volcán Ubinas que funciona de manera permanente y en tiempo real. Actualmente, el IGP cuenta con una red de monitoreo permanente compuesta por 6 sismómetros, 3 GPS, 2 inclinómetros y 3 cámaras de vigilancia, cuyos datos son transmitidos mediante telemetría a la sede del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL) en Arequipa. El CENVUL es un servicio del estado peruano implementado por el IGP, el cual registra, analiza e interpreta los datos sismovolcánicos, geodésicos, geoquímicos y de cámaras de video que provienen en tiempo real de las estaciones de monitoreo instaladas en 12 volcanes activos y potencialmente activos del sur peruano, entre ellos el volcán Ubinas. La información obtenida es transmitida a las autoridades y población involucrada de manera eficiente y oportuna.

El presente informe técnico recolecta y analiza toda la información sísmica disponible de los últimos 23 años de trabajos de monitoreo e investigación realizada por el IGP sobre el comportamiento dinámico del volcán Ubinas. Los resultados finales de este estudio buscan definir el comportamiento dinámico, es decir, la actividad interna que presenta el volcán Ubinas antes, durante y después de una crisis eruptiva con fines de prevención y/o mitigación de desastres. Asimismo, pretende determinar el nivel de actividad sismovolcánica base, en caso de que el volcán presente un estado de intranquilidad. Este trabajo considera, también, la elaboración de un nuevo modelo de velocidades que busca mejorar el modelo actual con el objetivo de disminuir el error en la estimación de la localización sísmica. Estos puntos importantes tienen la finalidad de mejorar las herramientas del análisis sismovolcánico que finalmente contribuyen en la reducción del riesgo de desastres.

La información sismovolcánica adquirida durante los tres periodos eruptivos recientes ha permitido a los especialistas del IGP desarrollar un modelo de pronóstico de erupciones volcánicas basado en el análisis de dichas señales. Esta información es sumamente vital en la gestión del riesgo de desastres, en salvaguarda de la vida y bienes de los más de 3 millones de personas que viven en inmediaciones de los volcanes activos.

CAPITULO I: CONTEXTO GENERAL

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

- Analizar e interpretar el comportamiento dinámico del volcán Ubinas mediante el tratamiento de los datos sísmicos principalmente, adquiridos por la red de monitoreo geofísico implementada por el IGP en dicho volcán desde el 2006 hasta la actualidad. Esto permitirá a su vez establecer umbrales de actividad sísmica durante periodos preeruptivos, eruptivos y posteruptivos, y definir un nivel de actividad base.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los tipos de sismicidad registrados al interior del volcán Ubinas, basándose en los modelos de fuente generadora.
- Realizar la localización de los sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) utilizando un modelo de velocidades desarrollado en el presente estudio, con el cual se busca minimizar los errores en la estimación de la localización de sismos volcánicos.
- Correlacionar la información geofísica con información de tipo visual y satelital para determinar el comportamiento interno de dicho volcán.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El Ubinas, considerado como el volcán más activo del Perú por haber presentado 26 erupciones desde 1550, ha sido catalogado como un volcán de muy alto riesgo (Macedo et al., 2016). En caso de generar una erupción de mayor magnitud, podría afectar a los más de ocho poblados asentados en un radio de hasta 20 km del centro volcánico.

Solo en el presente siglo ya se han observado tres nuevos procesos eruptivos (2006-2009, 2013-2017 y 2019), los mismos que han afectado a las poblaciones más cercanas de las regiones de Moquegua y Arequipa, en los distritos de Ubinas, Yunga, Lloque, Ichuña, Chojata, Matalaque y San Juan de Tarucani. Recientemente, producto de la actividad explosiva ocurrida

el 19 de julio de 2019, el Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN) ha estimado que 29 703 personas, solo en las regiones de Moquegua, Puno y Tacna, fueron afectadas por la dispersión de cenizas ocurrida durante ese episodio eruptivo (Reporte Complementario n.º 1528 - 21/07/2019 / COEN-INDECI).

Por tales consideraciones, es necesario analizar el comportamiento dinámico del volcán Ubinas mediante el tratamiento de los datos sísmicos adquiridos por la red de monitoreo geofísico permanente que opera el IGP en el Ubinas desde el año 2006 hasta la actualidad. Esto permitirá prever escenarios eruptivos futuros con fines de prevención y mitigación de desastres.

1.3 UBICACIÓN

El volcán Ubinas (16.34°S; 70.89°W; 5672 m s.n.m.), se ubica en la región Moquegua, provincia de General Sánchez Cerro, distrito de Ubinas (Figura 1), a 6 km al noreste del distrito de Ubinas y a 70 km al este de la ciudad de Arequipa. En los distritos de Ubinas y Matalaque habitan 2359 habitantes (INEI, 2018) distribuidos entre los pueblos de Querapi, Ubinas, Sacohaya, Anascapa, Tonohaya, San Miguel, Huatagua, Huarina, Matalaque, Yalagua, Escacha, entre otros.

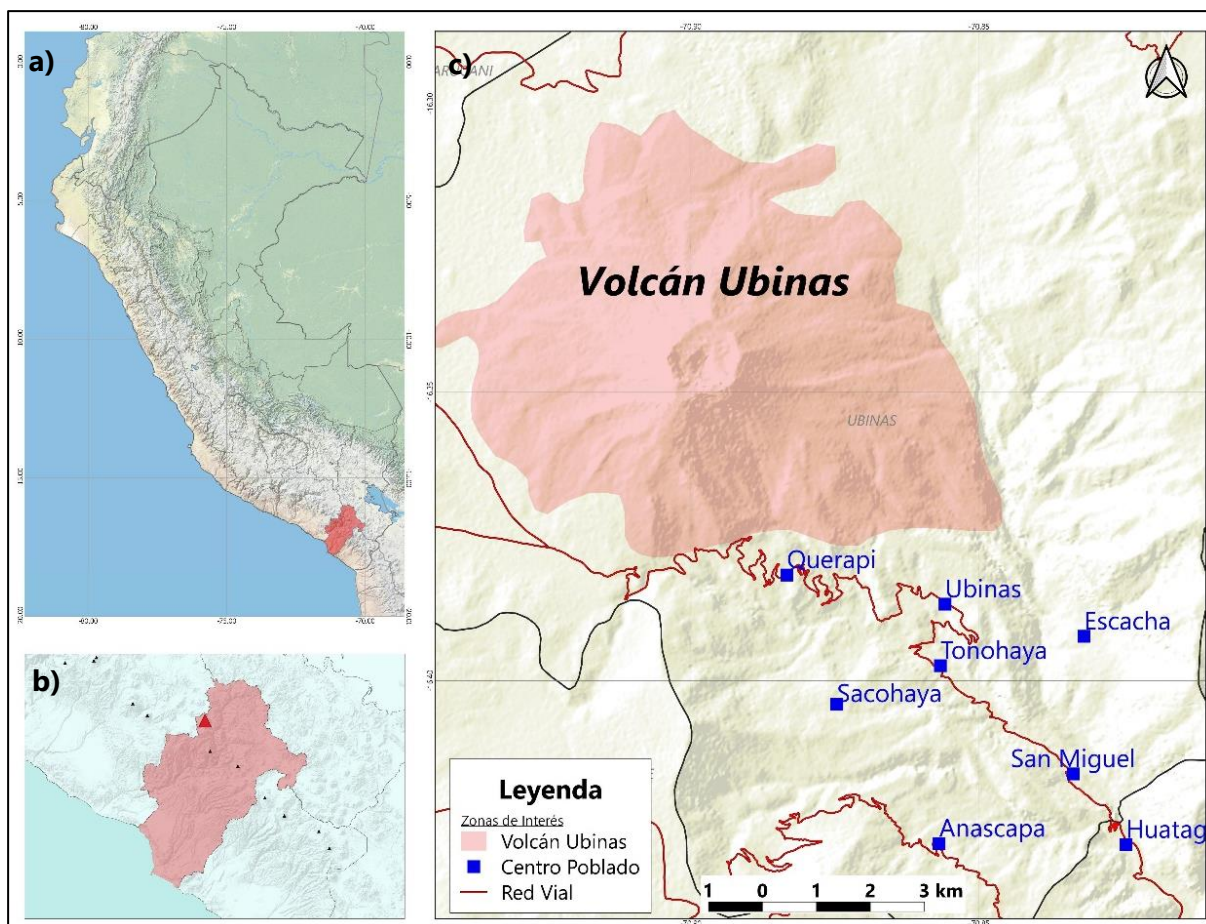


Figura 1.- (a) Ubicación de la región Moquegua sobre un modelo de elevación digital del Perú; b) mapa político de la región Moquegua, en cuyo extremo noroeste se localiza el volcán Ubinas; (c) Mapa de ubicación del volcán Ubinas (sombra roja) y poblados aledaños.

1.4 ACCESIBILIDAD

Para acceder a la zona del volcán Ubinas se debe tomar, desde la ciudad de Arequipa, la ruta que se dirige desde el distrito de Chiguata con dirección a la localidad de Salinas. En la vía con dirección al centro poblado de Ubinas, se gira a la izquierda por el desvío hacia Yalagua. La ruta nos permite alcanzar el lado oeste del volcán Ubinas. La mayor parte de la vía está compuesta por trochas carrozables.

1.5 ASPECTOS DEMOGRÁFICOS

En un radio de 30 km del volcán Ubinas se localizan los distritos de Ubinas, Matalaque, Chojata, Lloque, Yunga, Omate, Coalaque y San Juan de Tarucani. En el valle de Ubinas, se localizan ocho poblados, donde habitan alrededor de 2359 personas (INEI, 2018).

CAPITULO II: ACTIVIDAD VOLCÁNICA EN EL SUR DEL PERÚ, CASO VOLCÁN UBINAS

2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

Los depósitos volcánicos emplazados durante el Cenozoico en el sur peruano muestran mayor extensión y volumen respecto a los depósitos volcánicos emplazados en el Cuaternario. Las explicaciones de tales variaciones se asocian a cambios de velocidad de convergencia como en la geometría y ángulo de la subducción (Wörner, 2000b).

En el sur del Perú, Bolivia y norte de Chile, la subducción de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa continental sudamericana genera la existencia de un arco volcánico pliocuaternario denominado Zona Volcánica Central de los Andes (CVZ, 14° 30' -27° S), ver figura 2; donde se localizan los 14 volcanes poligenéticos o estratovolcanes del Pleistoceno superior: Sara Sara, Ampato-Sabancaya, Solimana, Firuro, Cerro Auquihuato, Coropuna, Chachani, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca, Yucamane, Casiri, además de aproximadamente cuarenta pequeños conos monogénicos de escorias y cenizas (zonas de Orcopampa-Andahua y Huambo), Lampa (Ayacucho), Yura (Arequipa). Este arco volcánico se localiza a una distancia media de 250 km al este de la fosa Peruano-Chilena. El plano de Benioff se encuentra debajo de esta zona, entre 120 km y 150 km de profundidad (Barazangi & Isacks, 1976). La dirección de convergencia de la Placa de Nazca debajo del continente sudamericano es N78°E y tiene una velocidad media de 5-7 cm/año (Norabuena et al., 1999; Somoza, 1998).

En los Andes peruanos, la actividad volcánica actual está restringida a la zona sur del Perú, entre los 14° y 17°30' de latitud sur (corresponde a la región más septentrional de la ZVC). Estos volcanes están ubicados a lo largo de una banda de 60 km a 80 km de ancho (De Silva & Francis, 1991) a la cual pertenece el volcán Ubinas. Además, dentro de esta banda estrecha se observan otros edificios volcánicos de edad Miocena a Cuaternaria.

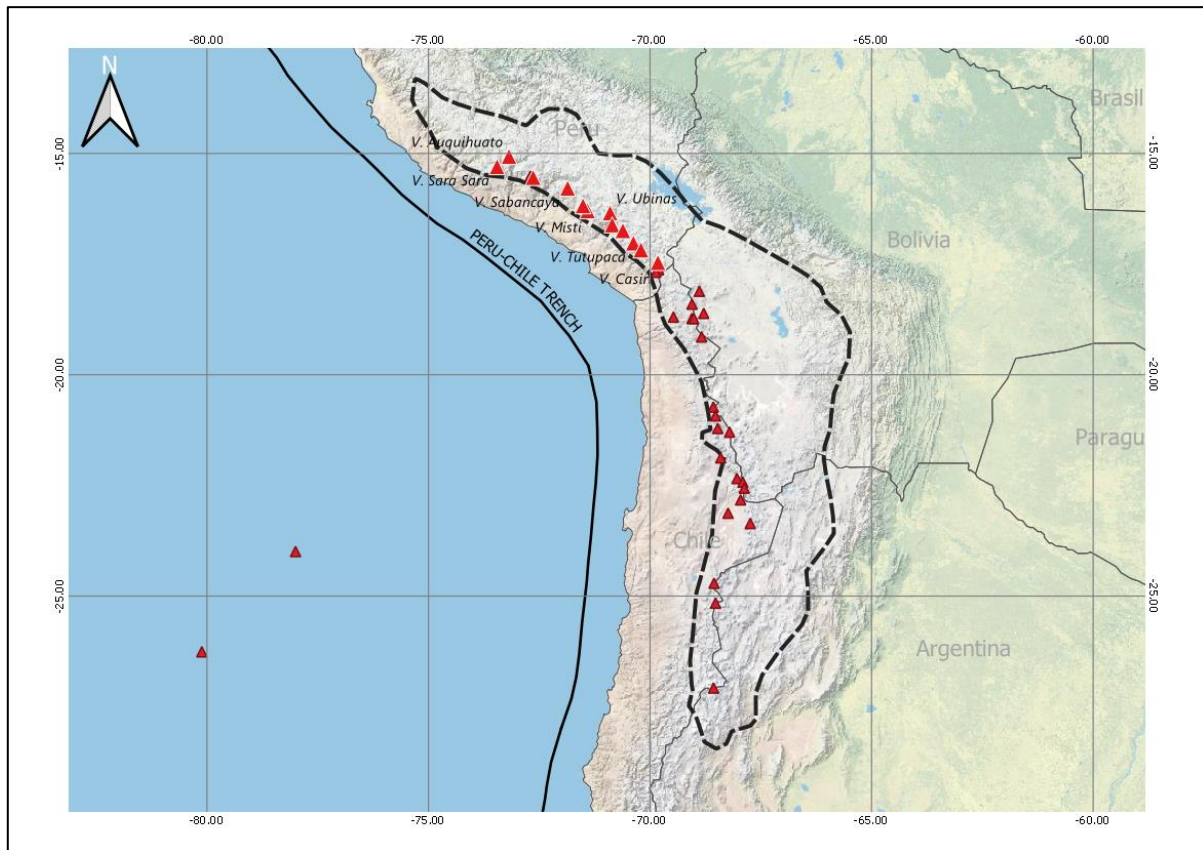


Figura 2.- Zona Volcánica Central de los Andes donde se ubica el volcán Ubina (De Silva & Francis, 1991).

2.2 GEOLOGÍA DEL VOLCÁN UBINA

Basado en los estudios geológicos, estratigráficos y dataciones radiométricas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, C^{14} efectuados por Thouret et al., (2005); Rivera (1998, 2010), se presenta de manera resumida la actividad volcánica pasada del Ubina.

2.2.1 Actividad volcánica ocurrida desde hace menos de 370 000 años hasta los últimos miles de años

La historia eruptiva del Ubina se divide en dos períodos:

(1) "Ubina I" (>370 000 años).- Corresponde a la primera etapa eruptiva, durante la cual el Ubina presentó una actividad principalmente de tipo efusiva que emplazó flujos de lava andesíticos que yacen en la base del volcán (Figura 3). Posteriormente, se destruyó el flanco sur del volcán que generó depósitos de avalanchas de escombros distribuidos en la parte baja del flanco sur (visibles a más

de 12 km al sureste del volcán, valle de Ubinas). Este depósito tuvo un volumen aproximado de 2.8 km^3 .

(2) "Ubinas II" (370 000 años hasta el presente).- Inicialmente, entre ~370 000 y 270 000 años A.P. (antes del presente), se produjo el crecimiento y destrucción de domos de lava, seguido o asociado al emplazamiento de lavas que forman parte del cono superior del volcán. Posteriormente, se produjo una erupción explosiva que generó una secuencia de flujos piroclásticos de pómez y cenizas cuyo volumen fue de 1.8 km^3 , que aflora entre 7 y 8 km al sureste del cráter, ligado a un probable colapso de caldera ocurrido hace $269\,000 \pm 14$ años. Posteriormente, entre ~250 000 y 170 000 años A.P., se produjo el crecimiento y destrucción de domos de lava asociados a una actividad efusiva que emplazó flujos de lava. Entre 170 000 y 20 000 años A.P., predomina una importante actividad efusiva que terminó por formar el cono superior del volcán.

En una última etapa ocurrida hace menos de 20 000 años, se produjeron erupciones explosivas plinianas que formaron la caldera del volcán. Una de las erupciones plinianas antiguas, de hace 14 000 años A.P., ha depositado una capa de lapilli de pómez riolíticos de 4.5 m de espesor a 9 km al sur del cráter (visibles en los sectores de Sacohaya y Anascapa), sobre la cual existe otro depósito de caída pliniana de 1.2 m de espesor constituido de lapilli de pómez, datado en 7480 años A.P. Hace cerca de 3670 años, ocurrió un segundo derrumbe del flanco sur del volcán que depositó una avalancha de escombros de $\sim 1.2 \text{ km}^3$. Estos depósitos formaron montículos al pie de la pared sur del cono (Querapi). Hace 980 ± 60 años A.P., ocurrió la última erupción pliniana del Ubinas que depositó una capa de caída de lapilli pómez andesíticos de 4.5 m de espesor a 6 km al sureste del volcán. Desde el año de 1550 d. C. hasta la actualidad, la actividad volcánica estuvo caracterizada por erupciones explosivas de magnitud baja (IEV 1-3), como la actividad eruptiva 2006-2009, 2013-2017 y, recientemente, la actividad 2019.

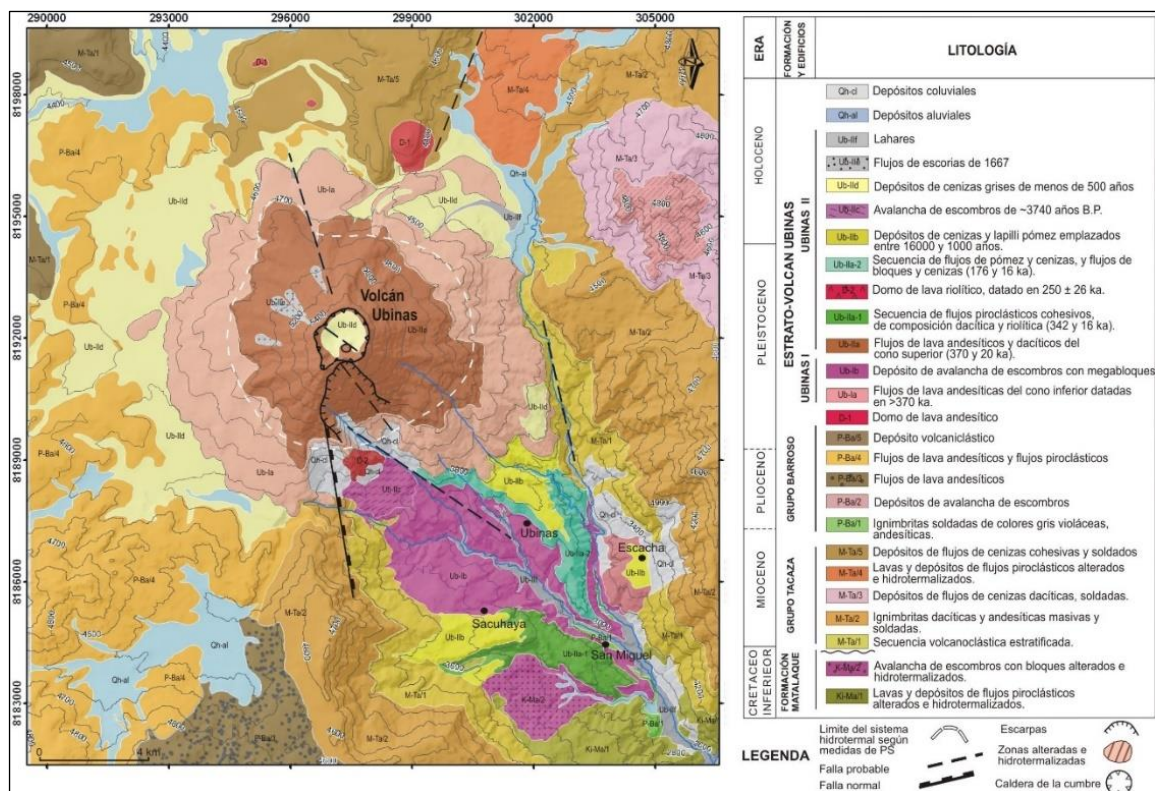


Figura 3.- Mapa geológico del volcán Ubina (tomado de Rivera, 2010).

2.2.2 Actividad Volcánica registrada desde la época histórica hasta la actualidad

Relatos históricos y datos geológicos de campo muestran que el volcán Ubina presentó al menos 26 crisis volcánicas desde el año de 1550 (Rivera, 1998; Thouret et al., 2005), referidas a alta actividad fumarólica y emisiones de cenizas, con una recurrencia de 6 a 7 episodios por siglo. Los eventos registrados sucedieron en los años 1550, 1599, 1662, 1667, 1678, 1784, 1826, 1830, 1862, 1865, 1867, 1869, 1906, 1907, 1912-1913?, 1923-1925?, 1936, 1937, 1951, 1956, 1969, 1995-1996, 2006-2009, incluido 2013-2017. Estos eventos causaron daños en centros poblados y terrenos de cultivos localizados en áreas aledañas al volcán. Los daños ocasionados fueron principalmente por lluvias de cenizas y emisiones de gases.

Datos históricos refieren que algunas de estas erupciones ocurridas en los últimos 500 años fueron erupciones explosivas de magnitudes leves a moderadas. Por ejemplo, la erupción ocurrida el año de 1662 corresponde a una erupción de tipo vulcaniana que tuvo un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) igual a 2 o la erupción del año 1677 que tuvo un IEV igual a 3. Esta última erupción depositó un flujo

piroclástico de escoria de color gris de 0.5 m de espesor a 1 km al oeste del cráter. En áreas distales, este depósito de flujo de escoria está sobre las cenizas de la erupción del volcán Huaynaputina, ocurrida en el año de 1600 d. C.

Durante el siglo XX, el Ubinas ha presentado al menos ocho erupciones leves, caracterizadas por intensas emisiones de gases y cenizas. Las caídas de cenizas causaron daños considerables en terrenos de cultivo y poblados situados alrededor del volcán, causando la muerte de algunas personas y de ganado a consecuencia de epidemias desconocidas. Cabe mencionar que el Índice de Explosividad Volcánica (IEV) es la escala de magnitud de una erupción que va de 0 a 8. Esta describe el tamaño de las erupciones volcánicas basada en factores como el volumen de material emitido, altura de la columna eruptiva, etc.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de la actividad del volcán Ubinas registrada desde épocas históricas hasta la actualidad.

AÑO	TIPO DE ACTIVIDAD	IEV	OBSERVACIONES
1550	Erupción central y explosiva	3?	
1599	Erupción explosiva moderada	2	Cenizas grises cayeron cerca de Arequipa.
1600	Erupción explosiva		
1662	Erupción explosiva	2?	Las cenizas viajaron hasta las pampas de Sama y Locumba.
1677	Erupción explosiva de gran magnitud	3	Probablemente, cayeron cenizas y flujos piroclásticos de escorias encontrados al NW y N del volcán (hasta 1 km del cráter).
1778	Erupción explosiva		
1784	Erupción central y explosiva	2	Alta actividad fumarólica y emisión de ceniza.
1826	Erupción central y explosiva	2	
1830	Erupción central y explosiva	2	
1862	Erupción central y explosiva	2	
1865	Erupción central y explosiva	2	Emisión de ceniza gris.
1867	Erupción central y explosiva	2	
1869	Erupción central y explosiva	2	
1906	Erupción central y explosiva	2	
1907	Erupción central y explosiva	2	
1912-1913 ?	Erupción central y explosiva	2	Cenizas cayeron sobre Ubinas, Chojata y Yalahua; afectó tierras de cultivo y murieron ganados por epidemias desconocidas generadas por las cenizas.
1923-1925 ?	Erupción explosiva		Cenizas grises cayeron cerca de la ciudad de Arequipa.
1936	Erupción explosiva y fumarólica	2	En el valle de Ubinas las cenizas afectaron áreas importantes de cultivo.
1937	Erupción central y explosiva	2	Las cenizas destruyeron terrenos de cultivo y generaron epidemias en el valle de Ubinas.
1951	Erupción central y explosiva	2	En el valle de Ubinas las cenizas causaron serios daños.
1956	Erupción explosiva y fumarólica	2	Emisión de cenizas causaron daños en los terrenos de cultivo y en poblados del valle de Ubinas.
1969	Erupción explosiva	2	En el valle de Ubinas las cenizas destruyeron los cultivos y afectaron a la población.
1995-1996	Alta actividad fumarólica	1	Esta actividad alarmó a la población del valle de Ubinas.
2006-2009	Erupción explosiva y fumarólica	2	En el valle de Ubinas las cenizas destruyeron los cultivos y afectaron a la población. La población de cinco pueblos (1500 habitantes) fue evacuada al refugio Chacchagen.
2013 - 2017	Erupción explosiva y fumarólica	2	En el valle de Ubinas las cenizas destruyeron cultivos y afectaron a la población. La población de 3 poblados fue evacuada a Anasapa
2019	Erupción explosiva y fumarólica	2	En el valle de Ubinas las cenizas destruyeron cultivos y afectaron a la población. La población del distrito de Ubinas fue evacuada a 4 albergues temporales de Anasapa, Sancaya, Chacalque y Pucacancha.

Tabla 1. Resumen de la actividad histórica del volcán Ubinas.

CAPITULO III: DATOS GEOFÍSICOS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

Los datos utilizados en el presente informe se obtuvieron en campañas de monitoreo geofísico efectuadas por el IGP desde el año 1995 hasta la actualidad y a través de la red de monitoreo volcánico permanente que opera el IGP en el volcán Ubinas desde el año 2006. Esta información ha sido analizada por el personal del Centro Vulcanológico Nacional y está disponible en los siguientes tipos de productos geofísicos: (i) catálogos de actividad sismovolcánica, (ii) mapas de actividad sismovolcánica, (iii) parámetros hipocentrales, (iv) informes técnicos, etc.

Los métodos de análisis utilizados se refieren al procesamiento de la información sísmica adquirida teleméricamente y mediante campañas de campo.

3.1 DATOS GEOFÍSICOS

A continuación, se detalla cada uno de los datos y productos vulcanológicos utilizados para el desarrollo del presente informe.

3.1.1 Catálogos de actividad sismovolcánica

Son documentos elaborados a partir de la clasificación y análisis manual o automático de los eventos sísmicos registrados por la red de monitoreo volcánico permanente del Ubinas, cuya fuente está localizada al interior y en los alrededores del volcán. Estos documentos detallan el tipo de señal sísmica registrada, la fecha y hora del evento, frecuencia principal, amplitud pico, duración y energía sísmica de la señal. Si el sismo es localizable, muestra las coordenadas y altitud de dicho evento (figura 4).

Desde el 2006 hasta el 2019, se han registrado un total de 594 705 sismos volcánicos, los cuales fueron analizados y clasificados por el IGP. Esta información es presentada a través de catálogos sismovolcánicos, los cuales han sido publicados anualmente.

IDE (VOL-AN-No)	EST. REF.	TIPO	FECHA Y HORA (UTC) AN-MS-DD Hra. Min. Seg.	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	ELEVACIÓN (km)	FREC. (Hz)	DUR. (Seg.)	MAG. (ML)	D.R. (cm2)	ENERGÍA (MJ)
UB18-00001	UB1	VTD	2018-01-02 11:37:23				11.6	38	1.7	0.03	6.50E-05
UB18-00002	UB1	VT1	2018-01-07 11:17:22				4.2	24	1.1	0.06	1.00E-05
UB18-00003	UB1	VT1	2018-01-07 13:15:54				11.3	15	0.5	0.01	7.00E-06
UB18-00004	UB1	VT1	2018-01-08 12:56:27				7.6	16	0.6	0.03	1.00E-05
UB18-00005	UB1	VT1	2018-01-09 15:11:56				4.5	14	0.5	0.05	7.00E-06
UB18-00006	UB1	VT1	2018-01-09 20:03:08				8.2	11	0.2	0.03	4.00E-06
UB18-00007	UB1	VT1	2018-01-11 11:39:32	-16.342	-70.909	-0.76	7.1	20	0.9	0.21	6.12E-04
UB18-00008	UB1	VT1	2018-01-12 16:38:15				5.7	17	0.7	0.07	1.90E-05
UB18-00009	UB1	VT1	2018-01-13 17:12:03				9.9	40	1.8	0.21	2.58E-03
UB18-00010	UB1	VT1	2018-01-13 17:35:19				5.0	29	1.4	0.16	1.06E-04
UB18-00011	UB1	VT1	2018-01-13 17:44:13				7.1	35	1.6	0.04	2.50E-05
UB18-00012	UB1	VT1	2018-01-14 12:09:51				9.8	19	0.9	0.02	6.00E-06
UB18-00013	UB1	VT1	2018-01-14 13:37:28				11.2	30	1.4	0.04	4.30E-05
UB18-00014	UB1	VT1	2018-01-14 16:15:43				4.7	21	1.0	0.06	1.30E-05
UB18-00015	UB1	VT1	2018-01-15 20:33:58				10.0	26	1.2	0.10	1.26E-04
UB18-00016	UB1	VT1	2018-01-16 23:12:34				3.9	17	0.7	0.18	6.00E-05
UB18-00017	UB1	VT1	2018-01-17 11:22:40				9.9	13	0.4	0.03	9.00E-06
UB18-00018	UB1	VT1	2018-01-17 14:27:03	-16.343	-70.901	-3.58	7.3	19	0.8	0.07	3.90E-05
UB18-00019	UB1	TRE	2018-01-17 16:57:09				9.9	54	2.1	0.02	9.90E-05
UB18-00020	UB1	VT1	2018-01-17 22:12:34				7.4	15	0.6	0.03	8.00E-06
UB18-00021	UB1	LP1	2018-01-17 22:28:12				8.4	19	0.9	0.01	1.90E-05
UB18-00022	UB1	TOR	2018-01-18 20:28:32				7.4	32	1.5	0.13	4.70E-04
UB18-00023	UB1	VT1	2018-01-18 21:21:42				3.9	14	0.5	0.06	1.00E-05
UB18-00024	UB1	VTD	2018-01-18 22:39:04				5.6	19	0.9	0.11	3.60E-05
UB18-00025	UB1	VT1	2018-01-19 14:49:31				10.0	16	0.7	0.03	1.10E-05
UB18-00026	UB1	TRE	2018-01-20 17:40:51				7.3	42	1.8	0.05	4.25E-04
UB18-00027	UB1	VT1	2018-01-23 16:57:39				3.8	45	1.9	0.21	1.38E-04
UB18-00028	UB1	TRE	2018-01-24 19:42:06				3.2	1047	5.8	0.10	2.15E-03
UB18-00029	UB1	LP1	2018-01-25 14:41:16				6.2	23	1.1	0.05	8.80E-05
UB18-00030	UB1	VTD	2018-01-25 14:57:42				3.5	19	0.9	0.12	5.10E-05
UB18-00031	UB1	VTD	2018-01-26 14:13:32	-16.335	-70.865	5.08	4.0	26	1.2	0.15	4.40E-05
UB18-00032	UB1	LP1	2018-01-28 20:49:41				6.2	15	0.6	0.02	1.90E-05
UB18-00033	UB1	VT1	2018-01-28 21:26:46				4.2	14	0.5	0.16	6.10E-05

Figura 4.- Parte del catálogo de actividad sismovolcánica correspondiente a la sismicidad registrada en el volcán Ubinas en el año 2018.

3.1.2 Mapas de actividad sismovolcánica

Los mapas de actividad sismovolcánica nos permiten conocer la distribución espacial de la sismicidad que se genera debajo del edificio volcánico. Para elaborar este producto es preciso identificar claramente las fases P y S de los sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) o de fractura. Estos mapas geofísicos se desarrollan anualmente y existen versiones digitales publicadas desde el año 2013.

También, se han instalado temporalmente, durante el 2009, arreglos de estaciones sísmicas conocidos como antenas sísmicas, cuyo objetivo fue localizar las explosiones del volcán y la sismicidad de baja frecuencia con arribos emergentes (tipo Largo Periodo o LP). Estos arreglos han permitido estimar la profundidad en el conducto volcánico a la cual se generaron las explosiones volcánicas en el Ubinas durante la actividad 2006-2009 (Inza et al., 2014).

3.2 SISMOLOGÍA VOLCÁNICA: MÉTODOS DE ANÁLISIS

Los sismos generados en volcanes y/o ambientes volcánicos presentan diferentes formas, frecuencias y amplitudes. Esta variedad de señales, luego de su análisis e identificación, describe los distintos procesos dinámicos que ocurren al interior de un volcán, así como la situación actual o el grado de actividad que presenta un determinado volcán. La red de monitoreo sismovolcánico permanente del Ubinas está conformada por 6 estaciones sísmicas distribuidas alrededor del volcán que cubren todos sus flancos (Figura 5). De estas, 5 son estaciones de banda ancha y 1 de periodo corto (UBI3), equipos de marcas *Guralp*, *Lennartz* y *Nanometrics*.

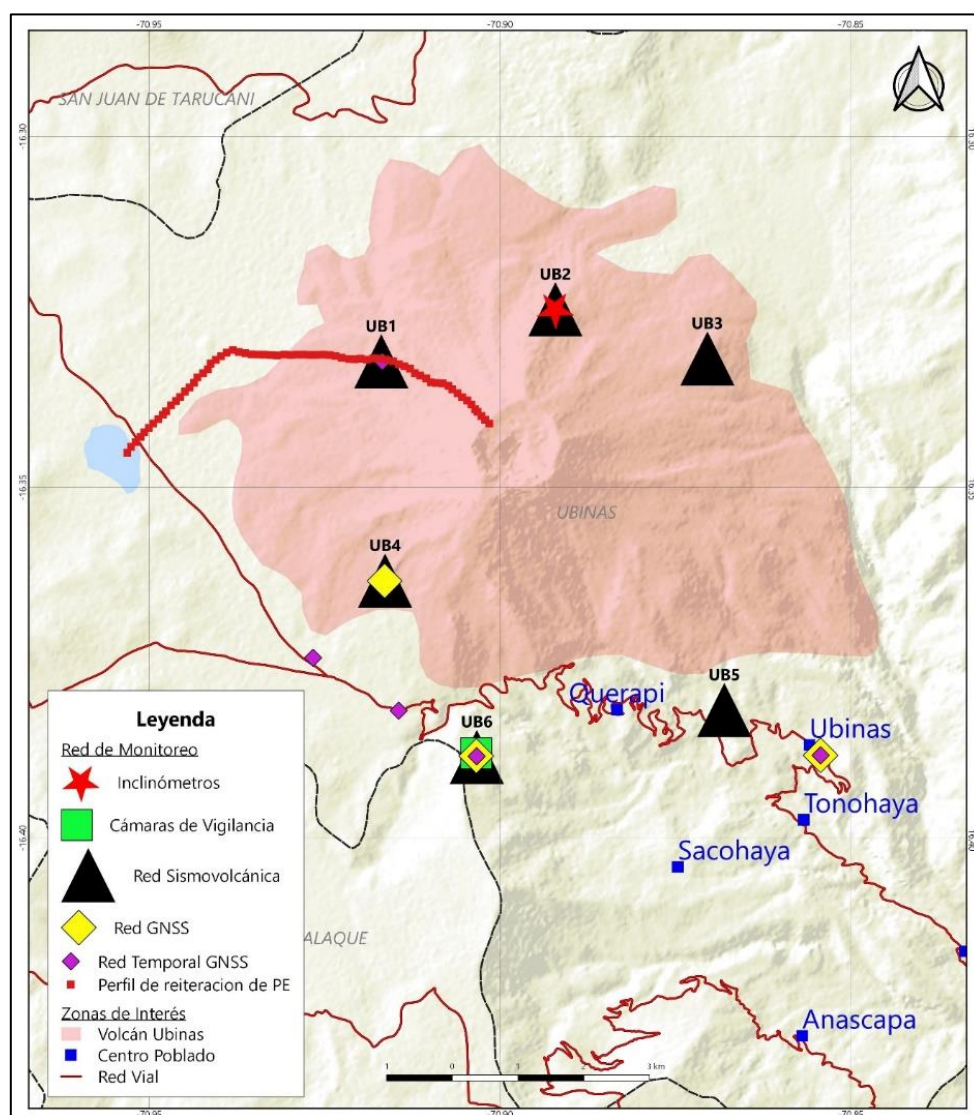


Figura 5.- Red de monitoreo geofísico del IGP sobre el volcán Ubinas. Las estaciones sísmicas se muestran en triángulos negros.

3.2.1 Tipos de Sismicidad

Desde hace varias décadas a nivel global, se han desarrollado varias metodologías de clasificación de señales sismovolcánicas propuestas por varios autores: Shimozuru (1971); Minakani (1974); Chouet (1996); McNutt (2000); Ibañez (2000), etc. Según los análisis, cada autor plantea un método con características propias, lo que deja algunos vacíos cuando un volcán en particular presenta señales que no se ajustan a su clasificación.

Los tipos de sismicidad registrados en el volcán Ubinas, según su origen, pueden ser de varios tipos, los cuales pueden ser incluidos en la clasificación propuesta por McNutt (2005): a) Eventos Volcano-Tectónicos (VT) de alta frecuencia, similares a los terremotos puramente tectónicos, pero originados en ambientes volcánicos; b) Eventos de Largo Período (*Long Period* o LP) y de "muy largo periodo" (*Very Long Period* o VLP), producidos por la interacción de fluidos magmáticos y/o hidrotermales; c) Explosiones volcánicas, con contenido en frecuencias del rango de los infrasonidos; estos eventos se producen también por la interacción de fluidos con un medio volcánico; d) Tremor volcánico, corresponde a una señal de baja frecuencia prolongada en el tiempo (desde pocos segundos hasta días) (Chouet, 2003; Zobin, 2011); e) Eventos superficiales como lahares, derrumbes, flujos piroclásticos, sismos de hielo en regiones glaciares, etc., estos eventos se caracterizan por tener espectros de altas frecuencias, en la banda de 5 y 45 Hz.

A continuación, se describe las señales típicas registradas en el volcán Ubinas identificando su forma en el dominio del tiempo y analizando su contenido espectral.

3.2.1.1 Señales sísmicas de tipo Largo Periodo (LP)

Están caracterizadas por tener una duración que varía entre 10 segundos hasta algo más de 40 segundos. El contenido espectral se enmarca en una banda de frecuencia relativamente estrecha de $0.5 \text{ Hz} < f < 6 \text{ Hz}$. La mayoría de señales Largo Periodo (LP) presentan frecuencias de 3.8 Hz en promedio

(figura 6). A menudo es posible registrar eventos de tipo Largo Periodo que aparecen precedidos por arribos de fase algo menos energéticas, a frecuencias mayores a 5 Hz (Ferrazzini & Aki, 1992).

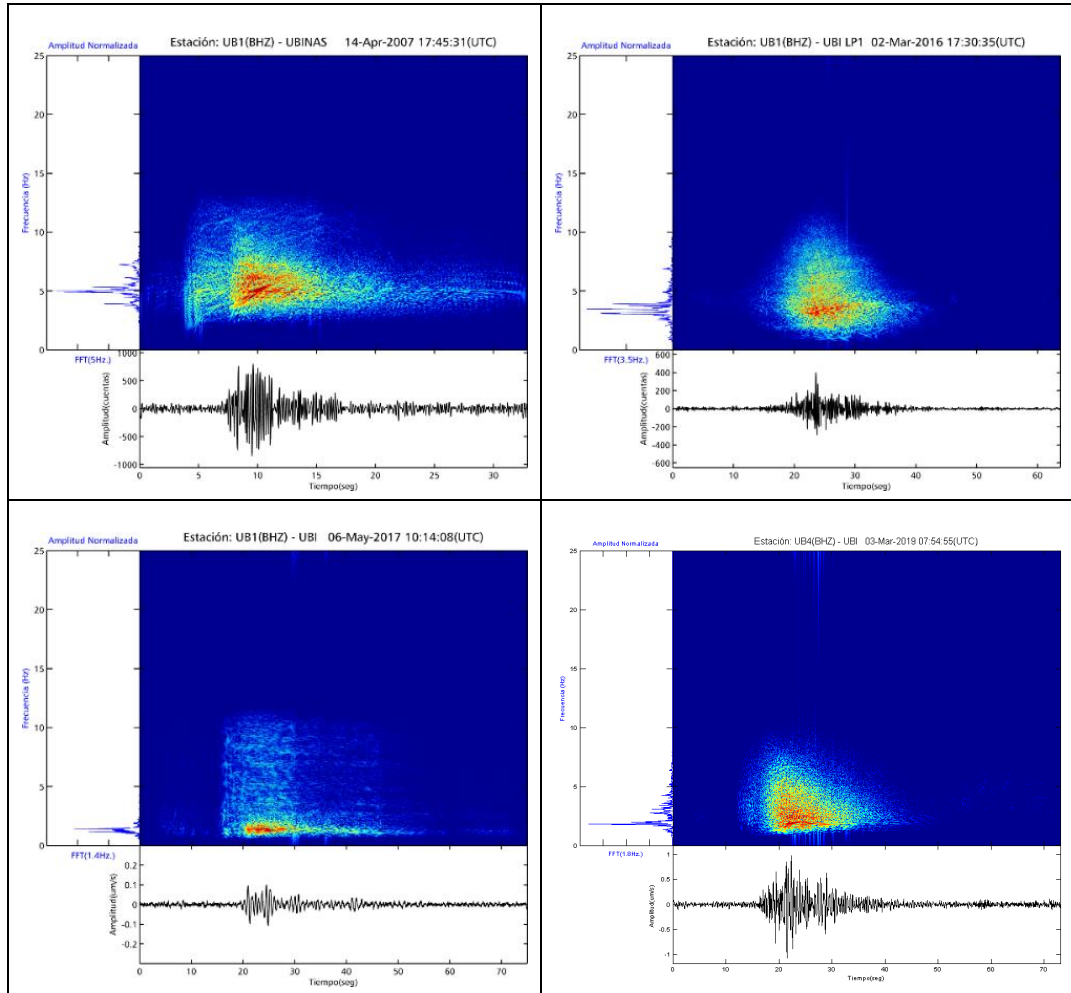


Figura 6.- Sismos tipo Largo Periodo registrados por la estación sísmica UBI1 instalada en el volcán Ubinas. Se observa en todas las señales el arribo emergente de la fase P y una estrecha banda de frecuencia ($< 5\text{Hz}$).

3.2.1.2 Señales sísmicas de tipo Tornillo

Según Chouet (1996), este tipo de señales corresponden a eventos sísmicos de Largo Periodo que muestran formas parecidas a un "tornillo" (figura 7), siendo sus características: (a) larga duración comparada con su amplitud; (b) una coda larga, casi lineal con decaimiento lento; (c) forma de onda de baja frecuencia y monocromático o casi monocromático (Torres et al., 1996). La

fuerza de los eventos Tornillo puede ser modelada como la resonancia en una grieta llena de fluido inducida por una presión transitoria aplicada sobre un área de una pared de la grieta (Chouet, 1985; Chouet, 1992). En el volcán Ubinas se observaron picos frecuenciales que variaron entre 1 Hz hasta 15 Hz, además de presentar arribos impulsivos de la fase P.

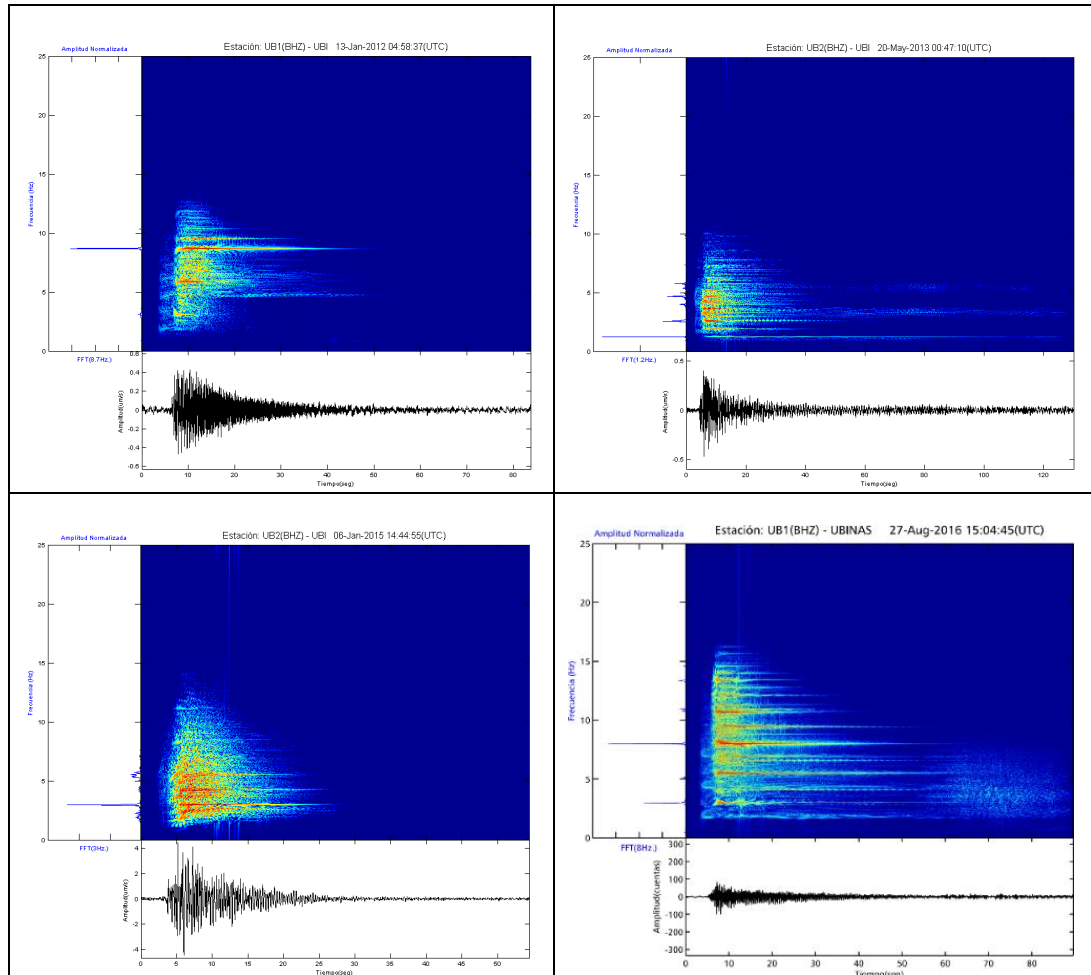


Figura 7.- Sismos de tipo Tornillo registrados por la estación sísmica UBI1 instalada en el volcán Ubinas. Estas señales fueron obtenidas entre enero de 2012 y agosto de 2016. Nótese la forma de tornillo y los picos de frecuencia dominante en el espectro.

3.2.1.3 Señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónico (VT)

Son sismos producidos por el fracturamiento de rocas al interior del edificio volcánico como resultado de esfuerzos causados, en buena parte, por la presión que ejercen los fluidos volcánicos (magma, gases) al momento de su ascenso. Los sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) están caracterizados por poseer, en algunos casos, ondas con arribo impulsivo de sus fases P y S

(figura 8), típicamente con una amplia banda espectral de hasta 15 Hz (Lahr et al., 1994). La mayoría de los eventos de tipo Volcano-Tectónico en el volcán Ubinas presentan ondas P emergentes que hacen difícil su localización. Las magnitudes de estos sismos están en un rango de M1.0 y M3.5. Es muy frecuente registrar este tipo de sismos, independientemente del estado de actividad de un volcán. Es decir, cuando el Ubinas se encuentra en reposo o sin actividad eruptiva, la ocurrencia de los eventos de tipo Volcano-Tectónico representa el único síntoma de actividad volcánica.

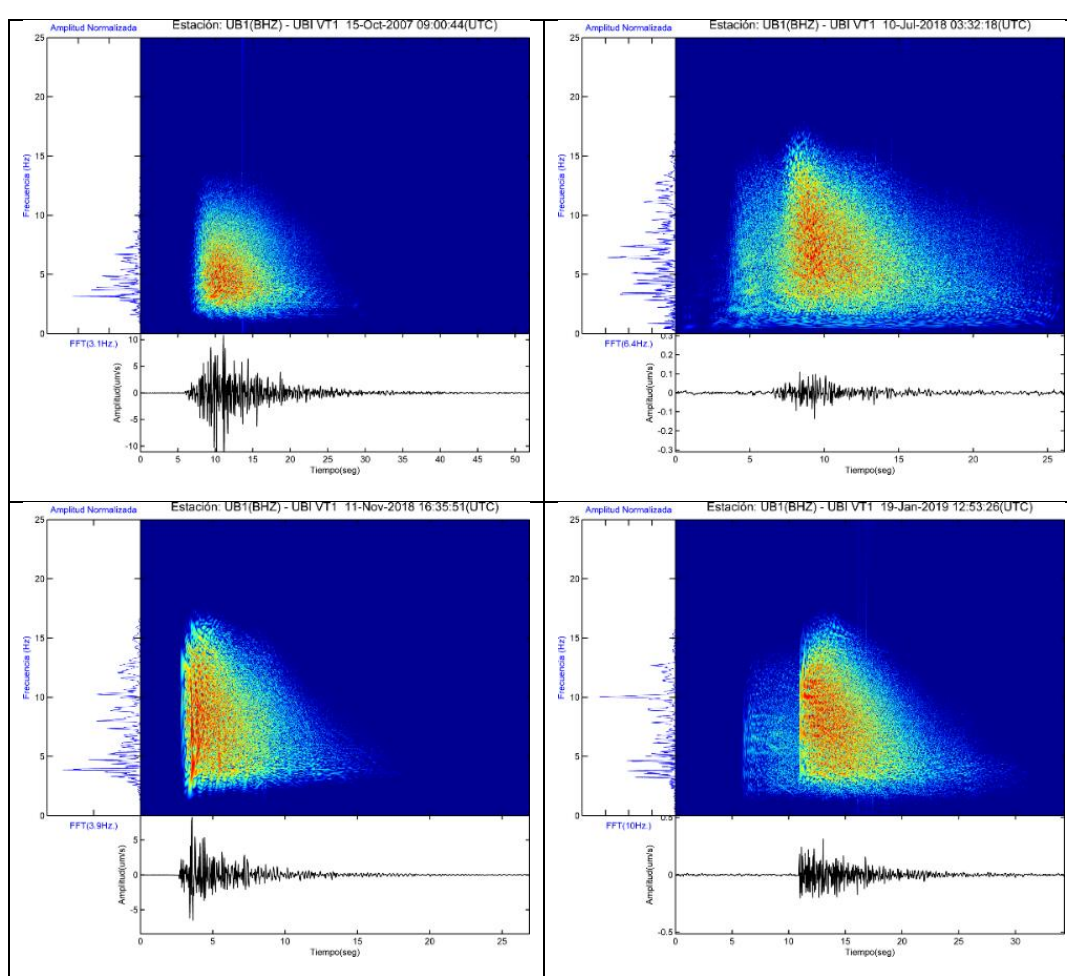


Figura 8.- Sismos de tipo Volcano-Tectónico registrado por la estación sísmica UBI1 instalada en el volcán Ubinas, ocurridos desde octubre de 2007 a enero de 2019.

3.2.1.4 Señales sísmicas de tipo Tremor Espasmódico

Los tremores volcánicos son los tipos de señales sismovolcánicas más comunes registradas en la mayoría de volcanes en el mundo en sus distintas

etapas o fases de actividad. El Tremor es un registro continuo de vibraciones monotónicas o no armónicas del suelo que puede tener una duración de minutos, días o meses (Zobin, 2003).

Estos eventos en el volcán Ubinas presentan una amplia banda espectral y un registro continuo de vibraciones no armónicas que pueden ocurrir por varios minutos, horas o días. El Tremor Espasmódico está caracterizado por distribuir la energía en una banda de frecuencia ancha, usualmente en el rango de 1 Hz a 6 Hz; por tal motivo, puede presentar picos espectrales menores a ese rango de frecuencias (figura 9). Según McNutt (2002), los tremores espasmódicos son de muy altas frecuencias, pulsantes y de señal irregular.

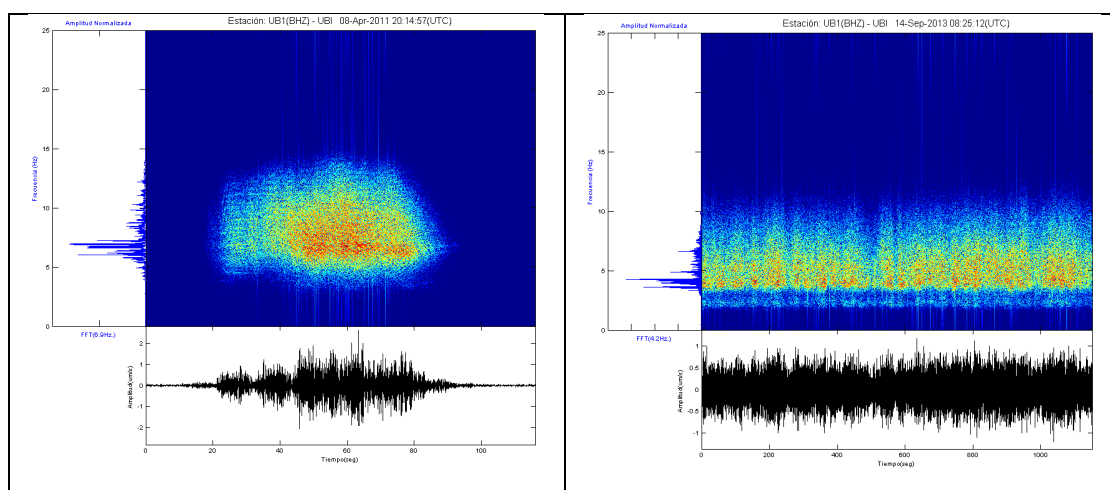


Figura 9.- Señales sísmicas de tipo Tremor Espasmódico registradas por la estación sísmica UBI1 instalada en el volcán Ubinas. En ambas señales destaca la duración por encima de los 40 segundos.

3.2.1.5 Señales sísmicas de tipo Tremor Armónico

Esta clase de tremor sísmico presenta picos espectrales dominantes, algunas veces con frecuencias menores a 5 Hz (figura 10). También se presentan como una onda de única frecuencia con amplitudes que varían suavemente (McNutt, 2002). En el volcán Ubinas, la ocurrencia de sismicidad de tipo Tremor Armónico estaría relacionada al ascenso de magma o gases.

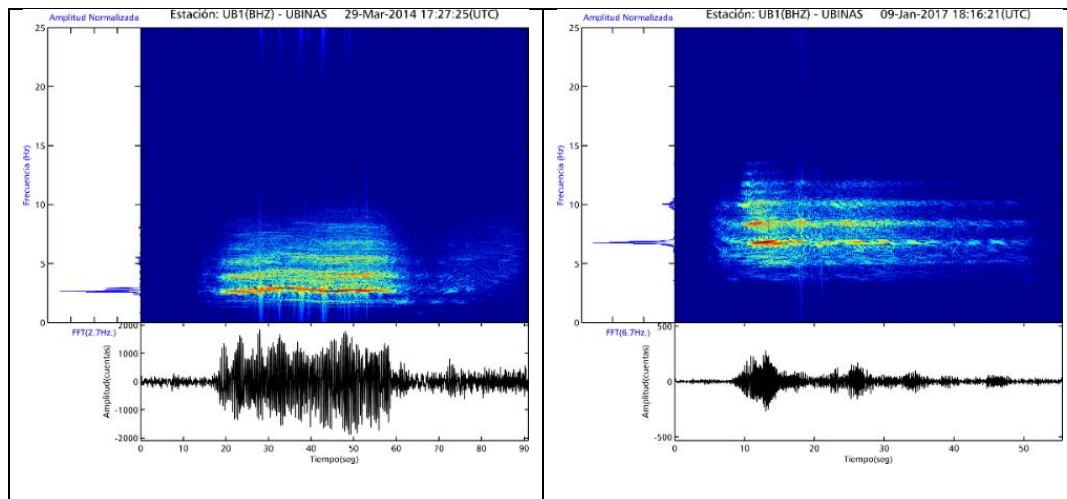
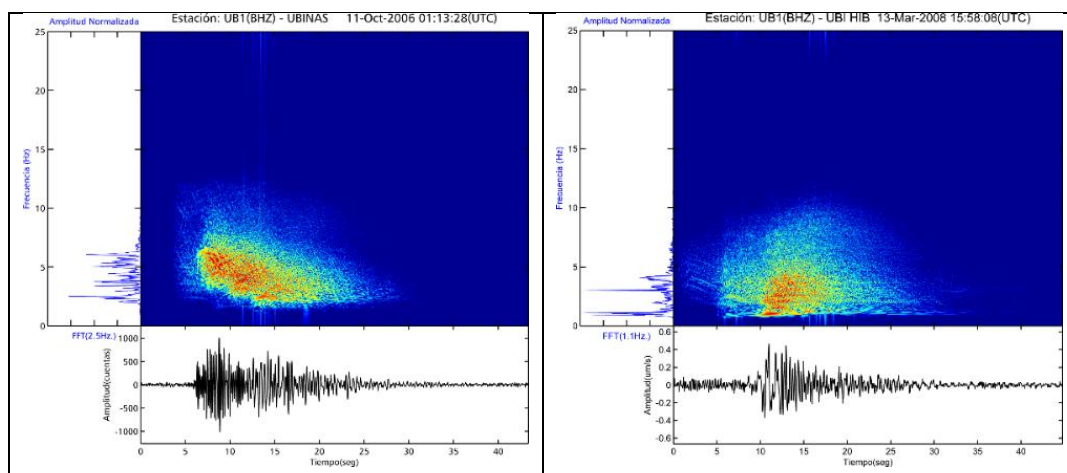


Figura 10.- Señales sísmicas de tipo Tremor Armónico registradas por la estación sísmica UBT1 instalada en el volcán Ubinas.

3.2.1.6 Señales sísmicas de tipo Híbrido

Son sismos de Largo Periodo con altas frecuencias incluidas dentro de la misma señal (Neuberg et al., 2006). Estos eventos han sido observados en muchos volcanes y están asociados a la presurización del sistema volcánico interno (Lahr et al., 1994). En Ubinas, los eventos de tipo Híbrido presentan bajas frecuencias de ~ 1 Hz, sobre todo al inicio del sismo, seguido inmediatamente por ondas de frecuencias más altas (Figura 11). Este tipo de eventos probablemente estén asociados al ascenso de magma (parte de baja frecuencia) que transporta la presión hasta los pocos kilómetros antes de llegar a la superficie, lo que provoca rupturas (parte de alta frecuencia) a lo largo del conducto volcánico.



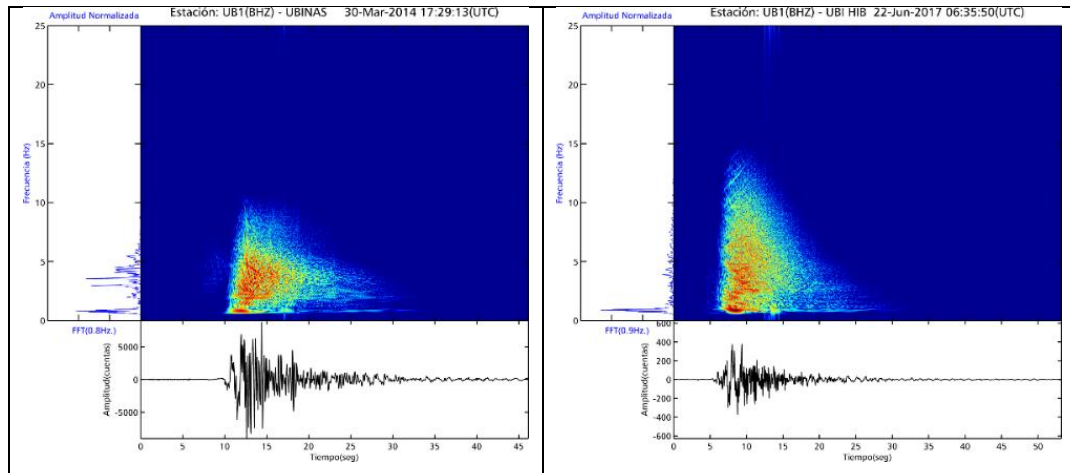


Figura 11.- Sismos de tipo Híbrido registrados por la estación sísmica UBI1 instalada en el volcán Ubinas. Es necesario notar la mezcla de frecuencias bajas y altas en la misma señal. En la erupción del Ubinas entre 2013-2017, el incremento en el número y energía de estos eventos indicaban el inminente inicio de la fase explosiva.

3.2.1.7 Explosión volcánica

Una explosión genera una señal sísmica de alta energía, generalmente mucho mayor a los sismos de tipo Híbrido. Presenta un inicio impulsivo y una componente de baja frecuencia, generalmente menor a 3 Hz (figura 12). Probablemente, la parte de alta frecuencia de la señal está asociada a la onda de choque de la explosión. Inmediatamente generada la explosión, se registra el Tremor Espasmódico asociado con la expulsión de ceniza y gases hacia la atmósfera.

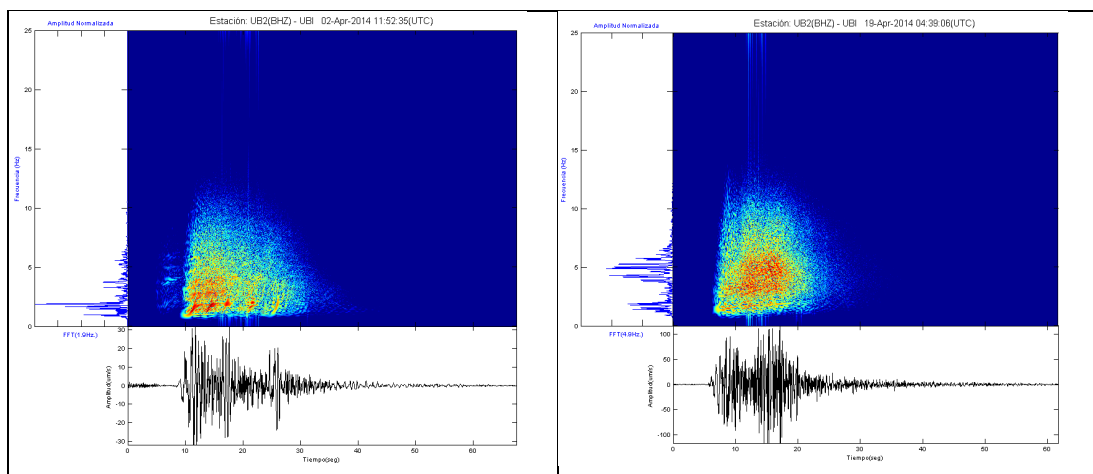


Figura 12.- Explosiones registradas por la estación sísmica UBI1 instalada en el volcán Ubinas en abril de 2014, durante el proceso eruptivo desarrollado por dicho volcán entre 2013-2017.

3.2.1.8 Señales sísmicas relacionadas al descenso de lahares

La ocurrencia de un lahar o flujo de lodo volcánico va a generar vibraciones sísmicas superficiales que son registrados como tremores, cuya forma de onda es un registro que puede durar varios minutos. La señal sísmica presenta, en general, frecuencias mayores a 5 Hz, esto ocurre exactamente cuando la energía de la señal se incrementa (figura 13). Su ocurrencia está principalmente restringida a la temporada de lluvias en las zonas altoandinas (diciembre-marzo) o por el deshielo de una masa de nieve.

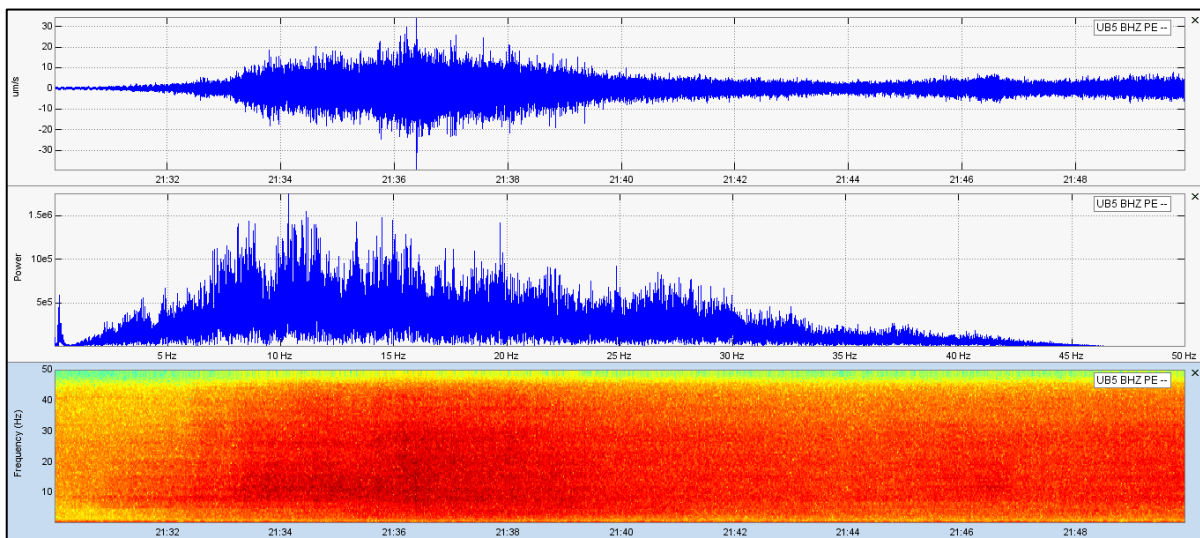


Figura 13.- Señal sísmica relacionada al descenso de un lahar por el flanco sur del volcán Ubina, registrada por la estación UBI5 el 7 de febrero de 2019 a 15:00 horas.

La categorización descrita anteriormente es aplicada por el IGP desde el año 2013 para identificar cada uno de los tipos de sismos registrados en el volcán Ubina. Algunos otros eventos clasificados previos al 2012, como los sismos de tipo pistón, LHF o LPPs, actualmente, no son considerados por la escasez o ausencia en los registros y/o debido a que sus características en el dominio del tiempo y en el espectro de frecuencias encajan en los tipos de eventos detallados anteriormente.

3.2.2 Localización de señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónico

El análisis de las señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónico (VT), asociadas a procesos de ruptura, implica la identificación de varios parámetros de fuente:

localización espacial y temporal, magnitud, mecanismos focales, dimensiones de la fuente, etc., con los cuales se obtiene información acerca del contexto estructural y de los procesos dinámicos que ocurren al interior de los volcanes. Para este fin, la identificación de fases sísmicas se realiza utilizando el programa SAC, el cual ayuda a determinar los arribos de las ondas P y S que están asociados a los tiempos que tardan las ondas sísmicas en atravesar el edificio volcánico. Posteriormente, se localizan los eventos con las lecturas de las ondas producidas utilizando el programa *Hypoellipse*.

3.2.3 Cálculo de la energía sísmica

La energía sísmica está relacionada a la magnitud de un sismo. La magnitud es entendida como la medida del tamaño de un sismo en términos de energía sísmica liberada por la fuente (Bormann, 2002). Los niveles de energía sísmica liberada durante el periodo de análisis 2006–2019 ha sido calculada principalmente con base en los datos registrados por la estación de referencia UBI1, así como por las estaciones UBI2 y UBI4, esto de acuerdo a los periodos de funcionamiento continuo de la red sismovolcánica. El cálculo se formula por integración de la señal sísmica (Johnson & Aster, 2005); la ecuación aplicada fue la siguiente:

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

dónde:

r	: distancia fuente - estación
ρ	: 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

3.2.4 Cálculo de la magnitud local

La magnitud Richter de sismos locales puede ser convenientemente estimada desde 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).

CAPÍTULO IV: NUEVO MODELO DE VELOCIDADES Y LOCALIZACIÓN SISMOVOLCÁNICA

En un volcán o un ambiente volcánico es muy importante determinar las coordenadas espaciales y características temporales de los eventos sísmicos. De acuerdo a ello, las ondas sísmicas y sus tiempos de llegada brindan información acerca de las características y el estado de los materiales que conforman el interior de las estructuras volcánicas. Una de las principales aplicaciones de este conocimiento es obtener un modelo de corteza que represente las velocidades de propagación de la onda respecto a la profundidad, sin descartar que para la corteza superficial se debe tener en cuenta las condiciones litológicas y la topografía del terreno (Palau, 2005).

4.1 ESTIMACIÓN DEL NUEVO MODELO DE VELOCIDADES 1D

En el marco de este estudio se ha realizado un nuevo modelo de velocidad en 1D aplicando el algoritmo del programa VELEST (Kissling et al., 1995) que se alimenta de los datos de la red de monitoreo sísmico del volcán Ubinas.

El programa VELEST es una rutina escrita en *Fortran*, la cual fue desarrollada para derivar modelos de velocidad 1D que son utilizados en la localización de sismos y como referencia inicial en tomografía sísmica. Este programa permite reajustar el modelo de estructura de velocidades unidimensionales (1D) a partir de un modelo inicial para la localización de eventos sísmicos aplicando el proceso de inversión. La relocalización de hipocentros se lleva a cabo usando las ondas sísmicas reflejadas y refractadas en los límites de las capas al interior de un volcán.

4.2 DATOS SÍSMICOS EMPLEADOS PARA EL CÁLCULO DEL MODELO

Los datos sísmicos empleados para la elaboración del nuevo modelo de velocidades fueron recolectados por la red de monitoreo del volcán Ubinas en el periodo enero de 2013 a junio de 2019. En total se seleccionaron y localizaron 768 sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT), los mismos que se distribuyen dentro de un radio de 10 km del cráter del volcán (Figura 14). Los

parámetros hipocentrales de cada sismo fueron calculados con el programa *Hypoellipse* (Lahr, 1994).

Para realizar la correcta selección de sismos localizados en el volcán Ubinas, ha sido necesario evaluar la sismicidad a fin de que cumpla con las siguientes características:

- $GAB \leq 180^\circ$ (distribución azimutal)
- $RMS < 1.0$
- Calidad de localización A y B (*Hypoellipse*)
- $1 < V_p/V_s < 2$ (relación de la velocidad de las ondas P y S)
- Sismos que cuenten con 4 o más lecturas de las fases P o S

Como resultado de esta selección se identificaron 58 eventos sísmicos. Este conjunto de datos corresponde al registro de 5 estaciones sísmicas obtenidas en un periodo total de 300 días.

4.3 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO DE VELOCIDAD

Para obtener el modelo de velocidad con menor incertidumbre posible, el software considera tres aspectos importantes descritos a continuación: (i) correcta selección de la información a partir de los datos de la red sísmica del volcán Ubinas; (ii) selección del modelo inicial de referencia y aplicación del método Wadati para determinar la relación V_p/V_s ; e (iii) identificación de la red de estaciones sísmicas con distribución azimutal uniforme.

Finalmente, se realiza la inversión de los tiempos de arribo mediante el programa VELEST. A partir de los resultados, se efectúa la relocalización de eventos sísmicos.

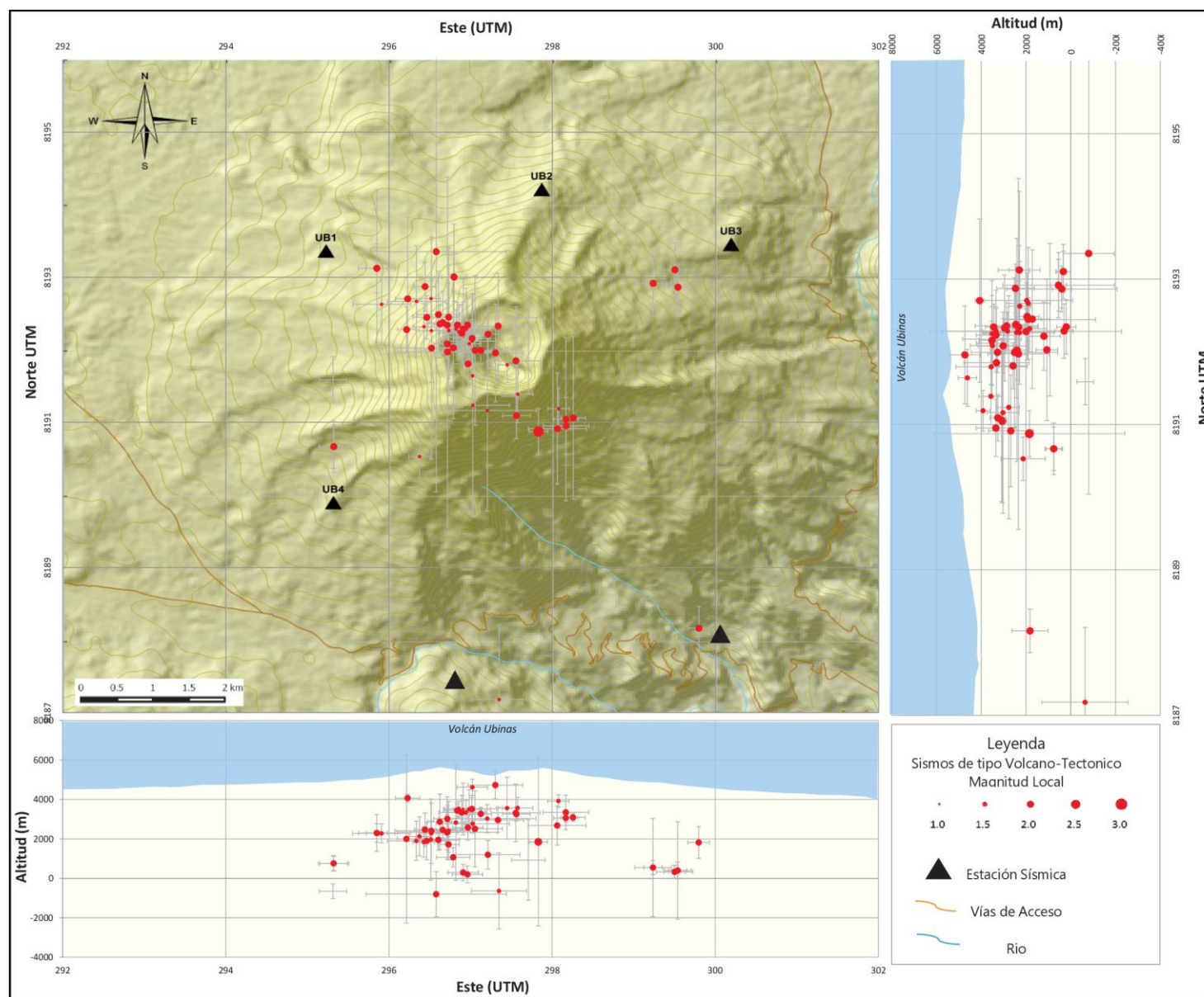


Figura 14.- Mapa de ubicación de sismos (círculos rojos) en el volcán Ubina seleccionados para elaborar el nuevo modelo de velocidades. Los sismos fueron registrados durante en el periodo enero de 2013 a junio de 2019.

4.3.1 Datos sísmicos seleccionados

- Parámetros de localización de los sismos. Para el caso del volcán Ubinas, se utilizó el programa *Hypoellipse*.
- Dentro de los datos requeridos están el tiempo de origen del evento, las coordenadas (latitud, longitud), profundidad, magnitud y los tiempos de arribo a cada estación sísmica que conforma la red.
- Mínimo 50 eventos registrados que tengan 5 o más lecturas de las fases P o que tengan 5 o más lecturas de las fases S.

4.3.2 Modelo de referencia y relación V_p/V_s

- El programa VELEST necesita un modelo de estructura de velocidades referencial a partir del cual realizará los cálculos correspondientes de inversión sísmica ajustando los valores de velocidades de este modelo inicial.
- Para cada región de interés es importante determinar un valor promedio de la relación V_p/V_s , que representa la proporcionalidad que hay entre las velocidades de la onda P y S.

4.3.3 Red sísmica

- La red sísmica del Ubinas está distribuida de manera azimutal y uniforme; en tal sentido, los instrumentos sísmicos cubren en 360° el área del volcán.

4.3.4 Inversión de los tiempos de arribo y modelo de velocidad

- La herramienta usada en el presente trabajo fue el programa VELEST, el cual realiza trazado de rayos para determinar el problema hacia delante de la fuente al receptor. El programa calcula el tiempo de arribo de ondas directas, refractadas y reflejadas que pasan por un modelo unidimensional.

4.4 MODELO DE VELOCIDAD INICIAL

Para el cálculo de los parámetros de localización sísmica en el volcán Ubinas, se ha utilizado el modelo previo de velocidad de Metaxian (1998) con 5 capas. En el modelo de Metaxian (1998) se ha modificado los espesores de las capas y las velocidades. Como resultado de ello, el modelo de velocidad inicial considerado para el volcán Ubinas ha calculado 8 capas de

velocidad hasta los 21 km de profundidad, con velocidades que varían entre 2.5 a 5.8 km/s (Figura 15).

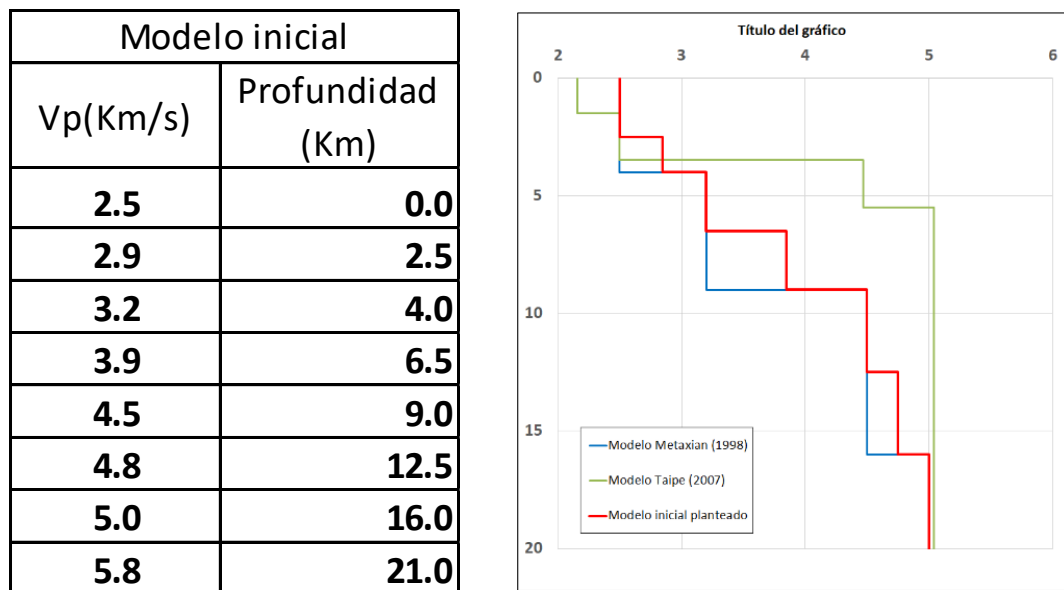


Figura 15.- El cuadro de la izquierda corresponde a los valores del modelo de velocidad inicial evaluado en el presente informe para el volcán Ubinas. La figura de la derecha muestra el nuevo modelo inicial propuesto en este estudio (línea roja), el modelo de Metaxian (1998) en línea celeste y el modelo de Taipei (2007) en línea verde.

Según el método Wadati (1933), la relación V_p/V_s es de 1.68 (Figura 16). Esta relación fue calculada mediante el análisis de 547 lecturas de las fases P y S.

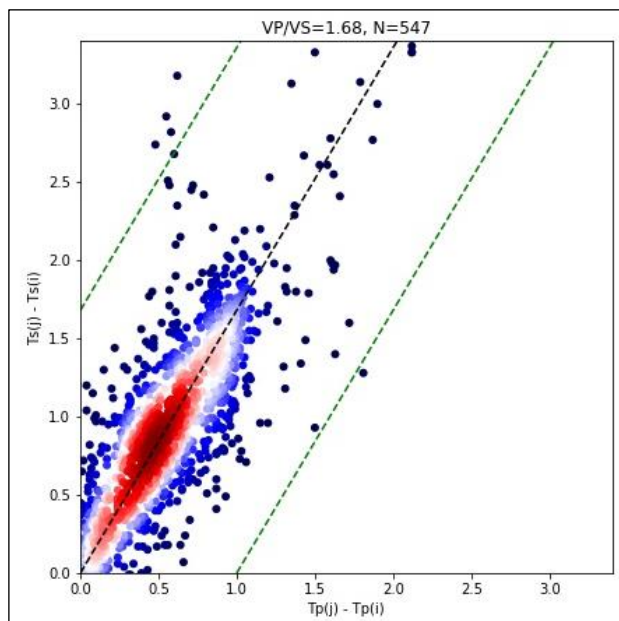


Figura 16.- Diagrama de Wadati para sismos de tipo Volcano-Tectónico registrados en el volcán Ubinas en el periodo enero de 2013 a junio de 2019. Los círculos corresponden a las lecturas de los tiempos de llegada de las fases P y S en las estaciones UBI1, UBI2, UBI3, UBI4 y UBI5. La línea negra punteada corresponde al mejor ajuste, con un valor de pendiente (V_p/V_s) de 1.68.

4.5 NUEVO MODELO DE VELOCIDADES CALCULADO CON EL PROGRAMA VELEST

Se realizaron varias pruebas de inversión con el programa VELEST. La figura siguiente muestra, en líneas grises, el número de inversiones de velocidad realizado por el programa VELEST. En total fueron 60 iteraciones, de las cuales el resultado con RMS menor a 0.1 se muestra en línea azul y corresponde al modelo definitivo para el volcán Ubinas (tabla 2).

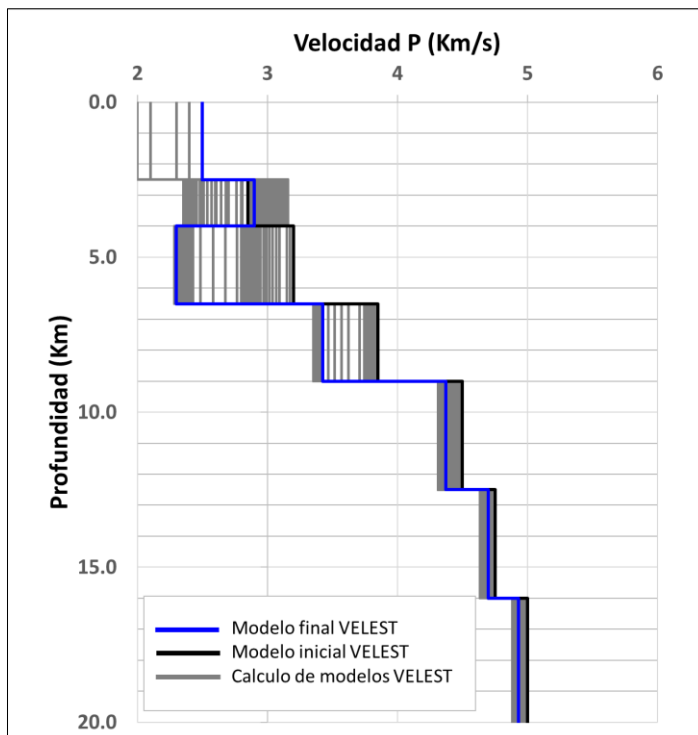


Figura 17.- Figura que muestra las inversiones realizadas con el programa VELEST (línea gris). En línea azul se muestra el mejor resultado de inversión con RMS < 0.1; en línea negra, el modelo inicial de velocidad de Metaxian (1998).

Modelo Final VELEST	
Profundidad (km)	Vp (km/s)
0.0	2.500
2.5	2.898
4.0	2.300
6.5	3.426
9.0	4.370
12.5	4.696
16.0	4.929
21.0	5.763

Tabla 2.- Modelo de velocidades final calculado con el programa VELEST

4.6 LOCALIZACIÓN CON EL NUEVO MODELO DE VELOCIDADES

Los nuevos resultados de velocidades calculados mediante el programa VELEST para la zona del volcán Ubinas fueron testeados utilizando el programa de localización *Hypoellipse* y conservando siempre la relación $V_p/V_s = 1.68$.

En la figura 18 se muestra la localización hipocentral del periodo 1998-2019, obtenido con el nuevo modelo de velocidades detallado en la tabla 2 y aplicado al total de sismos que presentaron fases P y S claras.

El mapa de localización sísmica (Figura 18) muestra que la distribución principal de los sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) o de fractura sigue un alineamiento de rumbo sureste-noroeste, el cual corresponde a una falla anteriormente identificada por Lavallée et al., (2009) y Rivera (2010) en la caldera del volcán Ubinas. En la figura 18, sobre los perfiles este-oeste y sur-norte, se distingue que la sismicidad está localizada entre la superficie del cráter y los 5.5 km de profundidad. Asimismo, la gran mayoría de sismos delinea sutilmente el conducto volcánico, el cual tiene una ligera inclinación hacia el oeste del cráter del volcán (perfil este-oeste). Entre los 5 km y 13.5 km de profundidad, la sismicidad es más dispersa y escasa. Se podría asumir que en esta área se ubicaría una cámara magmática más somera, tal como ha sido propuesta por Rivera et al., (2014).

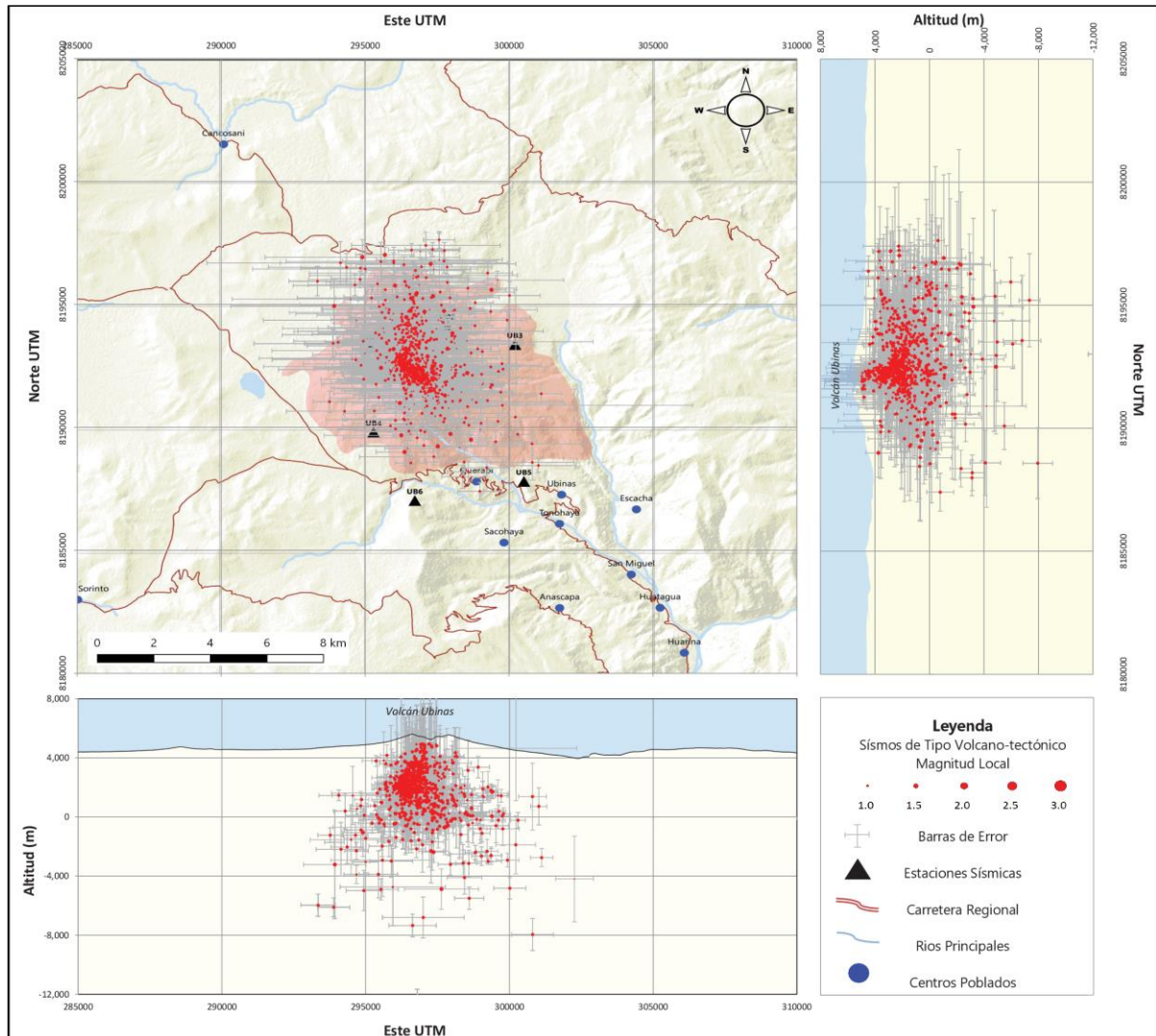


Figura 18.- Mapa de localización de sismos de tipo Volcano-Tectónico en el volcán Ubina ocurridos entre 1998–2019, obtenido con la aplicación del nuevo modelo de velocidades desarrollado en el presente estudio. Además, se detalla la ubicación en perfil de la sismicidad observada entre el año 1998 y 2019 para eventos mayores a M1.5. La actividad sísmica se concentra hasta aproximadamente 5 km de profundidad del volcán.

CAPÍTULO V: RESULTADOS DE ANÁLISIS SÍSMICOS EFECTUADOS EN EL VOLCÁN UBINAS

A continuación, se describen los estudios geofísicos realizados por el Instituto Geofísico del Perú en la región del volcán Ubinas y los resultados obtenidos.

5.1 ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA DEL PERIODO MARZO-ABRIL DE 1998

Para estudiar el comportamiento del volcán después de la crisis fumarólica de 1996, el IGP, en cooperación con el IRD de Francia, dispuso instalar en el año 1998 una red sísmica temporal de 8 estaciones sobre el Ubinas. Esta red funcionó desde el 14 de marzo hasta el 8 de abril de ese año. Como resultado de esta campaña, se obtuvieron una interesante cantidad de datos (Metaxian et al., 1998; Macedo et al., 2002; Taípe, 2006). El procesamiento de la data sísmica trató, básicamente, del análisis del contenido espectral, la forma de onda, la localización y del mecanismo de generación, todo esto usando programas computacionales y algoritmos adaptados para trabajar con la data sismovolcánica.

Se ha registrado una importante actividad sísmica ligada a la actividad del volcán Ubinas (771 eventos), principalmente asociada a la dinámica de fluidos que se evidencian por el gran número de señales sísmicas de tipo Largo Periodo (399 eventos) y Tornillo (110 eventos) que juntos representan el 66 % de la actividad total. El 31 % de los eventos corresponde al tipo Volcano-Tectónico (243 eventos), los cuales están asociados a la acumulación de esfuerzos y a la ruptura de rocas al interior o debajo del volcán.

La actividad superficial en aquel entonces se manifestó mediante la emisión intensa de gases (vapor de agua), con poco o casi nada contenido de cenizas que perduraron por algunos meses.

Los resultados de la localización de sismos muestran también que la actividad sísmica del volcán Ubinas es superficial y se alinea a lo largo de una falla de dirección N130° que atraviesa la caldera del volcán.

Finalmente, todos estos factores y las características encontradas en cada tipo de evento clasificado indican que la actividad sismovolcánica del Ubinas es principalmente controlada por la dinámica de los fluidos como ha sido propuesto anteriormente por Taipe (2006).

5.2 ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA ASOCIADA A LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN UBINAS EN 2006-2009

Este proceso eruptivo se inició el 25 de marzo de 2006. Inmediatamente después de suscitado el evento, el IGP puso en funcionamiento estaciones sísmicas analógicas muy próximas al volcán, las cuales fueron reemplazadas, a partir del 21 de abril de 2006, por dos estaciones digitales *Reftek*, con sismómetros *Guralp* CMG40T de banda ancha y tres componentes, instaladas sobre los flancos norte y sur del volcán. Posteriormente, el 24 de mayo de ese mismo año, se instala la estación telemétrica UB1 con un sismómetro *Kinematics*, modelo SS1, 1 Hz, cuyas señales fueron recepcionadas en la sede del IGP-Arequipa (Macedo et al., 2008). Posteriormente, se instalaron tres estaciones adicionales, denominadas UB2, UB3 y UB4.

El análisis de los registros sísmicos efectuado en el presente estudio ha permitido dividir el proceso eruptivo 2006-2009 en 3 periodos de actividad (Figura 19):

5.2.1 Primer periodo:

Este periodo comprende desde abril de 2006 a agosto de 2007, durante el cual se registró la mayor actividad sísmica de tipo Largo Periodo, asociada predominantemente al movimiento de fluidos volcánicos (magma, gases). Como consecuencia de esta actividad se generó el mayor número de explosiones volcánicas de alta energía. Durante los primeros meses de iniciado el periodo eruptivo (marzo, abril y mayo de 2006), la actividad sismovolcánica fue muy intensa.

Dentro de este periodo se han distinguido diversas etapas de actividad que son descritas a continuación:

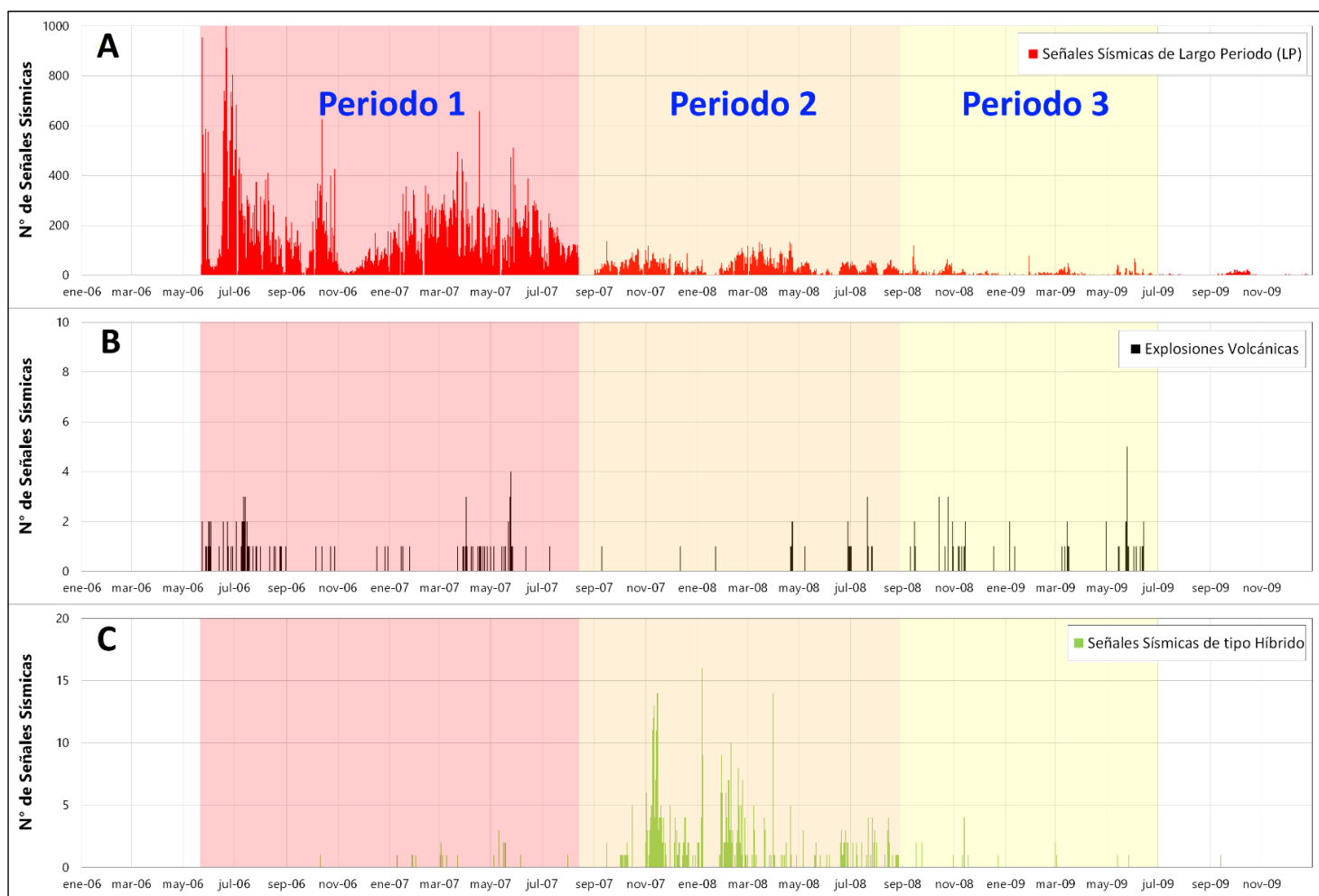


Figura 19.- Sismicidad registrada en el volcán Ubinas entre mayo de 2006 y diciembre de 2009, la cual fue dividida en tres periodos. A) En el periodo 1, las señales sísmicas de tipo Largo Periodo-LP (barras rojas), que estarían relacionadas al movimiento de fluidos volcánicos, fueron las más frecuentes; B) Señales de explosiones volcánicas (barras negras), las cuales inicialmente eran precedidas por enjambres sísmicos que contenían señales de tipo LP y; C) señales sísmicas de tipo Híbrido (barras verdes), probablemente asociadas al ascenso de magma

5.2.1.1 *Del 25 de marzo de 2006 (inicio de erupción) hasta el 24 de junio de 2006*

- Se registran pocos tremores; no obstante, su amplitud va incrementando al igual que su frecuencia de ocurrencia.
- Las explosiones vienen siempre precedidas por señales de tipo Largo Periodo (eventos precursores). En ocasiones, inmediatamente luego de la explosión, ocurren sismos de tipo Volcano-Tectónico.
- En comparación con las explosiones futuras, las explosiones de esta etapa presentan mayor energía.
- El día 19 de abril de 2006, el magma llega por primera vez a visualizarse en el fondo del cráter del volcán.
- Hubo apertura de los conductos por donde ascendieron los productos volcánicos.

5.2.1.2 *Del 24 de junio al 16 de julio de 2006*

- Ocurre muy poca actividad de tipo Tremor.
- Las explosiones ya no tienen eventos de tipo Largo Periodo como precursores.
- El número de explosiones aumenta. Se registran, algunas veces, 3 eventos por día. Sin embargo, el nivel de energía de estas explosiones decae notoriamente.
- Por otro lado, los datos de temperatura en superficie detectados por el satélite GOES (Universidad de Hawái) reflejan un ligero y sostenido incremento.
- El sistema volcánico funciona con conducto abierto.

5.2.1.3 *Del 16 de julio hasta fines de octubre de 2006*

- Se registra un incremento del flujo eruptivo.
- Aumentan notablemente los tremores y su energía, esta última hasta 10 veces su tasa de energía habitual.
- Aumento ligero de la energía de las explosiones.

- Las explosiones presentan nuevamente eventos tipo Largo Periodo (LP) precursores.

5.2.1.4 *Noviembre de 2006 en adelante*

- Se observan breves episodios de recuperación de la actividad.
- Hay largos periodos de relativa calma, con poca ocurrencia de explosiones y tremores. Sin embargo, ocurren episodios breves de aumento de actividad sísmica. Tales episodios se hacen cada vez más espaciados y de menor duración.
- La mayoría de las explosiones no tienen eventos de tipo Largo Periodo (LP) precursores o estas son débiles.
- Los eventos de tipo Largo Periodo (LP) disminuyeron notoriamente en número.
- En general, la energía diaria acumulada decrece de manera importante.

5.2.2 Segundo periodo:

Este periodo ocurrió entre los meses de septiembre de 2007 a septiembre de 2008, en el cual se registra un marcado decrecimiento en el número de las señales sísmicas de tipo Largo Periodo (LP); sin embargo, continuaron generándose explosiones, probablemente debido al incremento de eventos de tipo Híbrido (Figura 19C) asociados al ascenso de magma.

5.2.3 Tercer periodo:

Ocurrido desde octubre de 2008 a julio de 2009. En este periodo se hizo más notorio el decrecimiento del número de señales sísmicas, mientras que las explosiones fueron registradas esporádicamente. El último evento explosivo fue registrado el 14 de junio de 2009.

5.2.3.1 *Antenas Sísmicas*

Entre mayo a julio de 2009 se realizó un experimento en el volcán Ubina, desarrollado por especialistas del IRD de Francia, la Universidad de Dublín y

el IGP. Este consistió en la instalación de dos antenas sísmicas compuestas por arreglos de sismómetros de tres componentes, distribuidas en los flancos norte y noroeste del volcán Ubinas. Estas antenas tenían como objetivo realizar la localización hipocentral de explosiones volcánicas y de señales sísmicas de bajas frecuencias.

Los resultados principales de este estudio consisten en la identificación de dos fuentes distintas de explosiones volcánicas localizadas a diferentes profundidades en el conducto, separadas por 800 m una de la otra. Las altitudes promedio de estas fuentes fueron 3890 m s.n.m y 4810 m s.n.m (dentro del edificio volcánico), con un promedio de error de 390 m. La caldera está localizada a 5200 m s.n.m.; el fondo del cráter estuvo entre 200 m y 300 m debajo de la caldera. La fuente más superficial de los sismos estuvo sobre los 100 m a 200 m debajo de la superficie del cráter (Inza et al., 2014). Ver figura 21.

De manera general, se resalta que durante este proceso eruptivo (2006-2009), las señales sísmicas más importantes observadas corresponden a eventos de tipo Largo Periodo (LP), explosiones, tremores y también sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT), aunque estos últimos eventos ocurrieron en un número muy reducido. Las explosiones tuvieron la característica de incluir muy bajas frecuencias, entre 0.3 Hz y 0.9 Hz, y frecuentemente fueron precedidas por enjambres de sismos de tipo Largo Periodo (Macedo, 2010).

Durante este proceso eruptivo se registraron en total 162 explosiones, muchas de ellas precedidas por enjambres de sismos de tipo Largo Periodo. Estos sismos fueron analizados con métodos de pronósticos como el FFM (*Materials Failure Forescast Method*) y estudiados como una herramienta en la estructuración de un esquema de predicción ante las explosiones que acompañaron el proceso eruptivo (Machacca, 2012). Los resultados de este estudio indican que, entre 1 a 3 horas antes de la ocurrencia de la explosión, se registra un incremento significativo en la tasa de sismos de tipo Largo Periodo (figura 20), por lo que se considera a este tipo de señal como un evento precursor de explosiones.

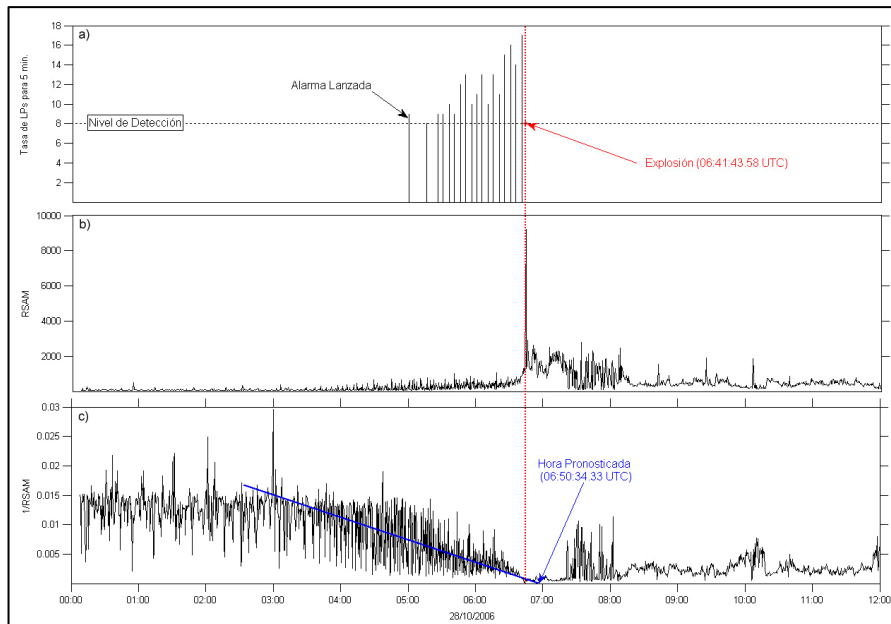


Figura 20.- Ejemplo de un caso exitoso de predicción para la explosión del 28/10/2006. (a) se activa la alarma, (b) el RSAM aumenta en función a la cercanía de la explosión, (c) la proyección de la pendiente negativa del $1/RSAM$ al eje de tiempo proporciona el posible momento de la explosión (Machacca, 2012).

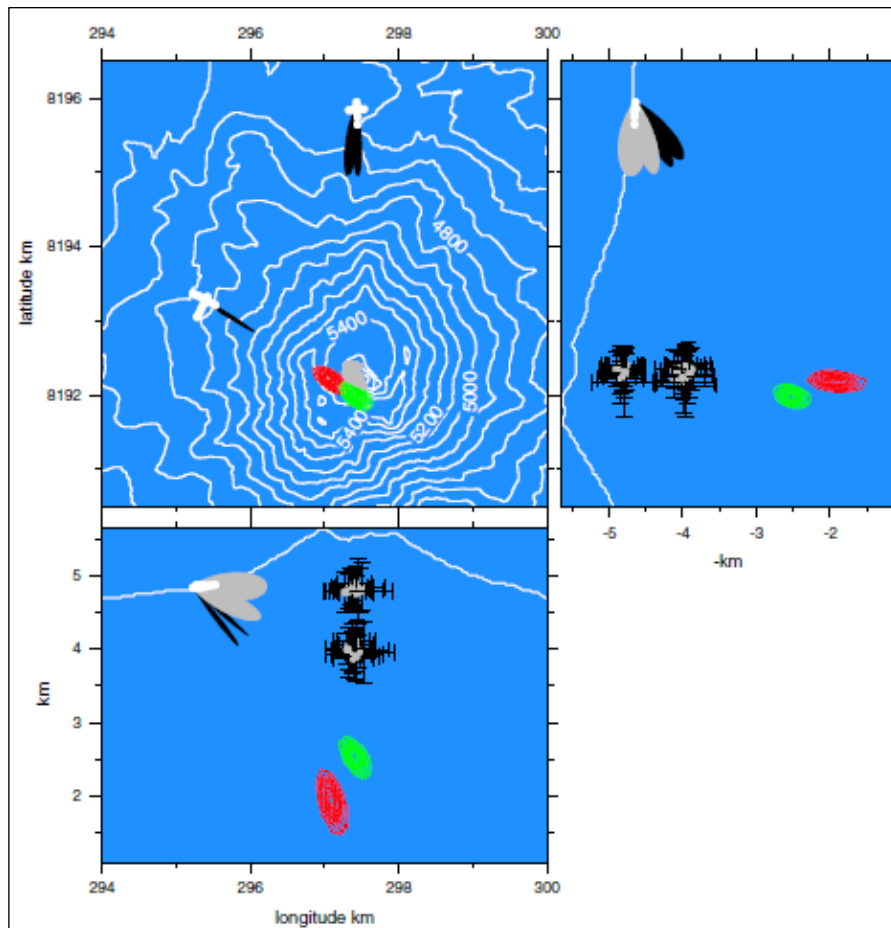


Figura 21. Mapa del volcán Ubina que muestra las direcciones de los vectores de baja velocidad y la solución de máxima probabilidad (contornos rojo y verde). Indica, también, la localización de las fuentes de los eventos de Largo Periodo. Las localizaciones de las 16 explosiones son mostradas en puntos grises con sus barras de error (Inza et al., 2014).

5.3 ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA ASOCIADA A LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN UBINAS EN 2013-2017

Cuatro años y 2 meses después de haber finalizado el último proceso eruptivo, en marzo de 2013 se registró un incremento paulatino de las señales sísmicas de tipo Tornillo y Volcano-Tectónicos (VT) en el Ubinas que habrían estado asociadas a la circulación de fluidos volcánicos y al incremento de la presión interna debajo el edificio volcánico, respectivamente.

Ocho meses antes de la primera explosión ocurrida el 2 de septiembre de 2013, el análisis de los registros sísmicos de la estación UBI1 mostró en promedio entre 10 a 15 sismos de tipo Largo Periodo por día. Además, en ese periodo, las señales de tipo Volcano-Tectónico aumentaron progresivamente de 1 a 20 sismos por día, lo que correspondería a una etapa de presurización del sistema magmático del Ubinas.

De acuerdo con el registro de 5 tipos de sismos particulares: (A) Volcano-Tectónico y Tornillo, (B) Tremor Espasmódico, (C) sismos de tipo Híbrido y (D) explosiones, los cuales sucedieron de manera secuencial, el proceso eruptivo 2013–2017 fue dividido en 4 periodos (Figura 22). Esta secuencia (ABCD) conforma el patrón sísmico que es insumo fundamental en el pronóstico de erupciones volcánicas (Del Carpio et al., 2016a). Los 4 periodos identificados son los siguientes:

5.3.1 Periodo 1:

Comprendido entre marzo a octubre de 2013 (Figura 22), se caracteriza por el incremento de sismos de tipo Volcano-Tectónico con ocurrencias máximas de 26 eventos diarios, mientras que las señales de tipo Tornillo se registraron más frecuentemente de lo usual, especialmente entre el 8 de marzo y 15 de junio (33 eventos por día). En este periodo ocurrieron 10 explosiones (Fase D) de tipo freático; probablemente, por esta razón no se registró importante sismicidad de tipo Híbrido que comprendería la fase C. Finalizada la fase explosiva, el 7 de septiembre, se registra actividad de tipo Tremor (Fase B).

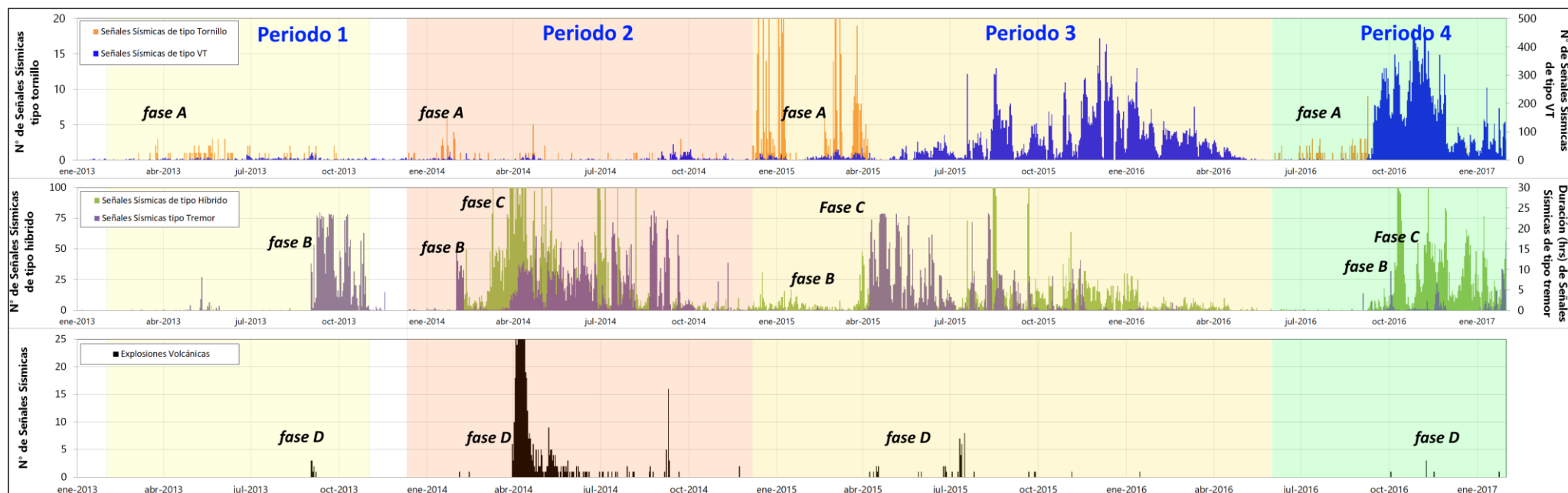


Figura 22.- Registro sísmico del volcán Ubinas del proceso eruptivo 2013-2017, el cual, de acuerdo al desarrollo del pronóstico de erupciones volcánicas, ha sido dividido en 4 periodos (sombras de color). En cada uno de estos periodos se han registrado las fases ABCD que integran el patrón sísmico, siendo D correspondiente al registro de explosiones volcánicas

5.3.2 Periodo 2:

Comprende desde diciembre de 2013 al 23 de noviembre de 2014 (Figura 22). Desde inicios de este periodo y hasta el 31 de enero de 2014, se registró un incremento de sismos de tipo Volcano-Tectónico que presentaron umbrales máximos de 26 eventos por día y un pequeño grupo de señales de tipo Tornillo conformado por 26 señales (fase A), similar a lo observado en 2013. Entre el 1 al 8 de febrero de 2014 se registraron eventos de tipo Tremor hasta por 24 horas consecutivas (fase B). Las señales sísmicas de tipo Híbrido (fase C) empezaron a registrarse inmediatamente después de culminada la ocurrencia de eventos de tipo Tremor (fase B). Entre el 1 y 31 de marzo de 2014, el promedio de ocurrencia de eventos de tipo Híbrido se incrementó hasta un máximo de 182 eventos por día con un pico de energía máxima de 29 Megajoules (MJ). Precisamente, el último día de marzo se inicia la fase explosiva de este periodo (Figura 23) considerada como la fase D. Durante esta fase se registró el mayor número de explosiones volcánicas (604 eventos), además de otras señales sísmicas asociadas con el proceso eruptivo del volcán Ubinas.

5.3.3 Periodo 3:

Ocurrido entre el 7 de diciembre de 2014 al 7 de noviembre de 2015 (Figura 22). En este periodo, los niveles de energía sísmica para los diferentes tipos de sismicidad que comprenden las fases del pronóstico de erupciones (ABCD) disminuyeron con respecto a los dos periodos anteriores. En ese sentido, las explosiones volcánicas registradas después de observado el patrón sísmico (Volcano-Tectónico, Tornillo, Tremor e Híbrido) tuvieron energías bajas con máximos de 28 MJ.

5.3.4 Periodo 4:

Ocurrido entre el 4 de junio de 2016 al 24 de enero de 2017 (Figura 22), este periodo se caracterizó por el registro de señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónico y Tornillo con valores promedio por debajo de 4 eventos diarios. Los eventos de

tipo Tremor fueron registrados únicamente el día 4 de septiembre durante 4 horas, mientras que la sismicidad de tipo Híbrido alcanzó valores máximos de 18 eventos por día. Luego, desde el 3 de octubre de 2016, se registra la ocurrencia de un total de 8 explosiones.

Finalmente, el 24 de enero de 2017 se registró la última explosión de este proceso eruptivo, que tuvo una energía de 0.2 MJ. Esta explosión marca el final de la erupción. En los meses posteriores se registró una marcada disminución en el número y energía de todos los tipos de eventos sismovolcánicos registrados.

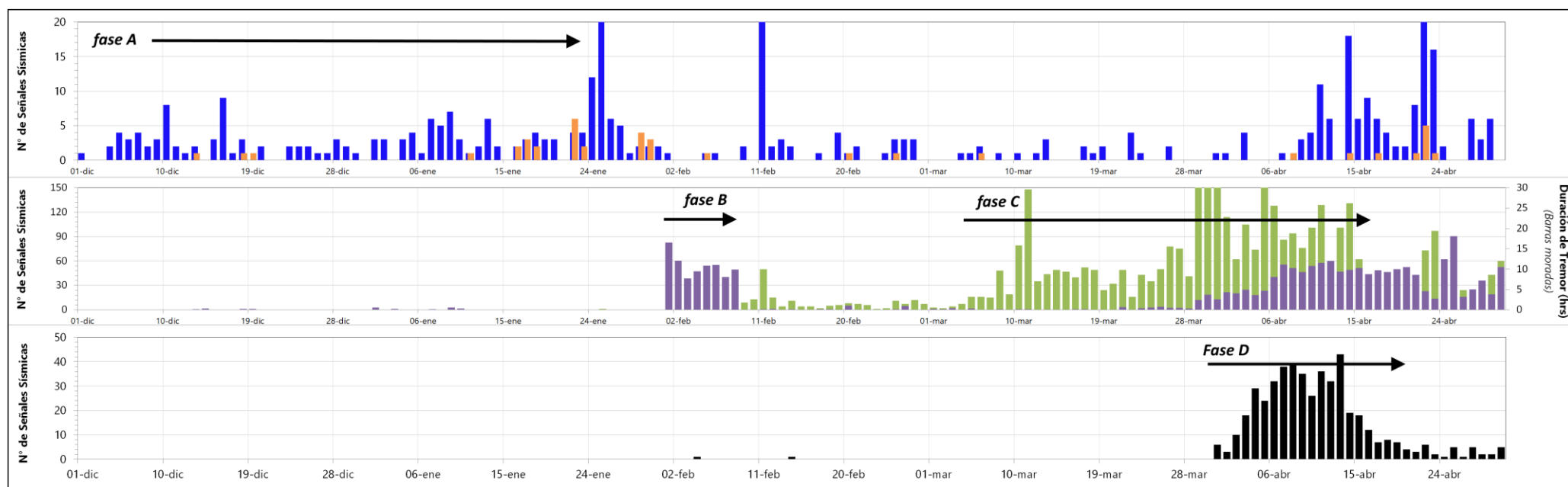


Figura 23.- El gráfico muestra la sismicidad ocurrida en el volcán Ubinas entre diciembre de 2013 y abril de 2014, que corresponde a la etapa de mayor actividad explosiva del periodo 2. En la fase A (diciembre de 2013–enero de 2014) ocurrió un incremento en el número de sismos de tipo Volcano-Tectónico y eventos de tipo Tornillo. La fase B (del 1 al 8 de febrero) corresponde al registro de Tremor. La fase C (del 9 de febrero al 31 de marzo) se caracteriza por el incremento de sismos de tipo Híbrido hasta el inicio de las explosiones, tanto en número y energía. Finalmente, durante la fase D (desde el 31 de marzo) se registra la actividad explosiva, siendo abril el mes con la mayor tasa de explosiones y emisiones de tefras en todo el proceso eruptivo 2013-2017.

5.4 ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA DEL PERIODO ENERO 2017 - DICIEMBRE 2018

Después de la última explosión del anterior proceso eruptivo, ocurrida el 24 de enero de 2017, la actividad sísmica del volcán Ubinas mostró una importante y continua disminución en el número y energía de los eventos sismovolcánicos (figura 24). En efecto, la sismicidad registrada entre enero y marzo mantuvo una tasa promedio de 76 sismos por día; sin embargo, para el trimestre de abril a junio de 2017 estos valores disminuyeron hasta en un 92 % y alcanzaron un promedio de 6 sismos por día. Lo más resaltante de ese trimestre (abril-junio) fue la ocurrencia de señales sísmicas de tipo Tornillo. Luego de esta actividad se observó la presencia de eventos de tipo Volcano-Tectónico e Híbrido; no obstante, no se registraron explosiones volcánicas.

Entre julio y septiembre de 2017, los valores sísmicos continuaban disminuyendo hasta registrar 4 eventos por día. Durante ese mismo periodo se observó una secuencia sísmica similar a la registrada en junio; es decir, la aparición de eventos Tornillo, específicamente entre el 23 de julio al 2 de agosto de 2017. Posteriormente, a finales de agosto se incrementó el número de eventos de tipo Híbrido, pero la fase explosiva no se desarrolló.

Durante el último trimestre de 2017 y hasta diciembre de 2018, la tasa promedio de eventos sismovolcánicos se mantuvo entre 1 y 2 sismos por día, asociados, en un 99 %, a eventos de tipo Volcano-Tectónico. Los sismos relacionados a la circulación de fluidos volcánicos (Largo Periodo, Tornillo, Híbrido y Tremor) fueron muy escasos, lo cual confirma los niveles bajos de actividad que presentaba el volcán Ubinas (figura 24).

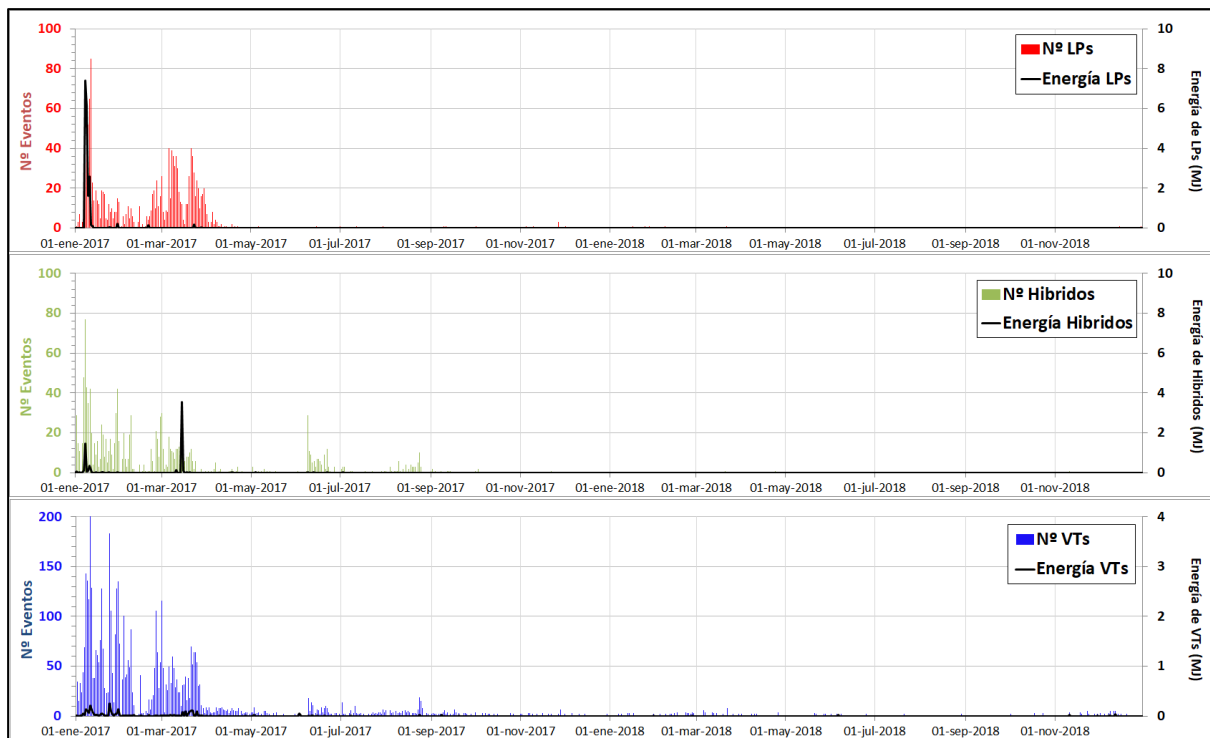


Figura 24.- El gráfico muestra la sismicidad ocurrida entre enero de 2017 y diciembre de 2018. Durante el primer trimestre de 2017, la sismicidad, aunque en descenso, mantuvo un promedio de 72 sismos por día. Sin embargo, a partir de abril de ese mismo año, la tasa de registro descendió en un 92 %. Durante el 2018, los niveles de actividad eran bajos, registrándose entre 1 y 2 eventos por día.

5.5 ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA ASOCIADA A LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN UBINAS EN 2019

Luego de culminado el último proceso eruptivo (septiembre de 2013-enero de 2017), el Ubinas presentó, desde finales de enero de 2017 a inicios de 2019, niveles bajos de actividad traducidos en emisiones leves de gases (principalmente vapor de agua) expulsadas eventualmente por el cráter del volcán. Durante este tiempo se registraron entre 1 y 2 eventos sísmicos por día. Asociado a ello, las imágenes satelitales del sistema “MIROVA” no mostraron anomalías.

Este último proceso eruptivo, de acuerdo al registro completo de secuencias sísmicas que conforman el patrón de pronóstico de erupciones (ABCD), ha sido dividido en 2 periodos (Figura 25), los cuales son detallados a continuación:

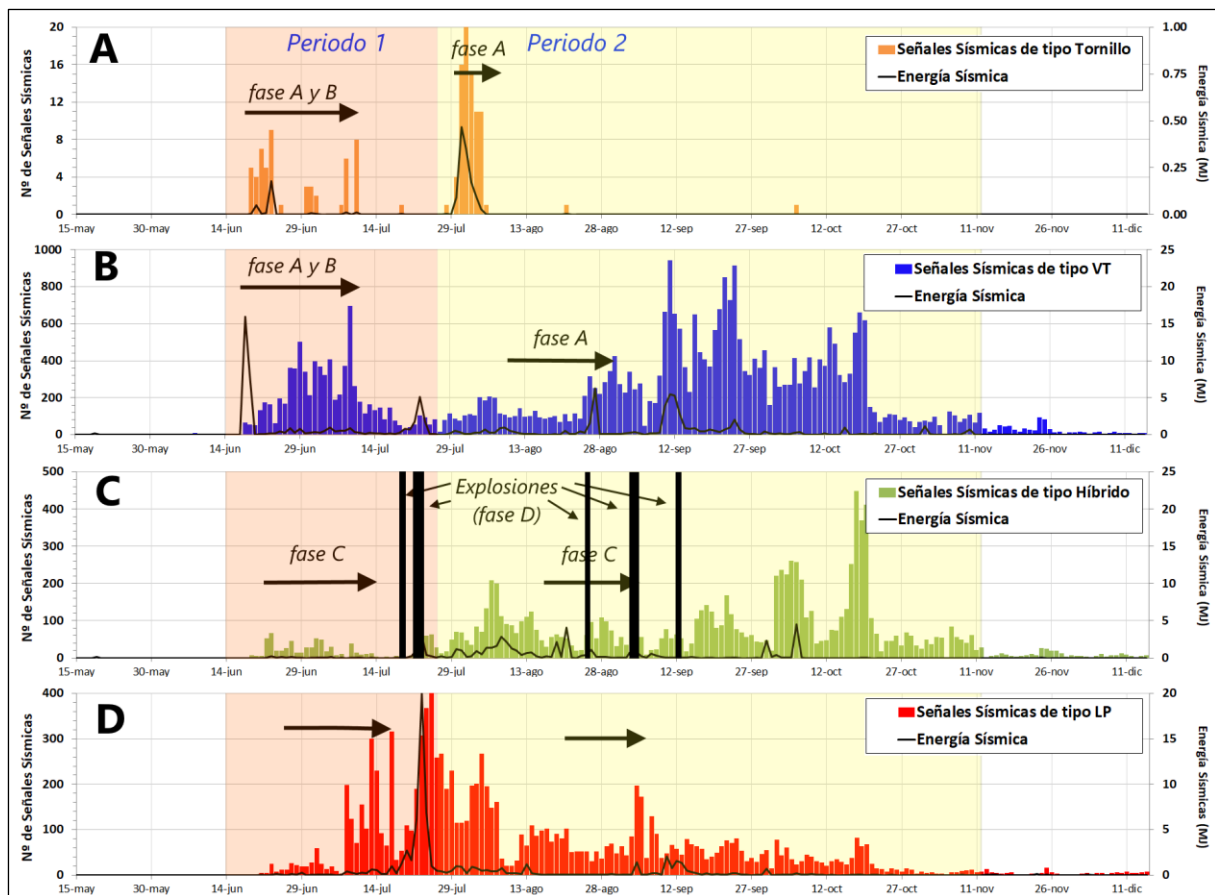


Figura 25.- Actividad sísmica registrada entre el 15 de mayo y 15 de diciembre de 2019. En A y B se observa que desde el 18 de junio se registran señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónico y Tornillo. En C, las señales de tipo Híbrido y explosiones. En D se presentan los eventos de tipo Largo Periodo que mostraron un importante incremento. Finalmente, el 19 de julio se registraba la mayor actividad explosiva de esta última erupción.

5.5.1 Periodo 1 (18 de junio al 23 de julio de 2019)

El día 18 de junio de 2019 se detectó un enjambre de sismos de tipo Volcano-Tectónico, localizado bajo el edificio volcánico a una profundidad aproximada de 7.5 km. Aunado a ello, desde el 19 de junio y hasta el 10 de julio se registraron señales sísmicas de tipo Tornillo, las mismas que se incrementaron a razón de 2 a 8 eventos por día. Esta actividad corresponde el desarrollo de la fase A del pronóstico de erupciones. Entre el 21 al 23 de junio se registra actividad de tipo Tremor (Fase B) que acumuló un total de 5.5 h de duración. El día 24 de junio se registra una señal tipo Tremor que fue correlacionada con una pequeña emisión de cenizas. Estas se elevaron hasta un poco más de 1.5 km de altura y fueron dispersadas hacia el sector norte del volcán. Este hecho marca el inicio de este

último proceso eruptivo. En ese mismo periodo, del 19 de junio al 13 de julio, se registró un incremento en el número y la energía de las señales sísmicas de tipo Híbrido, con la ocurrencia promedio de 23 eventos por día (Fase C). La actividad explosiva (Fase D) se inició el 19 de julio, con el registro de tres importantes explosiones que liberaron una energía sísmica máxima de 64 MJ (Figura 25). En ese día, el Ubinas generó una columna eruptiva sostenida que sobrepasó los 5000 m de altura sobre la cima del volcán (Del Carpio et al., 2019a).

Durante el desarrollo de esta última erupción, y a diferencia de la anterior actividad 2013-2017, las señales de tipo Largo Periodo brindaron información sísmica que fue correlacionaba con la evolución del proceso eruptivo. Este tipo de sismicidad, que estaría asociada al movimiento de fluidos magmáticos, registró un súbito incremento en el número y energía de sus valores entre los días 8 de julio y 7 de agosto. En promedio, fueron analizados 183 eventos por día con energías máximas de 20 MJ, generados durante el mayor periodo explosivo desarrollado entre el 19 y 23 de julio.

5.5.2 Periodo 2 (28 de julio y 12 de noviembre de 2019)

Entre el 28 de julio y 4 de agosto de 2019 (figura 25), se registró un grupo de 79 señales sísmicas de tipo Tornillo (fase A), a razón de 8 eventos por día, mientras que la sismicidad de tipo Volcano-Tectónico se mantuvo con una ocurrencia diaria de 118 eventos, con magnitudes menores a M2.2. Entre el 28 de julio al 24 de agosto, por espacio de 8 horas, se registró actividad tremórica (fase B). Posteriormente, entre el 29 de julio y el 12 de noviembre, se observó un nuevo incremento en el registro de las señales sísmicas de tipo Híbrido (fase C). Dentro del tiempo en el que se presentó esta fase se generaron 5 explosiones volcánicas, la última de ellas fue registrada el 12 de setiembre. Ver figura 25.

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El Instituto Geofísico del Perú ha registrado instrumentalmente el desarrollo de los tres últimos episodios eruptivos del volcán Ubinas, ocurridos entre los años 2006 hasta 2019, es decir, el 12 % del total de sus erupciones registradas en épocas históricas (desde el año 1500 d. C.).

Durante los tres últimos periodos eruptivos ocurridos entre los años 2006 y 2019, se han registrado y clasificado un total de 594 705 sismos de diferentes tipos a través de la red geofísica del IGP, los cuales han sido generados al interior del volcán. Del total de eventos identificados, se puede concluir que el 38 % de sismos corresponden a eventos de tipo Volcano-Tectónico (VT), los cuales están relacionados al fracturamiento de rocas que ocurre al interior del volcán, mientras que el 32.5 % corresponde a sismos de tipo Largo Periodo y Tornillo asociados al paso de fluidos volcánicos como vapor de agua y otros gases. Además, se han registrado 852 explosiones, así como 38 979 sismos de tipo Híbrido que estarían relacionadas al ascenso de magma. Se ha observado, también, un incremento sustancial de la energía de tipo Híbrido días previos al inicio de la fase explosiva, lo cual tiene relación lineal con la detección de anomalías térmicas (puntos de calor) por parte del sistema satelital MIROVA.

También, debe acotarse que durante los tres episodios eruptivos el Ubinas no ha erupcionado de la misma forma, pues existen variaciones en su comportamiento sismovolcánico y en las características eruptivas de cada proceso volcánico.

A continuación, se detallan las características de la actividad sismovolcánica registrada y analizada durante los tres últimos procesos eruptivos del volcán Ubinas. También se precisan los modelos fuente asociados y una interpretación general de lo que significa el registro de dicha sismicidad.

Finalmente, se expresan los niveles de actividad mínima observados durante periodos de tranquilidad volcánica, los cuales definen la línea base de referencia durante etapas no eruptivas.

6.1 ACTIVIDAD VOLCÁNICA DE 1998

Durante este periodo de actividad se han registrado 771 eventos sísmicos ligados a la actividad dinámica del volcán. Principalmente, se registraron un gran número de señales sísmicas de tipo Largo Periodo (399 eventos) y Tornillo (110 eventos), que representan el 66 % de la actividad total asociada a la circulación de fluidos al interior del volcán. Además, se registraron eventos de tipo Volcano-Tectónico (243 eventos), que representan un 31 %, los cuales estuvieron relacionados a la acumulación de esfuerzos y a la ruptura de rocas al interior o debajo del volcán.

La actividad superficial en aquel entonces se manifestó mediante la emisión intensa de gases, con poco o casi nada de contenido de cenizas que perduró por algunos meses. Probablemente, esta actividad se debió a la inyección de un pequeño volumen de magma que perturbó el sistema hidrotermal, pero dicho material no logró ser emitido.

Por otro lado, los resultados de la localización de sismos muestran también que la actividad sísmica del volcán Ubinas es superficial. Los sismos se alinean a lo largo de una falla de dirección N130, que atraviesa la caldera; además, esta actividad sísmica está delimitada verticalmente por las estructuras volcánicas, como la caldera antigua (sepultada por lavas recientes del Ubinas) y la caldera de la cumbre reciente. Estos factores estarían configurando un sistema favorable para la ocurrencia de eventos Tornillo. Finalmente, todos estos factores y las características encontradas en cada tipo de evento clasificado indican que la actividad sismovolcánica del Ubinas es principalmente controlada por la dinámica de los fluidos en el interior del sistema hidrotermal, como ha sido propuesto anteriormente por Taipe (2006).

6.2 PROCESO ERUPTIVO 2006-2009

En la primera erupción del presente siglo, la cual se inició el 25 de marzo de 2006, no se contaba con información sísmica previa; sin embargo, durante la campaña sísmica realizada en 1998 (8 años antes) se había registrado sismicidad de tipo Volcano-Tectónico y Tornillo que estaría relacionada a procesos de presurización del sistema magmático interno del volcán.

El análisis de los registros sísmicos efectuado en el presente estudio ha permitido dividir el proceso eruptivo 2006-2009 en 3 periodos de actividad:

Primer periodo: ocurrido entre abril de 2006 a agosto de 2007, durante el cual se registró la mayor actividad sísmica de tipo Largo Periodo asociada predominantemente al movimiento de fluidos volcánicos (magma, gases). Como consecuencia de esta actividad se generó el mayor número de explosiones volcánicas de alta energía. El 19 de abril, el magma alcanza por primera vez la superficie del cráter del volcán, taponeándolo por algunos días.

Tras el inicio del proceso eruptivo, no se registraron señales sísmicas de tipo Tornillo debido, probablemente, a que la fuente que generaba este tipo de sismicidad (fisuras, fracturas, grietas) se destruyó o cambio durante los primeros meses de la erupción.

Entre mayo de 2006 y julio de 2007, se registró un total de 88 026 señales sísmicas: el 87.1 % de estas correspondió a eventos de tipo Largo Periodo. Durante ese periodo se registró un total de 92 explosiones, las que algunas veces fueron seguidas por actividad tremórica asociada a la expulsión de material magmático (cenizas).

Asimismo, durante 2006, en el primer año de actividad, la ocurrencia de eventos de tipo Largo Periodo estaba estrechamente asociada con el registro de explosiones. Estos eventos Largo Periodo precedían por minutos y horas a las explosiones y se registraban en forma de enjambres sísmicos (Machacca, 2012) (figura 26). La presencia de este tipo de señales estaba coherentemente correlacionada con el proceso eruptivo, principalmente durante el primer periodo de esta erupción.

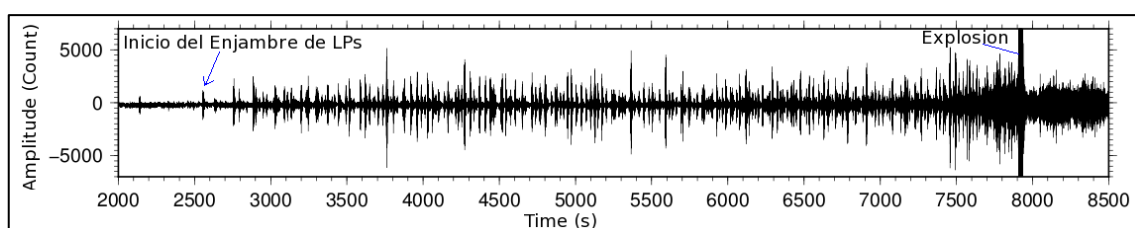


Figura 26.- Enjambre de eventos de tipo Largo Periodo registrado antes de la explosión del 31 de agosto de 2006 a las 10:11:49 UTC. El enjambre se presenta aproximadamente una hora y media antes de la explosión y comparte características sísmicas (forma de onda, duración, frecuencia, etc.) muy similares.

A partir de agosto de 2007, la actividad sísmica registró un marcado descenso en cuanto al número de eventos analizados mensualmente; sin embargo, el número de explosiones aún era

significativo, probablemente debido al ascenso de nuevo material magmático representado por la ocurrencia de eventos de tipo Híbrido registrados entre octubre de 2007 y agosto de 2008.

Además, inmediatamente después del registro de explosiones volcánicas se registraron tremores espasmódicos asociados a la emisión de cenizas. Durante esta erupción, el registro de tremores armónicos fue escaso y no evidenció relaciones claras con la ocurrencia de explosiones.

Segundo periodo: ocurrió entre septiembre de 2007 y septiembre de 2008, en el cual se registró un marcado decrecimiento en el número de las señales sísmicas de tipo Largo Periodo (LP), ligado a una menor circulación de fluidos magmáticos (magma, gases). Sin embargo, continuaron generándose explosiones, relacionadas probablemente al incremento de eventos de tipo Híbrido. Aunque estas señales no fueron representativas durante la erupción, los registros más importantes de eventos de tipo Híbrido fueron observados entre octubre de 2007 a agosto de 2008 y podrían haber estado relacionados con nuevos ascensos de magma que terminaron desencadenando actividad explosiva con intensas emisiones de ceniza

Tercer periodo: ocurrió entre octubre de 2008 a julio de 2009. Durante este periodo se hizo más notorio el decrecimiento del número de señales sísmicas, mientras que las explosiones fueron registradas esporádicamente. El último evento explosivo fue registrado el 14 de junio de 2009.

El registro de explosiones era escaso y esporádico, lo cual fue una evidencia del final de este proceso.

6.3 PROCESO ERUPTIVO 2013–2017

En la etapa preeruptiva, ocurrida meses antes del inicio de la erupción, se registró el incremento de sismos tipo Volcano-Tectónico ligado a procesos de ruptura de rocas ocurridos debajo del volcán. Asimismo, se registraron varias señales sísmicas de tipo Tornillo ligadas a la presurización del sistema magmático interno del volcán. El registro e incremento de la actividad de ambos eventos es considerado como un precursor de erupciones volcánicas.

Este proceso eruptivo ha sido dividido en cuatro periodos:

Primer periodo (marzo a octubre de 2013): caracterizado por el incremento de sismos de tipo Volcano-Tectónico con la ocurrencia máxima de 26 eventos diarios. Igual comportamiento se apreció con respecto a las señales de tipo Tornillo, especialmente entre el 8 de marzo y 15 de junio (33 eventos por día). Inmediatamente después fueron detectados eventos de tipo Largo Periodo. El modelo fuente que explica la generación de este tipo de sismicidad está asociada con el relleno de cavidades o conductos por fluidos provocados por cambios abruptos en la estructura rellena (Bean et al., 2013). Luego, ocurrieron 10 explosiones (Fase D) de tipo freático con la emisión de cenizas y gases. Las explosiones freáticas son generadas por la interacción directa del magma con el sistema hidrotermal cuando existe destrucción del sello (Lesley, 2013). Probablemente, por esta razón, no se registró importante sismicidad de tipo Híbrido que se genera en los últimos kilómetros del conducto antes de llegar a la superficie y que comprendería la fase C.

Finalizada la fase explosiva, el 7 de septiembre se registra actividad de tipo Tremor (Fase B). El modelo fuente propuesto indica que un cuerpo de magma en ascenso hacia la superficie influye en el sistema hidrotermal del volcán, lo que genera un mayor movimiento y circulación de fluidos traducido como una vibración sísmica continua y prolongada. Esta fase puede durar horas o incluso días y dependería del volumen de magma, su temperatura, la cantidad de agua almacenada en el sistema hidrotermal, etc. En el volcán Ubinas, mediante la correlación de la señal sísmica de tipo Tremor con datos de campo, se ha evidenciado que inmediatamente después de generarse una explosión se observaron emisiones de ceniza y gases.

Segundo periodo (diciembre de 2013 al 23 de noviembre de 2014): durante el inicio de este periodo y por espacio de dos meses, se registró un incremento de sismos de tipo Volcano-Tectónico. Estos presentaron umbrales máximos de 26 eventos por día, además del registro de un pequeño grupo de señales de tipo Tornillo (26 señales), actividad ligada a la presurización del sistema magmático y a la ruptura de rocas debajo el volcán. Entre el 1 al 8 de febrero de 2014, se registraron eventos de tipo Tremor hasta por 24 horas consecutivas (fase B). Las señales sísmicas de tipo Híbrido (fase C) empezaron a registrarse inmediatamente después de culminada la ocurrencia de eventos de tipo Tremor (fase B). Las señales sísmicas de tipo Híbrido

están asociadas al ascenso de magma en el conducto desde profundidades someras, aproximadamente a partir de 2 km de profundidad bajo el cráter del volcán Ubinas. Entre el 1 y 31 de marzo de 2014, el promedio de ocurrencia de eventos de tipo Híbrido se incrementó hasta en 182 eventos por día, con un pico máximo de energía de 29 MJ. Ese día se inició la fase explosiva (Figura 23) y durante abril de 2014 se registraron 472 explosiones volcánicas.

Durante el segundo periodo (2014), se observó la mayor ocurrencia de tremores armónicos y una mayor cantidad de explosiones volcánicas, sin relación clara entre ambos eventos. Las explosiones podían ser precedidas, o no, y podían ser seguidas, o no, por señales sísmicas de tipo Tremor Armónico. Es probable que las señales de tipo Tremor Armónico estén relacionadas al ascenso de magma en un medio libre, es decir, sobre un conducto volcánico más abierto.

Tercer periodo (7 de diciembre de 2014 al 7 de noviembre de 2015): en este periodo, los niveles de energía sísmica para los diferentes tipos de sismicidad disminuyeron con respecto a los dos periodos anteriores. En ese sentido, las explosiones volcánicas registradas después de observado el patrón sísmico (VT, Tornillo, Tremor e Híbrido) tuvieron energías bajas, con máximos de 28 MJ.

Cuarto periodo (4 de junio de 2016 al 24 de enero de 2017): se caracterizó por el registro de señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónico y Tornillo, con valores promedio por debajo de 4 eventos diarios. Los eventos de tipo Tremor fueron registrados únicamente el día 4 de septiembre durante 4 horas; la sismicidad de tipo Híbrido alcanzó valores máximos de 18 eventos por día. Luego, desde el 3 de octubre de 2016 se registró la ocurrencia de un total de 8 explosiones. La última de ellas ocurrió el 24 de enero de 2017

En los periodos 2, 3 y 4 de este proceso eruptivo se han registrado las fases A, B, C y D del pronóstico de erupciones. La diferencia entre los periodos fue el nivel de energía sísmica generada por cada fase, la misma que decaía de periodo a periodo.

Cabe indicar que en este proceso eruptivo 2013-2017 no se registró el mismo patrón de señales de tipo Largo Periodo registrado en forma de enjambre que precedía la ocurrencia de explosiones durante el proceso eruptivo de 2006-2009. El registro de las señales de tipo Largo Periodo durante la erupción de 2013-2017 no ha aportado información relevante en la

evolución del proceso eruptivo en comparación con lo observado durante 2006-2009. Esta variación podría ser explicada por un posible cambio en la morfología de las cavidades, fisuras o conducto volcánico, las cuales habrían sido selladas, destruidas o deformadas a lo largo del desarrollo del proceso eruptivo 2006–2009 e inicios del proceso 2013-2017. No obstante, la sismicidad de tipo Híbrido, relacionada al ascenso de magma antes de la fase explosiva, ha aportado valiosa información en el pronóstico de los periodos eruptivos de esta erupción.

Durante la actividad eruptiva 2013-2017, el número y energía de los sismos de tipo Híbrido fueron exitosamente correlacionados con las detecciones de anomalías térmicas observadas por el sistema satelital MIROVA (Coppola et al., 2015; Del Carpio et al., 2019c), lo que contribuyó en el pronóstico de erupción volcánica (Figura 27).

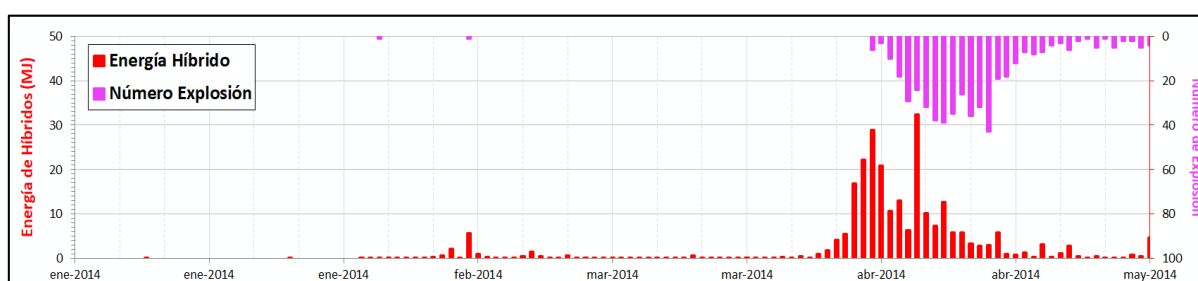


Figura 27.- Se observa el incremento de la energía sísmica de los sismos de tipo Híbrido (barras rojas) antes del inicio de la mayor fase explosiva (barras magenta) de la erupción ocurrida en el año 2014.

6.4 PROCESO ERUPTIVO 2019

Meses antes del inicio de este proceso eruptivo, la actividad sismovolcánica del Ubinas se caracterizaba por el registro diario de 1 y 2 señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónico. Este escenario cambio el 18 de junio de 2019 con el registro en 75 minutos de un enjambre de sismos VT o fractura conformado por 33 eventos (Del Carpio et al., 2019a). Luego, el 19 de junio se registró el incremento de señales de tipo Tornillo, precursoras de erupciones. Uno de los modelos fuente para este tipo de sismo es explicado mediante un resonador relleno de fluido en una dimensión (*organ pipe*), el cual genera los picos espectrales uniformemente espaciados del Tremor Armónico (Alvarado et al., 1997; Benoit & McNutt, 1997; Garcés et al., 1998)

Durante este proceso eruptivo, la sismicidad de tipo Largo Periodo e Híbrido estuvo relacionada al incremento de la circulación de fluidos volcánicos y al ascenso de magma;

ambos tipos de señales registraron un incremento en número y energía antes del inicio de la fase explosiva ocurrida el 19 de julio. Entre el 19 y 23 de julio, la energía de las explosiones llegó a un máximo de 64 MJ, principalmente el día 19 de julio, registrada a las 07:48 UTC. Este día, las emisiones de gases y cenizas ocurrieron de manera continua por más de 8 horas formando columnas eruptivas por encima de los 5.5 km sobre la cima del volcán. Las cenizas fueron dispersadas por los vientos a distancias superiores a 250 km, afectando las regiones de Moquegua, Tacna y Puno. El 19 de julio de 2019 se registró la mayor actividad explosiva ocurrida durante los últimos periodos eruptivos (2006-2009; 2013-2017; 2019).

Luego del inicio del registro de explosiones sucedido en julio de 2019, se empezaron a observar tremores armónicos. Nuevamente, no se ha encontrado relación física con las explosiones registradas hasta el 12 de septiembre de ese año. Entre octubre y noviembre de 2019, la actividad sísmica de tipo Volcano-Tectónico e Híbrido, relacionada a procesos de ruptura y al ascenso de magma, respectivamente, fue considerada como de nivel moderado. Se registraron un mínimo de 2 y un máximo de 125 sismos VT y entre 1 a 85 eventos de tipo Híbrido diariamente. En diciembre de 2019, los valores de la actividad sísmica continuaron disminuyendo a niveles por debajo de los 7 eventos VT y 2 Híbrido por día.

6.5 LÍNEA BASE DE LA ACTIVIDAD SISMOVOLCÁNICA

Realizar el monitoreo permanente de la actividad sísmica en volcanes activos como el Ubinas es vital para el pronóstico de erupciones. De acuerdo a los resultados del análisis sísmico de los procesos eruptivos y periodos de reposo del volcán, se ha definido un nivel base de actividad en el comportamiento dinámico de este volcán. En efecto, finalizada la primera erupción del presente siglo, ocurrida el 14 de junio de 2009 (Anca, 2013), se instauró un periodo de calma sísmica (figura 28, zona A), el cual se mantuvo hasta marzo de 2013, fecha en la cual se empezó a registrar sismos de tipo Volcano-Tectónico y Tornillo. Durante este lapso de tiempo se registró un promedio de 238 sismos por mes, a razón de 6 eventos por día. El número de señales sísmicas de tipo Largo Periodo, relacionadas la dinámica de fluidos, se incrementaba durante la temporada de lluvias (diciembre-abril), posiblemente debido al aporte de agua meteórica al sistema hidrotermal del volcán Ubinas.

Posteriormente, entre abril de 2017 y junio de 2019, se registró un segundo periodo de calma (Figura 28, zona B). El registro sísmico promedio en esta etapa ascendió a 10 señales de tipo Volcano-Tectónico por día y hasta un mínimo de 1 evento diario. De acuerdo a ambos periodos de tranquilidad volcánica, se puede definir como nivel base de referencia sismovolcánica la observación de entre 6 y 10 eventos por día. Además, durante periodos de calma o reposo, la sismicidad de tipo Tremor en el volcán Ubinas es escasa o nula. Este reconocimiento es importante, ya que permite definir el grado de actividad sísmica mínima a partir del cual se puede inferir un comportamiento más dinámico o con aporte de magma que puede desencadenar erupciones explosivas.

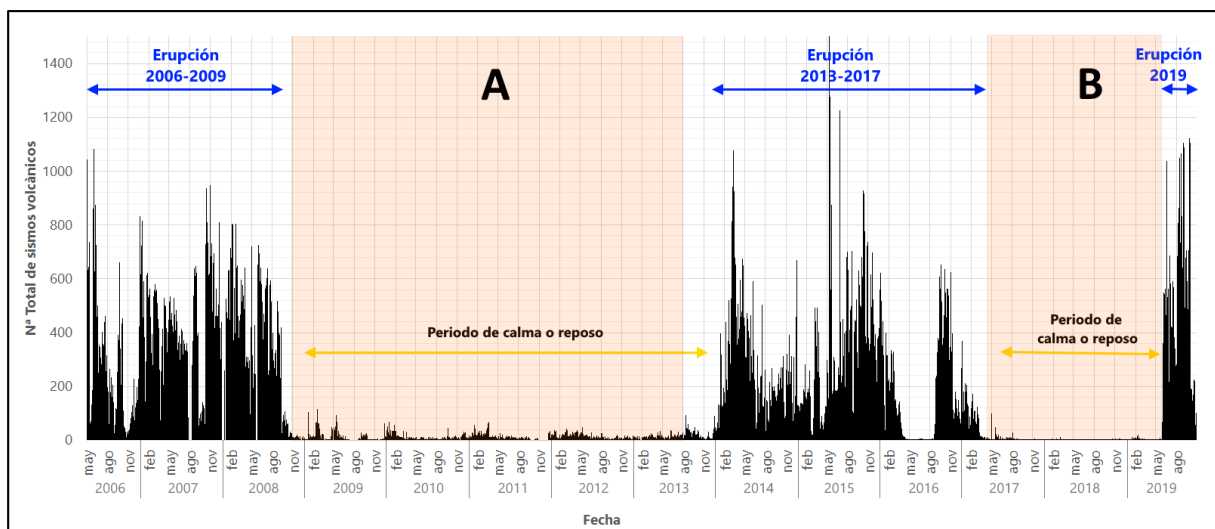


Figura 28.- Periodos de calma o reposo (Zona A y B) del volcán Ubinas registrados luego de finalizada la primera erupción ocurrida el 14 de junio de 2009 y la segunda en enero de 2017. El total de sismos es representado en barras negras.

CONCLUSIONES

- Desde el año 2006 hasta la actualidad, y gracias a la red de monitoreo del Instituto Geofísico del Perú implementada en el volcán Ubinas, se han registrado y analizado un total de 594 705 señales sísmicas. De estas, el 38 % corresponden a sismicidad tipo Volcano-Tectónico (VT) producida por fracturamiento de rocas al interior del volcán, mientras que el 32.5 % son sismos de tipo Largo Periodo y Tornillo que estarían asociados al paso de fluidos volcánicos. Durante el periodo de análisis se han registrado un total de 38 979 señales sísmicas de tipo Híbrido que estarían relacionadas al ascenso de magma; en cuanto a las explosiones volcánicas, definidas sísmicamente como señales de gran energía, se han acumulado un total de 852 eventos.
- Durante la actividad eruptiva 2006-2009 se registraron enjambres sísmicos conformados por eventos de Largo Periodo que precedían a la ocurrencia de explosiones volcánicas. Este tipo de precursor no ha sido identificado en los dos últimos procesos eruptivos de 2013-2017 y 2019, debido, probablemente, al cambio de la morfología del conducto del volcán (sellado, destrucción u obstrucción de fisuras y grietas).
- Durante los procesos eruptivos de 2013-2017 y 2019, se ha determinado un incremento de la sismicidad de tipo Híbrido relacionada al ascenso de magma. Asimismo, mediante las imágenes satelitales (MIROVA) se empezaron a registrar anomalías térmicas en el cráter del volcán. Esto indicaría la proximidad del magma a la superficie o la presencia de un cuerpo de lava en el fondo del cráter. Esta herramienta ha permitido reducir el nivel de incertidumbre con la que cuenta el método de pronóstico de explosiones.
- El modelo de velocidades final implementado en este estudio tiene en cuenta un nivel de incertidumbre del orden de $RMS < 0.1$, el cual considera 8 capas: la primera va desde 0 a 2.5 km de profundidad, con una velocidad de la onda P de 2.5 km/s; la segunda capa va desde 2.5 a 4 km, con una velocidad de 2.9 km/s; la tercera capa, desde 4 a 6.5 km, con una velocidad de 3.2 km/s; la cuarta capa, de 6.5 a 9 km, con velocidad de 3.9 km/s; la quinta capa, de 9 a 12.5 km, con 4.5 km/s de velocidad; la

penúltima capa, de 12.5 km a 16 km, con velocidad de 5 km/s y, la última capa, desde los 21 km al semiinfinito tiene una velocidad de 5.8 km/s. Los resultados evidencian que la mayor cantidad de sismos volcánicos localizados se distribuyen a lo largo de un lineamiento de rumbo SE-NO que atraviesa el cráter del volcán Ubinas.

- El mapa de localización sísmica presentado en este estudio muestra que la posición del conducto volcánico del Ubinas está ligeramente orientada hacia el oeste. Asimismo, la distribución principal de los sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) se alinea siguiendo un rumbo sureste-noroeste, siguiendo la falla identificada por Lavallée et al., (2009) y Rivera (2010) en la caldera del volcán Ubinas. La sismicidad está localizada entre la superficie del cráter y ~5 km de profundidad (respecto al nivel del mar), la cual delinearía al conducto del Ubinas. Asimismo, escasa y dispersa sismicidad localizada hasta los 13.5 km de profundidad podría sugerir que en esta área se ubica la cámara magmática superficial del Ubinas, tal como ha sido propuesta por Rivera et al., (2014).
- Se han identificado periodos de reposo con escasa sismicidad que corresponderían a un nivel base de actividad volcánica. El nivel bajo considera un registro diario de entre 1 y 10 señales sísmicas. Este reconocimiento es importante, ya que permite definir el grado de actividad sísmica mínima a partir del cual se puede inferir un comportamiento más dinámico o con aporte de magma que puede desencadenar erupciones explosivas.
- Finalmente, de acuerdo al análisis de los tres últimos procesos eruptivos, se puede indicar que cada uno de ellos presentó características sismovolcánicas particulares sin ser completamente iguales. Esto se debería probablemente a los cambios morfológicos de la estructura interna del volcán (nuevos conductos, nuevas fisuras, sellado de estos, etc.); es decir, cambios en la fuente donde se originan las señales sísmicas. Por estas razones, es esencial realizar un monitoreo minucioso de la actividad sísmica donde se interprete correctamente cada una estas señales con el fin de realizar pronósticos oportunos de erupciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado G.E., Taylor W., Ohrnberger M., Soto G., Madrigal L., 1997. First observations of volcanic seismicity at Arenal volcano (Costa Rica) using a new three-component seismic digital network. *Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles*, vol. 15–16, pp. 11–45.
- Anca J., 2013. Análisis y clasificación de la sismicidad asociada a la erupción del volcán Ubinas 2006-2009. Tesis Ingeniero Geofísico, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 114 pp.
- Barazangi, M.; Isacks, B. 1976. Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, Vol. 4, p. 606-692.
- Bean C., De Barros L., Lokmer I., Métaxian J-Ph., O'Brian G., Murphy S., 2013. Long-period seismicity in the shallow volcanic edifice formed from slow-rupture earthquakes. *Nature geoscience*, DOI:10.1038/NGEO2027.
- Benoit J., McNutt S., 1997. New constraints on source processes of volcanic tremor at Arenal volcano, Costa Rica, using broadband seismic data. *Geophysics Research Letters* 24 (4), pp 449–452.
- Bormann P., 2002. IASPEI, New manual of seismological observatory practice. Volume 1 & 2.
- Chouet B., 1985. Excitation of a buried magmatic pipe: a seismic source model for volcanic tremor. *J. Geophysics Research Letters*, 90, pp 1881-1893.
- Chouet B., 1992. A seismic model for the source of long-period events and harmonic tremor, in *Volcanic Seismology*, edited by P. Gasparin, R. Scarpa and K. Aki (Springer-Verlag), pp 133-156.
- Chouet B., 1996. Long-period volcano seismicity: Its Source and Use in Eruption Forecasting. *Nature* 380 (6572): pp 309 - 316.
- Chouet, B. 2003. Volcano seismology. *Pure and Applied Geophysics*, 160(3-4), pp 739-788.
- Coppola D., Macedo O., Ramos D., Finizola A., Donne D., del Carpio J., White R., McCausland W., Centeno R., Rivera M., Apaza F., Ccallata B., Chilo W., Cigolini C., Laiolo M., Lazarte I., Machaca R., Masias P., Ortega M., Puma N., Taipe E., 2015. Magma

extrusion during the Ubinas 2013-2014 eruptive crisis based on satellite thermal imaging (MIROVA) and ground-based monitoring. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 302 (2015), pp 199-210.

- De Silva S., Francis P., 1991. *Volcanoes of the central Andes*. Springer-Verlag, New York.
- Del Carpio J., Macedo O., Puma N., Centeno R., Torres J., Cruz J., 2016a. Características de la actividad sísmica en el proceso eruptivo 2013-2015 del volcán Ubinas. XVIII Congreso Peruano de Geología. 2016.
- Del Carpio J., Tavera H., 2019a. Evaluación del proceso eruptivo del volcán Ubinas de julio 2019. Informe Técnico IGP, 46 págs.
- Del Carpio J., Rivera M., 2019c. Aportes del monitoreo geofísico en el manejo de crisis del volcán Ubinas, actividad eruptiva 2019. Informe Técnico IGP, 48 págs.
- Ferrazzini V., Aki K., 1992. Preliminary results from a field experiment on volcanic events at Kilauea using an array of digital seismographs. In *Volcanic Seismology (IAVCEI Proceedings in Volcanology 3)*, Aki, K., Gasparini, P. and Scarpa, R. (ed.), Springer-Verlag: pp 168-189.
- Garcés M.A., Hagerty M.T., Schwartz S.Y., 1998. Magma acoustics and time-varying melt properties at Arenal volcano, Costa Rica. *Geophysics Research Letters* 25 (13), pp 2293–2296.
- Gonzales K., 2001. Estudio estructural y del sistema hidrotermal del volcán Ubinas por métodos geofísicos y geoquímicos. Tesis profesional, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 177 págs.
- Gonzales K., Finizola A., Lénat J-F., Macedo O., Ramos D., Thouret J-C., Fournier N., Cruz V., Pistre K., 2014. Asymmetrical structure hydrothermal system and edifice stability: The case of Ubinas volcano, Peru, revealed by geophysical surveys. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 276(2014), pp 132-144.
- Ibañez J., Carmona E., 2000. *Sismicidad volcánica*. Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada, 14 págs.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI, 2018. Perú: Crecimiento y distribución de la población total, 2017, Censos Nacionales 2017: XII de población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. 80 págs.

- Inza L., Mars J., Métaxian J-P., O'Brien G., Macedo O., 2011. Seismo-volcano source localization with triaxial broad-band seismic array. *Geophysical Journal International* (2011) 187, 371-384. 14 págs.
- Inza L., Métaxian J-P., Bean C., O'Brien G., Macedo O., Zandomenighi D., 2014. Analysis of dynamics of vulcanian activity of Ubinas volcano, using multicomponent seismic antennas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 270 (2014), pp 35-52.
- Johnson J., Aster R., 2005. Relative partitioning of acoustic and seismic energy during Strombolian eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 148 (2005), pp 334 – 354.
- Kissling E., Kradolfer U. & Mauer H., 1995. Program VELEST USER'S GUIDE. Institute of Geophysics and Swiss Seismological Service, ETH-Hoenggerberg, Zurich Switzerland.
- Lahr j., Chouet B., Stephens C., Power J., Page R., 1994. Earthquake classification, location and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989-1990 eruptions at Redoubt volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 62, pp 137-151.
- Lavallée Y., de Silva S., Salas G., Byrnes J., 2009. Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina, and Ticsani Volcanic Group (UHTVG), southern Peru. *JVGR* 186 (2009), pp 253-264.
- Lee W., Bennett R., Meagher K., 1972. A Method of Estimating Magnitude of Local Earthquakes from Signal Duration. US Geological Survey, open file report.
- Lesley R., 2013. An investigation into recent phreatic and phreatomagmatic eruptions of Ruapehu volcano, New Zeland: the causes and local/regional effects of the September 2007 eruption, and current and postulated mitigation strategies against future similar eruptions. A report submitted as the examined component of the project Module SXG390. 54 págs.
- Macedo O., Gonzáles K., Finizola A., Métaxian J-Ph., Fournier N. & Sortino F., 2002. Estudio estructural y del sistema hidrotermal del volcán Ubinas por métodos geofísicos y geoquímicos. Resúmenes extendidos del XI Congreso Peruano de Geología, Trabajos Científicos, set 2002, Vol. de presentaciones multimedia ,23 págs.
- Macedo O., Taipe E., Ramos D., 2007. Observaciones asociadas al lahar ocurrido el 17 de enero 2007 en el valle de Ubinas. Informe interno Instituto Geofísico del Perú.

- Macedo O., Métaxian J-P., Taïpe E., Ramos D., 2008. Actividad sismo-volcánica asociado a la erupción del volcán Ubinas en 2006-2008. XIII Congreso Latinoamericano de Geología, XIV Congreso Peruano de Geología. Lima, Perú. 6 págs.
- Macedo O., 2010. Respuesta del IGP ante la crisis del volcán Ubinas en el año 2006. V Foro Internacional Peligro Volcánico y Sísmico en el Sur del Perú. Arequipa, 23 y 24 de 2010. 10 págs.
- Macedo O, Del Carpio J, Centeno R, Machacca R, Portugal D, Huancco O, Chijcheapaza R., 2014. Características Sísmicas de la Actividad Explosiva del Volcán Ubinas ocurrida en setiembre 2013. XVII Congreso peruano de geología, octubre de 2014. 4 págs.
- Macedo O., Taïpe 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. 75 págs.
- Machacca R., Macedo O., Anca J., 2012. Tasa de sismicidad LP como una herramienta útil en el pronóstico de explosiones, caso volcán Ubinas, periodo 2006-2009. 7th Cities on Volcanoes 2012, México.
- McNutt S., 2000. Volcanic seismicity, Encyclopedia of Volcanoes. Ed. H. Sigurdsson, Academic Press, San Diego. Pp. 1015-1034.
- McNutt S., 2002. Volcano Seismology and Monitoring for Eruptions. International Handbook of Earthquakes and Engineering Seismology, volume 81A.
- McNutt S., 2005. Volcanic Seismology. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 33(1), pp 461–491.
- Metaxian J-P., 1998. Reporte a la misión del sur del Perú. Informe interno, IGP-Arequipa, 30 págs.
- 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.
- Monteiller V., O'Brien G.S., Métaxian J-P., Bean C., Macedo O., 2008. Moment-tensor inversion of explosion events recorded on Ubinas volcano, Peru. Geophysical Research Abstracts, Vol 10, EGU 2008-A-04275, 2008.

- Neuberg J. W., Tuffen H., Collier L., Green D., Powell T., Dingwell D., 2006. The trigger mechanism of low-frequency earthquakes on Montserrat. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 153 (2006), pp 37 – 50.
- Norabuena E.O., Dixon T.H., Stein S., Harrison C.G.A., 1999. Decelerating Nazca-South America and Nazca-Pacific plate motions. *Geophysical Research Letters*, 26, 22, pp 3405-3408.
- Palau Y., 2005. Modelo de Velocidades sísmicas de la Cuba Oriental *Revista Geológica Colombiana*.
- Reporte Complementario N°1528-21/07/2019/COEN-INDECI/08:00horas (Reporte N°04). Explosión volcánica afecta a los departamentos de Moquegua, Arequipa, Tacna y Puno. 26 págs.
- Rivera M., Thouret J.C., Gourgaud A., 1998. Ubinas, el volcán más activo del sur del Perú desde 1550: Geología y evaluación de las amenazas volcánicas. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v.88, pp 53-71.
- Rivera M., 2010. Genèse et évolution des magmas andésitiques à rhyodacitiques récents des volcans Misti et Ubinas (Sud du Pérou). Tesis de doctorado, Univ. Blaise Pascal. 414 págs.
- Rivera M., Thouret J-C., Samaniego P., Le Pennec J-L., 2014. The 2006 2009 activity of the Ubinas volcano (Peru): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 270 (2014), pp 122-141.
- Shimozuru D., 1971. A seismological approach to the prediction of volcanic eruptions, the surveillance and prediction of volcanic activity. UNESCO, Paris. Pp. 19-45.
- Somoza R., 1998 - Updated Nazca (Farallon)-South America relative motions during the last 40 My; implications for mountain building in the Central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*, 11, 3, pp 211-215.
- Taípe E., 2006. Estudio de la actividad sismo-volcánica del volcán Ubinas. Tesis profesional, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. 166 págs.
- Taípe E., 2007. Implementación del programa "VELEST" que se utilizaran para mejorar modelo de velocidad del volcán Ubinas. IGP.

- Thouret J-C., Rivera M., Wörner G., Gerbe M., Finizola A., Fornari M., Gonzales K., 2005. Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Perú. *Bulletin of Volcanology* 67; pp 557-589.
- Torres R., Gómez D., Narváez L., 1996. Unusual seismic signals associated with the activity at Galeras volcano, Colombia, from July 1992 to September 1994. *Annal. Geofis.*, 39: 299-310.
- Traversa P., Lengliné O., Macedo O., Métaxian J-P., Grasso J., Inza A., Taipei E., 2011. Short term forecasting of explosions at Ubinas volcano, Perú. *Journal of Geophysical Research*, Vol 116, B11301.
- Vargas K., 2017. Pronóstico de erupción volcánica mediante la identificación de señales sísmicas y eléctricas en el volcán Ubinas y análisis de la sismicidad den el volcán Sabancaya noviembre2015-diciembre2016. Tesis profesional, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. 232 págs.
- Wadati K., 1933. On the travel time of earthquake waves, II, *Geophys Mag.*, 7, pp 101-111.
- Wörner G., Hammerschmidt K., Henjes-Kunst F., Lezaun J., Wilke H., 2000b. Geochronology ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, K-Ar and He-exposure ages) of Cenozoic magmatic rocks from northern Chile (18-22°S): implications for magmatism and tectonic evolution of the central Andes. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 27, p. 205-240.
- Zandomenighi D., Inza A., Métaxian J-P., Macedo O., 2012. Long-period seismic events at Ubinas volcano (Perú): their implications and potentiality as monitoring tool. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 14, EGU 2012-9359, 2012.
- Zobin V.M., 2003. *Introduction to Volcanic Seismology*, Developments in Volcanology 6 Elsevier, 290 p.
- Zobin V., 2011. *Introduction to volcanic seismology*. Elsevier. Aki, K., 1992. State of the art in volcanic seismology. In: Gasparini, P., Scarpa, R., Aki, K. (Eds.), *Volcanic Seismology*. IAVCEI Proc. Volcanol. 3, pp 3-10.