



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú - IGP



Vista del volcán Coropuna desde el sector noroeste

INFORME VULCANOLÓGICO

Evaluación y análisis de la actividad sísmica en el complejo volcánico nevado Coropuna (periodos 2001-2002, 2008-2010 y 2018-2019)

Fecha: abril de 2020

2020

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Danny Scipión

Informe vulcanológico

IGP/CENVUL-COR/IV 2020-0001

Evaluación y análisis de la actividad sísmica en el complejo volcánico nevado Coropuna
(Periodos 2001-2002, 2008-2010, 2018-2019)

Autores:

José Luis Torres Aguilar

José Alberto Del Carpio Calienes

Marco Rivera Porras

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú

Calle Badajoz n.º 169, Mayorazgo, Ate

Teléfono: 51-1-3172300

RESUMEN

El presente trabajo describe los resultados del análisis sísmico de los periodos 2001-2002, 2008-2010 y 2018-2019 del volcán Coropuna, ubicado a 150 km al noroeste de la ciudad de Arequipa, utilizando registros sísmicos del Instituto Geofísico del Perú (IGP).

Las técnicas de análisis sísmicos comprendieron la utilización del espectro de frecuencias, correlación cruzada, localización sísmica, mecanismos focales y distribución de la frecuencia-magnitud. Se han registrado cuatro tipos de señales sísmicas: Volcano-Tectónico (VT), Largo Periodo (LP), tremores (TRE) y eventos producidos por la dinámica del glaciar o DG. En total, se han identificado aproximadamente 6500 sismos volcánicos, de los cuales más del 77 % corresponden a sismos de tipo VT que estarían asociados a procesos de ruptura de rocas que ocurren al interior del macizo volcánico, 18 % son señales de tipo LP y tremores, eventos que estarían relacionados con la dinámica de fluidos volcánicos al interior del volcán. El 5 % de los eventos fueron caracterizados como señales de tipo DG, ligados a la dinámica del glaciar (deshielo, etc.).

La localización sísmica de los eventos de tipo Volcano-Tectónico ha permitido reconocer dos focos activos distribuidos en dirección oeste y noroeste, a 6 km y 15 km del volcán Coropuna, respectivamente. Estos eventos tuvieron magnitudes menores a M3.7 y probablemente habrían estado asociados a la actividad de fallas inversas locales que existen en inmediaciones del volcán. El análisis frecuencia-magnitud de los sismos VT muestra valores del parámetro "b" mayores a 1.6, característico de ambientes volcánicos.

La fuente generadora de la actividad sísmica en el volcán Coropuna tendría su origen en la dinámica del sistema hidrotermal del volcán, el cual estaría siendo influenciado por la presencia de un cuerpo caliente de poco volumen localizado a considerable profundidad que perturba dicho sistema.

ÍNDICE

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN	6
1. CAPÍTULO I	8
1.1. OBJETIVOS.....	8
1.1.1. <i>Objetivo general</i>	8
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i>	8
1.2. JUSTIFICACIÓN	9
1.3. UBICACIÓN	9
1.4. ACCESIBILIDAD	10
1.5. ASPECTO SOCIOECONÓMICO.....	10
2. CAPÍTULO II: VULCANISMO EN EL SUR DEL PERÚ, VOLCÁN NEVADO COROPUNA	12
2.1. CONTEXTO VULCANOLÓGICO	12
2.2. CONTEXTO ESTRUCTURAL.....	14
2.3. CONTEXTO GEOLÓGICO	16
2.3.1. <i>Edificio Coropuna</i>	17
2.3.2. <i>Edificio Paiche</i>	17
2.3.3. <i>Edificio Escalera</i>	18
2.3.4. <i>Edificio Casulla</i>	18
2.3.5. <i>Edificio Yanaranra</i>	18
2.4. CONTEXTO GLACIOLÓGICO	19
2.5. FUENTES TERMALES	19
3. CAPÍTULO III: DATOS GEOFÍSICOS Y METODOLOGÍA	21
3.1. DATOS GEOFÍSICOS.....	21
3.1.1. <i>Periodo 2001-2002: Red Sísmica Nacional</i>	21
3.1.2. <i>Periodo 2008-2010: red sísmica temporal</i>	22
3.1.3. <i>Periodo 2018-2019: red sísmica permanente del volcán Coropuna</i>	23
3.1.4. <i>Catálogos de actividad sismovolcánica</i>	25
3.1.5. <i>Mapas de actividad sismovolcánica</i>	26
3.2. METODOLOGÍA	27
3.2.1. <i>Clasificación de señales sísmicas</i>	27
3.2.1.1. Señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónico (VT)	28
3.2.1.2. Señales sísmicas de tipo Largo Periodo (LP)	29

3.2.1.3.	Señales sísmicas de tipo Tremor Espasmódico	31
3.2.1.4.	Señales sísmicas asociadas a la dinámica de glaciar (DG)	32
3.2.2.	Cálculo de la energía sísmica.....	32
3.2.3.	Cálculo de la magnitud local	33
3.2.4.	Cálculo de la relación de velocidades (V_p/V_s)	34
3.2.5.	Modelo de velocidad	35
4.	CAPÍTULO IV: ANÁLISIS LA ACTIVIDAD SISMOVOLCÁNICA EN EL COROPUNA	38
4.1.	ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA EN EL PERIODO 2001-2002	38
4.2.	ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA EN EL PERIODO 2008-2010	42
4.3.	ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA EN EL PERIODO 2018-2019	45
4.1.1.	Estadística de eventos sismovolcánicos para el periodo 2018-2019	45
4.1.2.	Localización de eventos de tipo Volcano–Tectónico (VT).....	49
4.1.3.	Sismicidad asociada a la dinámica del glaciar	51
5.	CAPÍTULO V: DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	52
5.1.	ACTIVIDAD SÍSMICA 2001-2002	52
5.2.	ACTIVIDAD SÍSMICA 2008-2010	53
5.3.	ACTIVIDAD SÍSMICA 2018-2019	54
5.3.1.	Familias sísmicas	54
5.3.2.	Características de la fuente sísmica	56
5.3.3.	Sismos de baja frecuencia (Largo Periodo-LP).....	58
5.3.4.	Ocurrencia de sismos de tipo Volcano-Tectónico.....	58
	CONCLUSIONES	60
	BIBLIOGRAFÍA.....	62

INTRODUCCIÓN

El volcán nevado Coropuna (15.52°S, 72.70°O; 6377 m s.n.m.) está ubicado a 150 km al noroeste de la ciudad de Arequipa, en el extremo norte de la Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes. El Coropuna es el volcán más alto de los 16 volcanes activos y potencialmente activo del sur del Perú, el cual alberga un casquete glaciar de 44.1 km² (Kochtitzky, 2018) que representa la mayor reserva de agua en este sector de los Andes. Ello beneficia a más de 90 000 personas que habitan en zonas de influencia de este volcán (INEI, 2018) y cuyas principales actividades económicas son la agricultura y la ganadería.

La actividad eruptiva pasada del volcán Coropuna comprende el emplazamiento de variados flujos de lava, domos y domo-coladas que conforman al menos cinco edificios volcánicos o estratovolcanes (Mariño et al., 2018). La última erupción data de hace aproximadamente 700 años y corresponde a una erupción efusiva que emplazó flujos de lava distribuidos hasta 7 km al sur del volcán. En la zona del volcán Coropuna se observa un complejo sistema de fallas y lineamientos, en dirección preferencial NO-SE y NE-SO (Núñez & Valenzuela, 2001; Mariño, 2017; Margirier, 2015). Actualmente, no se evidencia actividad fumarólica; sin embargo, en un radio menor a los 25 km del complejo volcánico existen fuentes termales que muestran la actividad de su sistema hidrotermal.

Según los últimos estudios efectuados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), el Coropuna está categorizado como un volcán de muy alto riesgo, solo superado por los volcanes Ubinas, Sabancaya y Misti (Macedo et al., 2016). En una eventual reactivación del volcán Coropuna, el hielo y la nieve pueden fusionarse y producir lahares (huaicos) de gran volumen que afectarían significativamente a las poblaciones, terrenos de cultivo y obras de infraestructura de las provincias de Condesuyos, Castilla y Camaná. El presente trabajo tiene como objetivo analizar el tipo de actividad sísmica de los periodos 2001-2002, 2008-2010 y 2018-2019 utilizando metodologías ya existentes de clasificación de señales e identificación de fuentes sísmicas para determinar el comportamiento dinámico del complejo volcánico nevado Coropuna.

Entre los años 2001 y 2002, el IGP registró mediante la Red Sísmica Nacional importante sismicidad en el sector oeste y noreste del Coropuna, a distancias de 24 km y 30 km con magnitudes por debajo de M5.0. Entre los años 2008 y 2010, se instaló por primera vez una estación sísmica a menos de 8 km del volcán; este instrumento registró señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónico (VT) y Largo Periodo (LP), ambas señales típicas de volcanes activos. Estos antecedentes llevaron al IGP a implementar una red de monitoreo geofísico en tiempo real, la cual viene operando desde mayo de 2018. Esta red consta a la fecha de cinco estaciones sísmicas, una cámara de vigilancia y dos inclinómetros. En el último periodo de análisis (2018-2019), se empleó los datos de la actual red sísmica del Coropuna, con la cual se registró y confirmó la ocurrencia de actividad sísmica asociada a actividad volcánica, específicamente de sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT), Largo Periodo (LP), Tremor (TRE) y, por último, sismos asociados a la dinámica del glaciar (DG).

En el caso de los sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT), estos fueron localizados al sector oeste y noroeste del complejo volcánico y presentaron magnitudes por debajo de M3.7, siendo difícilmente percibidos por la población. Los resultados del análisis sísmico del Coropuna indicarían la existencia de una actividad volcánica en la zona; sin embargo, esta actividad es considerada de bajo nivel en comparación a la actividad de volcanes como el Sabancaya y Ubinas. En ese sentido, no existen indicios de que a corto y/o mediano plazo haya una reactivación de este macizo; no obstante, el monitoreo continuo es muy importante.

CAPÍTULO I

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

- Conocer el tipo de actividad sísmica registrada en la zona del volcán nevado Coropuna durante los periodos 2001-2002, 2008-2010 y 2018-2019 mediante el procesamiento y análisis de datos sísmicos adquiridos por el Instituto Geofísico del Perú, lo cual permitirá determinar la localización y fuente de ocurrencia de los sismos e interpretar el modo de generación. Este estudio está orientado a establecer la línea base de la actividad sísmica del Coropuna para pronóstico de erupciones volcánicas como parte del monitoreo volcánico del IGP.

1.1.2. Objetivos específicos

- Analizar y caracterizar los tipos de sismos registrados en la zona del volcán Coropuna mediante el análisis del contenido espectral, forma de onda y localización de la fuente sísmica.
- Determinar y caracterizar la fuente que desencadena los sismos en la zona del complejo volcánico nevado Coropuna mediante la localización de los sismos, identificación de familias sísmicas, cálculo de mecanismo focales y distribución de la frecuencia de ocurrencia sísmica.
- Proponer un modelo de velocidades mediante la inversión del tiempo de arribo de la onda P para determinar los parámetros de localización de los sismos en la zona del volcán Coropuna.
- Elaborar la línea base de la actividad sísmica para el volcán Coropuna mediante gráficos estadísticos temporales para los periodos 2008-2010 y 2018-2019.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Estudios realizados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) consideran al volcán nevado Coropuna como un volcán de "muy alto riesgo". Este volcán alberga uno de los más importantes recursos hídricos de la región Arequipa en forma de un casquete glacial. En una eventual reactivación, el volcán Coropuna podría generar flujos de lava que afectarían seriamente la reserva de agua produciendo lahares (huaicos). Este fenómeno ocasionaría consecuencias devastadoras en las poblaciones asentadas en los valles aguas abajo de las provincias de Condesuyos, Castilla y Camaná. La población que habita en zona de influencia del volcán Coropuna es de aproximadamente 90 000 personas (INEI, 2018). El presente trabajo analiza la actividad sísmica y la fuente que origina los sismos en la zona del volcán nevado Coropuna, cuyos resultados son una herramienta importante para la gestión del riesgo volcánico.

1.3. UBICACIÓN

El volcán nevado Coropuna (15°31'S, 72°39'O, 6377 m s.n.m.) se ubica en el segmento sur de la cordillera occidental de los Andes peruanos. Políticamente, se localiza al norte de la región Arequipa, entre las provincias de Condesuyos y Castilla. El complejo Coropuna está situado a 150 km al noroeste de la ciudad de Arequipa, entre 15 km a 20 km al sureste de los poblados de Viraco, Machaguay, Pampacolca y Tipan (Figura 1).

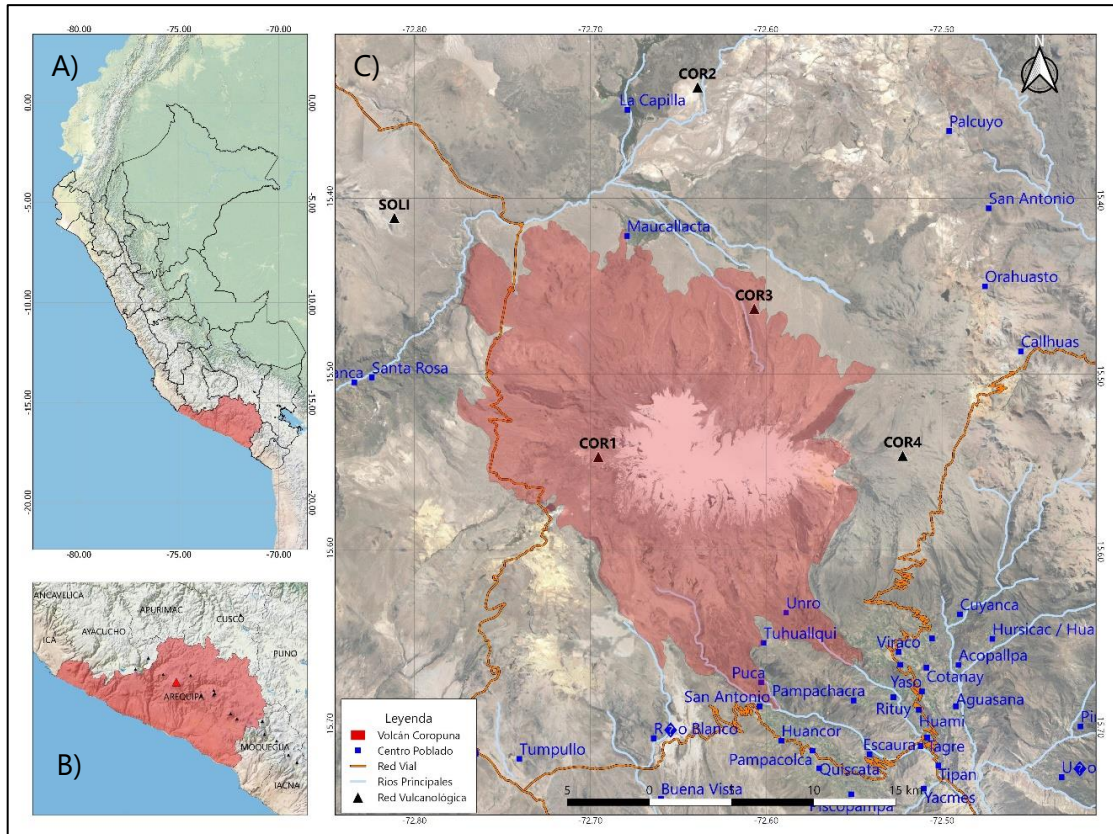


Figura 1.- (a) Ubicación de la región Arequipa sobre un modelo de elevación digital del territorio peruano, (b) mapa de la región Arequipa: el volcán Coropuna se emplaza entre las provincias de Condesuyo y Castilla, (c) mapa de ubicación del volcán Coropuna (sombra roja).

1.4. ACCESIBILIDAD

El acceso hacia el volcán Coropuna se realiza a través de vías afirmadas, aunque en los tramos finales se efectúa a través de trochas que en épocas de lluvia dificultan el acceso. Para llegar al volcán desde la ciudad de Arequipa se toma la vía Interoceánica Sur (34A) rumbo hacia la Repartición, se continúa por la carretera Panamericana Sur (1S) hacia El Pedregal y luego se toma la vía AR-105 que atraviesa los poblados de Corire, Aplao, Acoy y Chuquibamba. Finalmente, se toma la vía 107-105 y accede hacia el flanco oeste del volcán Coropuna. El tiempo de viaje es de aproximadamente 8 horas. Cabe mencionar que existen otras vías secundarias que permiten acceder al CVNC. La carretera afirmada que rodea el sector suroeste del CVNC ingresa por la laguna Pallarcocha, pasa por el cerro Minasnioc y el río Huyllaura, llegando hasta las fuentes termales cerca al cerro Auquiato.

1.5. ASPECTO SOCIOECONÓMICO

La información acerca del número de pobladores y viviendas fue obtenida del directorio nacional de centros poblados del INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática), de acuerdo con la información del último censo realizado el año 2017.

La región Arequipa cuenta con una población total de 1 382 730 habitantes, distribuida en las provincias de Arequipa, Caylloma, Caravelí, Islay, La Unión, Camaná, Castilla y Condesuyo. Las tres últimas provincias mencionadas (Camaná, Castilla y Condesuyos) están en zona de influencia directa o indirecta en caso de una reactivación del volcán Coropuna. En dichas provincias habitan 90 203 personas, lo cual corresponde a un 6.5 % de la población total de la región, además de 44 254 viviendas (Figura 2).

En un radio menor de 40 km se encuentran poblados como Tipan, Pampacolca, Viraco, Machaguay, Iray, Chuquibamba, Andaray, Yanaquihua, Chichas, Andagua, Salamanca y Chilcaymarca.

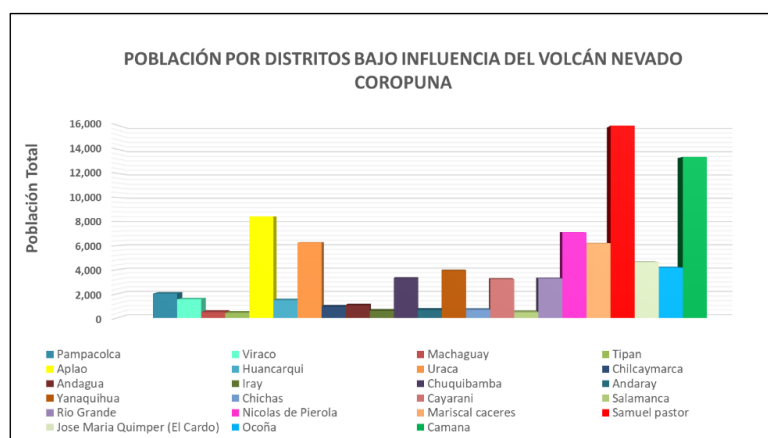


Figura 2.- Población bajo influencia directa e indirecta por distrito ante cualquier eventualidad de reactivación del volcán Coropuna (tomado de INEI, 2018).

CAPÍTULO II: VULCANISMO EN EL SUR DEL PERÚ, VOLCÁN NEVADO COROPUNA

2.1. CONTEXTO VULCANOLÓGICO

La subducción de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa continental Sudamericana produce la generación de magma, el crecimiento de volcanes y, por ende, la existencia de un arco volcánico en el sur del Perú. Actualmente, la dirección de convergencia entre la placa de Nazca y la Sudamericana es N78°E, con una velocidad de 5-7 cm/año (Somoza, 1998; Norabuena et al., 1999). Este arco volcánico Plio-Cuaternario, de poco más de 1000 km de largo, es de naturaleza calcoalcalina con predominio de andesitas, aunque es común encontrar magmas mucho más silíceos como dacitas y riolitas (Delacour et al., 2007; Mamani et al., 2008). El arco volcánico se encuentra situado sobre la cordillera occidental de los Andes y forma parte de la denominada Zona Volcánica Central de los Andes (CVZ; de Silva y Francis, 1991), sobre la cual se localizan todos los volcanes del sur del Perú.

En el sur del Perú se han identificado 16 estructuras volcánicas catalogadas como activas y potencialmente activas: Cerro Auquihuato, Sara Sara, Quimsachata, Coropuna, Andahua, Huambo, Sabancaya, Chachani, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca, Yucamane, Casiri y Cerros Purupuruni (Figura 3) (De Silva & Francis, 1991, Macedo et. al, 2016, Siebert et al., 2010), todas ellas distribuidas entre las regiones de Ayacucho y Tacna. De estos volcanes, al menos 6 han experimentado actividad histórica posterior a la conquista española (i.e. posterior a 1532 d. C.).

El volcán nevado Coropuna es considerado “potencialmente activo” del arco volcánico del sur del Perú. No hay información respecto a la actividad histórica del Coropuna. Estudios precisan que este centro volcánico estaba activo desde finales del Pleistoceno al Holoceno. Varios flujos de lavas andesíticas del Holoceno (Venturelli et al., 1978) se encuentran en los flancos noreste, sureste y oeste del edificio, flujos con 11 000 años de antigüedad. La morfología y grado de alteración mínima de las lavas sugieren que son muy jóvenes. Este volcán se caracteriza por la presencia de varios estratoconos distribuidos sobre un área de

25 km de largo y 17 km de ancho. En las secuencias de lavas sobreyacen ignimbritas datadas en aproximadamente 14 millones de años (Noble et al., 1974). En épocas recientes, el Coropuna ha presentado actividad efusiva que ha emitido flujos de lava andesíticos que cubren algunos depósitos de morrenas. Además, presenta una leve actividad hidrotermal (Núñez y Valenzuela 2001).

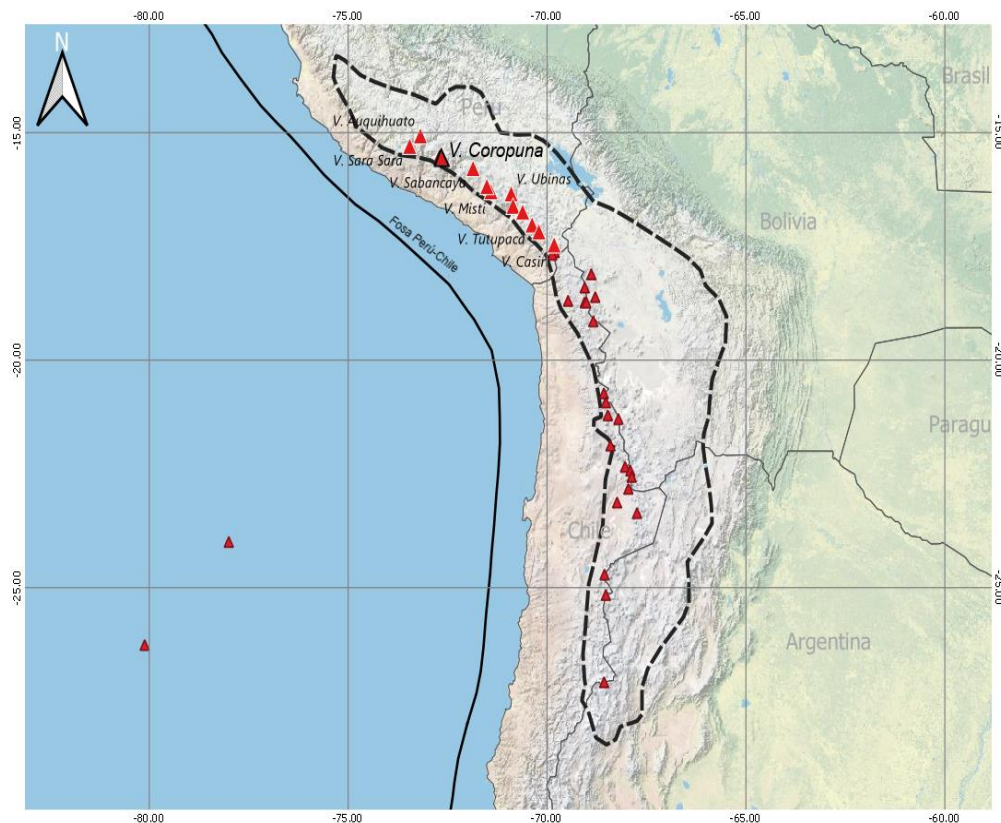


Figura 3.- Zona Volcánica Central de los Andes y su relación con la fosa Perú-Chile (De Silva & Francis, 1991).

2.2. CONTEXTO ESTRUCTURAL

Existen varios estudios relacionados con la presencia de fallas y lineamientos en el área del volcán Coropuna (Núñez & Valenzuela, 2001; Mariño, 2017; Margirier, 2015; Úbeda, 2011). El área del volcán Coropuna presenta un sistema de fallas y lineamientos con dos direcciones preferenciales (NO-SE y NE-SO, Figura 4), denominadas como (1) Falla Chuquibamba, la cual corresponde a un sistema de fallas normales paralelas con dirección NO-SE, localizado a 20 km al suroeste del complejo volcánico y pasa por la localidad de Chuquibamba; (2) Falla Pampacolca, de tipo inversa y de dirección NO-SE, ubicada a 10 km al sur del edificio volcánico, la cual atraviesa el poblado de Pampacolca; (3) el lineamiento Pumaranra, el cual sigue una dirección NO-SE, paralelo a la falla Pampacolca, y localizado a 12 km al noreste del complejo volcánico, coincidiendo con el cráter volcánico Pumaranra y el curso del río Arma; (4) lineamiento del Casulla, el cual atraviesa los picos de Casulla y Paiche del CVNC en dirección NE-SO, cortando el sistema de fallas Chuquibamba.

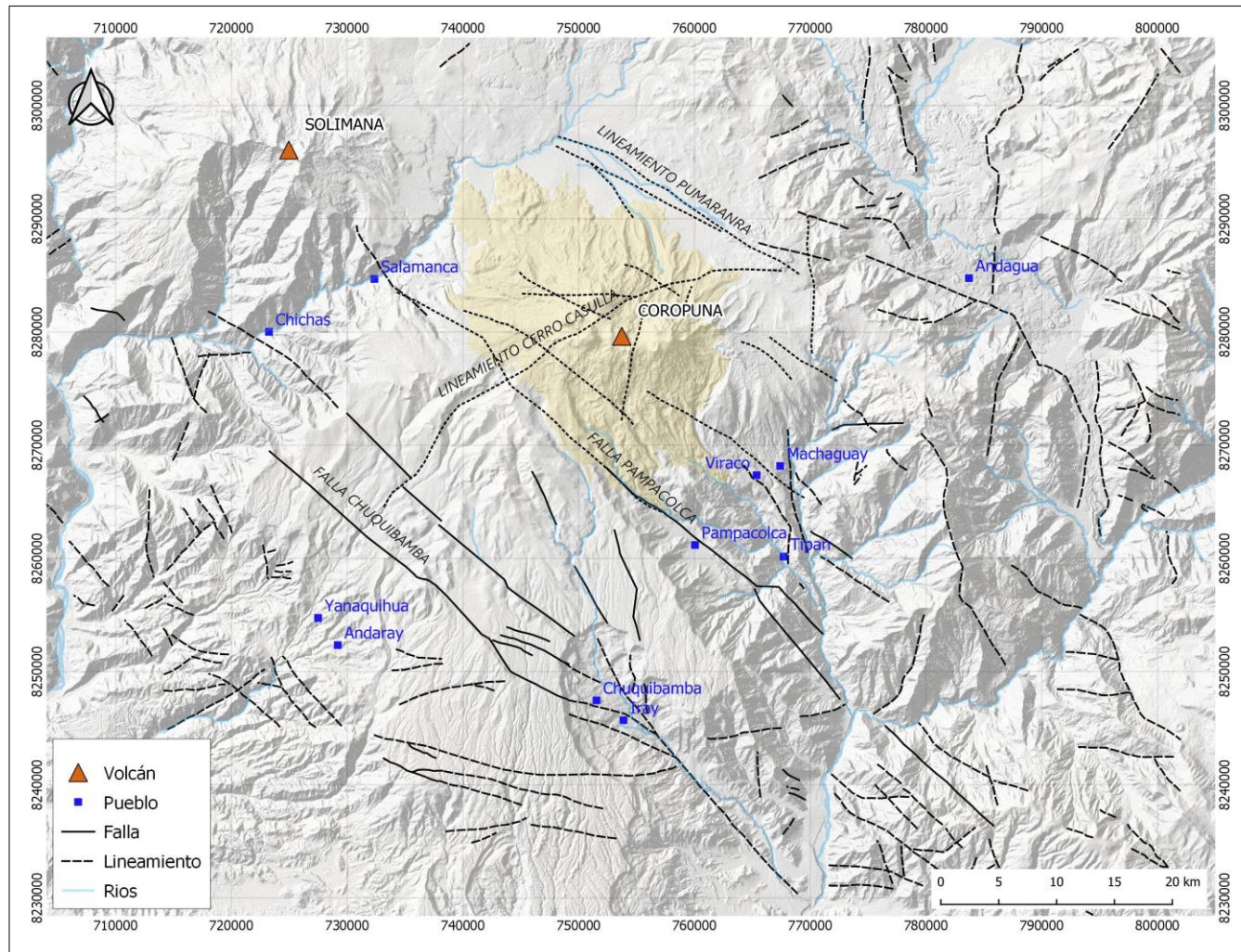


Figura 4.- Sistema de fallas en la zona del volcán Coropuna. Las líneas representan fallas y las líneas discontinuas lineamientos, mapa modificado de Margirier (2015) y Úbeda (2011).

2.3. CONTEXTO GEOLÓGICO

El volcán nevado Coropuna constituye un complejo volcánico que se formó durante el Pleistoceno y Holoceno, hace aproximadamente 600 000 años, sobre un substrato conformado por ignimbritas del Neógeno. Se encuentra en discordancia angular sobre dos estratovolcanes más antiguos: el Sunjillpa (Plioceno), ubicado en su extremo occidental, y el Cunciacha (Pleistoceno inferior), que se encuentra en el extremo oriental (Mariño et al., 2017).

El volcán nevado Coropuna es de forma asimétrica. Está emplazado en el borde de la cordillera occidental y está conformado principalmente por flujos de lava y domos de lava. Los flujos de lava de corto recorrido, es decir de menos de 7 km, cubren los sectores NE, N y NO del volcán, pero los flujos de lava de mayor recorrido, entre 10 y 16 km, se han emplazado en los valles profundos ubicados al sur. En la parte central y más alta del complejo volcánico se han identificado al menos cinco edificios o estratovolcanes y domos de lava que se distribuyen en dirección este-oeste, denominados Yanaranra (6305 m s.n.m.), Coropuna (6161 m s.n.m.), Paiche (6330 m s.n.m.), Casulla (6377 m s.n.m.) y Escalera (6171 m s.n.m.). El complejo tiene aproximadamente 25 km de largo por 17 km de ancho. A continuación, se describen las características geológicas de cada edificio volcánico.

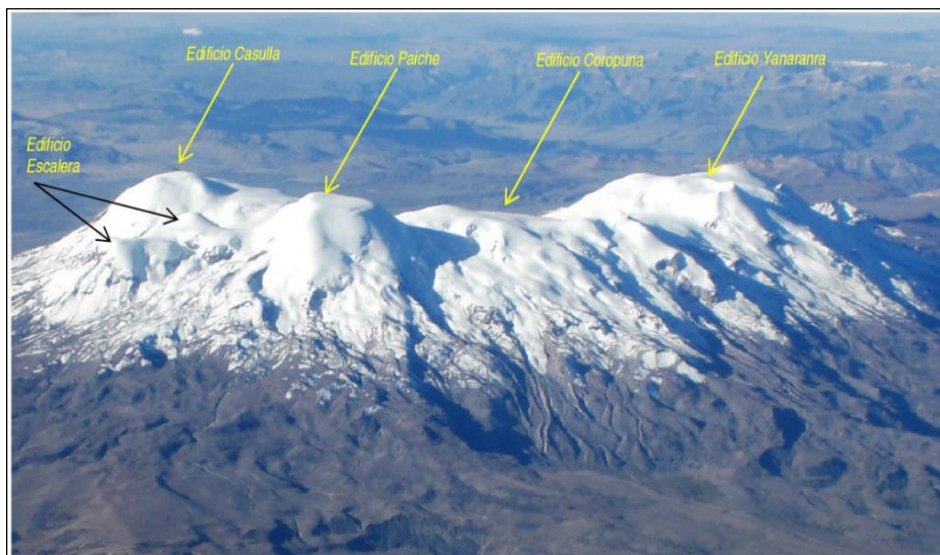


Figura 5.- Fotografía aérea del complejo volcánico Coropuna constituido de cinco edificios: Yanaranra, Coropuna, Paiche, Escalera y Casulla (tomado de Mariño, 2017).

2.3.1. Edificio Coropuna

Es considerado como el más antiguo de los 5 picos que componen el complejo volcánico Coropuna. Se encuentra en la parte central, entre los edificios Yanaranra y Paiche. Al edificio se le asocia tres flujos de lava emplazados en el sector sur del volcán: (i) Flujo de lava andesítica porfirítica datado en 270.1 ± 6.2 ka; (ii) flujo de lava andesítica porfirítica y (iii) flujo de lava andesítica afanítica (Mariño et al., 2017).

2.3.2. Edificio Paiche

Ubicado en el extremo suroccidental del complejo volcánico Coropuna, entre los edificios escalera y Coropuna. Este edificio presenta 6 flujos de lava en bloques, así como domo y domos colada (Mariño et al., 2017). Este estratocono presenta un cráter de 0.8 km de diámetro, el cual está cubierto por una gruesa capa de glaciar.

2.3.3. Edificio Escalera

Se ubica en el extremo occidental del complejo volcánico Coropuna, al oeste de los edificios de Casulla y Paiche. A este edificio se le asocia 4 flujos de lavas emplazados en dirección oeste. Los flujos de lavas son denominados (i) flujos de lava andesítica porfirítica oscuro, (ii) secuencias de piroclastos y flujos de lavas, (iii) flujos de la andesítica porfirítica datado en 118 ± 2.3 ka (Bromley, 2019) y (iv) flujos de lava andesítica afirítica datada en 255 ± 5.4 ka.

2.3.4. Edificio Casulla

Está ubicado en el extremo noroccidental del complejo volcánico Coropuna. En la parte de la cima de este edificio se ha identificado un conjunto de domos, así como un cráter de aproximadamente 0.5 km de diámetro, ambos cubiertos por el glaciar. Al edificio se le asocia extensos flujos de lava en bloques de espesor variable que se encuentran emplazados al norte y noroeste, hasta poco más de 15 km de distancia. Se distinguen al menos 8 flujos de lava andesítica de textura porfirítica y afanítica. El flujo de lava más visible puede ser observado en el sector noroeste y se extiende aproximadamente a lo largo de 6 km. Un flujo ha sido datado en 12.5 ± 0.2 ka (Bromley, 2019).

2.3.5. Edificio Yanaranra

Se encuentra ubicado en el extremo oriental del complejo volcánico Coropuna y está emplazado sobre secuencias lávicas y piroclásticas. El edificio es considerado el más joven de dicho complejo, en el cual se han identificado 4 flujos de lava de composición andesítica. La más reciente se extiende en el sector noreste y sureste y tienen edades de 2.1 ± 0.2 ka y 0.7 ± 0.4 ka (Bromley et al., 2019; Úbeda, 2011).

2.4. CONTEXTO GLACIOLÓGICO

El Coropuna actualmente presenta la mayor reserva de agua en forma de casquete glacial de los 16 volcanes activos del sur del Perú, con una extensión de 44.1 km², siendo uno de los más importantes recursos hídricos para la región Arequipa que alberga una población de 1.38 millones personas (INEI, 2018). Sin embargo, este importante recurso está sufriendo un retroceso glacial a un ritmo de entre 0.41 km²/año (Kochtitzky et al., 2018). Desde el año 1980 al 2014, el casquete glacial disminuyó de 58.0 km² a 44.1 km², lo que significa una disminución del 24 % del área glacial en 34 años (Kochtitzky et al., 2018).

Con estas consideraciones, ante una probable reactivación volcánica o el desarrollo de abundantes precipitaciones pluviales, el peligro potencial que podría originar este macizo estaría relacionado a la generación de lahares o flujos de barro voluminosos que descenderían por las principales quebradas ubicadas en el flanco sur.

2.5. FUENTES TERMALES

La cobertura de hielo que presenta el volcán Coropuna impide distinguir evidencias sobre algún tipo de emisión fumarólica en las cumbres o sus flancos. Sin embargo, afloran fuentes termales en la parte baja de los flancos sur y norte del volcán en un radio menor a 25 km del centro del volcán. Úbeda (2011) ha identificado 7 fuentes termales en la zona del volcán Coropuna (Figura 7): (1) Huamán Loma, (2) Pucaylla, (3) Buena Vista, (4) Viques, (5) Collpa, (6) Acopallpa y (7) Antauro. La mayoría de ellas están localizadas al sur del volcán. Las temperaturas de las fuentes termales se encuentran entre 20 °C y 50 °C (Masías, 2018) (Figura 6).

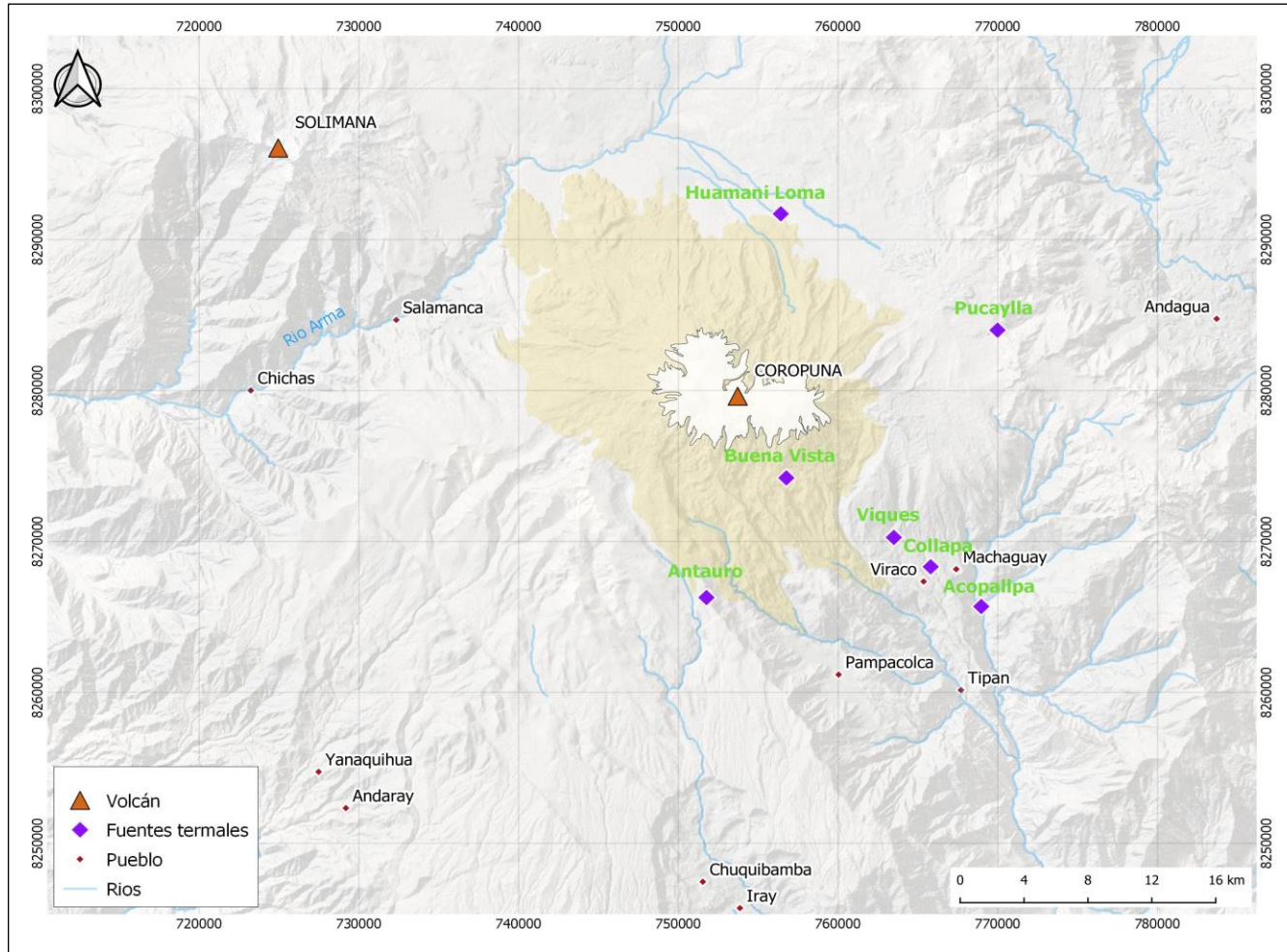


Figura 6.- Los rombos de color morado representan las fuentes termales localizadas alrededor del volcán Coropuna; el área pintada en amarillo corresponde a la extensión del complejo volcánico. El área de color blanco precisa la cobertura glaciar, mientras que en puntos rojos se señalan los principales centros poblados. Mapa modificado de Úbeda (2011).

CAPÍTULO III: DATOS GEOFÍSICOS Y METODOLOGÍA

En el presente trabajo se han utilizado los datos sísmicos registrados por el IGP durante los periodos 2001-2002, 2008-2010 y 2018-2019. Es importante mencionar que, desde mayo de 2018, correspondiente al último periodo (2018-2019), entró en funcionamiento la red de estaciones sísmicas para monitoreo permanente e investigación de la actividad volcánica del Coropuna. Además, se ha complementado la información con datos del catálogo de actividad sismovolcánica y mapas sísmicos elaborados por el IGP.

La metodología de trabajo consistió básicamente en el procesamiento y análisis de información geofísica registrada por las estaciones sísmicas instaladas en la zona del volcán Coropuna, utilizando programas computacionales especializados. Dichos programas nos permitieron calcular la energía sísmica, magnitud de los sismos, relación de velocidades de las ondas P y S (V_p/V_s) y modelo de velocidades.

3.1. DATOS GEOFÍSICOS

3.1.1. Periodo 2001-2002: Red Sísmica Nacional

El Instituto Geofísico del Perú opera la red sísmica nacional, la cual registra la ocurrencia de sismicidad en todo el territorio peruano incluyendo la zona del volcán Coropuna. Asimismo, mantiene actualizado el catálogo sísmico desde el año 1960 (Figura 7).

Los datos utilizados para este estudio corresponden a un catálogo de 2741 sismos de magnitud M4.0 a M8.4 registrados entre los años de 1960 a 2016, localizados entre las latitudes -14°S a 18°S que cubren la región sur del Perú.

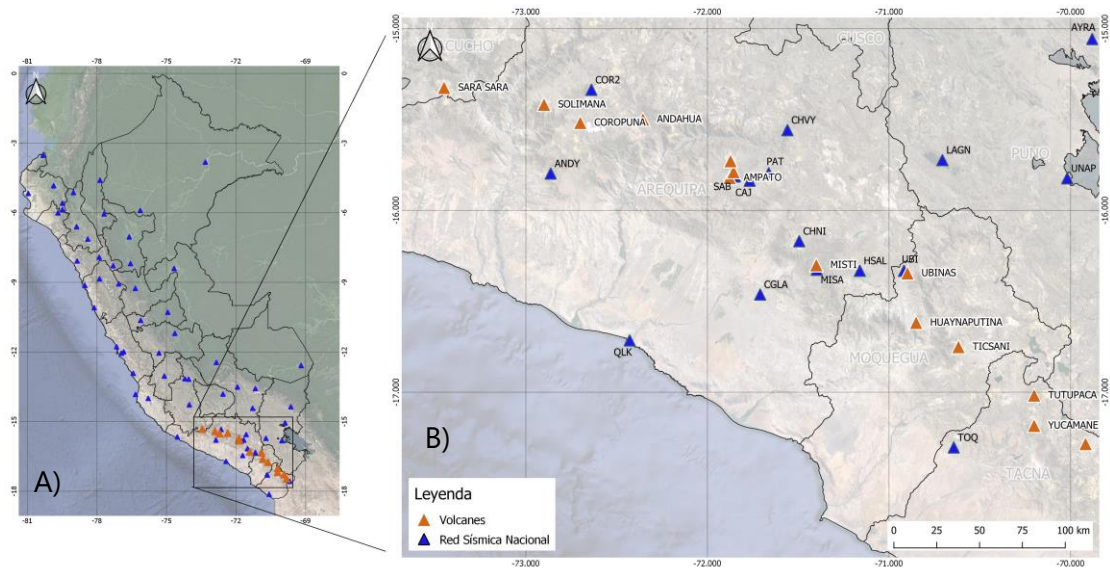


Figura 7.- A) En triángulos azules se representa la ubicación de las estaciones sísmicas que conforman la Red Sísmica Nacional operada por el Instituto Geofísico del Perú. B) Mapa que muestra la distribución de estaciones sísmicas en la zona sur del Perú. En triángulos naranjas la ubicación de los volcanes activos.

3.1.2. Periodo 2008-2010: red sísmica temporal

El proyecto VOLUME (*Volcanoes: Understanding subsurface mass movement*), ejecutado entre los años 2008-2010 en cooperación con el IRD (Francia), permitió recabar información sísmica en los volcanes activos del sur del Perú. En el volcán Coropuna se instaló una estación sísmica denominada CPN, localizada a menos de 8 km al oeste del centro volcánico (Figura 8), la cual funcionó temporalmente desde el 2008 hasta el 2010. El equipo sísmico correspondió a un registrador *Titan* con un sensor de periodo corto marca *Mark Products* de una sola componente (componente Z).

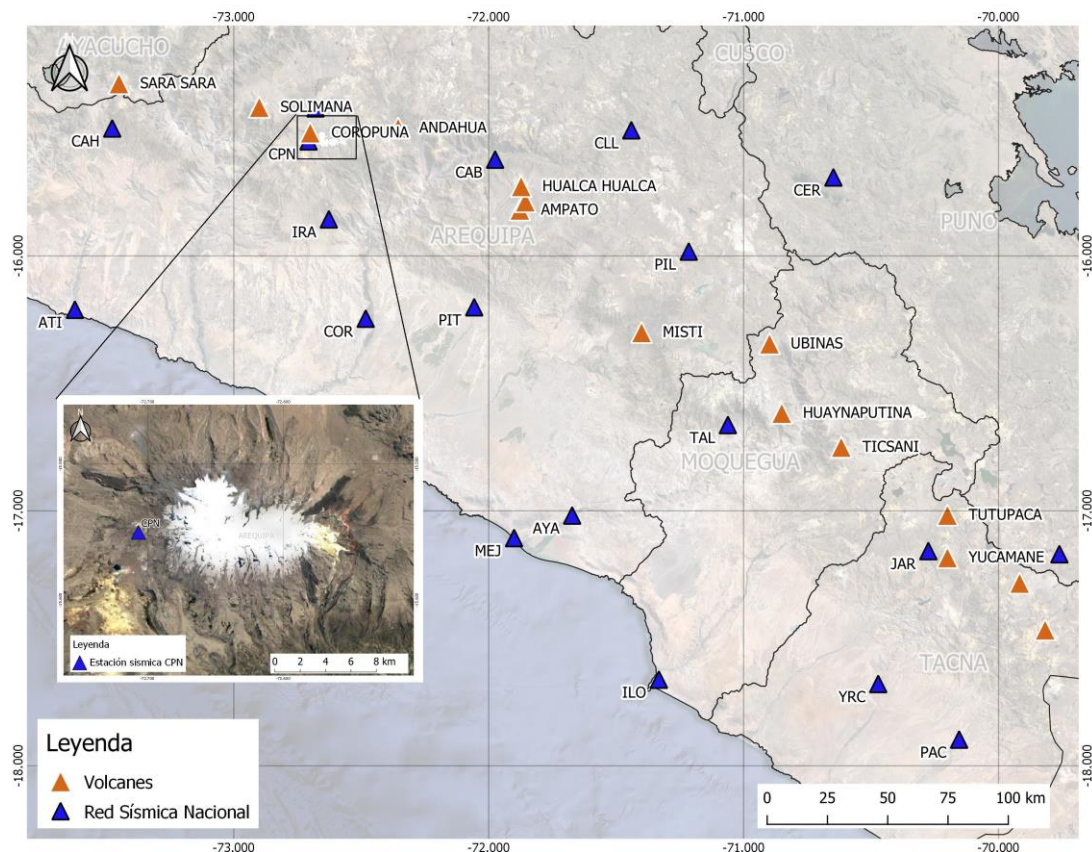


Figura 8.- Ubicación de las estaciones temporales instaladas dentro del marco del Proyecto VOLUME. El recuadro a la izquierda detalla la ubicación de la estación CPN, situada a 8 km al oeste del volcán Coropuna.

3.1.3. Periodo 2018-2019: red sísmica permanente del volcán Coropuna

La red sísmica permanente del volcán Coropuna inicia su funcionamiento en mayo de 2018 y continúa operando hasta la actualidad. Esta red consta de cinco estaciones de banda ancha marca *Trillium compact* 120s, con registrador *RefteK* (Cuadro 1), configuradas a 100 muestras por segundo. Los datos se transmiten en tiempo real vía telemetría a la oficina del IGP-Sede Arequipa (Figura 9).

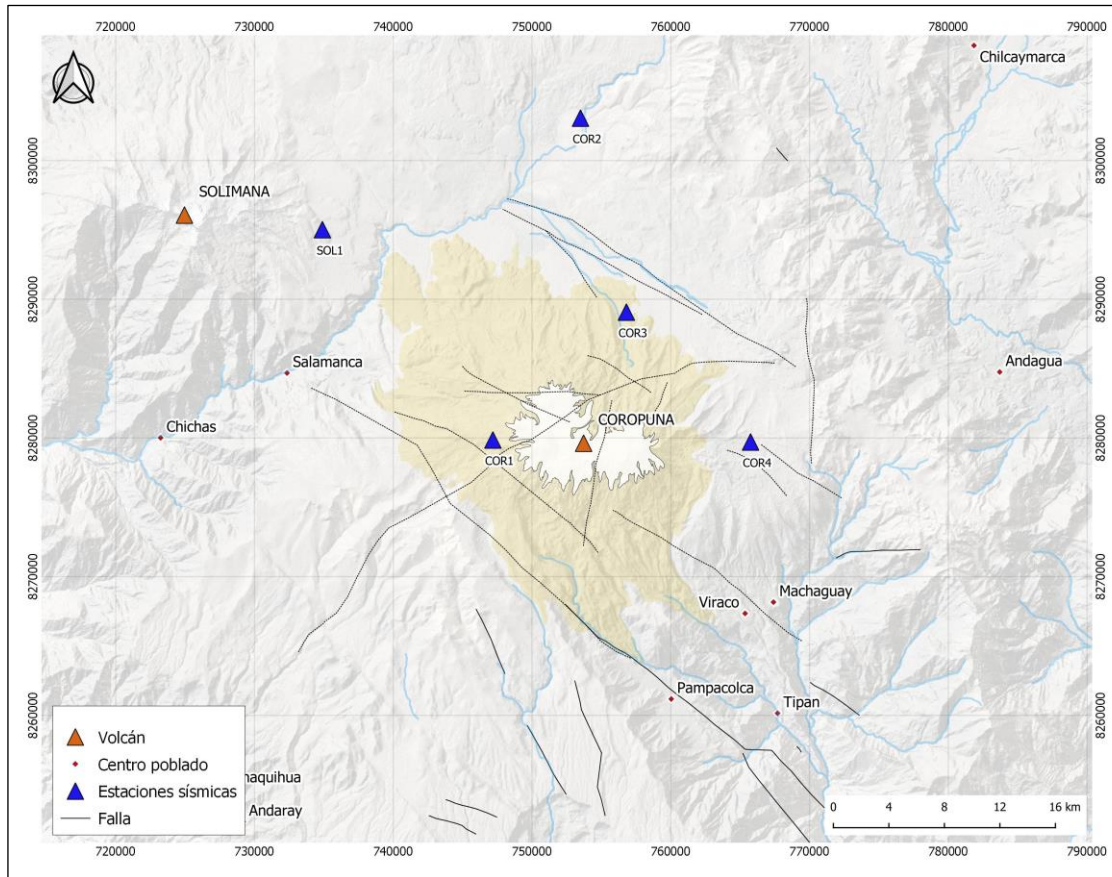


Figura 9.- Mapa de ubicación de la red sísmica del volcán Coropuna implementada en 2018. Los triángulos azules representan la ubicación de las estaciones sísmicas; los puntos rojos, los principales centros poblados.

En el Cuadro 1 se describe las características y el inicio de funcionamiento de las estaciones sísmicas.

ESTACIÓN		FECHA INICIO DE FUNCIONAMIENTO	SISMÓMETRO		DIGITALIZADOR
COROPUNA 1	COR1	08/05/2018	BH	TRILLIUM	REFTEK
COROPUNA 2	COR2	06/11/2018	BH	TRILLIUM	REFTEK
COROPUNA 3	COR3	06/11/2018	BH	TRILLIUM	REFTEK
COROPUNA 4	COR4	06/11/2018	BH	TRILLIUM	REFTEK
SOLIMANA	SOLI	09/11/2018	BH	TRILLIUM	REFTEK

Cuadro 1.- Detalle de las cinco estaciones sísmicas desplegadas en la zona del volcán Coropuna: nombre de la estación, código, fecha de funcionamiento, marca del sismómetro y digitalizador.

3.1.4. Catálogos de actividad sismovolcánica

Son elaborados a partir de la clasificación y análisis manual de cada evento sísmico registrado por la red de monitoreo geofísico del volcán Coropuna, cuya fuente está localizada al interior y al alrededor del volcán. Estos documentos contienen al detalle el tipo de evento, la fecha y hora del evento, frecuencia principal, amplitud pico, duración y energía del evento sísmico. Recientemente, en algunos casos, muestra la magnitud local, desplazamiento reducido, así como las coordenadas y altitud de los sismos que fueron localizados (Figura 10).

Los catálogos de actividad sismovolcánica son un producto de la unidad del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) y son de emisión anual. El catálogo contiene el análisis de información sísmica desde septiembre de 2009 a febrero de 2010 y de mayo de 2018 a diciembre de 2019, respectivamente. Durante estos periodos, el personal geofísico del IGP analizó y clasificó aproximadamente 7000 sismos volcánicos registrados.

Catálogo de Actividad Sismo-Volcánica del Coropuna, periodo Mayo-Diciembre 2018												
IDE (VOL-AN-No)	EST. REF.	TIPO	FECHA Y HORA (UTC) AN-MS-Da Hra. Min. Seg.	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	ELEVACIÓN (km)	FREC. (Hz)	DUR. (Seg.)	MAG. (ML)	D.R. (cm ²)	ENERGIA (MJ)	
CR-18-00001	COR1	VT	2018-05-25 01:15:43	---	---	---	5.1	16	1.5		1.06E-03	
CR-18-00002	COR1	VT	2018-05-25 02:38:57	---	---	---	3.1	18	1.6		1.75E-03	
CR-18-00003	COR1	IQ	2018-05-25 03:48:03	---	---	---	17.0	2			1.00E-05	
CR-18-00004	COR1	IV	2018-05-25 04:46:00	---	---	---	6.3	18			3.36E-02	
CR-18-00005	COR1	IV	2018-05-25 06:13:01	---	---	---	5.8	91			1.22E-02	
CR-18-00006	COR1	VT	2018-05-25 06:43:23	---	---	---	5.3	12	1.3		3.11E-04	
CR-18-00007	COR1	VT	2018-05-25 07:31:13	---	---	---	4.9	12	1.3		4.63E-04	
CR-18-00008	COR1	IV	2018-05-25 07:57:26	---	---	---	2.6	24			9.27E-04	
CR-18-00009	COR1	VT	2018-05-25 08:11:21	---	---	---	4.8	17	1.6		7.42E-04	
CR-18-00010	COR1	VT	2018-05-25 08:15:57	---	---	---	5.5	13	1.4		9.30E-04	
CR-18-00011	COR1	VT	2018-05-25 09:06:58	---	---	---	5.2	12	1.3		1.30E-04	
CR-18-00012	COR1	VT	2018-05-25 12:37:22	---	---	---	5.7	17	1.6		3.85E-03	
CR-18-00013	COR1	IQ	2018-05-26 00:48:21	---	---	---	9.6	12			1.05E-04	
CR-18-00014	COR1	IQ	2018-05-26 00:48:48	---	---	---	10.6	8			7.10E-05	
CR-18-00015	COR1	IV	2018-05-26 00:48:56	---	---	---	10.6	15			6.38E-04	
CR-18-00016	COR1	IQ	2018-05-26 00:49:14	---	---	---	9.5	5			6.60E-05	
CR-18-00017	COR1	IQ	2018-05-26 00:49:20	---	---	---	9.8	6			1.40E-05	
CR-18-00018	COR1	IQ	2018-05-26 00:49:31	---	---	---	9.5	6			1.10E-05	
CR-18-00019	COR1	IQ	2018-05-26 00:49:38	---	---	---	9.7	4			7.00E-06	
CR-18-00020	COR1	IQ	2018-05-26 00:49:42	---	---	---	9.6	5			1.70E-05	
CR-18-00021	COR1	VT	2018-05-26 00:55:18	---	---	---	13.8	16	1.5		8.35E-04	
CR-18-00022	COR1	IV	2018-05-26 01:52:14	---	---	---	1.9	39			1.05E-02	
CR-18-00023	COR1	IV	2018-05-26 02:12:28	---	---	---	4.3	24			8.95E-04	
CR-18-00024	COR1	IV	2018-05-26 09:49:07	---	---	---	3.4	43			6.56E-02	
CR-18-00025	COR1	IV	2018-05-26 10:09:19	---	---	---	3.5	27			2.52E-03	
CR-18-00026	COR1	IV	2018-05-26 18:04:40	---	---	---	5.4	49			9.08E-01	
CR-18-00027	COR1	IV	2018-05-26 18:52:09	---	---	---	9.5	10			1.54E-02	
CR-18-00028	COR1	IQ	2018-05-26 19:06:05	---	---	---	10.9	6			7.30E-05	
CR-18-00029	COR1	IQ	2018-05-26 19:15:24	---	---	---	20.2	1			0.00E+00	
CR-18-00030	COR1	IV	2018-05-26 20:44:26	---	---	---	17.1	4			1.91E-04	
CR-18-00031	COR1	IV	2018-05-26 20:56:51	---	---	---	12.8	11			1.18E-03	
CR-18-00032	COR1	IV	2018-05-26 21:39:54	---	---	---	27.3	5			5.86E-03	
CR-18-00033	COR1	IV	2018-05-26 21:48:57	---	---	---	23.9	3			5.00E-06	
CR-18-00034	COR1	VT	2018-05-27 01:00:50	---	---	---	5.3	27	2.0		9.48E-04	
CR-18-00035	COR1	VT	2018-05-27 01:51:26	---	---	---	3.9	19	1.7		1.05E-03	
CR-18-00036	COR1	VT	2018-05-27 03:21:05	---	---	---	4.9	17	1.6		2.20E-04	
CR-18-00037	COR1	VT	2018-05-27 03:24:20	---	---	---	4.1	20	1.7		9.13E-04	
CR-18-00038	COR1	IV	2018-05-27 03:59:25	---	---	---	5.1	26			3.49E-04	
CR-18-00039	COR1	VT	2018-05-27 04:04:50	---	---	---	5.8	19	1.7		4.62E-04	
CR-18-00040	COR1	VT	2018-05-27 04:23:10	---	---	---	5.9	14	1.4		8.00E-05	
CR-18-00041	COR1	IQ	2018-05-27 04:55:55	---	---	---	40.4	1			0.00E+00	
CR-18-00042	COR1	IV	2018-05-27 05:37:53	---	---	---	14.8	7			1.23E-03	
CR-18-00043	COR1	IV	2018-05-27 05:40:21	---	---	---	12.1	4			6.56E-04	
CR-18-00044	COR1	VT	2018-05-27 07:46:25	---	---	---	3.9	23	2.0		1.25E-03	
CR-18-00045	COR1	VT	2018-05-27 07:48:26	---	---	---	3.5	29	2.1		1.03E-03	
CR-18-00046	COR1	VT	2018-05-27 08:31:18	---	---	---	5.1	14	1.5		3.47E-04	
CR-18-00047	COR1	VT	2018-05-27 10:49:05	---	---	---	3.1	15	1.6		5.59E-04	
CR-18-00048	COR1	VT	2018-05-27 10:49:42	---	---	---	5.0	21	1.9		1.05E-03	
CR-18-00049	VT	VT	2018-05-27 11:07:45	---	---	---	5.0	30	1.9		1.54E-03	

Figura. 10.- Ejemplo del catálogo sísmico de actividad sismovolcánica elaborado por la unidad del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS)-IGP.

3.1.5. Mapas de actividad sismovolcánica

Los mapas de actividad sismovolcánica nos permiten conocer la distribución espacial de la sismicidad bajo el edificio volcánico. Para elaborar este producto es preciso identificar claramente las fases P y S de los eventos sísmicos de tipo Volcano-Tectónico (VT) o fractura, ya que este tipo de señales, según los resultados mostrados más adelante, es el que ocurre más frecuentemente en el volcán. Como parte del informe, estos mapas sísmicos fueron elaborados para los periodos 2001-2002 y 2018-2019 en la zona del volcán Coropuna. Para el periodo 2008-2010 solo se contaba con una sola estación, razón por la cual fue complicado realizar los mapas de localización sismovolcánica.

En el presente trabajo, la localización de los parámetros hipocentrales de los sismos (VT) se analizó con el programa HYPOELLIPSE, desarrollado en el lenguaje de programación Fortran por John C. Lahr (1999), basado en los principios de Geiger (1912).

3.2. METODOLOGÍA

La metodología del presente trabajo consta fundamentalmente de cinco fases: (1) clasificación de señales sísmicas, mediante el análisis de la forma de onda y contenido espectral, utilizando las metodologías ya existentes de clasificación de señales sismovolcánicas e identificación de fuentes sísmicas; (2) cálculo de la energía sísmica, utilizada para medir la magnitud del sismo en términos de energía liberada por la fuente; (3) cálculo de la magnitud de los sismos, para la cual se utiliza la duración del sismo y la distancia epicentral; (4) cálculo de la relación de velocidades V_p/V_s ; y (5) cálculo del modelo de velocidad, utilizado para determinar los parámetros de localización de un sismo.

3.2.1. Clasificación de señales sísmicas

En las últimas décadas, se han desarrollado varias metodologías de clasificación de señales sismovolcánicas: Shimosuru (1971); Minakani (1974); McNutt (2000); Chouet (1996); Ibáñez (2000), etc. Sin embargo, cada autor plantea un método con características propias, dejando algunos vacíos cuando un volcán en particular presenta señales que no se ajustan a su clasificación.

En la zona del volcán Coropuna, la clasificación sísmica se realizó para dos periodos de registro: 2008-2010 y 2018-2019. En estas etapas, se han clasificado y caracterizado tres tipos de sismos volcánicos: Volcano-Tectónico (VT), Largo Periodo (LP) y eventos tipo Tremor (TRE). Las características de estos eventos se asemejan a sismos típicamente registrados en ambientes volcánicos. Asimismo, se registraron sismos asociados a la dinámica del glaciar del Coropuna (DG).

A continuación, se describe cada grupo de las señales sísmicas registradas en la zona del volcán Coropuna, identificando su forma de onda en el dominio del tiempo, analizando su contenido espectral y mecanismo de fuente.

3.2.1.1. Señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónico (VT)

Los sismos de tipo Volcano-Tectónico están caracterizados por poseer, en algunos casos, ondas con arribo impulsivo de sus fases P y S (Figura 11 y 12), típicamente con una amplia banda espectral de hasta 20 Hz (Lahr, 1994).

En el volcán Coropuna, los sismos de tipo Volcano-Tectónico se caracterizan por presentar una banda espectral de entre 2 Hz a 17 Hz y una duración promedio de 11 a 25 segundos. De acuerdo a su forma de onda y a la diferencia del tiempo de llegada de las ondas P y S, se han dividido estos eventos en dos subclases: VT proximales y VT distales. Ambos deben su origen al fracturamiento de rocas al interior del edificio volcánico como resultado de esfuerzos causados, en buena parte, por la presión de fluidos (White y McCausland, 2016).

Los sismos de tipo Volcano-Tectónico proximales presentan diferencia del tiempo de llegada (S-P) menor a 1 segundo y su duración promedio es de 15 segundos.

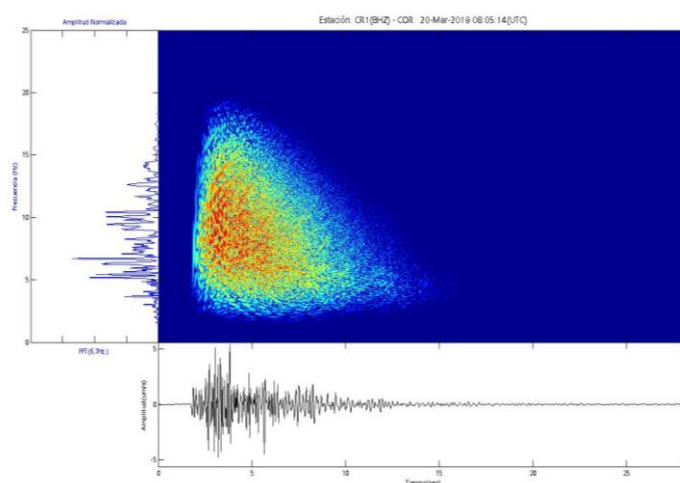


Figura 11.- Ejemplo típico de un evento tipo Volcano-Tectónico proximal en el volcán Coropuna. Evento registrado el 20/03/2019 a las 08:05:14 UTC en la estación COR1, componente Z (vertical).

Los sismos de tipo Volcano-Téctónico distales presentan diferencia de tiempos de S-P mayor a 1 segundo (Figura 12).

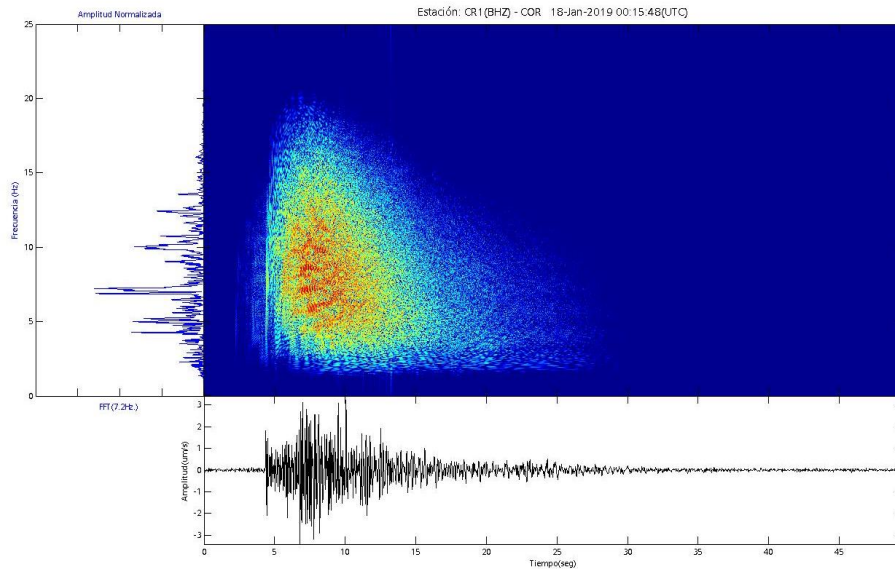


Figura 12.- Ejemplo de un sismo de tipo Volcano-Téctónico distal en el volcán Coropuna. El evento fue registrado el 18/01/2019 a las 00:15:48 UTC por la estación COR1, componente Z (vertical).

La importancia de registrar y analizar los sismos de tipo Volcano-Téctónico o de fractura se debe a que estos se originan en las primeras fases de un proceso eruptivo, ligados al ascenso de magma que genera una presión que fractura las rocas subyacentes de un volcán. También se generan debido a la actividad de fallas existentes en la región a consecuencia de esta presión (Wassermann, 2002 y White y McCausland, 2016).

3.2.1.2. Señales sísmicas de tipo Largo Periodo (LP)

Los sismos de tipo Largo Periodo (LP) son conocidos también como eventos de baja frecuencia (*Low frequency-LF*) y corresponden a señales típicas de ambientes volcánicos. Es difícil determinar el momento exacto del comienzo de la señal puesto que no presentan llegadas definidas de ningún tipo de fase (P y S). El contenido espectral

es restringido a bandas de frecuencia relativamente bajas, de entre 0.2 Hz a 6 Hz (Zobin, 2012).

En el volcán Coropuna, este tipo de señal se caracteriza por presentar banda espectral estrecha menor a 6 Hz y una duración promedio de 20 segundos (Figura 13A y B). La mayoría de estos eventos son registrados primero en la estación COR1 y luego en las demás estaciones.

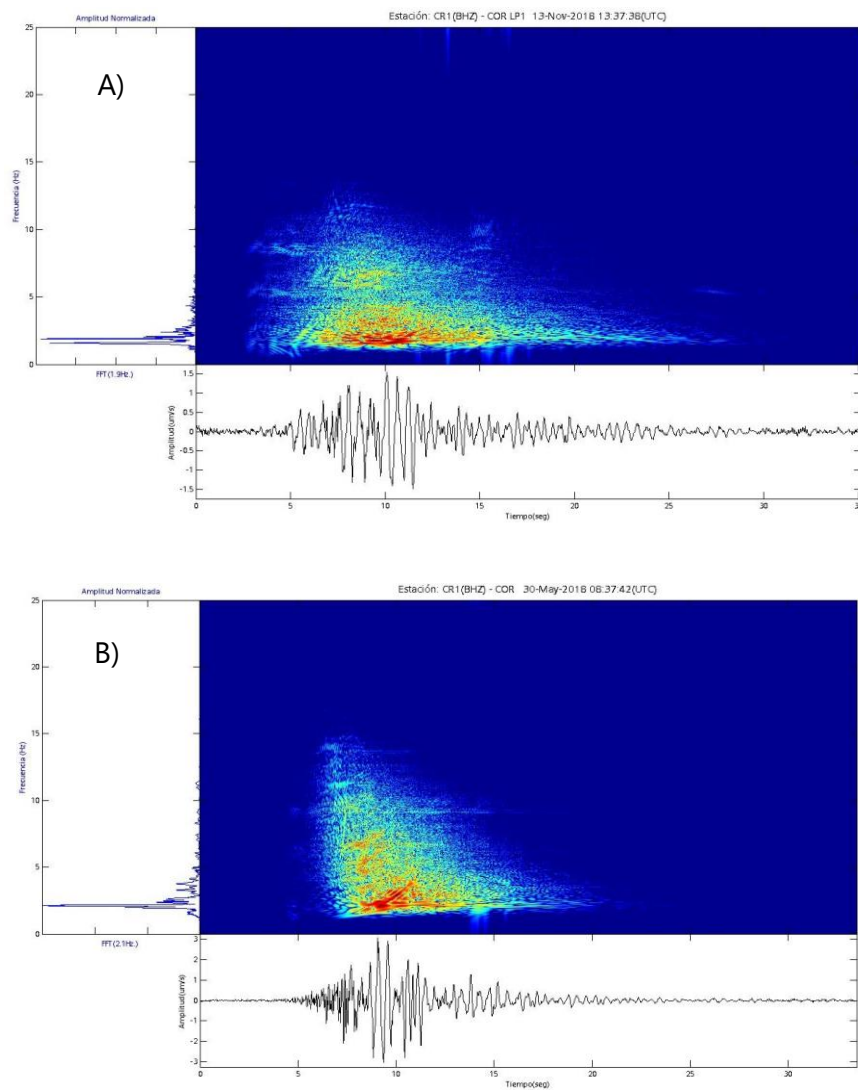


Figura 13.- Ejemplos de sismos de tipo Largo Periodo (LP) registrados en el volcán Coropuna por la estación (COR1), situada a menos de 6 km del volcán. Se observa en todas las señales el arribo emergente de la fase P y una estrecha banda de frecuencia menor a 5Hz.

Los modelos de fuente asociados a los eventos de tipo Largo Periodo (LP) varían desde una grieta abierta que resuena cuando el magma asciende hacia la superficie (Chouet et al., 1996) hasta la existencia de presiones transitorias dentro de una mezcla de fluido y gas (magma), de baja viscosidad, causando resonancia en el mismo magma (Seidl et al., 1981).

3.2.1.3. Señales sísmicas de tipo Tremor Espasmódico

Los tremores volcánicos son el tipo de señal sismovolcánica más común registrada en la mayoría de volcanes en el mundo en sus distintas etapas de actividad. El Tremor es un registro continuo de vibraciones monótonas o no armónicas del suelo que puede tener una duración de minutos, días o meses (Zobin, 2012). El Tremor Espasmódico está caracterizado por distribuir la energía en una banda de frecuencia ancha, usualmente en el rango de 2 Hz a 9 Hz; por tal motivo, puede presentar picos espectrales menores a ese rango de frecuencias (Figura 14). Estos eventos de tipo Tremor Espasmódico en el volcán Coropuna presentan una amplia banda espectral y continuo registro de vibraciones no armónicas que pueden continuar por varios minutos o días (Figura 14).

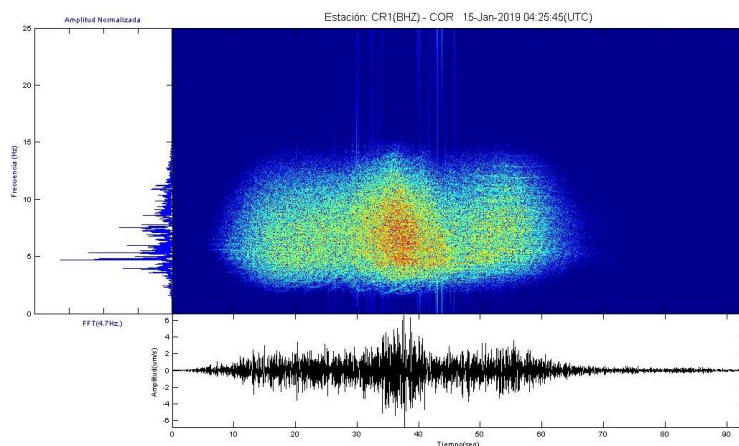


Figura 14.- Tremor Espasmódico registrado en el volcán Coropuna por la estación sísmica COR1. Lo resaltante de estos eventos es su duración superior a los 40 segundos.

3.2.1.4. Señales sísmicas asociadas a la dinámica de glaciar (DG)

Este tipo de señal sísmica presenta, en general, variaciones de frecuencia de entre 3 Hz a 20 Hz y duración promedio de 11 segundos, aunque, en algunos casos puede durar hasta minutos (Figura 15).

El volcán nevado Coropuna presenta uno de los casquetes glaciares más extensos (44.1 km²) del sur del Perú. Su dinámica y deshielo origina diferentes tipos de señales que son registradas por la red de estaciones de monitoreo instaladas muy próximas al volcán.

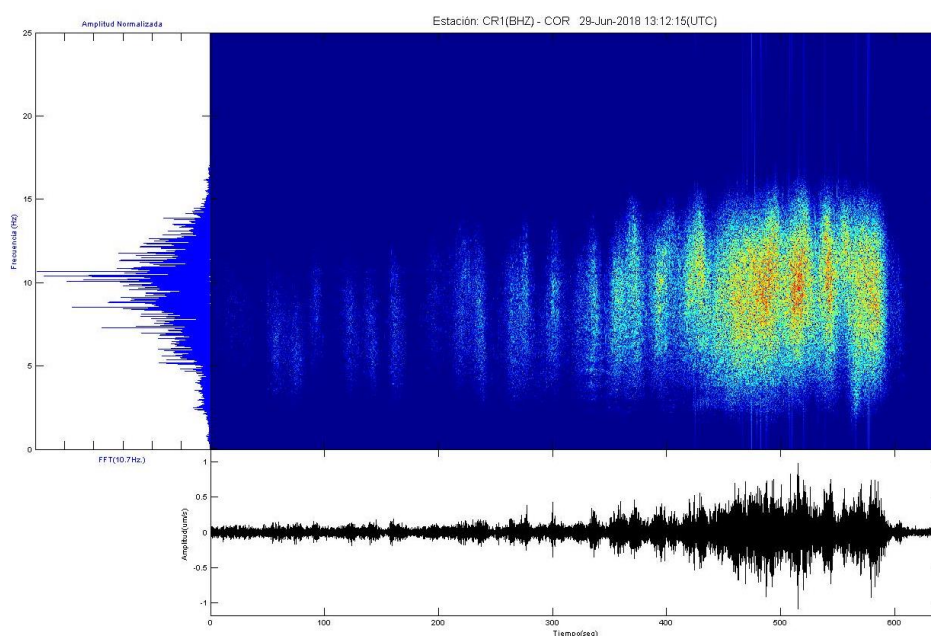


Figura 15.- Ejemplo de sismo que estaría asociado a la dinámica del casquete glaciar del volcán Coropuna. Estos eventos son registrados por la estación COR1 y se caracterizan por presentar un ancho de banda que varía entre 3 Hz a 20 Hz.

3.2.2. 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).

Se ha realizado el cálculo de la energía sísmica liberada en inmediaciones del volcán Coropuna en el periodo 2008-2010 y 2018-2019 con datos de las estaciones de referencia CPN (instalada en septiembre de 2008) y COR1 (instalada en mayo de 2018), ambas ubicadas a menos de 8 km del volcán, de acuerdo con 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 es la siguiente:

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

donde:

r : distancia fuente-estación

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

3.2.3. Cálculo de la magnitud local

Para el cálculo de la magnitud de los sismos registrados en la zona del volcán Coropuna se ha utilizado como parámetros importantes la duración del sismo (T) y la distancia epicentral (Δ) (Lee et al., 1972).

La magnitud Richter de sismos locales pueden ser convenientemente estimada desde la duración de la señal usando una 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

3.2.4. Cálculo de la relación de velocidades (Vp/Vs)

La mayoría de los algoritmos de localización de sismos utilizan como parámetro importante la relación de velocidades de las ondas P y S (Vp/Vs).

A fin de obtener este valor (Vp/Vs) para la zona del volcán Coropuna, en el presente trabajo se utilizó 566 lecturas de sismos registrados por la red del volcán Coropuna, con diferencia de tiempos de las ondas P y S (Ts-Tp) menor a 20 segundos. El procedimiento seguido permite construir la curva de Wadati, obtenida a partir de los tiempos de llegada de las ondas P y S de un número determinado de sismos en una serie de estaciones. Los valores utilizados en el ajuste corresponden a la diferencia de tiempo existente para cada sismo, entre el valor del tiempo de llegada mínimo con los valores mayores, tanto para la onda P como para la onda S (Ts-Tsmin vs. Tp-Tpmin). Conocidos estos valores, se procedió a construir el gráfico de la Figura 16, cuyo ajuste de la tendencia sigue una recta con pendiente igual a 1.67. Este valor para la relación de velocidades es similar a otros valores obtenidos en diversos estudios de microsismicidad superficial (Dorbath et al., 1991; Lindo, 1993; Tavera et al., 2000).

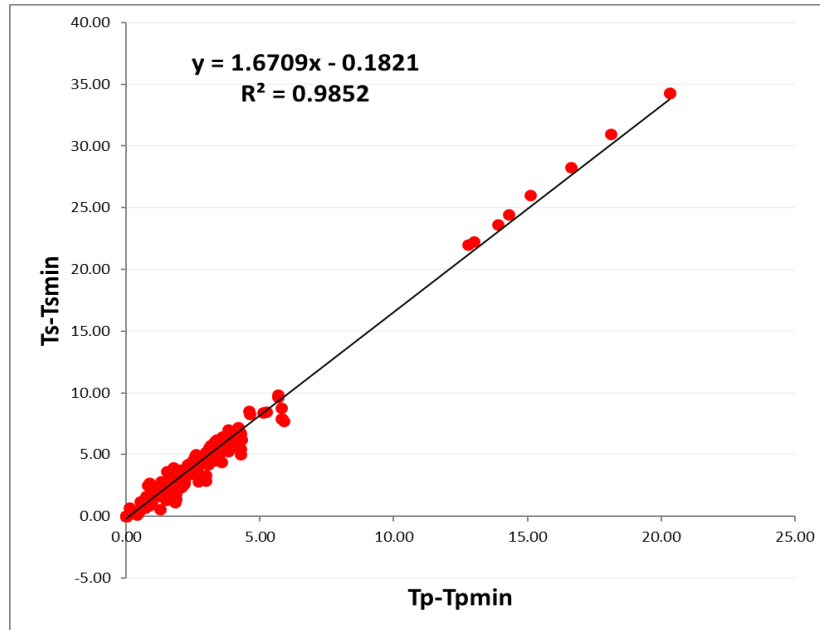


Figura 16.- Curva de Wadati para los sismos ocurridos en la región del volcán Coropuna. T_p y T_s son los tiempos de llegada de las ondas P y S, donde la pendiente de la recta representa la relación $V_p/V_s = 1.67$.

3.2.5. Modelo de velocidad

Uno de las componentes más importantes para realizar la localización de los parámetros de los sismos volcánicos involucra el desarrollo de un modelo de velocidades con la mayor exactitud posible, cercano a la realidad.

Como parte del presente informe, para la zona del volcán Coropuna se desarrolló un modelo de velocidad, el cual consiste en realizar diversos test o pruebas de diversos modelos usando, en este caso, el programa VELEST (Kissling et al., 1995), desarrollado por el *Institute of Geophysics, ETH Zuerich*.

Los datos utilizados para el cálculo del modelo de velocidad corresponden al periodo 2018-2019 de la red sísmica del volcán Coropuna. El modelo inicial utilizado presenta 12 capas con velocidades que varían de entre 4.3 km/s a 5.9 km/s hasta los 15 km de profundidad (Figura 17). En líneas grises se observa las inversiones realizadas mediante el programa VELEST. Se tuvo por conveniente realizar 10 inversiones hasta obtener valores de RMS menores a 0.6.

Modelo inicia VELEST	
Profundidad (Km)	Vp (Km/s)
0.0	4.38
1.0	4.65
5.0	4.88
6.0	4.98
7.0	5.10
8.0	5.22
9.0	5.27
10.0	5.57
11.0	5.66
12.0	5.60
13.0	5.82
15.0	5.91

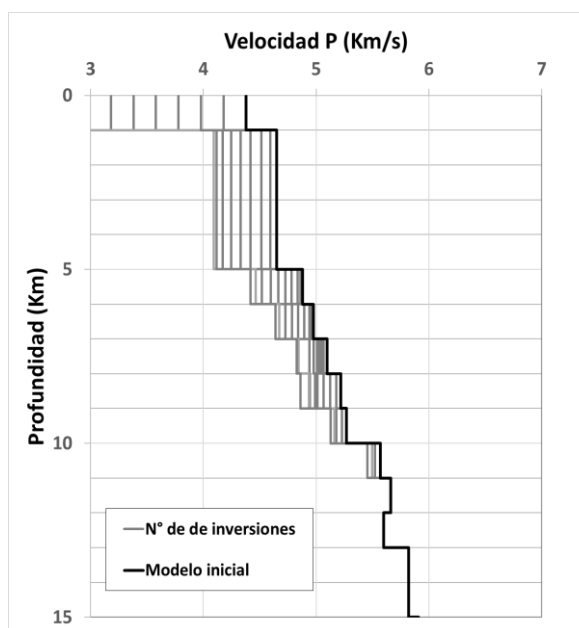


Figura 17.- En el cuadro de la izquierda se observa los valores del modelo inicial ingresado al programa VELEST. En la derecha, en líneas grises, se muestra las inversiones realizadas por el programa VELEST; en línea negra, el modelo inicial.

Para el cálculo del modelo de velocidad se seleccionaron sismos que cumplan con las siguientes características requeridas por el programa VELEST: parámetros de localización, tiempos de arribo de las ondas P y S, distribución acimutal (GAB) ≤ 180 , raíz de la media cuadrática (RMS) < 1.0 y sismos que presenten 5 a más lecturas de las fases P y S. Para el volcán Coropuna, 58 sismos cumplieron con las características antes mencionadas, con los cuales se procedió a calcular el modelo de velocidad.

Finalmente, el modelo de velocidades (1D) propuesto para la zona del volcán Coropuna presenta 12 capas con un RMS < 0.6 , cuyas velocidades de las capas varían entre 4.58 km/s a 5.91 km/s (Figura 18).

Modelo final VELEST	
Profundidad (Km)	Vp (Km/s)
0.0	4.58
1.0	4.70
5.0	4.89
6.0	4.99
7.0	5.13
8.0	5.22
9.0	5.27
10.0	5.57
11.0	5.66
12.0	5.60
13.0	5.82
15.0	5.91

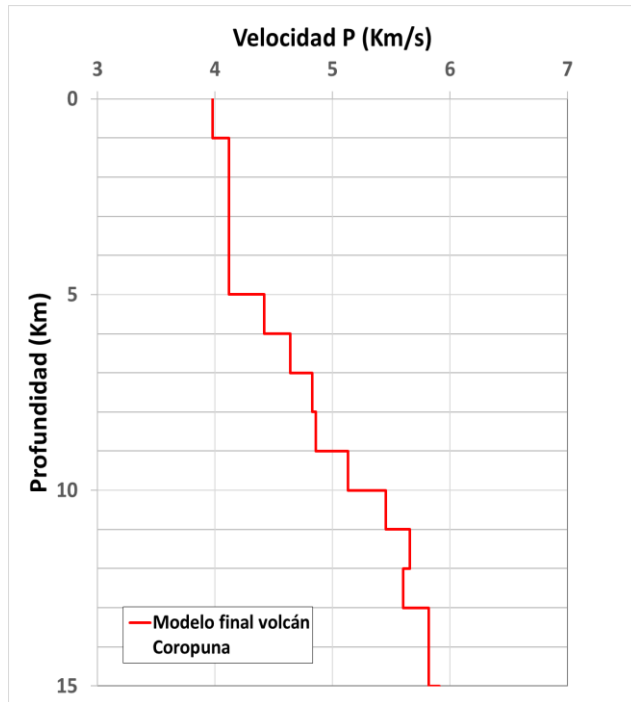


Figura 18.- El cuadro de la izquierda corresponde a los valores del modelo de velocidades final propuesto para la zona del volcán Coropuna, donde las profundidades de las capas están en kilómetros y el valor Vp corresponde a las velocidades de la onda P en kilómetros por segundo (km/s). En la derecha, la línea roja corresponde a la variación de las velocidades en profundidad hasta los 15 km.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS LA ACTIVIDAD SISMOVOLCÁNICA EN EL COROPUNA

En este capítulo se presentan los resultados y análisis de la información geofísica de los periodos 2001-2002, 2008-2010 y 2018-2019, registrada por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) en la región del volcán Coropuna.

Para el primer periodo (2001-2002) se realiza el análisis y la discriminación de eventos que estarían relacionados a la actividad del volcán Coropuna, utilizando el catálogo de eventos sísmicos registrados por la Red Sísmica Nacional del IGP. Para el segundo periodo (2008-2010) y tercer periodo (2018-2019), se realizó el análisis de los tipos de sismos registrados por la red geofísica instalada en la zona del volcán Coropuna con la finalidad de determinar su probable fuente de ocurrencia, ello mediante la caracterización de las señales sísmicas, forma de onda, análisis estadístico y localización de sismos.

4.1. ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA EN EL PERIODO 2001-2002

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) mantiene un catálogo sísmico desde 1960, elaborado mediante el registro sísmico de la red nacional. En el sector sur del Perú, en donde se hallan emplazados los 16 volcanes activos incluyendo el volcán Coropuna, se observó la ocurrencia de un total de 2476 señales durante los años de 1960 a 2016. De dicho total, aproximadamente 900 sismos tuvieron magnitudes entre M4.0 a M5.5. La localización de los sismos está delimitada dentro del área comprendida entre las latitudes 13°S y 19°S (Figura 19). Es importante resaltar que la magnitud de los sismos en ambientes volcánicos (por ejemplo, sismos de tipo Volcano-Tectónico) presenta, generalmente, valores menores a M5.5, superando rara vez dicha magnitud.

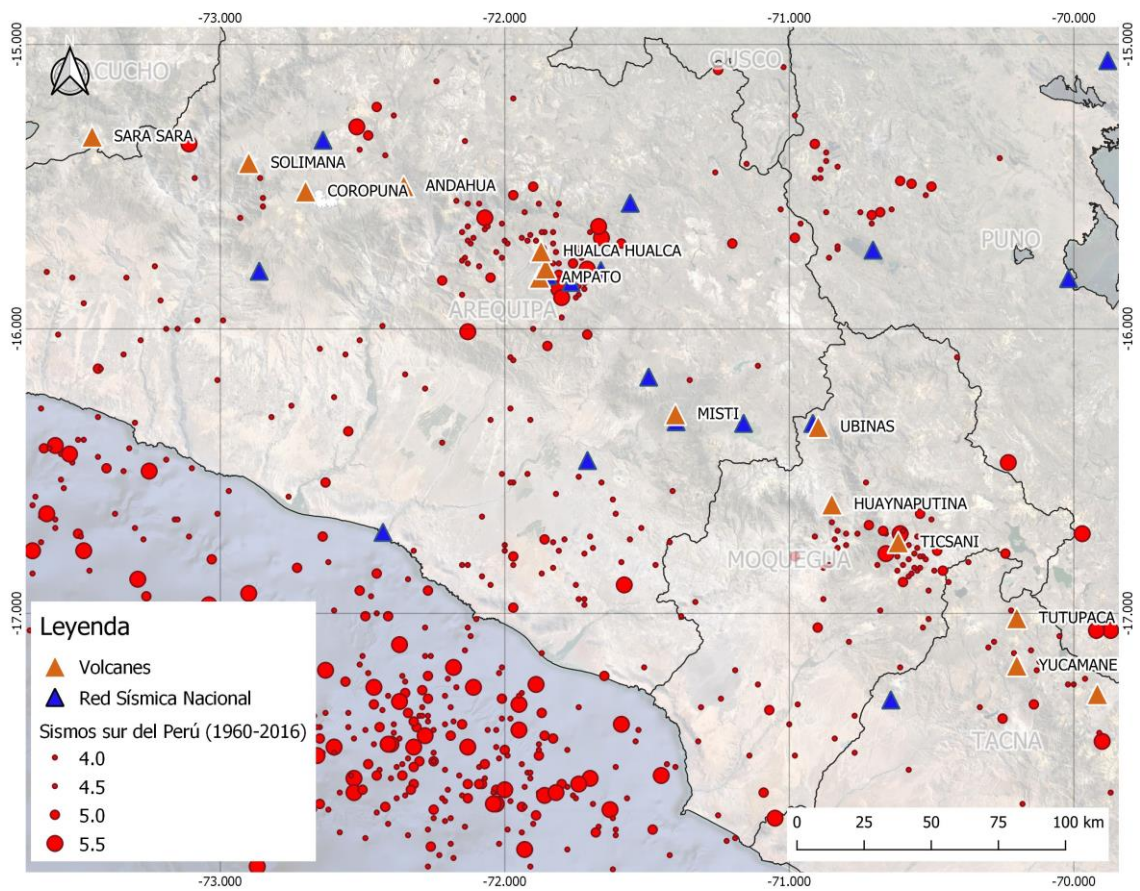


Figura 19.- Mapa sísmico elaborado con información del catálogo del IGP para el periodo 1960 a 2016. En el mapa se visualizan solamente los sismos con magnitudes menores a M5.5. Los círculos rojos representan los sismos ocurridos en el sur del Perú.

Del total de 2476 sismos registrados en las inmediaciones del volcán Coropuna, se han seleccionado 9 sismos con magnitudes entre M4.0 a M5.5, con profundidades menores a 36 km. Estos corresponden a probables eventos asociados a la actividad del Coropuna ocurridos en el periodo 2001-2002 (Figura 20).

Los sismos elegidos han sido obtenidos como producto de un filtraje por distancia epicentral al centro volcánico y por profundidad (hipocentro). De acuerdo con estudios de White y McCausland (2016), la ocurrencia de sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) en ambientes volcánicos ocurre generalmente entre 2 km a 45 km de distancia epicentral desde la fuente y entre 15 km a 20 km de profundidad.

En la Figura 20 se muestran los sismos distales localizados en dos zonas:

La primera (zona1) fue localizada a 24 km al oeste del volcán, en donde se identificaron 3 sismos con magnitudes de entre M4.2 y M4.3, los cuales ocurrieron en los meses de noviembre de 1997, enero y mayo de 2002 respectivamente (Figura 20).

En la segunda zona se identificaron 5 sismos, los cuales fueron localizados a 30 km al noreste del volcán con magnitudes de entre M4.3 a M5.0. Estos eventos ocurrieron en los meses de diciembre de 2001, abril y julio de 2002 (Figura 20).

En el cuadro 2 se detallan los parámetros hipocentrales de los posibles sismos de tipo VT distales ocurridos en la zona del volcán Coropuna, la mayoría de ellos registrados entre los años 2001 y 2002.

ID	Fecha	Hora (UTC)	Latitud	Longitud	Profundidad (Km)	Magnitud (ML)
1	4/11/1997	14:17:08	-15.47	-72.86	33	4.2
2	26/01/2002	16:20:08	-15.57	-72.85	36	4.5
3	19/05/2002	01:19:31	-15.61	-72.93	24	4.3
4	28/06/2001	06:53:00	-15.37	-72.51	33	4.4
5	29/06/2001	23:56:15	-15.39	-72.42	33	4.4
6	24/07/2001	05:37:16	-15.32	-72.48	33	4.7
7	28/06/2001	06:08:26	-15.29	-72.52	33	5
8	23/06/2001	21:52:43	-15.22	-72.45	33	4.7
9	24/07/2001	05:27:14	-15.25	-72.39	33	4.3

Cuadro 2.- Detalle de los parámetros hipocentrales de los sismos ocurridos en la zona del volcán Coropuna, en su mayoría entre los años 2001 y 2002. Los sismos fueron registrados por el IGP a través de la red sísmica nacional.

Es preciso mencionar que la Red Sísmica Nacional del IGP, durante el periodo 2001-2002, no tenía cobertura alguna sobre el volcán Coropuna; por lo tanto, solo se pudieron detectar sismos del volcán que tuvieron un nivel de energía capaz de ser registrado por las estaciones distantes de la Red Sísmica Nacional.

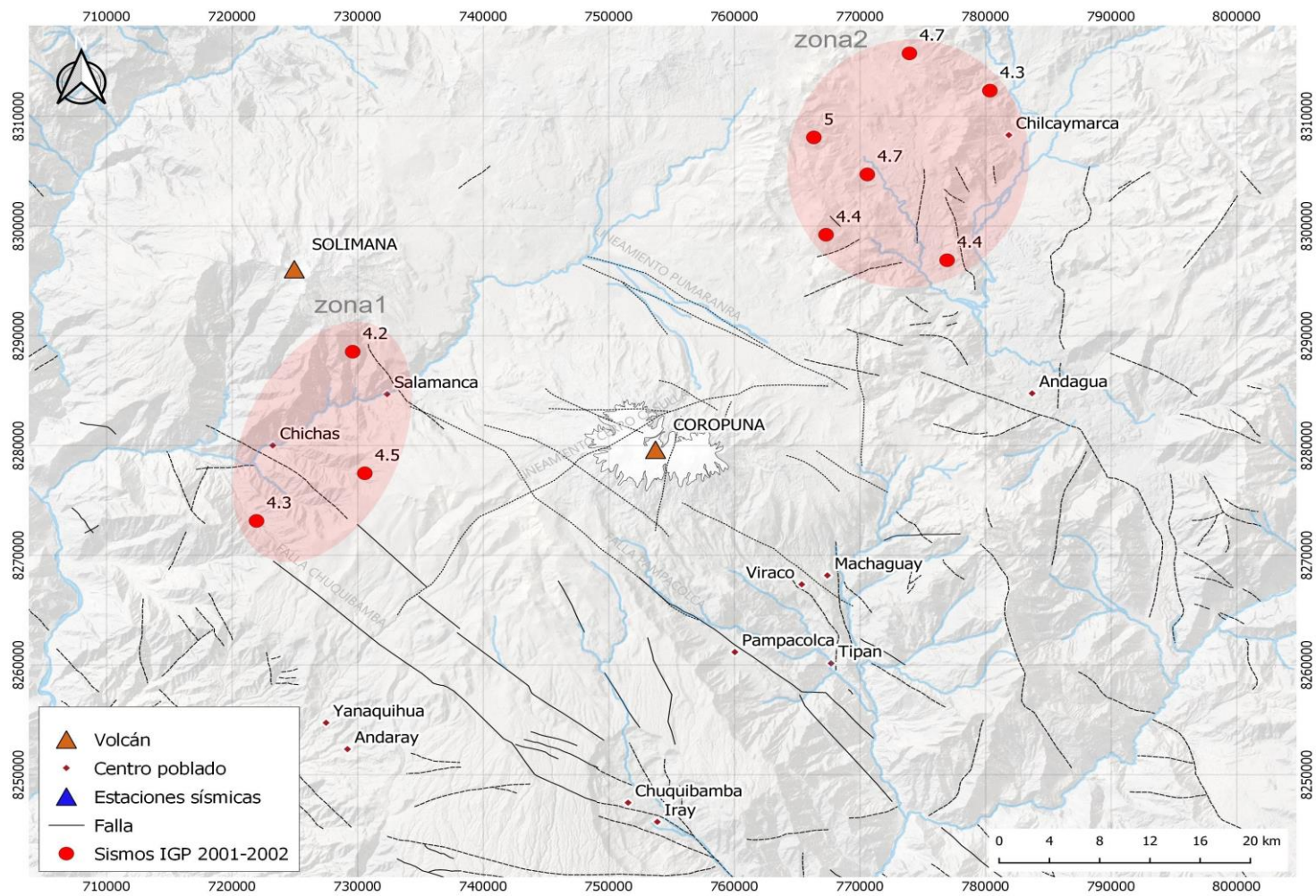


Figura 20.- Localización de los sismos extraídos del catálogo sísmico nacional del IGP. Sus parámetros de localización muestran dos sectores sísmicos ubicadas al oeste (Zona 1) y noreste (Zona 2), entre 24 km a 30 km del volcán Coropuna.

4.2. ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA EN EL PERIODO 2008-2010

Durante este periodo se instala por primera vez una estación sísmica (CPN) a menos de 8 km al oeste del volcán Coropuna, la cual operó entre el 6 de septiembre de 2008 y el 24 de febrero de 2010 (160 días). Esta estación tuvo interrupciones en la adquisición de datos. Al analizar los datos sísmicos se han registrado aproximadamente 987 sismos volcánicos de magnitud menor a M2.8. En la Figura 21 se observa un ejemplo de sismos volcánicos (Tipo VT) registrados por la estación CPN.

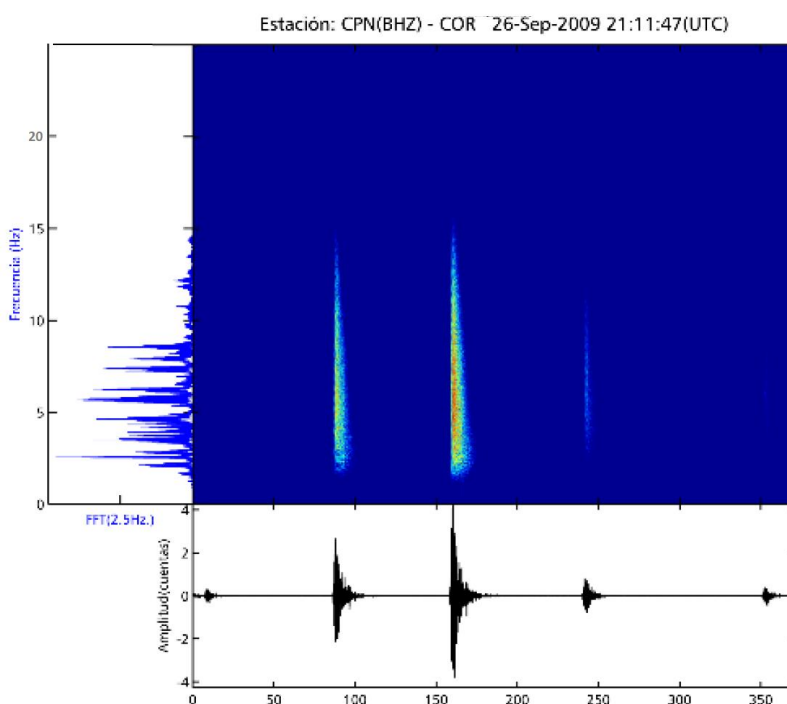


Figura 21.- Ejemplo de sismo volcánico de tipo VT registrado por la estación CPN el día 26 de septiembre de 2009.

Durante este periodo se observa una predominancia de sismos de tipo Volcano–Tectónico, con un aproximado del 72 % (equivalente a 709 sismos), los cuales están asociados al fracturamiento de rocas al interior del volcán. El 28 % (equivalente a 278 sismos) son sismos tipo de Largo Periodo (LP) y Tremor (TRE), asociados al movimiento de fluidos al interior del volcán. Este último evento (TRE) fue registrado muy escasamente. No ha sido posible localizar la fuente sísmica debido a que se contaba con una sola estación sísmica;

sin embargo, de acuerdo con las características del tiempo de llegada de las ondas P y S, esta se localizaría probablemente próxima al volcán Coropuna (Figura 22).

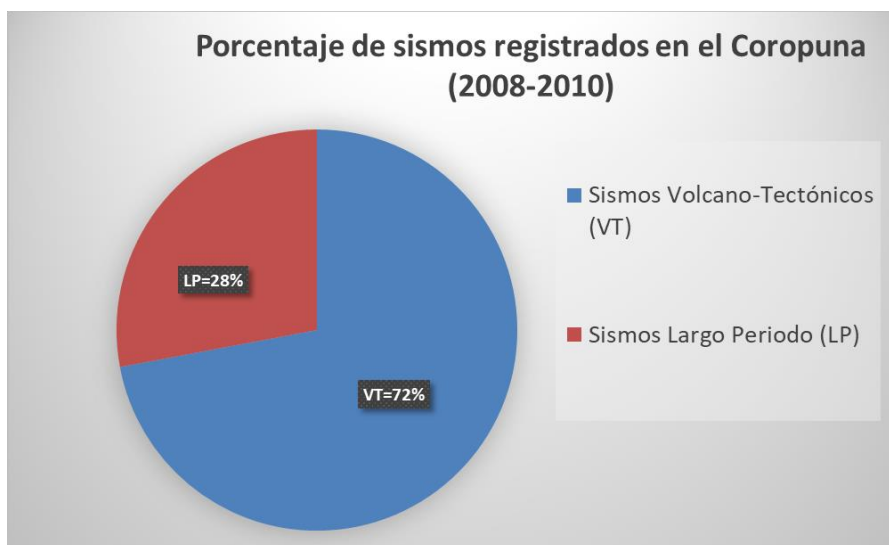


Figura 22.- Gráfico de porcentaje de eventos registrados en el volcán Coropuna para el periodo 2008-2010. Se observa la predominancia de sismos de tipo Volcano-Tectónico (72 %), seguido de sismos de tipo Largo Periodo (28 %).

El número de eventos promedio registrados en el volcán Coropuna está basado únicamente en el número de días que la estación CPN mantuvo el registro continuo de sismos. En ese sentido, durante el periodo 2008-2010, la actividad sísmica del Coropuna presentó valores bajos de registro diario (promedio diario de 5 eventos de tipo Volcano-Tectónico (VT) y 2 de tipo Largo Periodo (LP). No se observó variaciones o picos resaltantes de sismicidad durante todo el periodo, lo que mostraría que durante dicho espacio de tiempo la actividad sismovolcánica del Coropuna se mantuvo en "niveles "bajos" (Figura 23).

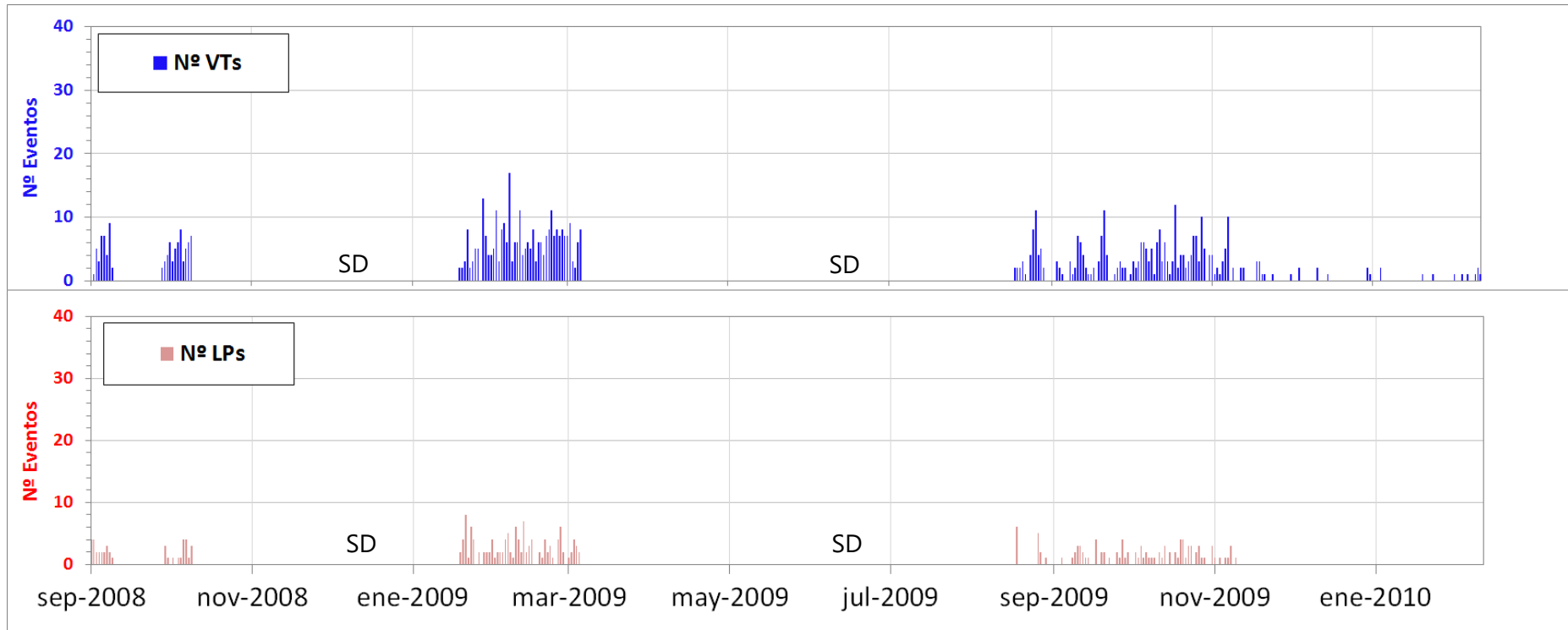


Figura 23.- Estadística del número y tipo de eventos registrados por la estación sísmica CPN durante el periodo 2008-2010. En barras azules se representa el número de sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT), mientras que las barras rojas corresponden a sismos de tipo Largo Periodo (LP). SD: representa el periodo sin registro de información sísmica.

4.3. ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA EN EL PERIODO 2018-2019

En 2018 se implementó la red sísmica del volcán Coropuna compuesta de 5 estaciones instaladas alrededor del complejo volcánico. Esta comenzó a operar desde mayo de 2018. La estación sísmica COR1 fue instalada a menos de 6 km del volcán. La información sísmica es transmitida en tiempo real a las oficinas del IGP-Sede Arequipa para ser procesada y analizada. Durante el periodo 2018-2019, se han registrado y caracterizado aproximadamente 6000 sismos que estarían relacionados a la actividad del volcán Coropuna, con magnitudes menores a M3.7. Los sismos fueron clasificados en 4 grupos: Volcano-Tectónico (VT), Largo Periodo (LP), Tremor (TRE) y sismos asociados a la dinámica del glaciar del Coropuna (DG). Los sismos VT fueron localizados en los sectores oeste y noroeste, a menos de 15 km del volcán con profundidades menores a 10 km.

4.1.1. Estadística de eventos sismovolcánicos para el periodo 2018-2019

Desde mayo de 2018 a diciembre de 2019 (aproximadamente 460 días), la red sísmica registró 6115 sismos relacionados a la actividad del volcán Coropuna, cuyas magnitudes fueron menores a M3.7. La mayoría de los eventos, el 82 % (equivalente a 5041 eventos), fueron clasificados como sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT), los cuales probablemente estuvieron asociados a procesos de ruptura de roca en el interior del volcán. El 9 % (equivalente a 559 eventos) fue clasificado como eventos de tipo Largo Periodo (LP) y Tremor (TRE), que estarían asociados a movimiento de fluidos (vapor de agua y gases volcánicos). Finalmente, el 9 % (equivalente a 515 eventos) de estas señales sísmicas estarían relacionadas a la dinámica propia del glaciar del Coropuna (tipo DG) (Figura 24).

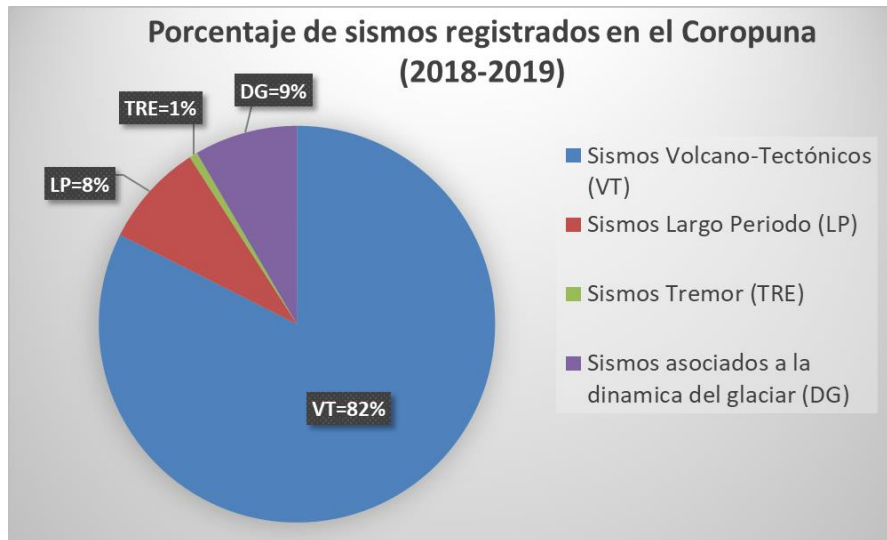


Figura 24.- Gráfico de porcentaje de eventos registrados en el volcán Coropuna. Se observa la predominancia de sismos de tipo Volcano-Tectónico (82 %), seguido de sismos de tipo Largo Periodo (8 %), DG (9 %) y muy pocos sismos asociados a Tremor volcánico (1 %).

Para este periodo, los sismos de tipo Volcano-Tectónico registraron un promedio de 11 sismos por día, mientras que la sismicidad de tipo Largo Periodo, Tremor y DG mantuvo un nivel de actividad menor a 1 sismo por día.

Con respecto al número de eventos de tipo Volcano-Tectónico (VT), dicho parámetro no ha sufrido cambios significativos; sin embargo, se muestran dos picos máximos de 78 y 83 eventos por día registrado en marzo y octubre de 2019 (Figura 25). Asimismo, se resalta el incremento de los sismos en los últimos meses del periodo (noviembre y diciembre de 2019), pasando de un promedio de 12 VT/día (septiembre a octubre) a 25 VT/día (figura 26A). En la Figura 25 se observa el sismograma del 14 de octubre de 2019, el cual muestra importante sismicidad de tipo Volcano-Tectónico asociada al volcán Coropuna.

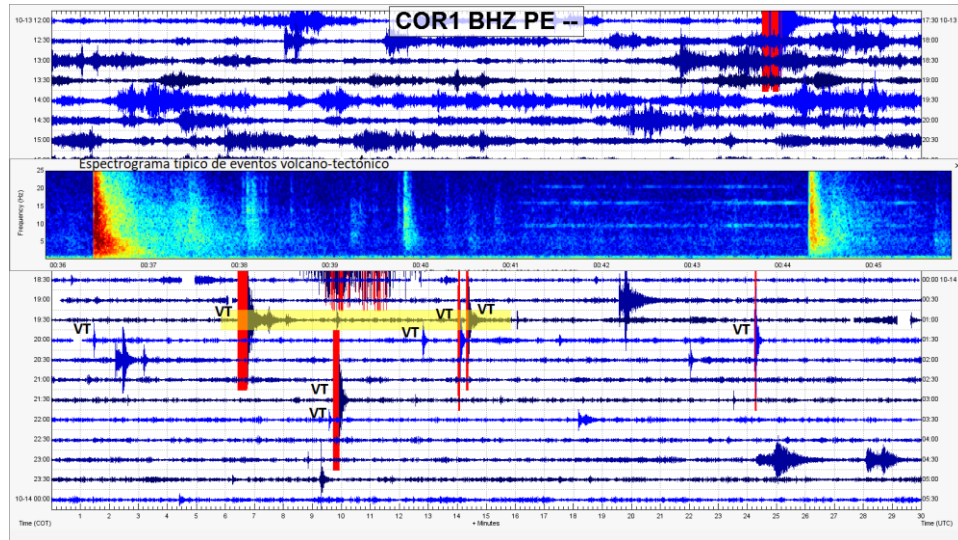


Figura 25.- Sismograma de la estación sísmica COR1 que muestra sismos de tipo VT registrados el 14 de octubre de 2019.

Respecto a los eventos de tipo Largo Periodo, estos muestran niveles bajos de energía por debajo de 3 MJ (Megajoules). En ocasiones, se han registrado agrupamientos de sismos importantes en periodos de tiempo relativamente cortos, por ejemplo, en los enjambres desarrollados los días 17 y 31 de mayo de 2019, cuando se registraron 12 y 24 eventos sísmicos por día, respectivamente (ver Figura 25B). Los sismos de tipo Tremor fueron muy escasamente registrados; en total, se identificaron tan solo 41 eventos durante todo el periodo (Figura 26C).

Esto muestra que el volcán Coropuna, durante el periodo 2018-2019, registró niveles bajos de actividad sísmica tanto en número como en energía.

Por otro lado, los sismos DG en el volcán Coropuna, entre mayo y septiembre de 2018, mostraron un ligero incremento y un pico máximo de hasta 20 eventos por día, para luego disminuir en promedio en los meses siguientes a razón de un sismo por día (Figura 26D).

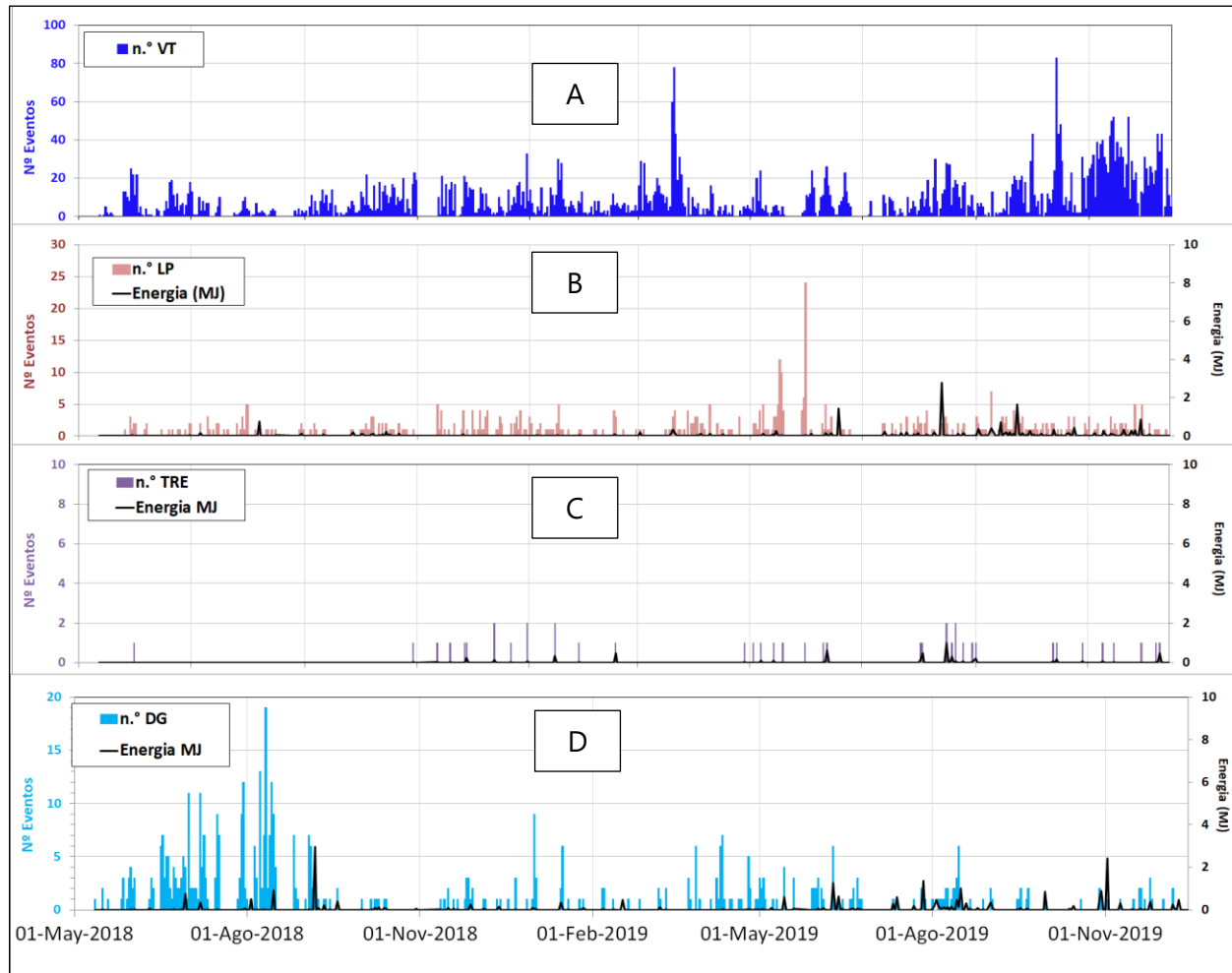


Figura 26.- Evolución temporal de los principales eventos sismovolcánicos registrados en el volcán Coropuna y en sus inmediaciones en el periodo mayo de 2018 a septiembre de 2019. El gráfico muestra el número de eventos sísmicos (barras de color) y la energía sísmica generada (línea negra). A) Eventos de tipo Volcano-Tectónico (VT), B) eventos de tipo Largo Periodo (LP), C) eventos de tipo Tremor (TRE) y D) eventos asociados a la dinámica del glaciar (DG).

4.1.2. Localización de eventos de tipo Volcano-Tectónico (VT)

Del total de señales de tipo Volcano-Tectónico (VT) registradas, solo fue posible calcular los parámetros hipocentrales de 139 sismos. Los errores de localización sísmica en horizontal (este-oeste) fueron menores a 0.5 km y en vertical (profundidad) menores a 5 km. Las magnitudes generadas por estos eventos fueron menores a M3.7. Estos eventos están principalmente distribuidos en los sectores O y NO, en un radio de 3 m a 18 m de distancia desde el centro del volcán Coropuna, en los sectores denominados Zona 1 y Zona 2, respectivamente (Figura 27).

Zona 1.- En esta zona, los hipocentros de los sismos están localizados bajo la superficie del complejo volcánico Coropuna hasta los 10 km de profundidad. Sus epicentros están distribuidos en dirección E-O, dentro de un radio menor a 6 km. El sismo de mayor magnitud registrado en esta zona fue de M3.7, el cual ocurrió el 9 de abril de 2019 a las 04:09 UTC.

Zona 2.- En esta zona, los sismos están localizados a 18 km al NO del complejo volcánico Coropuna, distribuidos en alineamiento NO a SE, con profundidades que varían entre 6 km y 15 km. El sismo de mayor magnitud registrado en esta zona fue de M3.2, ocurrido el 15 de febrero de 2019 a las 05:57 UTC.

En el cuadro 3 se observa los parámetros hipocentrales de los principales sismos ocurridos en las zonas 1 y 2 con magnitudes mayores a M3.0.

ID	Fecha	Hora (UTC)	X (UTM)	Y (UTM)	Profundidad (Km)	Magnitud (ML)	RMS
1	18/01/2019	06:40:24	741837	8295135	3.1	3.1	0.31
2	15/02/2019	05:56:25	738949	8296180	2.8	3.2	0.34
3	09/04/2019	04:09:42	750223	8279529	2.0	3.7	0.24
4	21/07/2019	16:41:31	749440	8299814	3.6	3.0	0.29
5	22/07/2019	09:54:54	749254	8299115	2.8	3.1	0.25
6	05/08/2019	13:21:55	751920	8277776	6.2	3.2	0.30
7	14/10/2019	02:39:40	750327	8280912	0.0	3.1	0.21

Cuadro 3.- Detalle de los parámetros hipocentrales de los sismos mayores a M3.0 ocurridos en la zona del volcán Coropuna entre los años 2018 y 2019. Los sismos fueron registrados por el IGP a través de la red de monitoreo sísmico del Coropuna.

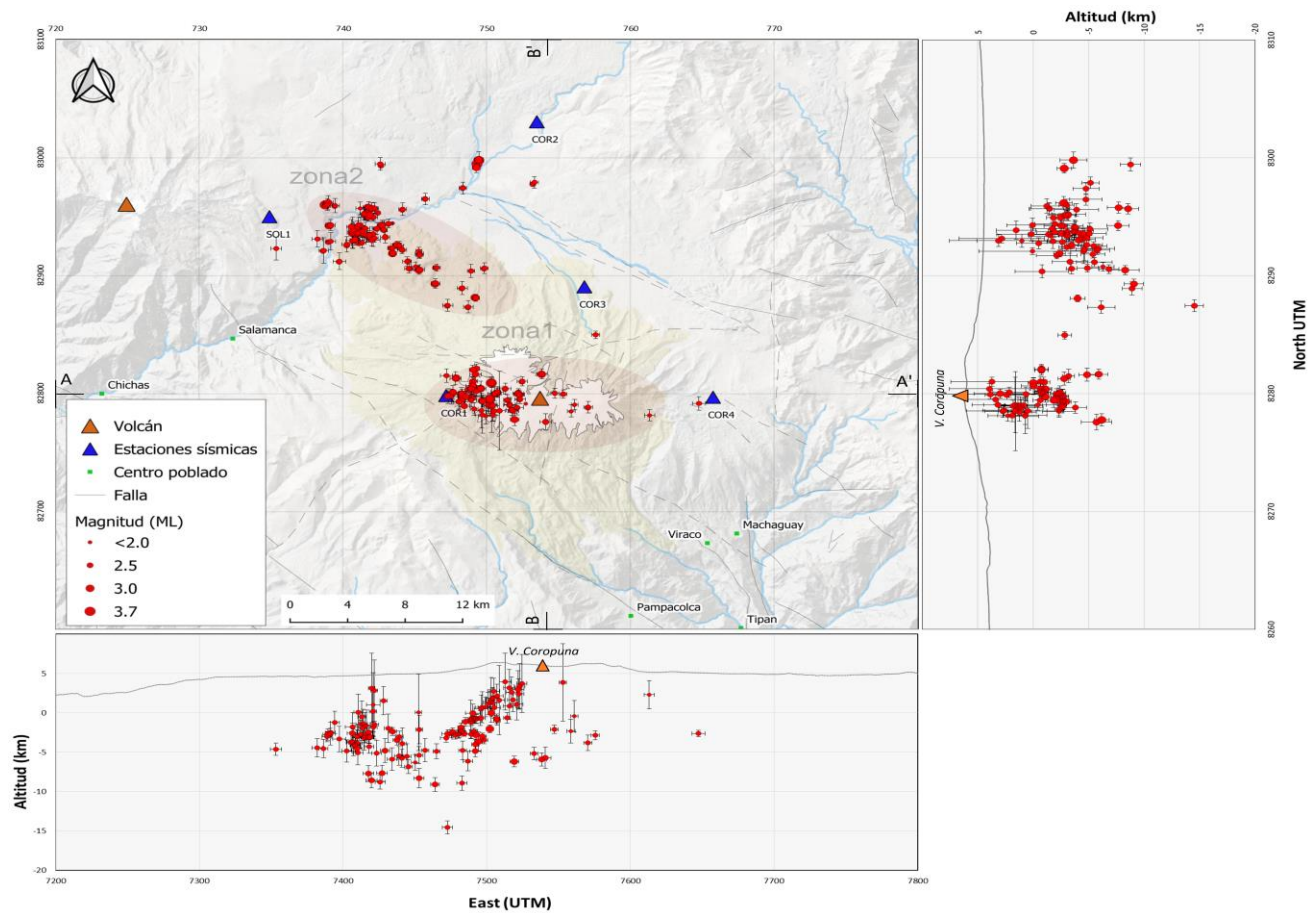


Figura 27.- Mapa de localización de sismos ocurridos en las inmediaciones del volcán Coropuna. Los sismos son de tipo Volcano-Tectónico registrados durante el periodo mayo de 2018 a septiembre de 2019. Los sismos localizados se distribuyeron en dos grupos: zona 1, localizada a 6 km al oeste del volcán, y zona 2, localizada a 18 km al noroeste del volcán. Los triángulos azules representan las estaciones de la red sísmica del volcán Coropuna.

4.1.3. Sismicidad asociada a la dinámica del glaciar

El volcán Coropuna presenta una importante cobertura glaciar (44.1 km²), la cual está en constante dinámica (disminución de área, volumen, cambio de morfología, etc.) por efectos estacionales y debido al cambio climático o calentamiento global. El dinamismo de este importante volumen de hielo genera, a su vez, diferentes señales sísmicas superficiales, las cuales son registradas por la estación sísmica COR1 situada a menos de 6 km del volcán Coropuna.

Del total de los eventos sísmicos registrados durante el periodo 2018-2019 en la zona del volcán Coropuna, el 11 % de las señales sísmicas (equivalentes a 496 eventos) podría relacionarse a la dinámica propia del glaciar (Figura 28). Estos eventos son de corta duración, presentan altas frecuencias (mayores a 9 Hz) y amplia banda espectral.

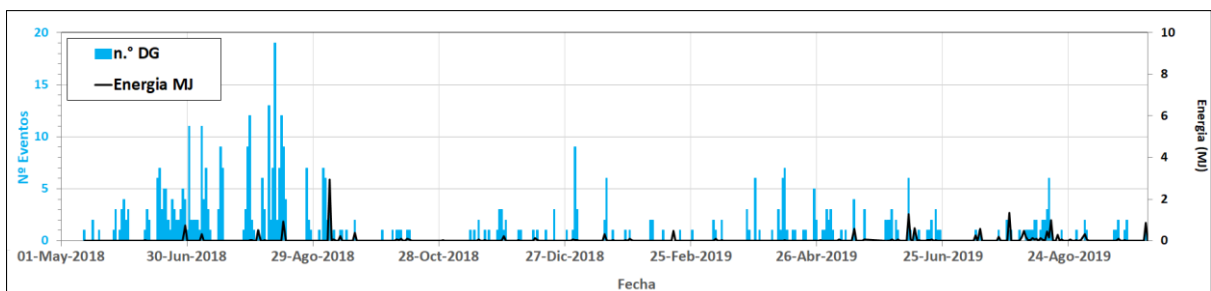


Figura 28.- Las barras celestes representan el número de eventos DG por día relacionados a la dinámica del glaciar. La línea negra representa la energía sísmica diaria.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este punto se discuten los resultados obtenidos para los periodos 2001-2002, 2008-2010 y 2018-2019, respectivamente. La actividad sísmica registrada entre el 2001-2002 presentó magnitudes mayores a M4.2 y ocurrió en zonas distales. En el periodo 2008-2010 se registró por primera vez sismicidad asociada a posible actividad volcánica en el Coropuna; estos eventos fueron caracterizados como eventos de tipo VT y eventos de tipo LP, típicos en ambientes volcánicos. Finalmente, se discuten los sismos registrados en el periodo 2018-2019, en el cual se registró importante actividad volcánica localizada muy próxima al volcán Coropuna y en zonas distales. En este periodo (2018-2019), para entender mejor la ocurrencia sísmica, se ha realizado la detección de familias sísmicas (correlación cruzada), cálculo de mecanismo de fuente de ocurrencia sísmica. Asimismo, se analizarán los eventos de baja frecuencia (LP) y, finalmente, se discutirá la distribución frecuencia-magnitud de ocurrencia de los sismos VT en función de la magnitud (cálculo del valor de "b"). Esto permitirá aseverar si los sismos registrados en el pasado y los que vienen ocurriendo recientemente estarían asociados a la presencia de un cuerpo magmático.

5.1. ACTIVIDAD SÍSMICA 2001-2002

La información sísmica proveniente del catálogo sísmico del IGP entre 1960 y 2016 muestra el registro de sismicidad ocurrida en inmediaciones del volcán nevado Coropuna que podría ser considerada como de origen volcánico (sismos de tipo Volcano-Tectónico distales). Estos fueron registrados especialmente entre los años 2001 y 2002. Durante ese periodo (2001-2002), se identificaron 9 sismos distribuidos en dos sectores del volcán Coropuna: el primero al sector oeste, próximo a la falla Chuquibamba, y el segundo al noreste del lineamiento Pumarana. Todos los sismos presentaron magnitudes entre M4.2 y M5.0.

La sismicidad de tipo Volcano-Tectónico (VT) se observa comúnmente en volcanes activos y, por lo general, está asociada a la activación de fallas influenciadas por el ascenso de

magma (Lahr et al., 1994; Roman and Cashman, 2006). Las magnitudes de los sismos VT son generalmente pequeñas y rara vez superan valores de M4.5 (Zobin, 2001 y White et al. 2016). En el volcán Coropuna, la mayor parte de los sismos observados recientemente entre los años 2008-2010 y 2018-2019 son de magnitudes menores a M3.7; sin embargo, los sismos analizados en el presente periodo (2001-2002) presentaron magnitudes superiores a M4.2 y fueron localizados en zonas distales, muy próximos a fallas activas. En tal sentido, de acuerdo con sus características observadas (magnitud y localización), podríamos interpretar que su ocurrencia estaría ligada a la actividad tectónica local asociada a la activación de fallas y no a la actividad propia del volcán Coropuna.

5.2. ACTIVIDAD SÍSMICA 2008-2010

En septiembre de 2008, se instaló una estación sísmica a menos de 8 km del volcán Coropuna. Este equipo permitió registrar por primera vez sismicidad con características típicas de ambientes volcánicos. Se observaron aproximadamente 900 sismos de tipo Volcano-Tectónico, Largo Periodo y muy escasos sismos de tipo Tremor.

Gran parte de los sismos ocurridos en la zona del volcán Coropuna son de tipo Volcano-Tectónico; la mayoría de ellos presentan las siguientes características: forma de onda con inicio impulsivo y claras fases de las ondas P y S, espectro de frecuencias amplio de hasta 20 Hz y tiempo de llegada de ondas P y S con diferencia <1 segundo. Estas características permiten interpretar que estos sismos estarían asociados a la actividad propia del volcán. La fuente de ocurrencia de estos eventos estaría localizada muy próxima al volcán, a menos de 6 km (valor estimado del tiempo S-P de los sismos VT y la velocidad de la primera capa del modelo de velocidad), y tendría su origen en el fracturamiento de rocas que ocurre al interior del volcán Coropuna (White y McCausland, 2016). Los sismos de tipo Largo Periodo presentan la siguiente característica: la mayoría muestra bajas frecuencias (<5Hz) con inicios de forma de onda emergentes que no permiten distinguir claramente las fases de la onda P y S. Dichas características son similares a sismos registrados en volcanes en proceso eruptivo (volcán Sabancaya y Ubinas). Estos eventos están asociados al movimiento de fluidos magmáticos (gases, magma). Los eventos de tipo Tremor son muy

escasos y difíciles de interpretar debido a la ausencia de evidencias superficiales (como emisión de cenizas u otros); sin embargo, sus características son semejantes a sismos asociados a la liberación de gases magmáticos.

En síntesis, podría interpretarse que la actividad sísmica ocurrida durante el periodo 2008-2010 se presentó en niveles bajos. Tan solo se observaron diariamente 5 eventos de tipo Volcano-Tectónico y 2 eventos de tipo Largo Periodo en promedio.

5.3. ACTIVIDAD SÍSMICA 2018-2019

En este periodo se implementa la red sísmica telemétrica del volcán Coropuna que inicia su funcionamiento en mayo de 2018. Utilizando la información de las cinco estaciones sísmicas pertenecientes a la red del Coropuna desde mayo de 2018 a diciembre de 2019, se interpretó la fuente de ocurrencia de los sismos en la zona del volcán Coropuna mediante la identificación de (i) familias sísmicas, (ii) caracterizando la fuente mediante el cálculo de mecanismos focales y (iii) la ocurrencia de sismos de baja frecuencia (eventos de tipo Largo Periodo) y sismos de tipo Volcano-Tectónico.

5.3.1. Familias sísmicas

La mayoría de los eventos registrados en el volcán Coropuna durante el periodo 2018-2019 corresponde a sismos de tipo Volcano-Tectónico, cuya localización de eventos ha formado dos agrupamientos sísmicos ubicados al oeste y noroeste del volcán (Zona 1 y Zona 2). Sin embargo, no se conoce la fuente o fuentes sísmicas que estarían desencadenando este tipo de sismicidad. Para ello, por medio de la técnica de la correlación cruzada (CC), se pudo determinar que los sismos de tipo Volcano-Tectónico han formado dos familias sísmicas, cada una de ellas con espectros de frecuencias y formas de ondas muy diferentes, con coeficientes de correlación superiores al 70 %. Esto significa que las dos familias sísmicas encontradas mediante la técnica de correlación cruzada (CC) tendrían su origen en la activación de dos fuentes (fallas) activas que constantemente estuvieron reactivándose, generando

sismos de tipo Volcano-Tectónico en las zonas denominadas como Zona 1 (Figura 29) y Zona 2 (Figura 30).

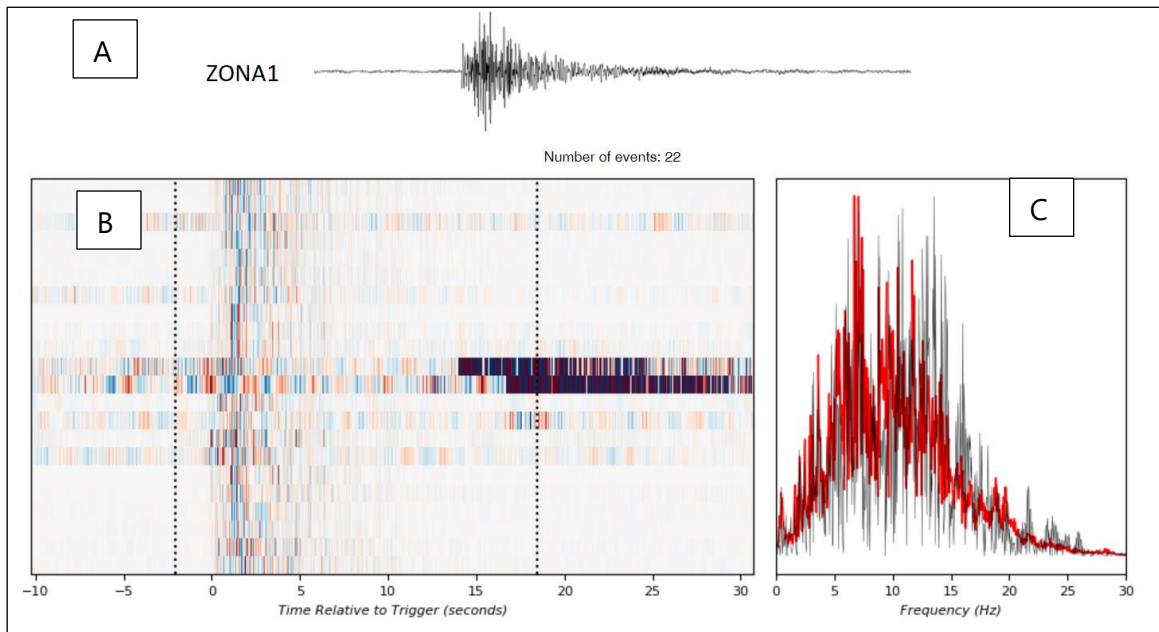


Figura 29.- Correlación cruzada de 22 sismos de tipo Volcano-Tectónico proximales con índice de parentesco de 0.7. A) Forma de onda de los sismos de tipo Volcano-Tectónico; B) representación de las señales sísmicas en colores. C) En línea roja, promedio de espectro de frecuencias de eventos de tipo Volcano-Tectónico.

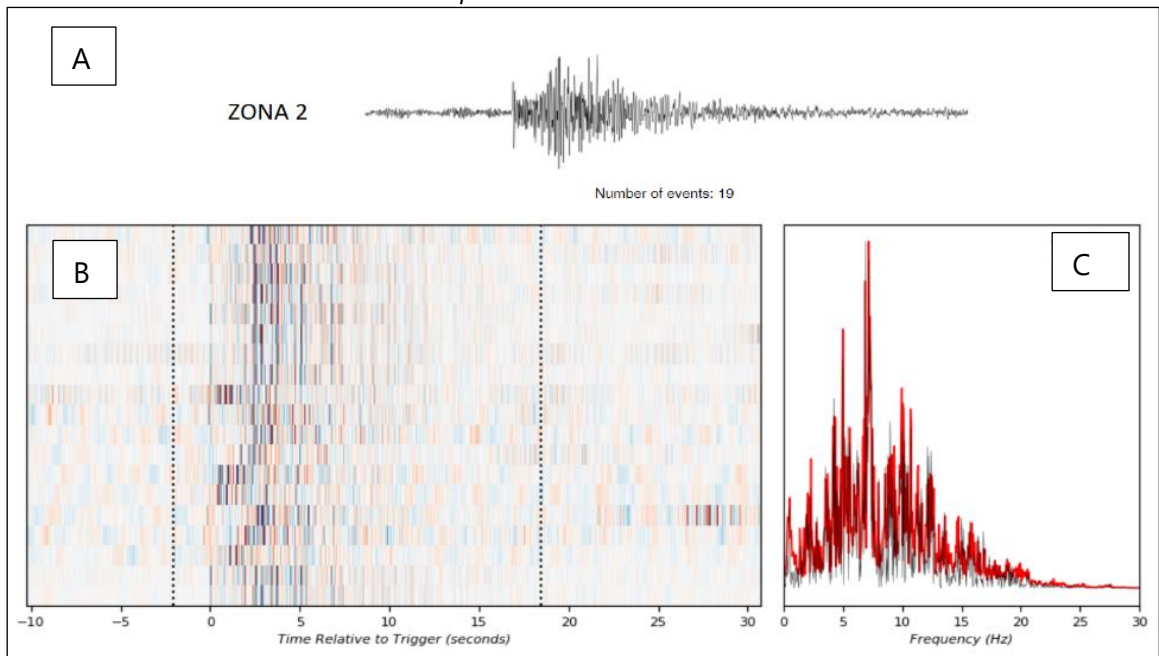


Figura 30.- Correlación cruzada de 19 sismos de tipo Volcano-Tectónico distales (VTD) con índice de parentesco de 0.7. A) Forma de onda de los sismos VTD; B) representación de las señales sísmicas en colores y C) En línea roja, promedio de espectro de frecuencias de eventos VTD.

5.3.2. Características de la fuente sísmica

Teniendo en cuenta la localización de dos familias sísmicas, los sismos de tipo Volcano-Tectónico registrados en la zona del volcán Coropuna ocurrieron por la reactivación constante de dos fallas (fuentes sismogénicas) localizadas en los sectores oeste y noroeste del volcán Coropuna (figura 31). De acuerdo a los estudios tectónicos y estructurales realizados en la zona del volcán Coropuna, se ha identificado un sistema de fallas y lineamiento con direcciones predominantes NO-SE y NE-SO. Para determinar el tipo de fallamiento que desencadenaron los sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) en la zona del volcán Coropuna, se han elaborado mecanismos focales (MF) de seis sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) con magnitudes entre M3.0 y M3.7. Estos eventos fueron registrados en más de cinco estaciones sísmicas pertenecientes a la red del volcán Coropuna y, en algunos casos, en la red del volcán Sara Sara, Cerro Auqui huato y Sabancaya, redes próximas al volcán Coropuna. Los resultados muestran mecanismos focales de tipo inverso (compresión) con componente transcurrente, los cuales están en concordancia con las fallas identificadas en la zona del volcán Coropuna. De acuerdo a los mecanismos focales, los sismos registrados en la Zona 1 y Zona 2 ocurrirían por la reactivación de fallas inversas y, probablemente, corresponderían al sistema de lineamiento denominado Cerro Casulla que atraviesa el volcán Coropuna en dirección NE-SO, de azimut N45° (Zona 1). La Zona 2 correspondería a la falla NO-SE, con azimut N 315°, y aún no estaría identificada en los mapeos geológicos efectuados hasta el momento (Figura 31).

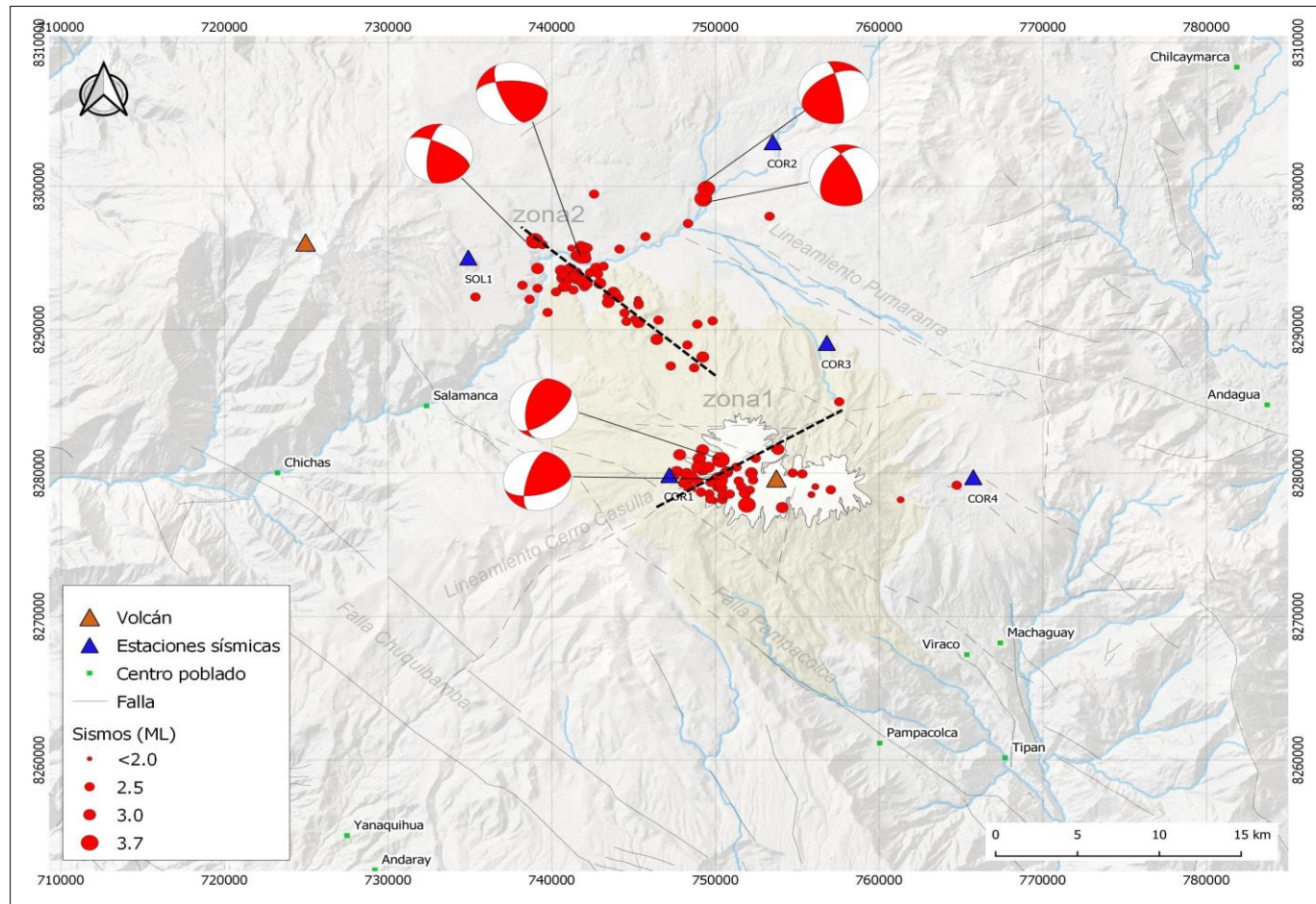


Figura 31.- Mecanismos focales generados para la sismicidad de mayor magnitud registrada durante el periodo mayo de 2018 a septiembre de 2019. Los círculos de color blanco (representan el régimen de presión) y rojo (régimen de tensión) son representaciones de posibles soluciones de ruptura. Las líneas discontinuas en gris corresponden a lineamientos geológicos; las líneas discontinuas en negro, a fallas inferidas.

5.3.3. Sismos de baja frecuencia (Largo Periodo-LP)

Los sismos de baja frecuencia (<6 Hz) están asociados en su mayoría a eventos de Largo Periodo (LP), siendo el segundo grupo de mayor ocurrencia en la zona del volcán Coropuna. En promedio, ocurre 1 sismo por día con energía por debajo de los 3 MJ. De acuerdo con el análisis del sismo (LP), la mayoría se registra primero en la estación COR1, la más próxima al volcán, seguida de las demás estaciones (COR3, COR4, COR2 y SOLI), lo que significa que la fuente que desencadena estos sismos probablemente se localizaría bajo el complejo volcánico Coropuna.

Actualmente, no se evidencia actividad fumarólica en todo el sector del complejo volcánico Coropuna, debido probablemente a que este está cubierto por el casquete glaciar; no obstante, sí se logran observar fuentes termales alrededor del complejo volcánico con temperaturas que varían entre 20 °C a 50 °C (Masías, 2018; Úbeda, 2011). El estudio geoquímico de fuentes termales de Masías (2018) muestra que el volcán Coropuna presentaría un importante sistema hidrotermal que estaría siendo alimentado por agua meteórica del deshielo del casquete glaciar. Dicho sistema estaría interactuando con una fuente caliente o magma remanente de la erupción de hace 700 años (Úbeda, 2011), fenómeno que ocasionaría movimiento de fluidos (vapor de agua y gases magmático) en el interior del volcán. Probablemente, este proceso puede estar generando sismos de tipo Largo Periodo. Las características de este grupo de sismos (LP) en el volcán Coropuna son similares a eventos registrados en volcanes en proceso eruptivo (Ubinas y Sabancaya).

5.3.4. Ocurrencia de sismos de tipo Volcano-Tectónico

Los sismos de tipo Volcano-Tectónico en el volcán Coropuna presentan magnitudes menores a M3.7 y están localizados en dirección oeste y noroeste a menos de 15 km del volcán. Su ocurrencia se asocia a la actividad de fallas inversas. Para determinar si estos sismos son ocasionados por la intervención

de un cuerpo magmático en profundidad, se ha realizado el cálculo del valor de "b" mediante la distribución de la frecuencia-magnitud de ocurrencia de sismos VT en función de la magnitud (ley de Gutenberg-Richter, 1994).

Diversos estudios en ambientes volcánicos demuestran obtener altos valores de "b" que son asociados a gradientes térmicos elevados, así como a ambientes con aumento de presión de poro y alto grado de heterogeneidad, típico de ambientes volcánicos (Wyss, 1973; Wiemer y McNutt 1997). En el volcán Coropuna, los grupos de sismos localizados en la Zona 1 y Zona 2 presentan valores de "b=1.89" (Zona 1) y "b=1.68" (Zona 2), respectivamente. Dichos valores son típicos de ambientes volcánicos y estarían asociados a zonas altamente fracturadas y heterogéneas por la presencia de fluidos magmáticos (Figura 32).

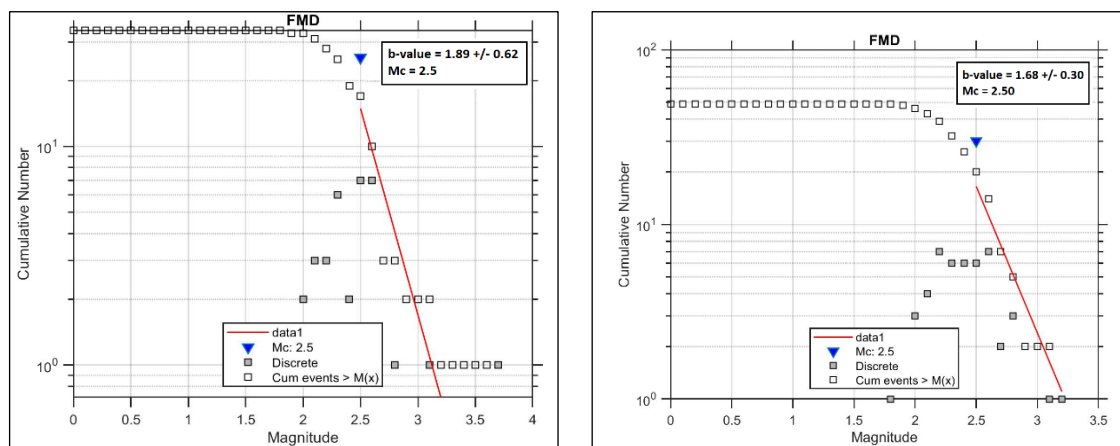


Figura 32.- Gráfico que muestra la distribución de la relación frecuencia-magnitud para el cálculo del valor de "b" efectuado para las Zonas 1 y 2. La línea roja representa la pendiente de la recta, la cual representa el valor de "b".

CONCLUSIONES

- La información geofísica utilizada en el presente trabajo corresponde a tres periodos de adquisición sísmica: 2001-2002; 2009-2010 y 2018-2019. En el periodo 2001-2002, se utilizaron los datos del catálogo sísmico registrados por la Red Sísmica Nacional. En el periodo 2008-2010, se emplearon datos de una estación sísmica (CPN) instalada a menos de 8 km del volcán Coropuna. Finalmente, para el periodo 2018-2019, se utilizaron datos de cinco estaciones sísmicas pertenecientes a la actual red de monitoreo del volcán Coropuna.
- El periodo 2001-2002 permitió identificar 9 sismos con magnitudes entre M4.2 a M5.2, localizados en dos zonas a 24 km al oeste y 30 km al noreste del volcán Coropuna. De acuerdo con las características de la sismicidad, los sismos tendrían como fuente de origen el sistema estructural local de la zona, probablemente asociados a las fallas Chuquibamba y a la zona de fallamiento Pumaranra, al noreste del volcán.
- En el periodo 2008-2010 se han registrado aproximadamente 1000 sismos volcánicos con magnitudes menores a M2.8. La mayor parte de los eventos fueron clasificados como sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) asociados a fractura de rocas, representando el 72 % del total de eventos. Estos fueron localizados a menos de 6 km del complejo volcánico nevado Coropuna. El 28 % correspondió a sismos de tipo de Largo Periodo (LP) y Tremor (TRE), vinculados al movimiento de fluidos.
- En el periodo 2018-2019 se han registrado aproximadamente 5000 sismos con magnitudes menores a M3.7. Los sismos fueron clasificados en 4 grupos denominados: Volcano-Tectónico (VT), Largo Periodo (LP), Tremor (TRE) y eventos relacionados a la dinámica del glaciar (DG). Más del 80 % de los sismos registrados en el Coropuna son de tipo VT, asociados a fractura de rocas en el interior del volcán, y menos del 10 % representan sismos de tipo LP y TRE, relacionados al movimiento de fluidos (vapor de agua y gases magmáticos). Asimismo, el 10 % de los eventos son sismos DG, vinculados a la dinámica del

glaciar (deshielo del casquete glaciar). Los sismos (VT) fueron localizados a menos de 6 km y 18 km en dirección oeste y noroeste del complejo volcánico Coropuna, formando dos zonas sismogénicas (Zona 1 y Zona 2), con magnitudes de entre M2.0 a M3.7 y a profundidades menores a 15 km. El mecanismo de fuente de los sismos (VT) corresponde esencialmente a fallas de tipo inverso en dirección NE a SO y SE a NO, acorde con la tectónica local observada en la zona de estudio.

- A partir del análisis realizado, se interpretaría que los sismos en la zona del volcán se generaron por la intervención de un cuerpo caliente (magma remanente) que interacciona con el sistema hidrotermal, ocasionando fractura de rocas (sismos VT) y movimiento de fluidos (sismos LP y TRE) al interior del volcán. Posiblemente, este fenómeno estaría reactivando las fallas preexistentes en la zona.
- La actividad sísmica observada desde mayo de 2018 en el volcán Coropuna confirma que este es un volcán activo. A pesar de ello, su comportamiento es calificado como de bajo nivel, por lo que a corto y mediano plazo no se espera una reactivación de dicho volcán. Las autoridades y la población deben tener en cuenta que la última erupción de este volcán ocurrió hace ~700 años, la cual se caracterizó por la emisión de flujos de lava que se emplazaron a 7 km al sur del Coropuna. La ocurrencia futura de flujos de lava podría fusionar parte de la masa glaciar y producir lahares o flujos de lodo que afectarían terrenos de cultivo, obras de infraestructura y otros.
- Como parte del presente trabajo, se implementó un modelo de velocidades de 12 capas de hasta 15 km de profundidad para la zona del volcán Coropuna. Los valores de velocidad de la onda P en cada capa varían entre 4.58 km/s a 5.91 km/s. Para el cálculo del modelo se utilizó la relación de velocidades $V_p/V_s = 1.67$.

BIBLIOGRAFÍA

- Bromley, G. R., Thouret, J. C., Schimmelpfennig, I., Mariño, J., Valdivia, D., Rademaker, K., & ASTER Team. (2019). In situ cosmogenic ^3He and ^{36}Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru. *Bulletin of Volcanology*, 81(11), 64.
- Chouet B. (1996). Long-period volcano seismicity: Its Source and Use in Eruption Forecasting. *Nature* 380 (6572): 309 - 316.
- De Silva, S. L., & Francis, P. W. (1991). *Volcanoes of the central Andes* (Vol. 219). Berlin: Springer-Verlag.
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4), 185-188.
- Hotovec-Ellis, A. J., & Jeffries, C. (2016). Near real-time detection, clustering, and analysis of repeating earthquakes: Application to Mount St. Helens and Redoubt volcanoes. In *Seismological Society of America Annual Meeting*.
- Ibáñez, J., & Carmona, E. (2000). Sismicidad volcánica. *Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica, Serie Casa de los Volcanes*, 7, 269-282.
- INEI (2018). *Directorio Nacional de Centros Poblados, Censo Nacional 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas* (https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1541/index.htm)
- Kissling, E., Kradolfer, U., & Maurer, H. (1995). *Program VELEST user's guide-Short Introduction*. Institute of Geophysics, ETH Zurich.
- Kochtitzky, W. H., Edwards, B. R., Enderlin, E. M., Marino, J., & Marinque, N. (2018). Improved estimates of glacier change rates at Nevado Coropuna Ice Cap, Peru. *Journal of Glaciology*, 64(244), 175-184.
- Lahr, J. C. (1999). *HYPOELLIPSE: A computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first motion pattern*. Denver, Colorado: US Geological Survey. p. 119.

- Lahr, J. C., Chouet, B. A., Stephens, C. D., Power, J. A., & Page, R. A. (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(1-4), 137-151.
- Lee, W. H. K., Bennett, R. E., & Meagher, K. L. (1972). A method of estimating magnitude of local earthquakes from signal duration (p. 28). US Department of the Interior, Geological Survey.
- Macedo O., Taipe 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.
- Margirier, A., Audin, L., Carcaillet, J., Schwartz, S., & Benavente, C. (2015). Tectonic and climatic controls on the Chuquibamba landslide (western Andes, southern Peru). *Earth Surface Dynamics*, 3(2), 281-289.
- Mariño, J., Thouret, J-C., Cabrera, M., Aguilar, R., Manrique, N., Edwards, B., y Kochtitzky, W. (2017). Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico nevado Coropuna, Instituto Geológico minero metalúrgico (INGEMMET).
- Masias P. (2018). Características químicas e isotópicas del sistema hidrotermal del complejo volcánico nevado Coropuna, (Tesis de maestría). Universidad Nacional San Agus de Arequipa, Arequipa-Peru.
- McNutt S. (2000). Volcanic seismicity, *Encyclopedia of Volcanoes*. Ed. H. Sigurdsson, Academic Press, San Diego. Pp. 1015-1034.
- McNutt, S. R. (1994). Volcanic tremor amplitude correlated with eruption explosivity and its potential use in determining ash hazards to aviation. In *Volcanic Ash and Aviation Safety: Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety* (pp. 377-385).
- Métaxian, J. P., Araujo, S., Mora, M., & Lesage, P. (2003). Seismicity related to the glacier of Cotopaxi Volcano, Ecuador. *Geophysical Research Letters*, 30(9).

- 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.
- Norabuena, E. O., Dixon, T. H., Stein, S., & Harrison, C. G. (1999). Decelerating Nazca-South America and Nazca-Pacific plate motions. *Geophysical Research Letters*, 26(22), 3405-3408.
- Núñez, S., Valenzuela, G. (2001). Mapa Preliminar de Amenaza Volcánica Potencial del Nevado Coropuna. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET).
- Seidl, D., Schick, R., & Riuscetti, M. (1981). Volcanic tremors at Etna: a model for hydraulic origin. *Bulletin volcanologique*, 44(1), 43-56.
- Snoke, J. (1984). FOCMEC: FOCal MEChanism Determinations. Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA.
- 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), 211-215.
- Ubeda, J. (2011). El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico nevado Coropuna, (cordillera occidental de los andes centrales), (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid-España.
- Wassermann, J. (2002). Volcano seismology. *IASPEI new manual of seismological observatory practice*, 1(13), 662-703.
- Weaver, C. S., & Malone, S. D. (1976). Mt. Saint Helens seismic events: Volcanic earthquakes or glacial noises?. *Geophysical Research Letters*, 3(3), 197-200.
- Wiemer, S., & McNutt, S. R. (1997). Variations in the frequency-magnitude distribution with depth in two volcanic areas: Mount St. Helens, Washington, and Mt. Spurr, Alaska. *Geophysical Research Letters*, 24(2), 189-192.
- Wyss, M. (1973). Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 31(4), 341-359.
- Zobin, V. M. (2012). *Introduction to volcanic seismology* (Vol. 6). Elsevier.

- White, R., & McCausland, W. (2016). Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 309, 139-155.