

Universidad Nacional del Comahue

Facultad de Ingeniería

Departamento de Geología y Petróleo



Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas

# **Análisis de la actividad sísmica del volcán Copahue (Andes del Sur) en el periodo de marzo-agosto del año 2020**

Alumna: Giuliana Guerendiain

Legajo: ING-8807

Directora: Lic. Sheyla Iglesias

Codirector: Mg. Iván Fernández Melchor (UNRN)

Neuquén, 2022

## Resumen

Los métodos sísmicos son una de las herramientas más eficaces para el monitoreo de volcanes. Asimismo, la detección y clasificación correcta de eventos sísmicos volcánicos son una de las tareas fundamentales a la hora de analizar un volcán.

Este trabajo sugiere un enfoque basado en el estudio de las señales registradas en el volcán Copahue, cubriendo tres métodos: la localización y análisis de las señales volcano-tectónicas (VT), la caracterización y clasificación de señales de largo periodo (LP) y el registro de silencios sísmicos (SS), que son de origen desconocido.

Este estudio aporta información valiosa a la comunidad científica ya que permite obtener información relevante de diferentes tipos de eventos sísmicos que se pueden identificar en otros volcanes.

A partir de los datos analizados se localizaron 84 VTs, distinguiendo 4 zonas activas sismológicamente. Se caracterizaron 54 LPs con su forma de onda y contenido espectral y se clasificaron en 7 familias. Por último, se describieron los SS y junto con los VT y LP, se compararon con la actividad superficial del volcán.

**Palabras claves:** Monitoreo volcánico, eventos sísmicos, volcán Copahue.

## Abstract

Seismic methods are one of the most effective tools for volcano monitoring. Likewise, the correct detection and classification of volcanic seismic events are one of the fundamental tasks when analyzing a volcano.

This paper suggests an approach based on the study of recorded signals at the Copahue volcano, covering three methods: the localization and analysis of the volcano-tectonics signals (VT), the characterization and classification of long period signals (LP) and the registry of Seismic Silences (SS), which are of unknown origin.

This study provides valuable information to the scientific community as it allows obtaining relevant information of different types of seismic events that can be identified in other volcanoes.

From the data analyzed, 84 VTs were localized, defining 4 seismic active zones. 54 LPs were characterized and classified in 7 families, according to their waveform and spectral values. Finally, the SS were described and then combined with the VTs and LPs, to compare with the surface activity of the volcano.

**Keywords:** Volcanic monitoring, seismic events, Copahue volcano.

## Reconocimientos y Dedicatorias

Este trabajo es dedicado a mi familia, ya que sin el apoyo incondicional que recibimos los estudiantes de parte de nuestras familias, se nos haría muy difícil recorrer este camino solos. Les agradezco a mis papás por permitirme comenzar la carrera en otra ciudad y a la mitad del camino apoyarme en la decisión de volver y cambiar de universidad. Siempre me sentí muy valorada y eso fue y sigue siendo sumamente importante para mí.

Le agradezco a la Universidad Nacional del Sur por formarme en el inicio de mi carrera y a la Universidad Nacional del Comahue por haberme recibido tan cálidamente y por todo el conocimiento brindado. A los profesores por siempre ayudarnos a crecer como profesionales. A la Universidad Nacional de Río Negro le agradezco por haber aportado los datos para realizar este trabajo.

Le agradezco a la República Argentina por la educación pública ya que sin esa posibilidad muchos alumnos perderían la opción de crecer académicamente y tener un futuro mejor.

A quienes me acompañaron en el viaje a Copahue, Iván Fernández Melchor, Marcia Hantusch, Enzo Martínez y Sara Pereira Da Silva, por compartir tantos conocimientos y hacerme sentir parte del equipo.

A mis amigos de la UNS por seguir siendo parte de mi vida a pesar de la distancia. Y, a mis amigos de la UNCO por transitar conmigo este último tramo que tuvo sus dificultades con una pandemia de por medio. Juntos siempre es mejor.

Quiero agradecerle a mi directora Sheyla Iglesias por no haberme cerrado la puerta a la hora de realizar un trabajo con la temática que yo deseaba y por haber buscado una persona que pueda ayudarme a lograrlo. No todos se toman el tiempo y el trabajo de ayudarnos a concretar un sueño y es por eso que voy a estar siempre agradecida.

A mi Codirector, Iván Fernández Melchor, le agradezco por haber aceptado transitar este camino juntos, en el que me enseñó, me ayudó y me tuvo mucha paciencia para lograr el objetivo. Siento una gran admiración y siempre voy a estar muy agradecida.

Por último, le agradezco al jurado asignado a este TFL, por haber aceptado tomarse el tiempo de corregir y proponer mejoras a mi trabajo.

# Índice

<b>1) Introducción</b>	<b>1</b>
1.1) Objetivos	2
General	2
Específicos	2
1.2) Ubicación de área de estudio	2
1.3) Marco Geológico Regional	3
1.3.1) Marco Geológico Local	6
1.4) Antecedentes eruptivos	8
<b>2) Marco Teórico</b>	<b>9</b>
2.1) Sismología	9
2.2) Sismógrafos y sismogramas	11
2.3) Sismología volcánica	12
2.3.1) Tipos de eventos sísmicos	12
2.3.1.1) Sismos volcano-tectónicos	13
2.3.1.2) Eventos de largo periodo	13
2.3.1.3) Eventos híbridos	14
2.3.1.4) Tremor volcánico	15
2.3.1.5) Explosiones	16
2.4) Análisis espectral	17
2.5) Localización de la sismicidad	18
2.6) Modelos de velocidad	18
<b>3) Desarrollo</b>	<b>19</b>
3.1) Equipamiento	20
3.2) Metodología aplicada	21
3.2.1) Sismos volcano-tectónicos	22
3.2.2) Sismos de largo periodo	22
3.2.3) Otros eventos	22
3.2.4) Análisis de la actividad superficial del volcán	25
<b>4) Resultados</b>	<b>26</b>
4.1) Localización y análisis de sismos volcano-tectónicos	26
4.2) Caracterización y clasificación de sismos de largo periodo	29
<b>5) Discusiones</b>	<b>33</b>
5.1) Relación de la actividad de VTs y LPs con la actividad del volcán	33
5.2) Silencios Sísmicos	38



<b>6) Conclusiones</b>	<b>40</b>
<b>7) Referencias</b>	<b>41</b>
<b>8) Anexos</b>	<b>50</b>

## 1) Introducción

El estudio de los volcanes activos en la Argentina es muy importante tanto geológicamente como sociológicamente. Desde el punto de vista geológico puede ayudar a mejorar el conocimiento del sistema volcánico y sus relaciones con la tectónica regional y local (Montenegro, 2019), y a nivel sociológico, por su cercanía a zonas pobladas, permite establecer diferentes estados de alerta a través del monitoreo volcánico (Páez *et al.*, 2021). También resulta importante, la exploración de los recursos geotérmicos con fines energéticos (Mas *et al.*, 2000).

Este trabajo se sitúa en la zona del volcán Copahue, el cual se encuentra monitoreado desde 2012 por el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN) y, en colaboración con el Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV) del SEGEMAR, desde 2020. El monitoreo volcánico tiene como objetivo, a través de establecer sistemas de vigilancia que permitan determinar el estado de actividad volcánica, detectar variaciones que indiquen el inicio de una fase eruptiva mayor (Quass *et al.*, 1995). El volcán Copahue es un estratovolcán poligenético activo (por ej., Folguera *et al.*, 2016). El cráter alberga un lago hiperácido cuya dinámica viene dada por la interacción entre los gases volcánicos y las aguas meteóricas de la lluvia, la nieve y el glaciar que se derrite y descarga en el cráter, además de la evaporación y otros efectos asociados al magmatismo (Agusto *et al.*, 2017). Este volcán se caracterizó en la última década por una actividad estromboliana con esporádicos pulsos eruptivos freáticos y freatomagmáticos de baja energía (julio y diciembre de 2012 (Petrinovic *et al.*, 2014; Caselli *et al.*, 2016b; Daga *et al.*, 2017), octubre-diciembre 2014 (*Global Volcanism Program (GVP)*, 2016), marzo-abril 2016 (Hantusch *et al.*, 2021a), septiembre-octubre 2019 (GVP, 2019), y marzo-octubre 2020 (Hantusch *et al.*, 2021b)), cambios continuos en el volumen, temperatura y composición química del lago del cráter (Agusto y Vélez, 2017; Candela-Becerra *et al.*, 2020; Melchor *et al.*, 2022), altas tasas de desgasificación (Agusto *et al.*, 2013; Tamburello *et al.*, 2015) y un proceso inflacionario continuo desde 2011 (Vélez *et al.*, 2016; Lundgren *et al.*, 2017). En el año 2020, el volcán Copahue siguió con actividad eruptiva entre marzo y octubre. Se destacan 3 pulsos eruptivos de emisión de ceniza desde junio hasta agosto, explosiones e intensa desgasificación entre agosto y septiembre (GVP, 2020).

Recientemente, Melchor *et al.* (2022), estudiaron la relación entre la actividad sísmica de tipo tremor y la actividad eruptiva entre 2012 y 2019. Sin embargo, todavía no está clara la relación entre la actividad volcano-tectónica y de largo periodo con los pulsos eruptivos. El objetivo de este Trabajo Final de Licenciatura es analizar los registros sísmicos de la red compuesta por tres estaciones sísmicas, instalada por la UNRN, desde el momento en que se pusieron en marcha (a mediados de marzo del año 2020), caracterizar los diferentes tipos de señales que se registraron hasta agosto del mismo año y vincularlos temporalmente con la actividad eruptiva del volcán.

Conocer la ocurrencia temporal de estos fenómenos así como sus características es fundamental tanto para comprender la naturaleza de la actividad del volcán Copahue como la de estas señales.



## 1.1) Objetivos

### General

Analizar y caracterizar la actividad sísmica local del volcán Copahue en el periodo de marzo-agosto del año 2020.

### Específicos

1. Conocer el funcionamiento de las estaciones sísmicas, su manejo y sus productos, y el procesamiento básico de análisis de señales sísmicas.
2. Estudiar las características espacio-temporales y espectrales de las diferentes señales registradas.
3. Relacionar las diferentes señales registradas con la actividad eruptiva y la geología del lugar.
4. Plantear posibles mecanismos de fuente para explicar las señales de largo periodo ( $< 10$  Hz).

## 1.2) Ubicación de área de estudio

El volcán Copahue ( $37^{\circ}51'21,27''S$ ;  $71^{\circ}09'37,38''O$ , 2977 m), ubicado en el límite Argentina-Chile, se encuentra en la cordillera de los Andes, en el sector noroeste de la provincia de Neuquén a 380 km de la capital de dicha provincia (Figura 1). Desde la ciudad de Neuquén se accede por la ruta nacional 22, hasta Zapala y se toma la ruta nacional 40 para arribar a Las Lajas. Luego de transitar por la ruta nacional 242 algunos kilómetros, se continúa por la ruta provincial 21 hasta Loncopué y se prosigue por la ruta provincial 26 hasta la localidad de Caviahue, la que se encuentra a 9,5 km al oeste del cráter activo y aproximadamente a 16 kilómetros medidos sobre el camino se encuentra Copahue, una villa turística de carácter estacional, ya que su acceso sólo es posible en los meses estivales.

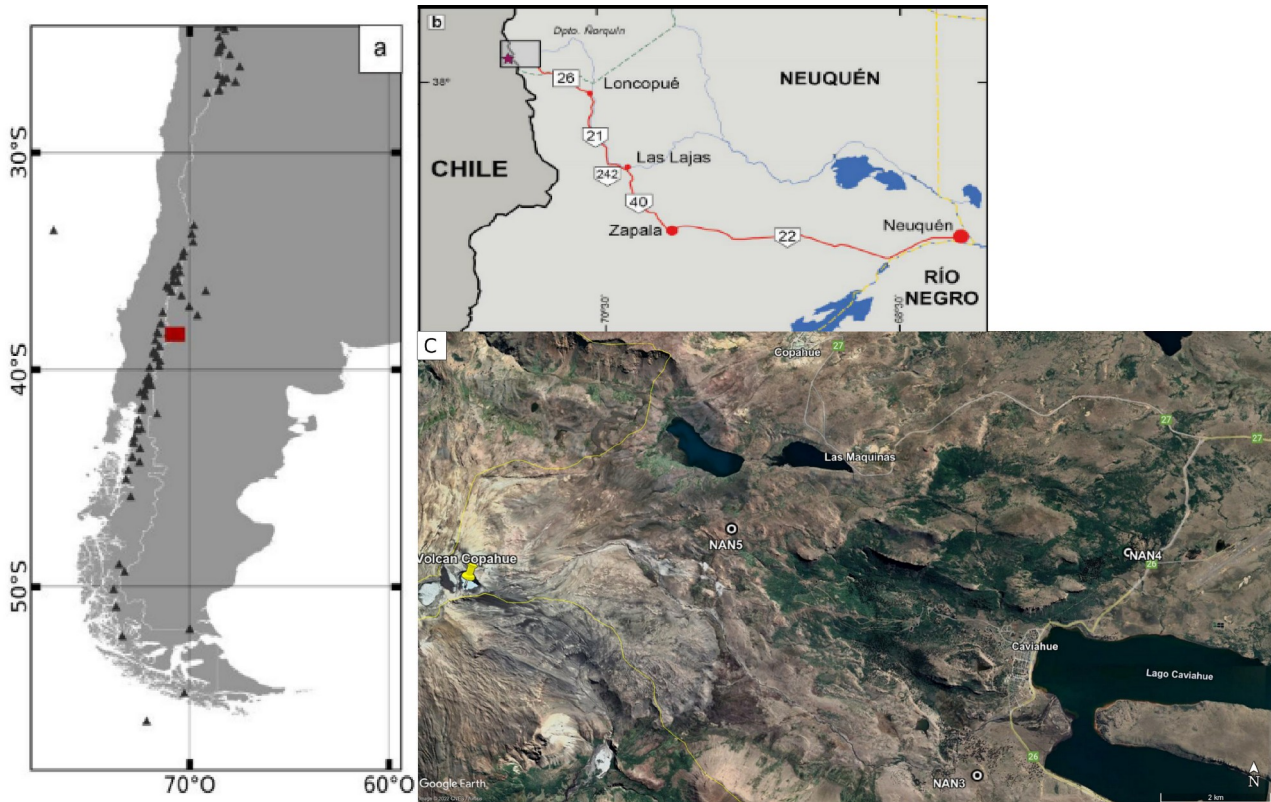


Figura 1: a) Mapa regional del sur de Argentina y Chile con la ubicación del área de estudio en rojo. b) Mapa del área de estudio con las rutas de acceso. c) Ampliación del área de estudio con la ubicación de las estaciones sísmicas (NAN3, NAN4 y NAN5) en Imagen satelital (Google Earth).

### 1.3) Marco Geológico Regional

El Complejo volcánico Copahue-Caviahue (CCVC, por sus siglas en inglés) se ubica aproximadamente a 30 km al este del frente de avance del actual arco volcánico (Figura 2), sobre el antiguo frente volcánico del Plioceno-Pleistoceno temprano (Folguera y Ramos, 2000; Melnik *et al.*, 2006). Forma parte del segmento central de la Zona Volcánica Sur (ZVS), donde la corteza es moderadamente gruesa (45 km) y la subducción de la placa de Nazca alcanza unos 30° (Bohm *et al.*, 2002; Lüth *et al.*, 2003).

La Zona de Falla de Liquiñe-Ofqui (LOFZ, por sus siglas en inglés) es un sistema de deslizamiento dextral de intraarco de aproximadamente 1200 km de largo desde el Golfo de Penas a los 47°S hasta el CCVC a los 38°S, que acomoda parte del componente paralelo al margen de subducción oblicua y que ha estado desacoplando una parte del antearco desde el Plioceno (Hervé, 1976, 1994; Nelson *et al.*, 1994; Cembrano *et al.*, 1996; Lavenu y Cembrano, 1999; Cembrano *et al.*, 2000, 2002; Rosenau, 2004; Rosenau *et al.*, 2006). La LOFZ muestra estilos de deformación contrastantes. El segmento sur (47°30'–42°S), ha sido descrito como transpresivo (Lavenu y Cembrano, 1999), controlado por la colisión de la dorsal de Chile (Cembrano *et al.*, 2002). El segmento central (42°–39°S) está caracterizado por una deformación predominantemente transcurrente (Lavenu y Cembrano, 1999; Cembrano *et al.*, 2000; Rosenau, 2004). El segmento norte (39°–37°50'S), sin embargo, muestra deformación transtensional, caracterizada por abanicos de falla, formación de grábenes, y una estructura de cola de caballo negativa (por ej., Rosenau *et al.*, 2006). La falla Lomín, con tendencia NE, es la estructura principal. A los 38°15'S sufre una inflexión hacia el este, hasta los 37°50'S, donde se abre la Caldera de Caviahue.



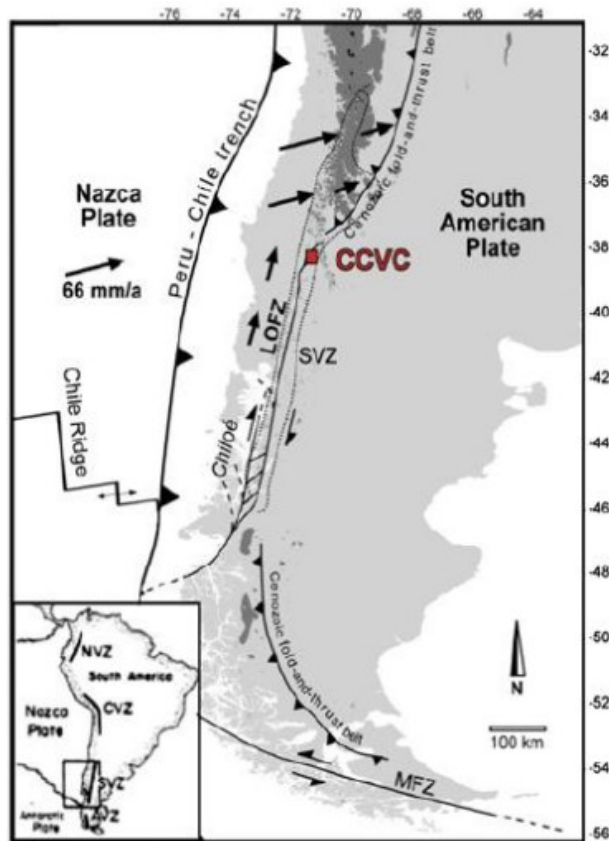


Figura 2: Mapa de los Andes del Sur. Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (LOFZ) en la ZVS; Con un cuadrado rojo se señala el CCVC (modificada de Vélez et al., 2011).

El CCVC se encuentra en el sector central del lineamiento volcánico Callaqui-Copahue-Mandolegüe (CCM) de 90 km de largo, desde el frente volcánico actual hasta el retroarco, siendo el lineamiento Plio-Cuaternario más largo de la ZVS (Figura 3) (Melnick et al., 2006).

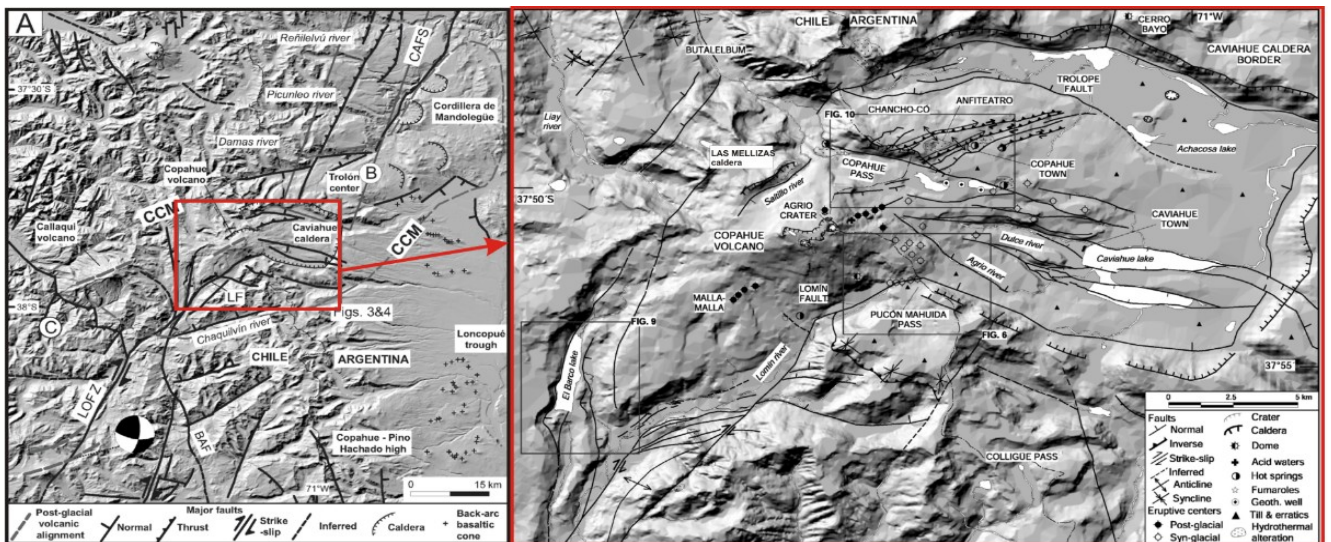


Figura 3: Mapa geológico-estructural presentado por Melnick et al. (2006) modificado por Bengoa (2016). Izq.: grandes estructuras en la zona del CCVC. Der.: estructuras que se encuentran dentro del complejo volcánico.

El CCM está compuesto por el volcán Callaqui (3080 m), un estratovolcán cuaternario; el CCVC con el volcán Copahue; el centro volcánico Trolón, un pequeño estratovolcán andesítico colapsado; y la Cordillera de Mandolegüe, un bloque de 40 km de largo, compuesta por estratovolcanes cuaternarios parcialmente colapsados, enjambres de diques y conos piroclásticos todos alineados en la misma dirección (Pesce, 1989; Linares *et al.*, 1999; Melnick *et al.*, 2006) (Figura 4).

Favorecido por estructuras preexistentes, el Volcán Copahue se encuentra sobre una zona de transferencia entre dos hemigrabenes pertenecientes a la cuenca de Cura Mallín, que Radic (2010) denominó Zona de Acomodación Copahue-Callaqui. Este sector se ubica en el límite de placas convergentes, en el cual se produce la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana con un ángulo de 30° (Bohm *et al.*, 2002) de subducción y una convergencia de las placas oblicua con un ángulo 79° (Angermann *et al.*, 1999). Folguera *et al.* (2004) reconocen a la caldera del Agrio y a la estructura del Cerro Chanco-Co como posibles estructuras de transferencia entre los dos sistemas de fallas imperantes en la zona: LOFZ al sur del CCVC en el arco y el sistema Antiñir-Copahue al norte del complejo, en el retro-arco (Figura 4).

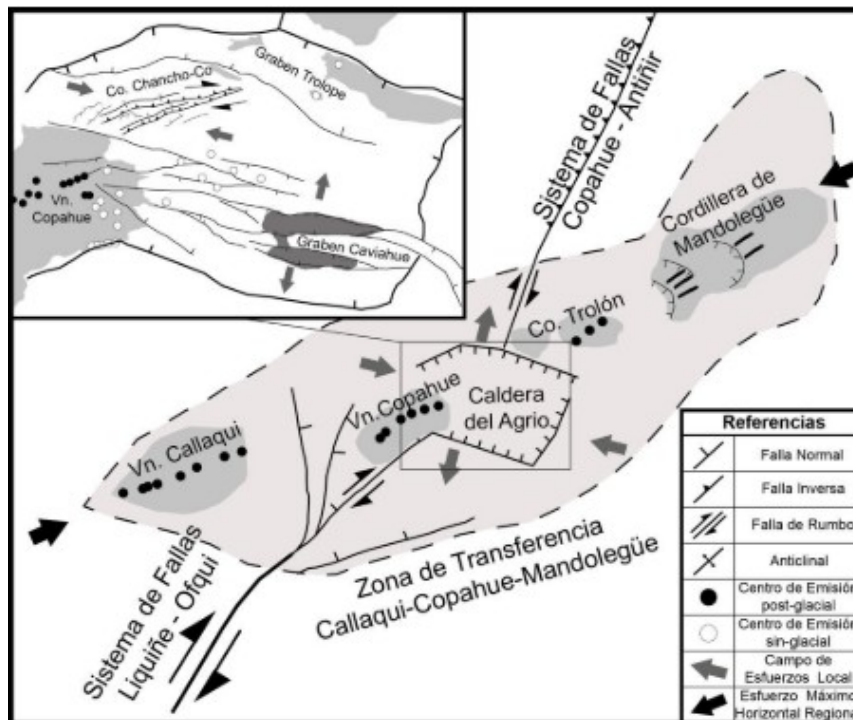


Figura 4: Modelo estructural de la Zona de Transferencia Callaqui-Copahue-Mandolegüe. Presentado por Melnick *et al.* (2006) modificado por Báez (2015).

Folguera *et al.* (2004), definieron la zona de falla de Antiñir-Copahue (ACFZ, por sus siglas en inglés) como una serie de fallas del frente orogénico de los Andes que se encuentra en el sector central del lineamiento CCM (Figura 5). La ACFZ consiste en fallas transpresivas y transtensivas dextrales de alto ángulo (Melnick *et al.*, 2006; Radic, 2010; Vélez *et al.*, 2011). El lineamiento de Mandolegüe funciona allí como zona de fallas de transferencia entre la transcurrencia de la LOFZ y la faja plegada y corrida de la ACFZ.

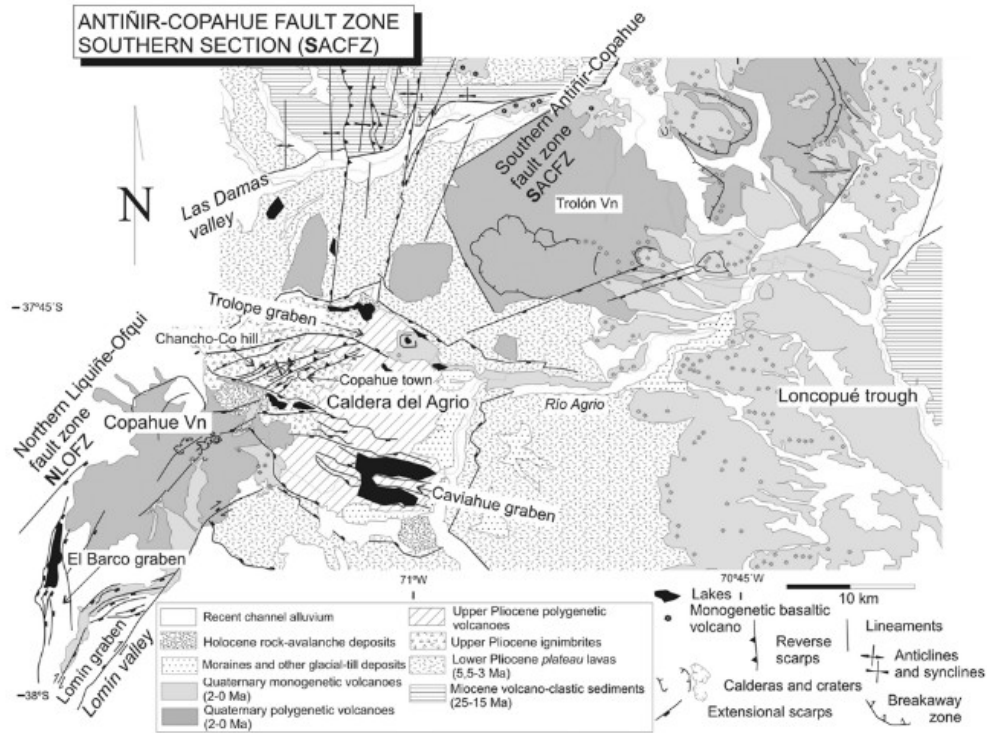


Figura 5: Mapa presentado por Folguera et al. (2004) donde se observan las estructuras entre la LOFZ y la ACFZ.

### 1.3.1) Marco Geológico Local

La depresión Caviahue o también llamada por algunos autores Caldera Copahue (Muñoz y Stern, 1988), Caldera Caviahue-Copahue (Pesce, 1989) o Caldera del Agrio (Polanco, 1998) es una depresión con forma rectangular en dirección ONO-ESE, de 15x20 km, emplazada en el medio del lineamiento CCM (Figura 4). Esta caldera fue descrita por varios autores con orígenes diferentes. En primer lugar Groeber (1921) la describió con un origen glaciario; Pesca (1989) sugirió el origen volcánico; Folguera y Ramos (2000) un origen estructural; Por último algunos autores (por ej., Sruoga y Consoli, 2011a) combinan un origen volcánico y estructural.

Diferentes interpretaciones se dieron a lo largo del estudio de la Caldera Copahue. Bermúdez *et al.*, 2002 y Melnick *et al.*, 2006 la han interpretado como una cuenca de intrarco extensional de pull-apart asociada a la LOFZ y la ACFZ. Pesca (1989), Delpino y Bermúdez (1993) y Linares *et al.* (1999) interpretaron que el colapso de la caldera ocurrió después de la erupción de Riscos Bayos, lo que fue descartado por Varekamp *et al.* (2006) en base a estudios geoquímicos.

Al norte del edificio volcánico Copahue se ubica el Cerro Chanco-Co, el mismo comprende una estructura de flor positiva con dirección N60°E (Folguera *et al.*, 2004). Rojas Vera *et al.* (2009) lo describen como una serie de cabalgamientos que levantan unidades pliocenas sobre depósitos cuaternarios coluviales y fluviales.

La caldera del Agrio forma parte del CCVC, siendo su rasgo más distintivo la presencia del volcán Copahue, un estratovolcán poligenético andesítico a basalto-andesítico activo con una elongación N40°E y una posible edad de formación de aproximadamente 1.2 Ma, según dataciones en base al método de K-Ar (Linares *et al.*, 1999), aunque las edades Ar/Ar más recientes son considerablemente más jóvenes (125 ka, Sruoga y Consoli, 2011b), por dataciones de la subyacente

Formación Las Mellizas. Las erupciones, de características freáticas a freatomagmáticas, han sido constantes en los últimos 250 años (Naranjo y Polanco, 2004). Los últimos ciclos eruptivos se han desarrollado en el cráter más oriental en los años 1992, 2000 y desde 2012 a la actualidad (Delpino y Bermúdez, 1993 y 2002; Forte, 2013; Petrinovic *et al.*, 2014; Caselli *et al.*, 2016a; Agosto y Vélez, 2017).

El volcán alberga un lago intracraterico ácido (pH 0-1) con un diámetro de 300 m; manchas de azufre aparecen periódicamente en su superficie. Asociado al sistema hidrotermal del cráter, se presentan aguas termales ácidas en el flanco oriental, ubicadas 200 m por debajo del borde del cráter, desembocan en el Río Agrio Superior, que desemboca en el Lago Caviahue, un lago glacial acidificado volcánicamente (Gammons *et al.*, 2005; Varekamp *et al.*, 2009; Agosto *et al.*, 2017). La actividad magmática afecta de manera directa e indirecta a las composiciones químicas de las aguas subsuperficiales ubicadas en el CCVC. Esto quedó evidenciado en el ciclo eruptivo del año 2012, ya que ante un aumento de la actividad del volcán se ha registrado un descenso en el pH y un aumento de las concentraciones de  $\text{SO}_2^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Al}^{3+}$  en las aguas del sistema (Agosto y Varekamp, 2016; Agosto y Vélez, 2017). El sistema magmático-hidrotermal del CCVC está dominado por gases, lo que implica una fuerte entrada de gases volcánicos, un bajo grado de neutralización, un corto tiempo de residencia de los fluidos y una matriz rocosa altamente alterada debido a la interacción agua-roca (Varekamp *et al.*, 2000). Este ha sido el foco de diversos estudios debido a su potencial geotérmico (Dellapé y Pando, 1975; Jurío, 1977; Panarello *et al.*, 1988; JICA, 1992; Sierra *et al.*, 1992; Mas *et al.*, 2000; Panarello, 2002).

La neotectónica de la caldera ha sido descrita en el pasado, a veces con observaciones e interpretaciones contradictorias. Algunas de las principales estructuras de la caldera de Caviahue descritas por Bonali *et al.* (2016) son las denominadas Sistema de Fallas de la Villa de Copahue (CVFS, por sus siglas en inglés) y corresponden a (Figura 6) (a) fallas normales ubicadas en los bordes de la caldera, en las direcciones ONO y NNE; (b) fallas de deslizamiento lateral derecho en dirección NNE, ubicado en la parte SO del volcán Copahue, correspondiente al borde norte del LOFZ; (c) fallas de caída lateral izquierda que van en una dirección NO, y (d) fallas en dirección NE, controlando el área geotérmica, localizada en la parte NE del volcán Copahue. Los mecanismos focales de estas fallas no están bien definidos, y existen interpretaciones de cómo son los sistemas de esfuerzos de las fallas. Melnick *et al.* (2006), Folguera *et al.* (2004), y Rojas Vera *et al.* (2009) infirieron que son fallas inversas con un pequeño componente dextral, debido al tensor transpresional local. Por otro lado, Bonali *et al.* (2016) y Lundgren *et al.* (2017) concluyeron que estas fallas son normales, con un pequeño margen dextral, usando diferentes enfoques como fotos aéreas, observaciones de campo y datos de InSAR. Luego Montenegro *et al.* (2021) confirman esto con estudios de mecanismos focales de sismos localizados en esta zona. Barcelona *et al.* (2019b), a través de las mediciones de estriación del plano de falla en las áreas geotérmicas con alteración hidrotermal superficial (Anfiteatro, Termas y Maquinitas), obtuvieron como resultado un régimen de tensión bien definido en el sector del campo geotérmico de Copahue, con la tensión principal mínima en el plano NO-SE. Los resultados obtenidos por estos autores indican que el campo geotérmico, y probablemente la pendiente noreste del volcán está sujeto a un régimen de fallas extensionales. Lamberti *et al.* (2019) también, a través de un análisis estructural que relaciona con la desgasificación difusa de  $\text{CO}_2$  sugirieron la presencia de un régimen extensional asociado a tres tendencias estructurales, que consisten en fallas normales con tendencia NE-SO, fallas de *strike-slip* sinistral NO-SE y fallas *strike-slip* dextrales ENE-OSO.

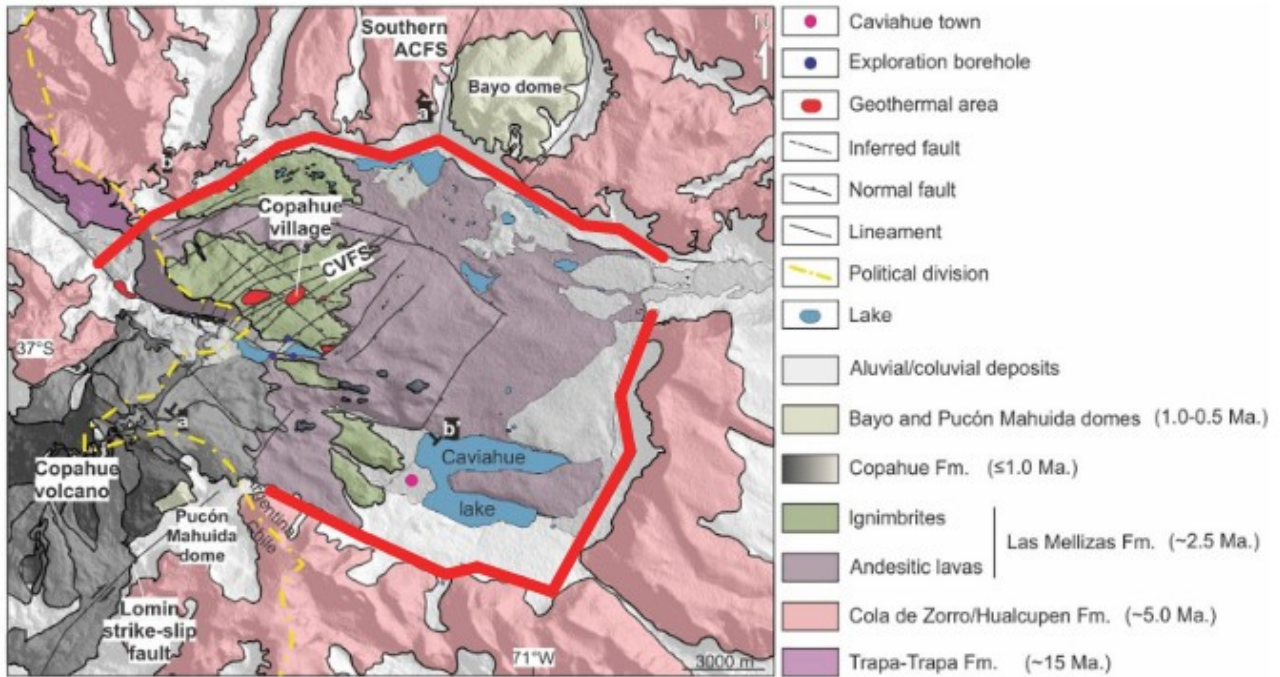


Figura 6: Ambiente geológico de la caldera del Agrio (delimitada con líneas rojas), modificado de Barcelona *et al.* (2019b). En el sector NO de la caldera, próximo a la Villa de Copahue puede observarse el Sistema de Fallas de la Villa de Copahue (CVFS).

#### 1.4) Antecedentes eruptivos

La actividad histórica del volcán Copahue es escasa e incompleta. Naranjo y Polanco (2004) mencionan la existencia de doce erupciones que han sido reportadas en los últimos 250 años (1750, 1759, 1867, 1937, 1944, 1960, 1961, 1992, 1993, 1994, 1995 y 2000). Las erupciones de este volcán se han caracterizado por ser de baja intensidad, tipo freáticas y presentando un Índice de Explosividad Volcánica entre 1 y 2 (VEI, por sus siglas en inglés), el cual relaciona la altura máxima de la columna eruptiva con el total del volumen de los productos eyectados, pudiendo clasificar las erupciones con un valor que va desde el 0 hasta el 8.

Estas erupciones se caracterizan fundamentalmente por las emisiones de cenizas. Los depósitos de caída descritos por Polanco *et al.* (2000) corresponden a composición andesítica con alto contenido de potasio.

En la erupción del año 2000 se observó un cambio drástico en el estilo eruptivo, comenzando por erupciones freáticas y freatomagmáticas (con la desaparición del lago cratérico) y culminando con erupciones típicamente estrombolianas. Éste evento comenzó el 1 de julio y duró hasta fines de octubre, siendo el ciclo eruptivo de mayor duración y magnitud en tiempos históricos (Bermúdez *et al.*, 2002; Naranjo y Polanco, 2004). Hacia fines del año 2000 comenzó a restablecerse el lago cratérico. El último ciclo eruptivo, que comenzó en julio de 2012, tuvo su máximo eruptivo, que culminó con una erupción estromboliana (VEI 2), el 22 de diciembre de ese mismo año (Caselli *et al.*, 2016b). Las erupciones freatomagmáticas-magmáticas de diciembre de 2012 fueron similares a las del 2000, ya que surgieron del mismo cráter de la cumbre más oriental después de un período de actividad sísmica creciente luego del terremoto del Maule de 2010 (Bonali, 2013).

Desde entonces, la actividad eruptiva se caracteriza por una alta tasa de desgasificación continuada

(Tamburello *et al.*, 2015), períodos frecuentes de incandescencia, explosiones y emisión de ceniza en el cráter activo.

En el año 2020 se describió una erupción con columnas de gas y cenizas desde mediados de junio hasta finales de octubre (GVP, 2020), acompañada de anomalías térmicas visibles en imágenes de satélite y pequeñas cantidades de SO<sub>2</sub> (OVDAS-SERNAGEOMIN). El reporte del GVP, 2020 menciona que la actividad durante la mayor parte de junio y julio consistió en emisiones ocasionales de vapor y gas blanco que se elevaron 350-500 m sobre el cráter de El Agrio y emisiones de SO<sub>2</sub>. El 16 de junio, un período de aumento de la sismicidad estuvo acompañado por la incandescencia del cráter y las emisiones de gases que contenían algo de ceniza. Los penachos de SO<sub>2</sub> aumentaron ligeramente en julio. Los residentes locales observaron una segunda columna de ceniza el 16 de julio (Hantusch *et al.*, 2021b) y emisiones de SO<sub>2</sub> de 4.684 ton/día. Por último, el reporte de SERNAGEOMIN indica que el 6 de agosto se registró un cambio en la actividad destacándose la coloración más oscura en la emisión de gas acompañado de un progresivo aumento en la señal sísmica tipo Tremor.

## 2) Marco Teórico

### 2.1) Sismología

La sismología es una rama de la geofísica que se encarga del estudio de la propagación de las ondas elásticas (ondas sísmicas) que se generan en el interior y en la superficie de la Tierra.

Las ondas sísmicas son perturbaciones de deformación que se propagan a través de un medio (Figura 7). Los sismos o terremotos ocurren en zonas de la corteza sometidas a un esfuerzo que sobrepasa la cohesión del medio y se liberan de forma repentina, generando una zona de nucleación que se propaga en lo que se conoce como frente de ruptura. Esto genera ondas de cuerpo longitudinales y transversales que se propagan hasta la superficie en todas las direcciones.

Recibe el nombre de onda P, a la primera onda de arriba que se corresponde con un movimiento longitudinal, es decir en la dirección de propagación. Reciben el nombre de ondas S, las ondas de corte (transversales a la dirección de propagación) por ser secundarias, ya que se propagan a una velocidad menor que las ondas P. Las ondas Rayleigh o retrógradas, son ondas superficiales compuestas (componente P y SV: proyección de la onda S en la vertical, respecto de la superficie), las partículas vibran en el plano vertical efectuando giros retrógrados. Se las llama ondas de “redoble de suelo” (del inglés, *ground roll*), son de baja frecuencia y velocidad. Por último, las ondas Love son ondas superficiales que están compuestas por ondas SH (proyección de la onda S en la horizontal, respecto de la superficie). Sus partículas vibran transversalmente en las superficies de contacto entre capas (medios estratificados). Cuando las ondas internas alcanzan la superficie, parte de su energía se propaga a través de la superficie en forma de ondas Rayleigh y Love.

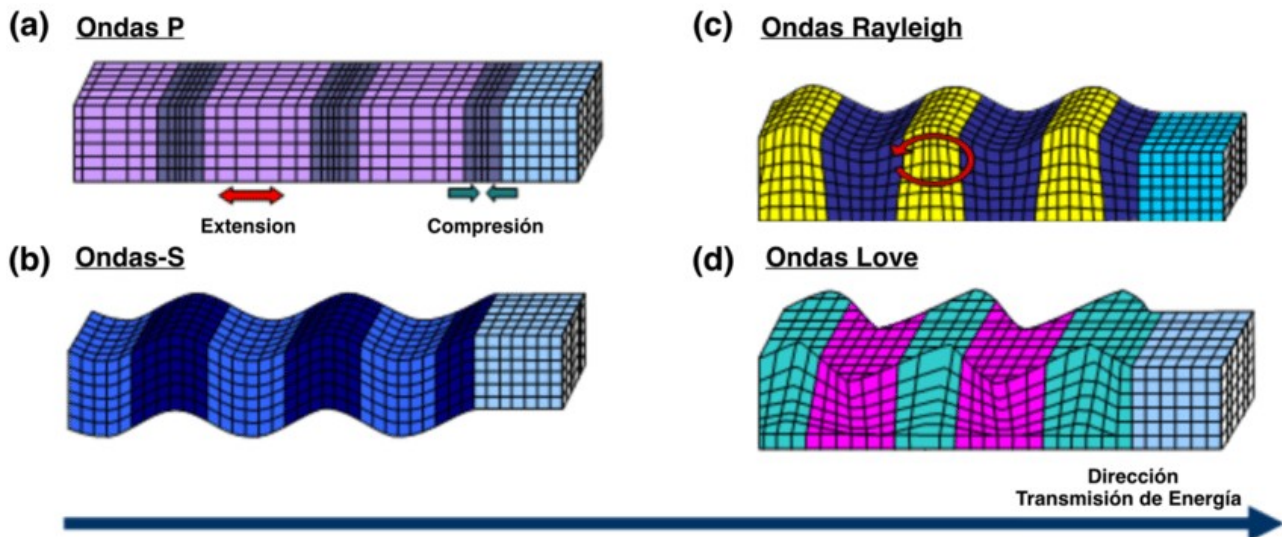


Figura 7: Ondas de cuerpo: (a) ondas P y (b) ondas S. Ondas superficiales: (c) ondas Rayleigh y (d) ondas Love. Tomado de Aki y Richards (2002).

El punto en la profundidad de la Tierra desde donde se libera la energía en un terremoto se conoce como hipocentro o foco. Cuando ocurre en la corteza, aproximadamente hasta 70 km de profundidad o en ocasiones hasta la discontinuidad de mohorovicic, se denomina superficial. Si ocurre entre los 70 y los 300 km se denomina intermedio o profundo y si es a mayor profundidad: profundo. Su proyección en la superficie se denomina epicentro. Los sismos son generados naturalmente por la ruptura frágil de la corteza, pueden ser tectónicos y/o volcánicos, en este trabajo se determinaron los de origen volcánico. Los sismos volcánicos resultan de la actividad volcánica ya sea directa o indirecta, por la acción del magma y otros fluidos volcánicos en la corteza terrestre y por los esfuerzos tectónicos en el entorno volcánico.

Para medir la energía liberada por un terremoto se emplean diversas escalas, entre ellas, la escala de Richter que es la más conocida. Las escalas permiten comparar la energía emitida de un terremoto en base a la amplitud máxima registrada. El concepto de magnitud fue propuesto por primera vez por Richter (1935). La magnitud de Richter o magnitud local, indicada usualmente por  $M_L$  está definida como el logaritmo de la máxima amplitud observada en un sismógrafo Wood-Anderson estándar (un sismógrafo de péndulo horizontal muy sencillo), con una corrección por la distancia y se asocia a un diferencial de tiempo ( $\Delta t$ ) que se contabiliza desde el inicio de las ondas P y las ondas S.

La magnitud está asociada a una función logarítmica calculada a partir de la amplitud de la señal registrada por el sismógrafo ( $M_L$ ) o a partir de su duración ( $M_D$ ).

## 2.2) Sismógrafos y sismogramas

El sismógrafo o sismómetro es un instrumento sensible a las variaciones de deformación de la corteza terrestre.

Los sismogramas son la representación gráfica de los registros de los sismómetros. Muestran la variación temporal de las mediciones de velocidad de deformación del suelo (Figura 8).

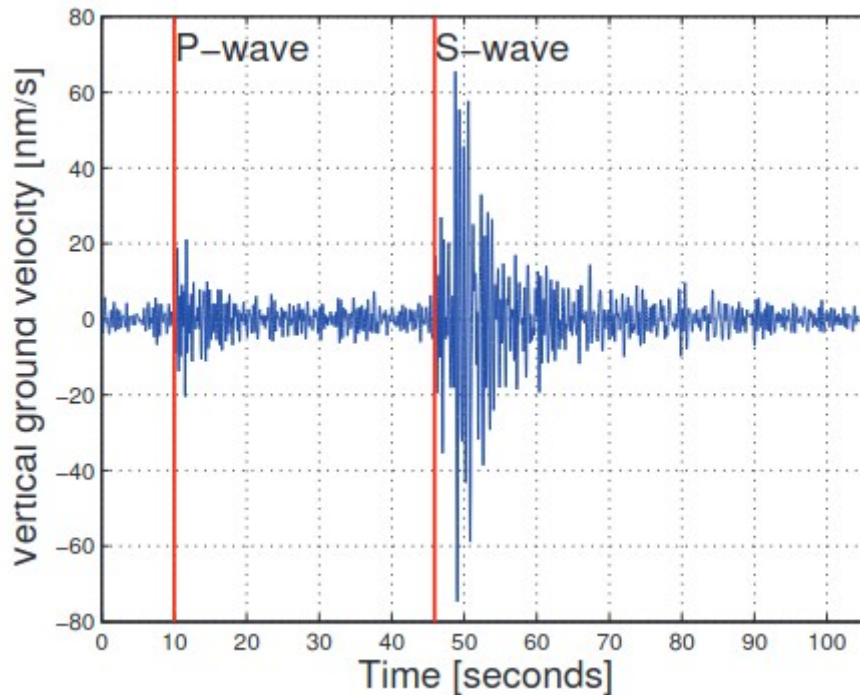


Figura 8: Ejemplo de un sismograma típico mostrando la llegada de la onda P y S. Tomado de Bui Quang et al. (2015).

Dado que las mediciones se realizan en un marco de referencia móvil (la superficie terrestre), casi todos los sensores sísmicos se basan en la inercia de una masa suspendida, que tenderá a permanecer estacionaria en respuesta al movimiento externo. El movimiento relativo entre la masa suspendida y el suelo será entonces una función del movimiento del suelo (Figura 9). Existen varios sensores de acuerdo al periodo natural de la masa que caracterizan la sismicidad por la sensibilidad del sensor utilizado. Los sensores de banda ancha son de 20 a 120 segundos. A mayor periodo, mayor sensibilidad a bajas frecuencias (Havskov y Alguacil, 2004).

El movimiento tridimensional del suelo generalmente se mide a través de masas que oscilan en las direcciones X (N-S y E-O) y Z, por lo que se necesitan 3 sensores de una masa o 1 sensor de tres masas (Havskov y Alguacil, 2004). En los últimos años se ha hecho evidente que los sismos también generan movimientos rotatorios que idealmente deberían ser medidos. La rotación debe medirse a lo largo de tres ejes, como vertical, N-S y E-O (Lee *et al.*, 2009).

Convertir una señal analógica a digital significa codificar variaciones continuas de voltaje en discretas. Se hace a través de un digitalizador y este convertirá así un voltaje en un número. En los sismómetros modernos, lo que se mide es la diferencia de potencial que hay que aplicar a la bobina por la que oscila la masa para que esta se mantenga fija en la misma posición. El digitalizador tiene 2 aspectos importantes: la frecuencia de muestreo y la resolución que normalmente es de 12, 16 o 24 bits. Así por ejemplo, un convertidor de 12 bits tiene 212 niveles y el de 24 tiene 224. La mayoría de los digitalizadores se basan en convertidores de analógico a digital de 24 bits (Havskov y Alguacil, 2004).



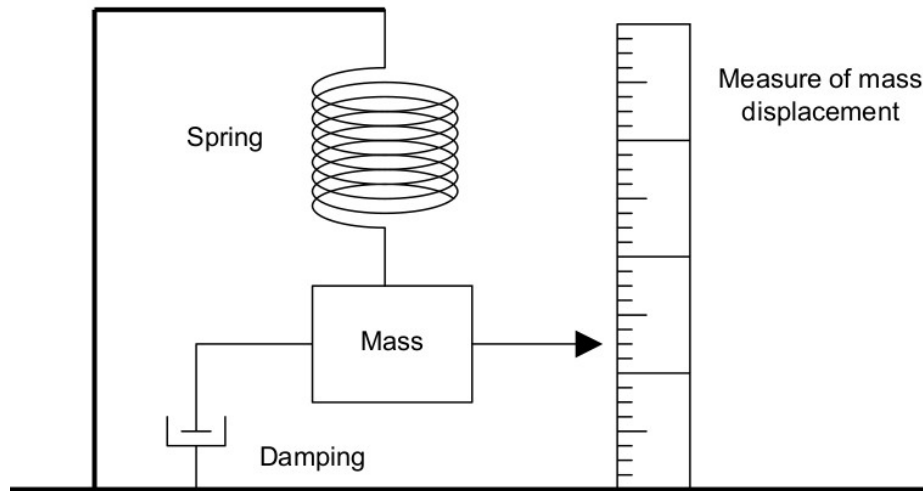


Figura 9: Esquema elemental del funcionamiento de un sensor (Havskov y Alguacil, 2004).

## 2.3) Sismología volcánica

La sismología volcánica es la rama de la sismología que estudia las ondas sísmicas generadas por procesos volcánicos (McNutt, 2005; Kawakatsu y Yamamoto, 2015). Sus objetivos principales consisten en entender la naturaleza y dinámica de las fuentes sísmicas asociadas al transporte de magma y también al movimiento de fluidos hidrotermales, entender la dinámica de los sistemas magmáticos activos, determinar las propiedades físicas de dichos sistemas, mapear la extensión y evolución de las regiones fuente y predecir erupciones volcánicas (Chouet, 1996a). Las señales sísmicas registradas en volcanes muestran comportamientos muy diferentes, desde señales de unos pocos segundos hasta oscilaciones continuas de meses o incluso años (Chouet, 2003).

### 2.3.1) Tipos de eventos sísmicos

Un primer paso para poder estudiar la sismicidad de una región es determinar y caracterizar los diversos tipos de señales que se observan para su posterior identificación. El estado de actividad del volcán y el tipo de volcanismo condicionarán las características de las diferentes señales registradas (McNutt, 2005).

Las regiones volcánicas tienen gran actividad sísmica debido a la dinámica de estos sistemas. La diversidad de procesos que ocurren en estas zonas y las heterogeneidades del medio generan un gran número de señales de naturaleza diversa, lo que se manifiesta en múltiples formas de onda. Ya sea por movimiento de fluidos (gases, agua o fundido) o directamente por procesos de fracturación. Cabe destacar que los eventos sísmicos son identificados y clasificados según las características que presentan, propias de cada uno de ellos, como su contenido espectral, forma de onda, duración, etc, también por su localización o por su relación con la actividad eruptiva (Minakami, 1974; Latter, 1981; Lahr *et al.*, 1994; Sherburn *et al.*, 1998).

#### 2.3.1.1) Sismos volcano-tectónicos

Son eventos cuya liberación de esfuerzos se debe a la sobrepresión que ejercen los fluidos relacionados con la dinámica magmática del volcán y a los esfuerzos tectónicos regionales en la zona volcánica (Figura 10). La duración de un sismo depende de su proceso de ruptura y del medio

por el que las ondas sísmicas se propagan hasta llegar al sensor. El comienzo de la señal suele ser más o menos impulsivo (llegada de la onda P) y es posible identificar la llegada de la onda S (especialmente si se tiene registro en tres componentes).

El contenido espectral es amplio, y es posible observar frecuencias superiores a los 30 Hz. Su forma de onda presenta la contribución de ondas superficiales y un decaimiento final en forma de exponencial decreciente que es la coda.

Espacialmente, los sismos volcano-tectónicos (VT) se suelen localizar en un amplio rango de profundidades, del orden de m. a km. En su proyección en superficie, la distribución es muy variada, en torno a un posible conducto, pero también a lo ancho de todo el sistema volcánico.

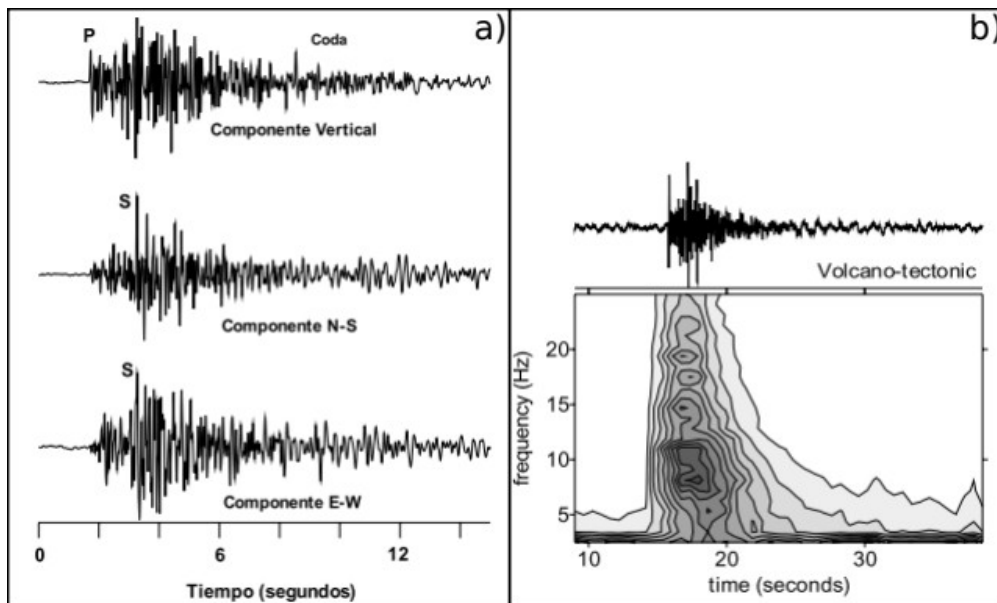


Figura 10: Sismo volcano tectónico (VT) registrado en Isla Decepción, Antártida. (a) componentes vertical, N-S y E-O. Se observan llegadas de ondas P y S y coda. (b) traza y espectrograma, se observan frecuencias >25Hz. (Ibáñez y Carmona, 2000).

### 2.3.1.2) Eventos de largo periodo

Los eventos de Largo Periodo (LP), también conocidos como de Baja Frecuencia, son señales típicas de ambientes volcánicos y de sistemas hidrotermales (Chouet y Matoza, 2013) (Figura 11). Están caracterizados por tener una duración del orden de decenas de segundos, y con un contenido espectral que se caracteriza por presentar bandas de frecuencia relativamente estrechas en el rango 0.5 -- 10 Hz. Se han reportado eventos LP que aparecen precedidos por llegadas de señales menos energéticas, a frecuencias mayores a 5 Hz (Ferrazzini y Aki, 1992).

No presentan llegadas de señales definidas de onda S, lo que podría ser consecuencia de la ruptura de material no consolidado (Bean *et al.*, 2014), por lo que evidencian una naturaleza diferente que los VT. El contenido espectral de esta señal puede variar entre ambientes volcánicos, e incluso evolucionar dentro de un mismo sistema.

Al no poseer onda S y presentar llegada emergente, se requieren muchas estaciones rodeando la fuente para localizar la señal (Ibáñez y Carmona, 2000).

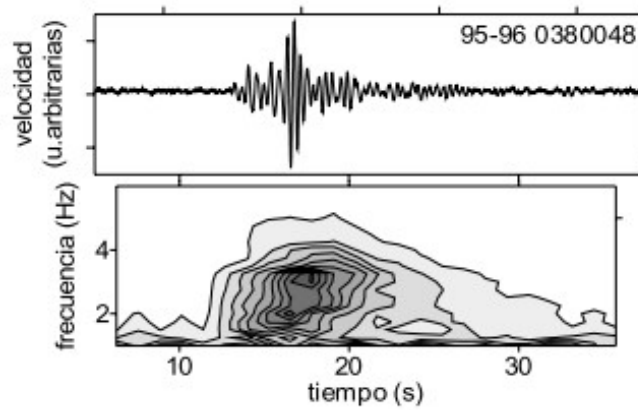


Figura 11: Un ejemplo de evento de largo periodo (LP) registrado en la Isla Decepción. Obsérvese como su contenido espectral es mucho más limitado que el que presentan los sismos de tipo volcano- tectónico. (Ibáñez y Carmona, 2000).

### 2.3.1.3) Eventos híbridos

Este tipo de eventos tiene un comienzo caracterizado por señales de altas frecuencias, mayores a 10 Hz, en donde se pueden identificar fases P y S, por lo que normalmente se asocia a un VT. Después de la fase de alta frecuencia aparece una señal muy similar a los eventos LP (Figura 12). Lahr *et al.* (1994) sugieren que los híbridos (Hy) estarían generados por procesos de fracturación en zonas de debilidad que interceptan grietas rellenas de fluidos. De esta manera, la generación de este tipo de evento sísmico involucra procesos de ambos tipos de fuentes, mecanismos de doble par (fracturación) y volumétricos (movimientos de fluidos).

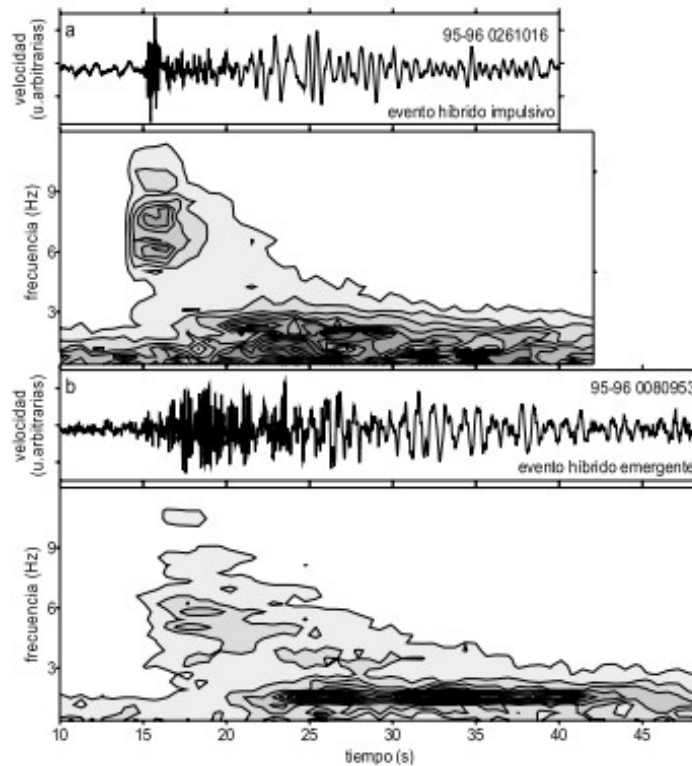


Figura 12: Dos ejemplos de eventos de tipo híbrido registrados en la Isla Decepción. Se puede comprobar la llegada inicial a altas frecuencias, seguida de una señal similar a la de los eventos de tipo LP (Ibáñez y Carmona, 2000).

#### 2.3.1.4) Tremor volcánico

Es un episodio sísmico similar a los LP, solo que su contenido espectral es del orden de los minutos, horas o días (Figura 13).

Se han observado una serie de características comunes:

- Su espectro puede contener muchos picos, mostrando un pico fundamental y sus armónicos. Las frecuencias centrales de los picos dominantes suelen ser estables. Muchos episodios de tremor vienen precedidos inicialmente por unas llegadas de altas frecuencias similares a las encontradas en algunos eventos de tipo LP.
- En pocas ocasiones se puede identificar la presencia de llegadas de fases de tipo P.

La localización espacial de la fuente del tremor requiere de técnicas basadas en correlación de forma de onda debido a la ausencia de fases identificables. La aplicación de antenas sísmicas en una misma región ha permitido localizar y seguir su evolución espacial (por ej., Bengoa, 2016). La ocurrencia temporal del tremor puede ser continua a cualquier fase eruptiva, pre y post.

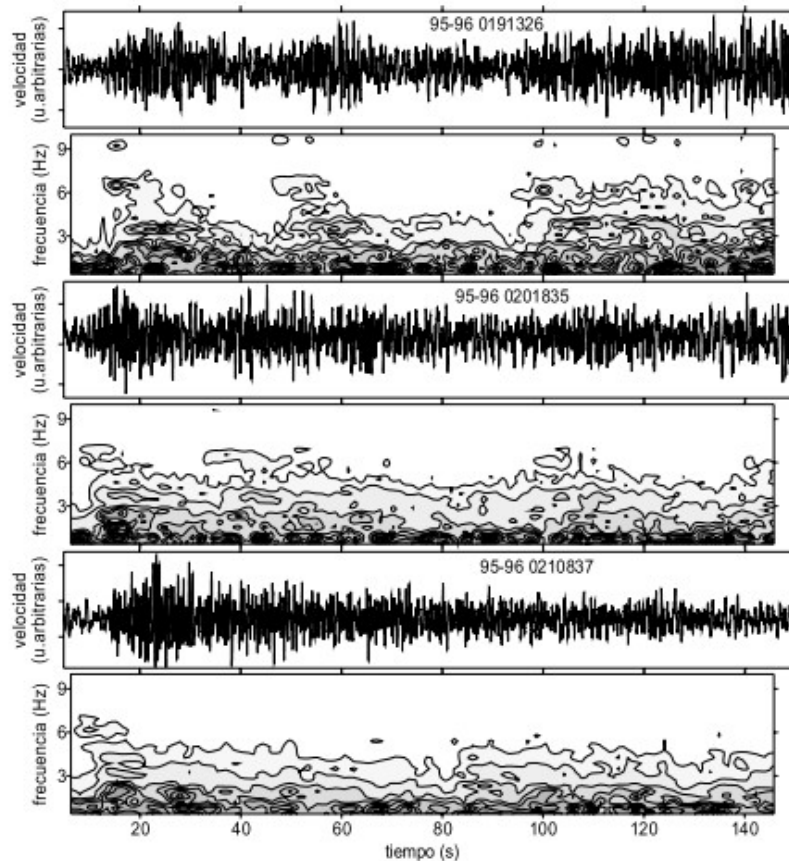


Figura 13: Un ejemplo del espectrograma y forma de onda de varios minutos de un tremor no eruptivo registrado en la Isla Decepción. (Ibáñez y Carmona, 2000).

#### 2.3.1.5) Explosiones

Quizás las señales provenientes de explosiones en los edificios volcánicos corresponden, junto al tremor, a las señales sísmicas más características durante un proceso eruptivo (Figura 14). En general, estos eventos tienen bajas frecuencias y están caracterizados por presentar ondas acústicas en sus sismogramas. Esto se da porque existe una partición de la energía en la fuente: parte de la

energía viaja a través del terreno como onda sísmica y otra parte a través del aire como ondas acústicas y cuando se acopla con el terreno es detectada por el sismómetro (Garcés y Hansen, 1998).

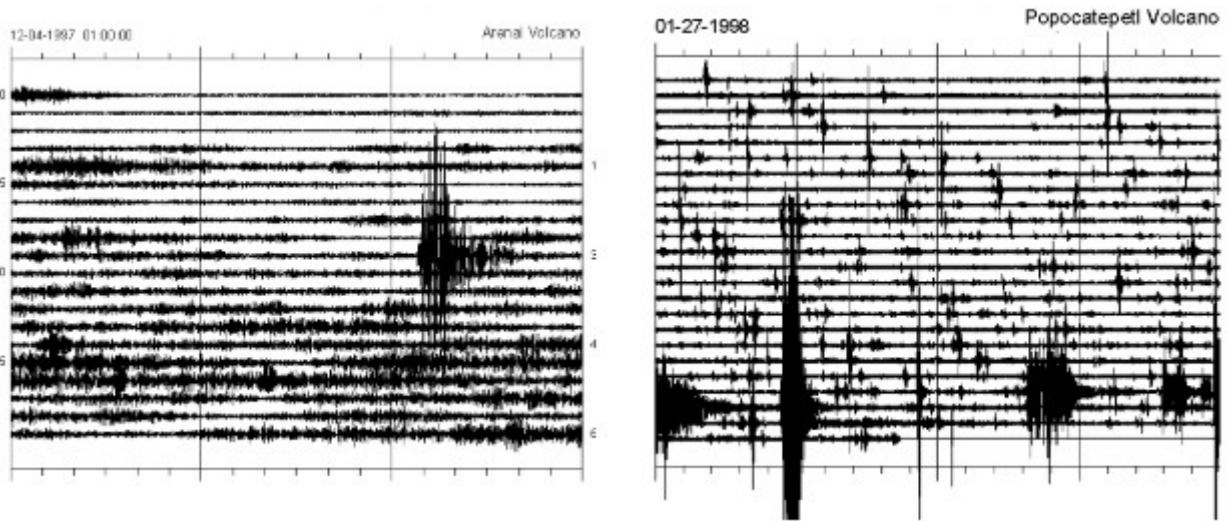


Figura 14: Dos ejemplos de registros en dos volcanes diferentes (Arenal, Costa Rica, a la izquierda y Popocatepetl, México, a la derecha) en donde sobresalen las señales de varias explosiones. (Ibáñez y Carmona, 2000).

## 2.4) Análisis espectral

El objetivo principal del análisis de series temporales es desarrollar medios cuantitativos que permitan caracterizar series temporales, una de las formas de hacerlo es, decir cuantitativamente cómo una serie difiere de otra o cómo se relacionan dos series. Hay dos técnicas de caracterización: dominio de tiempo y dominio de frecuencia. El análisis espectral es una técnica de dominio de frecuencia (Percival y Walden, 1993).

El análisis espectral se ha convertido en una herramienta cada vez más importante para monitorear la actividad de un volcán activo. Existen muchas técnicas diferentes para calcular la amplitud sísmica espectral, como la transformada de corto plazo de Fourier o la estimación de densidad espectral de potencia (PSD), que es una distribución de energía-frecuencia, que proporciona al observador información sobre la señal en el dominio espectral (por ej., Qian y Chen, 1996). Una característica importante de las señales sísmicas volcánicas son sus espectros de banda estrecha. El monitoreo de los cambios de las propiedades espectrales es una herramienta útil no solo para la discriminación de señales sino también para caracterizar el estado de la actividad volcánica (Bormann, 2002). Un ejemplo se da en la Figura 15.

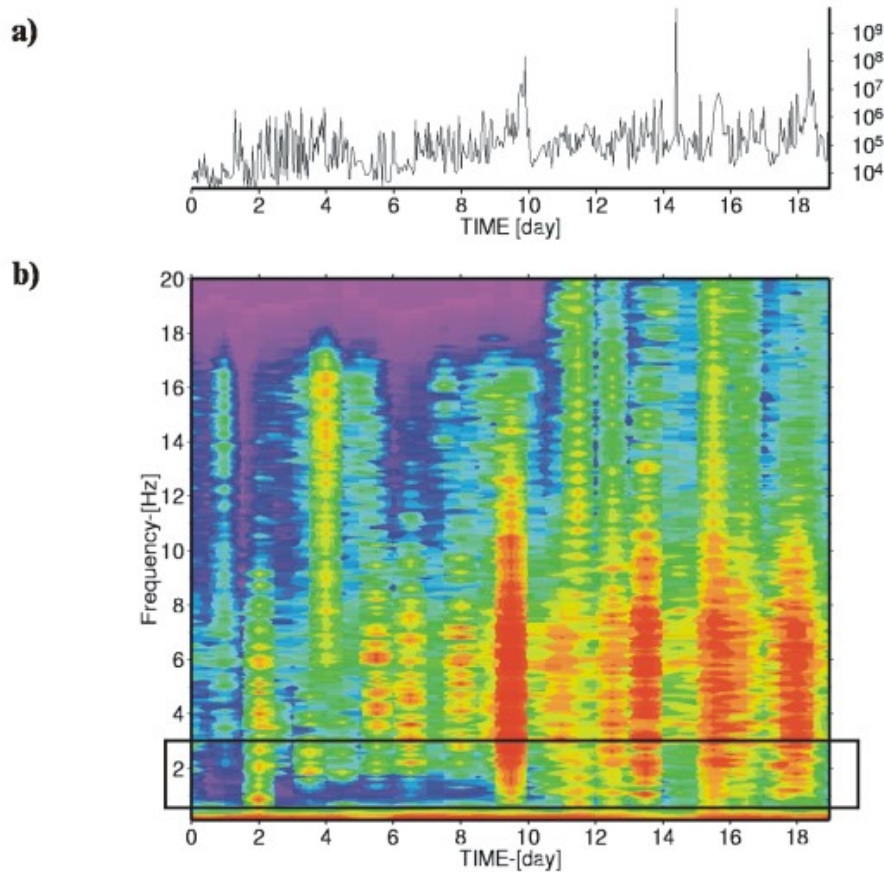


Figura 15: a) Muestra la potencia total (por 60 minutos) calculada en la banda de frecuencias entre 0,6 - 3,0 Hz del 01 - 19 de julio de 1998 en Mt. Merapi, mostrado en una escala logarítmica. Dos de los picos visibles (es decir, día 9 y día 18) están asociados con flujos piroclásticos, mientras que el pico agudo visible en el día 14 es causado por un terremoto regional; b) La densidad espectral de potencia vs. tiempo en el mismo rango de tiempo, donde el recuadro muestra las frecuencias utilizadas para la potencia total trazada en a). En rojo, mayor amplitud sísmica y en azul, menor. Tomado de Bormann, 2002.

## 2.5) Localización de la sismicidad

Para ubicar sismos, generalmente se obtienen datos de sismogramas registrados en estaciones sísmicas distribuidas alrededor de la zona de origen del terremoto, en la superficie de la Tierra o cerca de ella. Un aspecto importante para la determinación de datos es tener una buena ubicación de las estaciones con el objetivo de limitar lo más posible la localización de eventos (Lomax *et al.*, 2009).

Por lo general, para localizar un terremoto, el conjunto de datos serán las coordenadas de su hipocentro y la hora origen del evento, es decir la posición temporal y espacial del lugar donde ocurrió la fractura. Una forma de hacerlo es, identificar las fases sísmicas en el sismograma de un terremoto, medir sus tiempos de arribo a las estaciones así como también tener conocimiento de la velocidad de las ondas sísmicas en la estructura de la tierra entre el hipocentro y la estación sismológica (Havskov y Ottemoller, 2010).

La localización de un sismo, mediante fases de arribo, se resuelve a través de una inversión, donde se conocen los tiempos de llegada de las fases y la velocidad del medio, para obtener la localización

de la fuente y su tiempo origen, que sea consistente con los datos (Geiger, 1912). En este trabajo los eventos fueron localizados con el programa *NonLinLoc* (Lomax *et al.*, 2000) que utiliza la formulación probabilística de la inversión presentada en Tarantola y Valette (1982) y Tarantola (1987).

## 2.6) Modelos de velocidad

Estos modelos muestran zonas de alta y baja velocidad a lo largo de la zona de estudio, permitiendo inferir la ubicación de eventos sísmicos o de posibles fuentes hidrotermales y/o magmáticas.

Se utilizan varios métodos para obtener modelos de velocidad de estructuras. La resolución y profundidad de los modelos resultantes dependen del método utilizado, de la geometría de la red sísmica, de la distribución de las fuentes y del volumen de datos (Lesage *et al.*, 2018).

La tomografía distancia-tiempo es un método que se basa en la inversión de los tiempos de llegada de las ondas corporales de fuentes pasivas o activas (Chouet, 1996b; Díaz-Moreno *et al.*, 2017). Las inversiones tomográficas estiman la velocidad sísmica sólo para aquellas regiones del espacio que están atravesadas por un número suficiente de segmentos de rayos con diferentes orientaciones (Lesage *et al.*, 2018).

El análisis de las ondas de superficie es otro método que se basa en la medición de las velocidades de fase y de grupo de las ondas Rayleigh o Love en función de la frecuencia (Barmin *et al.*, 2001).

El método de correlación cruzada de ruido ambiental recupera las funciones Green de las ondas superficiales entre cualquier par de receptores. Este enfoque ahora se utiliza ampliamente para llevar a cabo la tomografía de ondas superficiales (por ej., Zulfakriza *et al.*, 2014; Mordret *et al.*, 2015; Spica *et al.*, 2016).

La relación espectral horizontal a vertical (HVSR) se utiliza principalmente para estudiar los efectos del sitio. Sin embargo, los recientes desarrollos teóricos (Sánchez-Sesma *et al.*, 2011) han demostrado que los modelos de velocidad 1-D pueden ser recuperados de la inversión de la HVSR.

Para muchos volcanes, no se han realizado estudios estructurales y se utilizan modelos de velocidad 1D para localizar. Estos modelos, que consisten en una capa o unas pocas capas homogéneas, a menudo se han obtenido minimizando los residuos de los tiempos de llegada durante la determinación de los hipocentros. También se utilizan como modelos de referencia para la tomografía local (Kissling *et al.*, 1994).

En este trabajo se utilizó el modelo de velocidad propuesto por Montenegro (2019) para la Caldera del Agrio. La Tabla 1 y Figura 16 muestran los resultados del modelo de velocidad 1-D final obtenido a partir del modelo inicial.

Prof. (km)	ANDES DEL SUR		
	VP	VS	VP/VS
0	4,69	2,75	1,71
2,2	5,26	3,14	1,68
3,4	6,01	3,39	1,77
6	6,51	3,74	1,74

Tabla 1: Ejemplo de tabla de valores de VP y VS del modelo de velocidad obtenido a partir del modelo de velocidad de los Andes del Sur (Bohm et al., 2002). Tomado de Montenegro (2019).

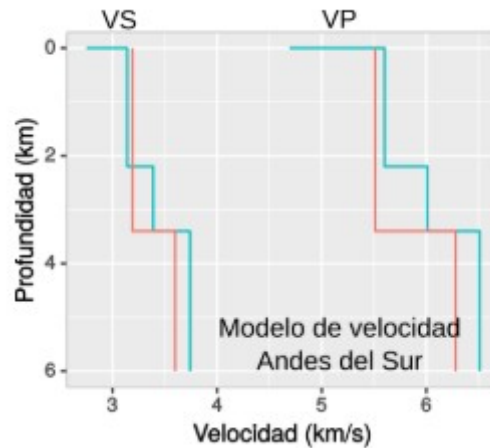


Figura 16: Modelo de velocidad inicial y final obtenido a partir de un modelo de velocidades regional propuesto por Bohm et al. (2002). Tomado de Montenegro (2019).

### 3) Desarrollo

#### 3.1) Equipamiento

En marzo de 2020 el Laboratorio de Estudio y Seguimiento de Volcanes Activos (LESVA) de la Universidad Nacional de Río Negro (UNRN) instaló una red sísmica compuesta por tres estaciones con el objetivo de investigar la dinámica interna del sistema volcánico (Hantusch *et al.*, 2021b). Cada estación cuenta con un sismómetro de Banda Ancha marca *Nanometrics*, modelo *Trillium Compact 20s* (Figura 17a), un digitalizador marca *Nanometrics*, modelo *Centaur* de 24 bits y una frecuencia de muestreo de 100 mps (muestras por segundo) (Figura 17b), un panel solar que recargan baterías y un GPS para coordinarse con los satélites y tener el tiempo con precisión de nanosegundos.

La Figura 18 muestra la ubicación de las estaciones “NAN 3”, en las instalaciones del INPRES (Figura 19a), “NAN 4”, en el campo de Higinio (Figura 19b) y “NAN 5”, en el Cerro Mesa (Figura 19c).



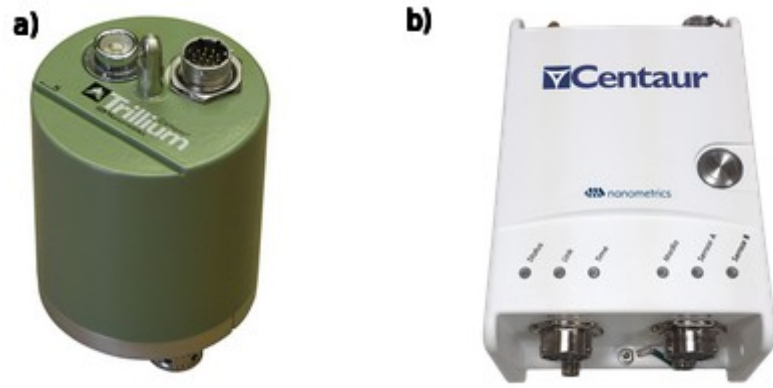


Figura 17: a) Sensor sísmico. b) Digitalizador. [www.nanometrics.ca](http://www.nanometrics.ca)

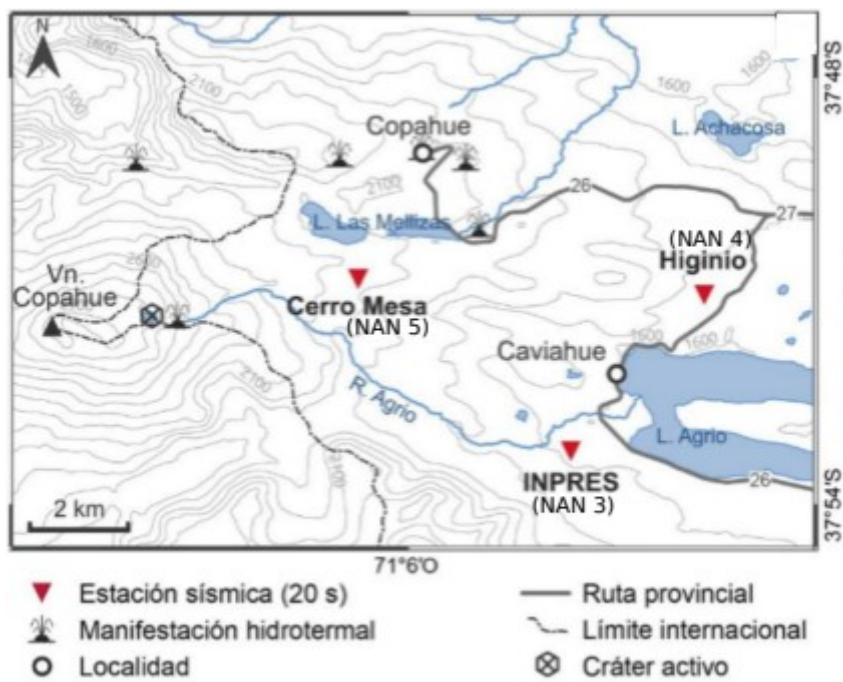


Figura 18: Mapa del área de estudio con la ubicación de las estaciones sísmicas, el cráter del volcán y la localidad de Caviahue, entre otros. Modificada de Hantusch et al., 2021b.

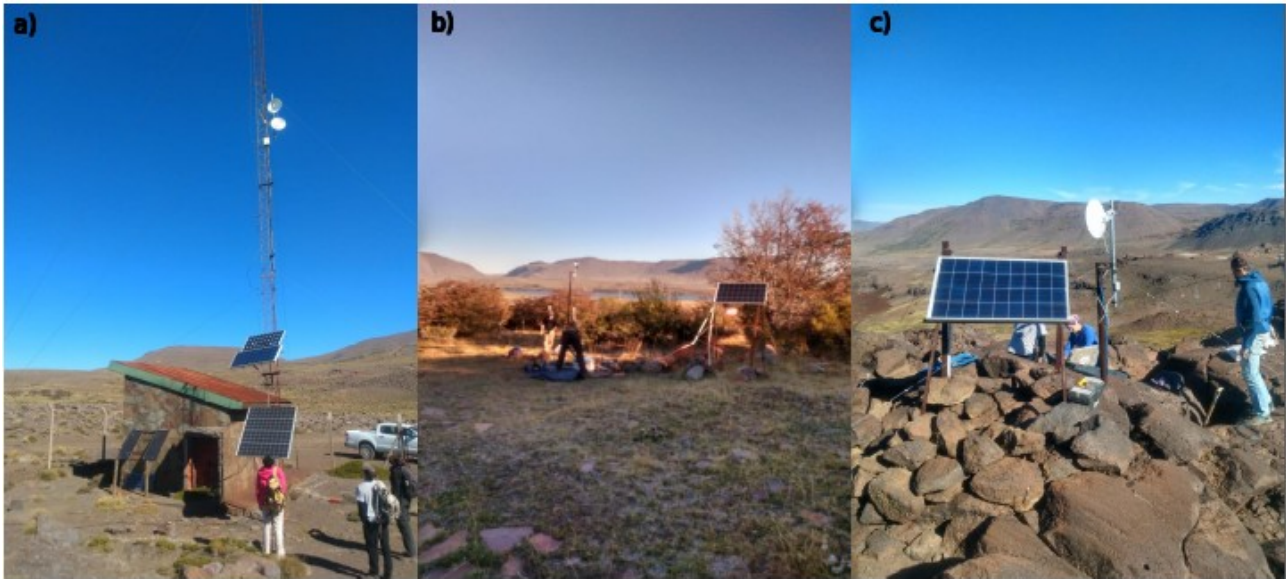


Figura 19: a) Estación sísmica NAN3. b) Estación sísmica NAN4. c) Estación sísmica NAN5.

### 3.2) Metodología aplicada

El análisis consistió en extraer eventos a partir de realizar una exhaustiva inspección visual de los datos, que fueron obtenidos directamente de las estaciones. Previo a la inspección, se procesó el sismograma, lo que consistió en filtrar y remover la respuesta instrumental para corregir la señal.

Para la individualización de los eventos se eligió la estación NAN5 por presentar la mayor relación señal/ruido y posteriormente, se analizaron en detalle las características de cada evento por separado.

La inspección visual se realizó en ventanas de 60 minutos junto con el espectrograma, que corresponde a apilar múltiples funciones solapadas de densidad espectral de potencia (PSDs) a lo largo del tiempo.

Los registros se organizaron en una base de datos homogénea, que permite el acceso inmediato a los mismos y luego se individualizó una base de datos para cada tipo de evento analizado. En esta etapa se analizan los eventos en las tres estaciones en simultáneo. Para ello se utilizó el paquete de software sísmico denominado SEISVO (Melchor y Almendros, en preparación).

De esta forma se pudieron detectar 208 eventos entre VTs y LPs (120 VTs y 88 LPs) (Anexo, Tabla 1 y 2). También se detectaron otras señales con características que llamaron la atención por ser diferentes y no están incluidas dentro de los VTs y LPs, que se catalogaron como “Silencios Sísmicos” (SS) además de otros eventos.

#### 3.2.1) Sismos volcano-tectónicos

Los VTs fueron localizados mediante el programa de Lomax *et al.*, 2000. Esto requirió determinar los arribos de las ondas P y S de la señal.

La magnitud de los VTs fue estimada a partir de la metodología propuesta en Montenegro *et al.* (2021). Se utilizó la siguiente fórmula para el cálculo de la magnitud duración:

$$M_d = 2.46 + 2.82 \log_{10}(d)$$

donde  $d$  es la duración del terremoto (Lee *et al.*, 1972). La magnitud resultante es la media de todas las magnitudes en todas las estaciones, aunque se suele usar la magnitud duración mayor.

Una vez obtenidas las localizaciones de los eventos con sus respectivas magnitudes y profundidades (Anexo, Tabla 3), se plasmaron en un mapa y se agruparon en zonas de VTs las cuales se compararon con las zonas de Montenegro *et al.*, 2021. Graficar las ubicaciones de los VTs en un mapa permite interpretar y asociar estos eventos a posibles estructuras activas durante el periodo analizado e identificar cuáles son las zonas de mayor actividad sísmica.

### 3.2.2) Sismos de largo periodo

Con el objetivo de reconocer señales sísmicas de largo periodo (1-5 Hz) en los sismogramas continuos fue necesario aplicar métodos de análisis espectral. Este análisis nos permite conocer la energía de las diferentes frecuencias que componen la señal.

Los LPs fueron agrupados en familias de acuerdo a su forma de onda, espectro y duración característica. Para calcular la frecuencia dominante, se eligió la componente de mayor amplitud (por lo general, la componente N), para ver en la PSD el pico de frecuencia dominante (Figura 20).

Para lograr la clasificación se generó una base de datos con información sobre el tiempo de arribo de cada señal, su duración, su frecuencia dominante y una etiqueta que identifica el tipo de evento (Anexo, Tabla 2).

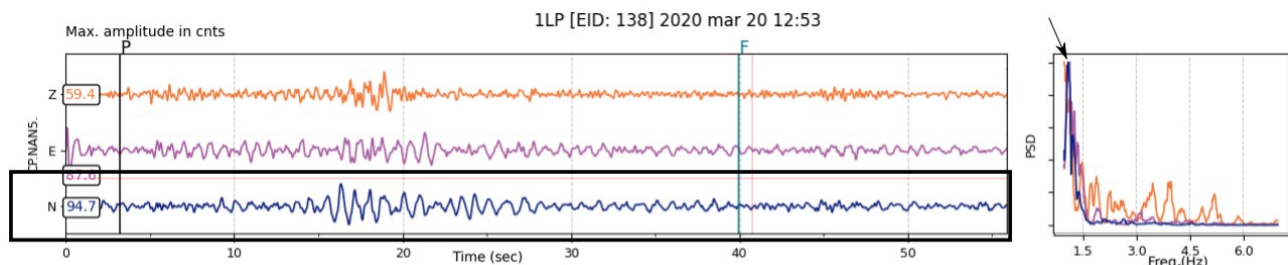


Figura 20: Señal de LP en la estación NAN5. Se recuadra la componente norte por ser la de mayor amplitud y se observa el pico de frecuencia de esa componente en el espectrograma que está a la derecha (como lo marca la flecha). Las líneas P y F marcan el principio y final del evento.

### 3.2.3) Otros eventos

Se pudieron registrar eventos regionales (RG) que son sismos que se encuentran localizados fuera de la zona de estudio pero que pueden ser detectados por el sismómetro. Estos eventos tienen amplitudes que resaltan en el sismograma (Figura 21). En ellos se puede observar claramente la llegada de la onda P y S pero con una diferencia mayor a 4 segundos, característica que los diferencia de los VTs (que se consideran eventos locales).

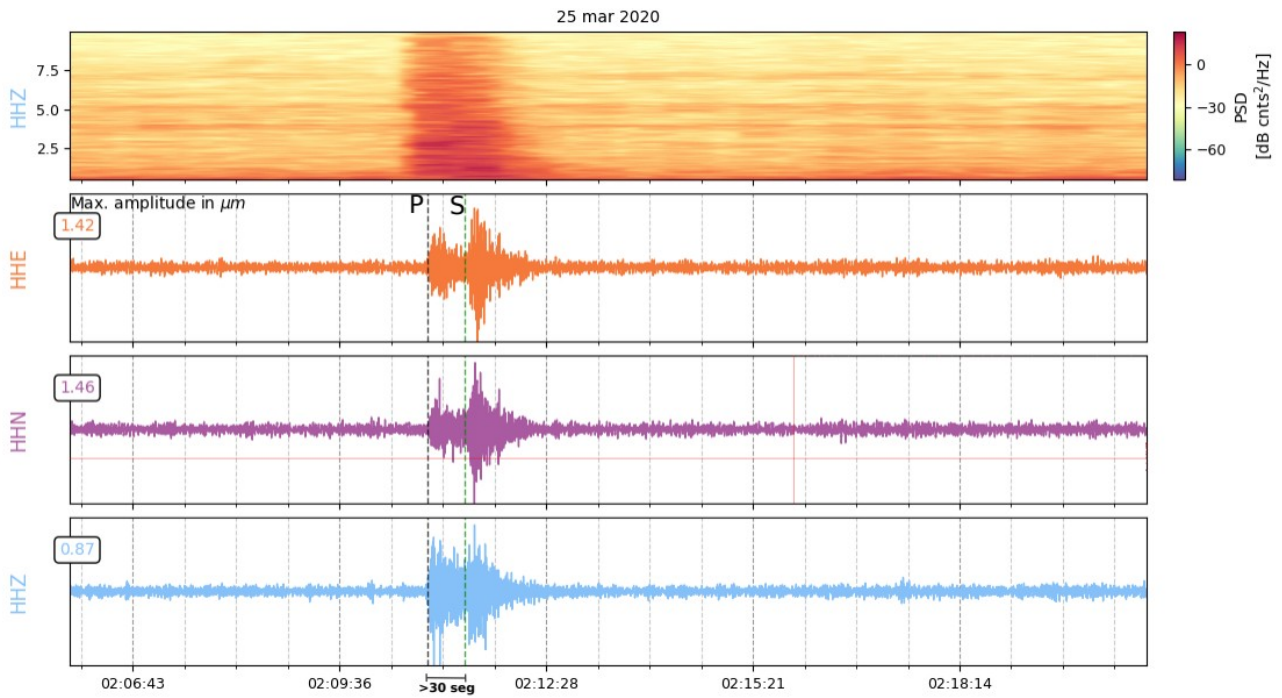


Figura 21: Ejemplo de evento RG donde se observa que la diferencia entre la llegada de la onda S y P es mayor a 30 segundos.

Otros eventos detectados, presentaron características que parecían ser Tremores. Sin embargo, luego de averiguar se descubrió que se trataba de eventos antrópicos, ya que se dan en horarios concretos en los que se encontraban trabajando en la telesilla del centro de esquí de Caviahue, la cual se encuentra muy cerca de la estación NAN5 (Figura 22).

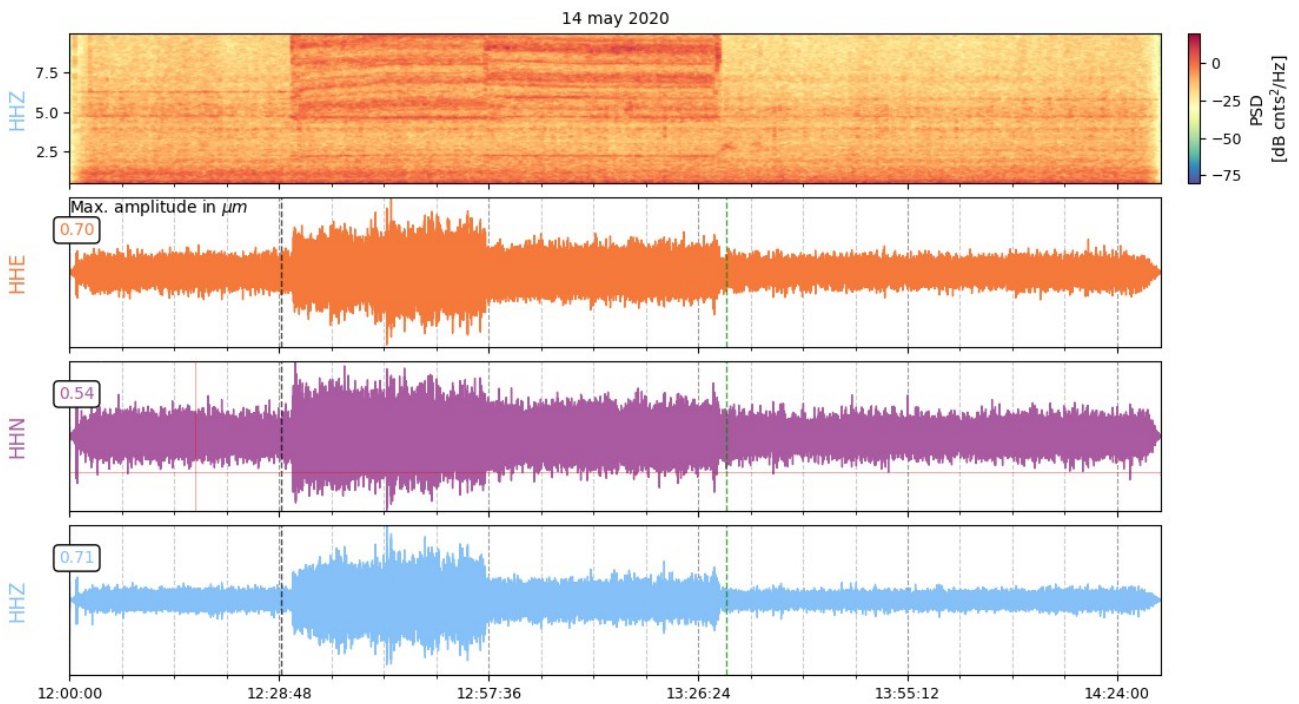


Figura 22: Ejemplo de evento no volcánico asociado a actividad antrópica.

Por último, en los registros del mes de agosto se observó un decaimiento de la señal continua del orden de los segundos. Estas “señales” no fueron episodios aislados sino que se observaron de forma recurrente y coinciden con lo descrito en el trabajo de Morales *et al.* (2015) y Melchor *et al.* (2022). Estos eventos de naturaleza desconocida, han sido muy poco descritos en la bibliografía hasta el momento es por eso que se consideró importante mostrar su identificación y características ya que las mismas son similares a las enunciadas por los autores, aunque el tiempo de duración de estos eventos son de segundos, a diferencia de lo que describen Morales *et al.* (2015) y Melchor *et al.* (2022), que son del orden de horas y días respectivamente (Figura 23). A estos eventos se los denomina Silencios Sísmicos, de acuerdo a lo establecido por Morales *et al.* (2015).

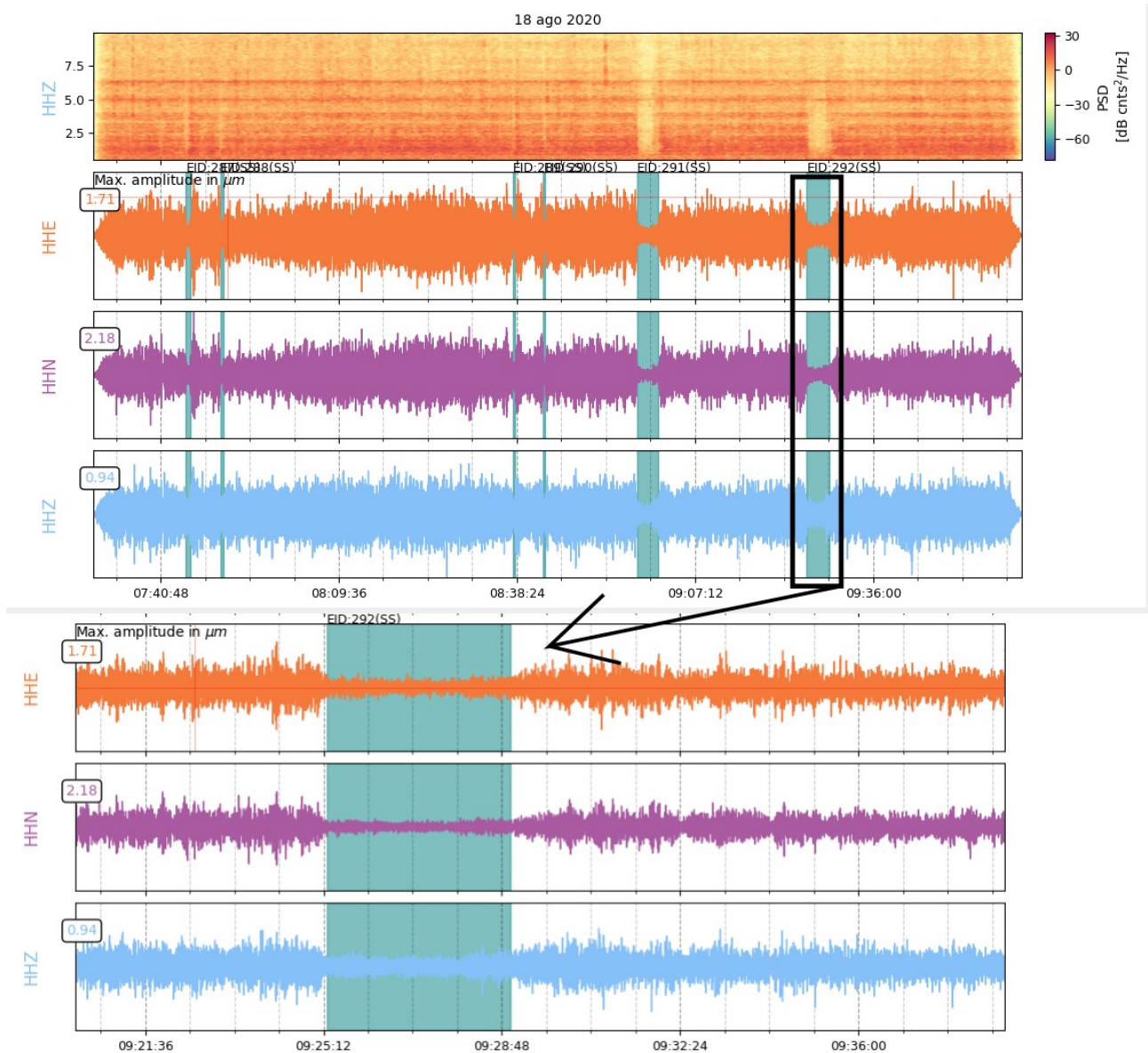


Figura 23: Silencios Sísmicos dentro de un Tremor. Se muestran los valores de amplitud de las tres componentes vs el tiempo del registro.

### 3.2.4) Análisis de la actividad superficial del volcán

Una vez realizada la individualización de los eventos a estudiar se recopiló información desde el mes de marzo correspondiente a los reportes de actividad del OVDAS y del *Global Volcanism Program* (GVP). La comparación entre la base de datos y la actividad permitió discutir la relación entre las señales sísmicas y la actividad observada. Para ello, se analizaron 17 imágenes desde marzo a agosto de 2020 del satélite Sentinel S2-1C para observar posibles cambios morfológicos del lago cratérico y la ocurrencia de cenizas. Sin embargo, no se pudieron hacer observaciones asociadas a la actividad eruptiva ya que las imágenes estaban totalmente cubiertas de nubes.

Por otro lado, se analizaron los productos satelitales del sensor TROPOMI que se encuentra a bordo del satélite Sentinel-5P. Se revisaron todas las imágenes disponibles para rastrear la anomalía de SO<sub>2</sub> en Copahue. Las mismas fueron proporcionadas por el *Global Sulfur Dioxide Monitoring* (<https://so2.gsfc.nasa.gov>), que publica imágenes diariamente de la densidad de la columna vertical en altitudes troposféricas medias (5–7,5 km). Se consideró una anomalía cuando los píxeles que rodean al volcán eran mayores a 1 Unidad *Dobson* (DU).

## 4) Resultados

### 4.1) Localización y análisis de sismos volcano-tectónicos

Se registraron 120 eventos volcano-tectónicos (VT), con los cuales se hizo una base de datos que se muestra en la Tabla 1 del Anexo. Los mismos presentan una diferencia entre las llegadas de las ondas sísmicas S-P menor a 4 segundos. De estos eventos, 84 presentaron ondas P y S claras en todas las componentes (Figura 24) y fueron localizados. Aquellas señales que no se observa la llegada de la onda P en las 3 estaciones y la llegada de la onda S en mínimo 2 estaciones, eran descartadas. La tabla con las localizaciones se encuentra en el Anexo (Tabla 3).

VT [ID: 189] 2020 mar 19 02:33

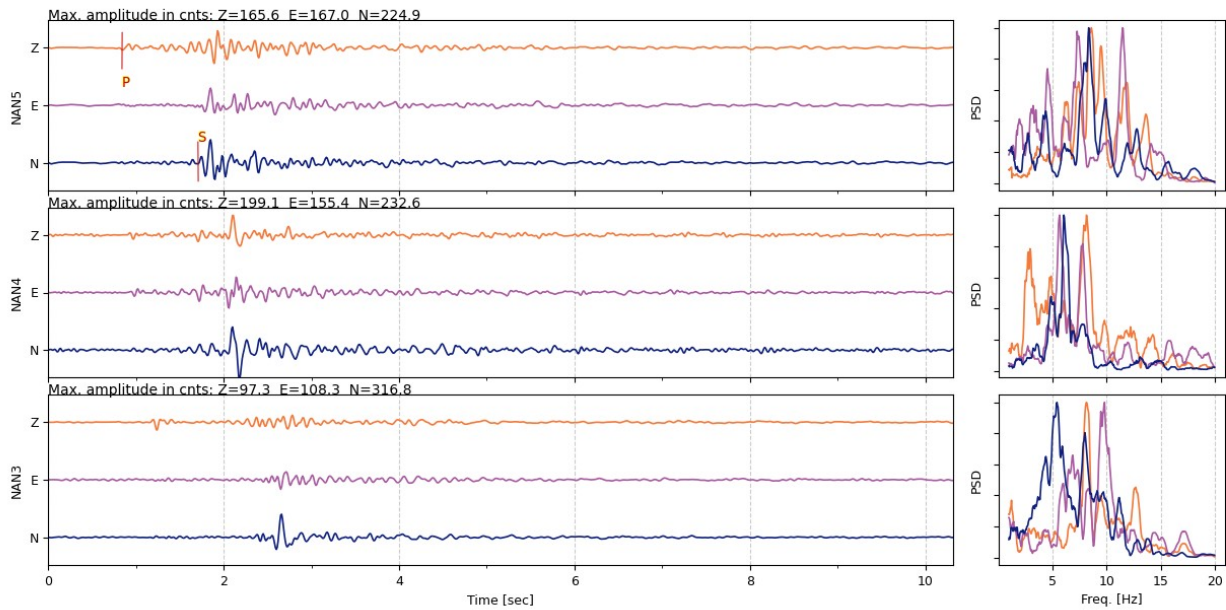


Figura 24: Ejemplo de VT con la llegada de las ondas P y S claras en sus tres componentes.

En la Figura 25 y 26 se muestra la distribución de los epicentros con sus magnitudes y profundidades. Se puede ver como los VT se agrupan en diferentes zonas.

Más de la mitad de los VTs se encontraron en el mes de abril, siendo los días 1 y 15 los más activos con 11 y 9 eventos respectivamente. Los eventos del 1 de abril ocurrieron en el borde norte de la caldera, que se corresponde con la zona C en Montenegro *et al.* (2021), con magnitud máxima de 3.6  $M_D$ . Por otro lado, la actividad del 15 abril se ubica alrededor de la estación NAN5, zona D en Figura 25. Esta zona presenta un total de 19 eventos con magnitudes menores a 2.9  $M_D$  y profundidades entre 2.5 y 3.5 km (Figura 26).

La actividad sísmica observada en la zona B (Figura 25), de acuerdo a Montenegro *et al.* (2021), fue la menos activa con un total de 13 VTs. Sin embargo, el evento más energético (3.5  $M_D$ ) fue registrado a 4 km de profundidad en esta zona, el 12 de julio, 4 días antes de la principal fase eruptiva de 2020. Los VTs más profundos (~5 km) tienen sus epicentros en la zona A, que se encuentra ubicada al noroeste del lago Caviahue (Figura 25 y 26). Si bien su actividad es más abundante en el mes de marzo, con 7 de sus 16 eventos, es en esta zona dónde se observó actividad un día antes de la erupción de junio de 2020. El evento en cuestión ocurrió a una profundidad de 4.6 km y tuvo una  $M_D$  de 2.9.

Por último, el evento más próximo al cráter activo ocurrió el 6 de agosto, horas después de la última fase eruptiva de 2020. Se encontró a una profundidad de 3.4 km con una  $M_D$  de 2.0. Este evento no corresponde a ninguna zona ya que se encuentra aislado del resto. En la Figura 27 se lo marca en color negro y se lo presenta junto a todos los eventos localizados con sus magnitudes duración.

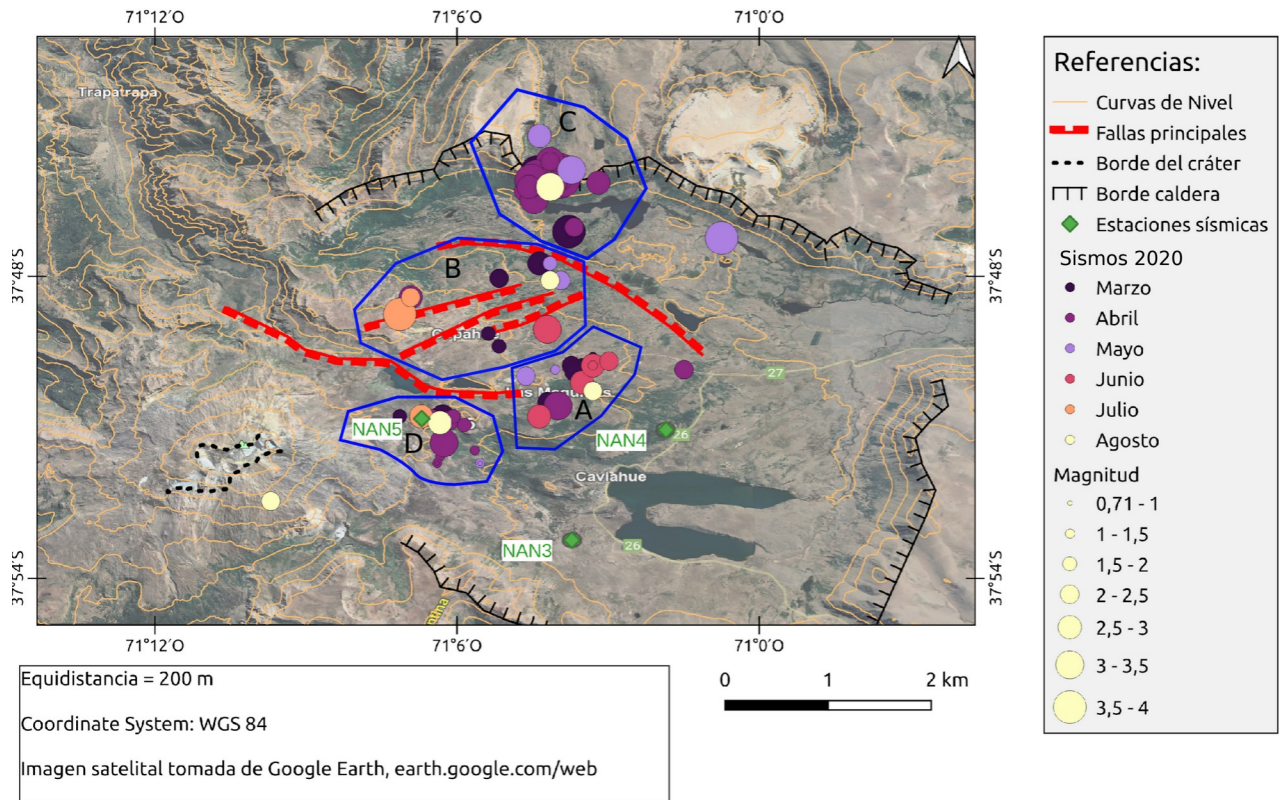


Figura 25: Mapa de la Caldera del Agrio con las principales estructuras basadas en Montenegro et al. (2021) y los sismos VT con sus respectivas magnitudes y fecha.

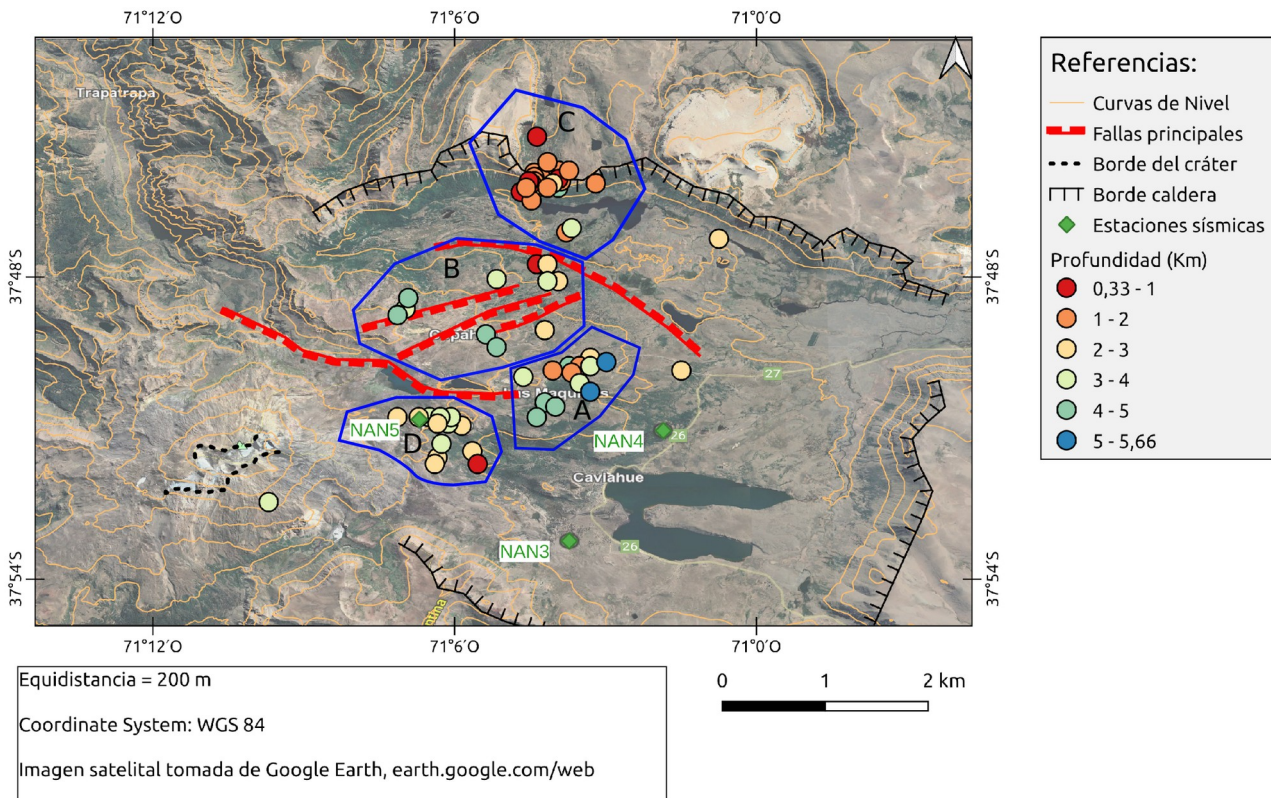


Figura 26: Mapa de la Caldera del Agrio con los VTs representados por su profundidad entre marzo y agosto del 2020.



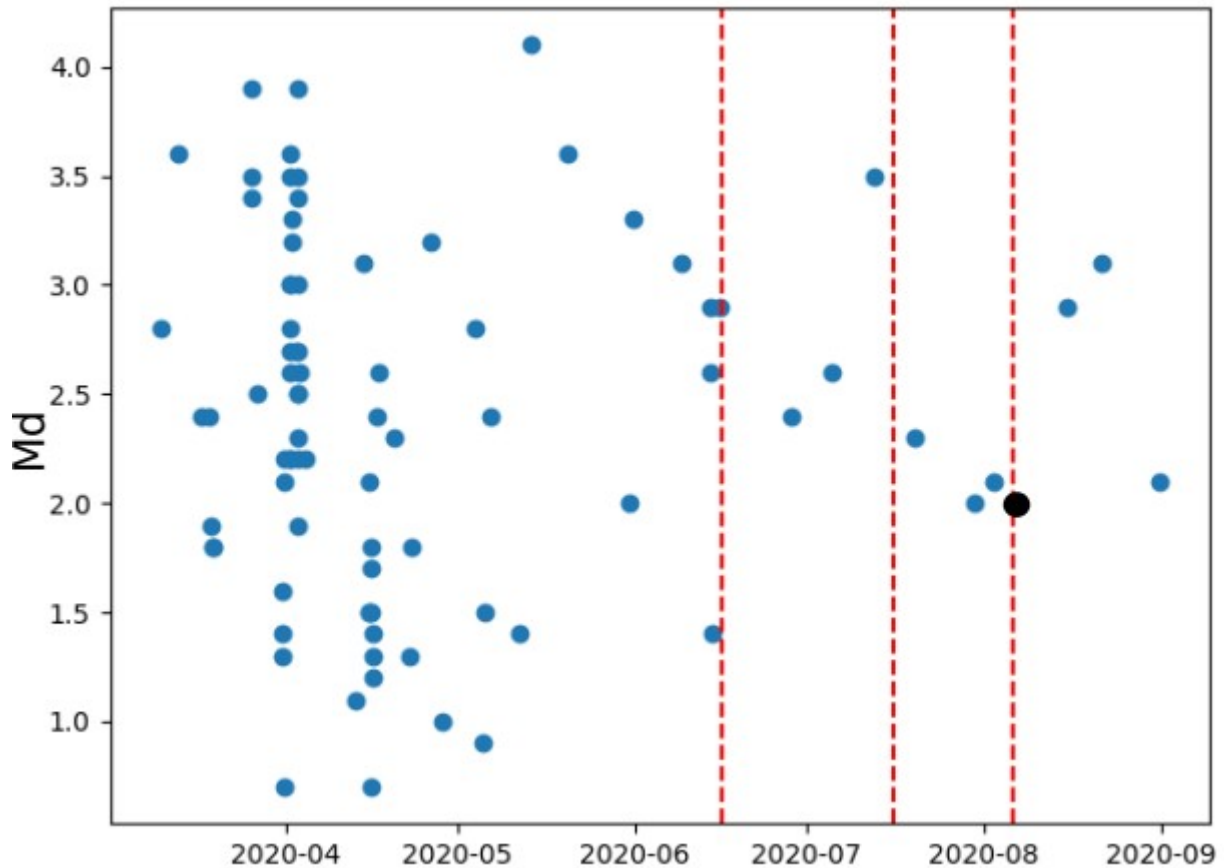


Figura 27: Con puntos azules se muestran los VTs con sus magnitudes duración en la vertical. En negro el evento más cercano al volcán. Las líneas rojas indican las tres fases eruptivas.

#### 4.2) Caracterización y clasificación de sismos de largo periodo

En cuanto a los eventos de largo periodo, se registraron una cantidad de 88 señales LP. Se pudo observar que algunas señales tenían los mismos picos de frecuencia dominante en la misma componente y su forma de onda era similar por lo tanto a esas señales parecidas se las agrupó en una familia (Figura 28). Como resultado se pudo agrupar manualmente 54 eventos en 7 familias de LPs de características similares. En la Tabla 2 se presenta un cuadro resumen de las familias identificadas. En la Figura 7 del Anexo se adjuntan algunos ejemplos de LPs que no fueron incluidos en estas familias por no compartir las características distintivas.

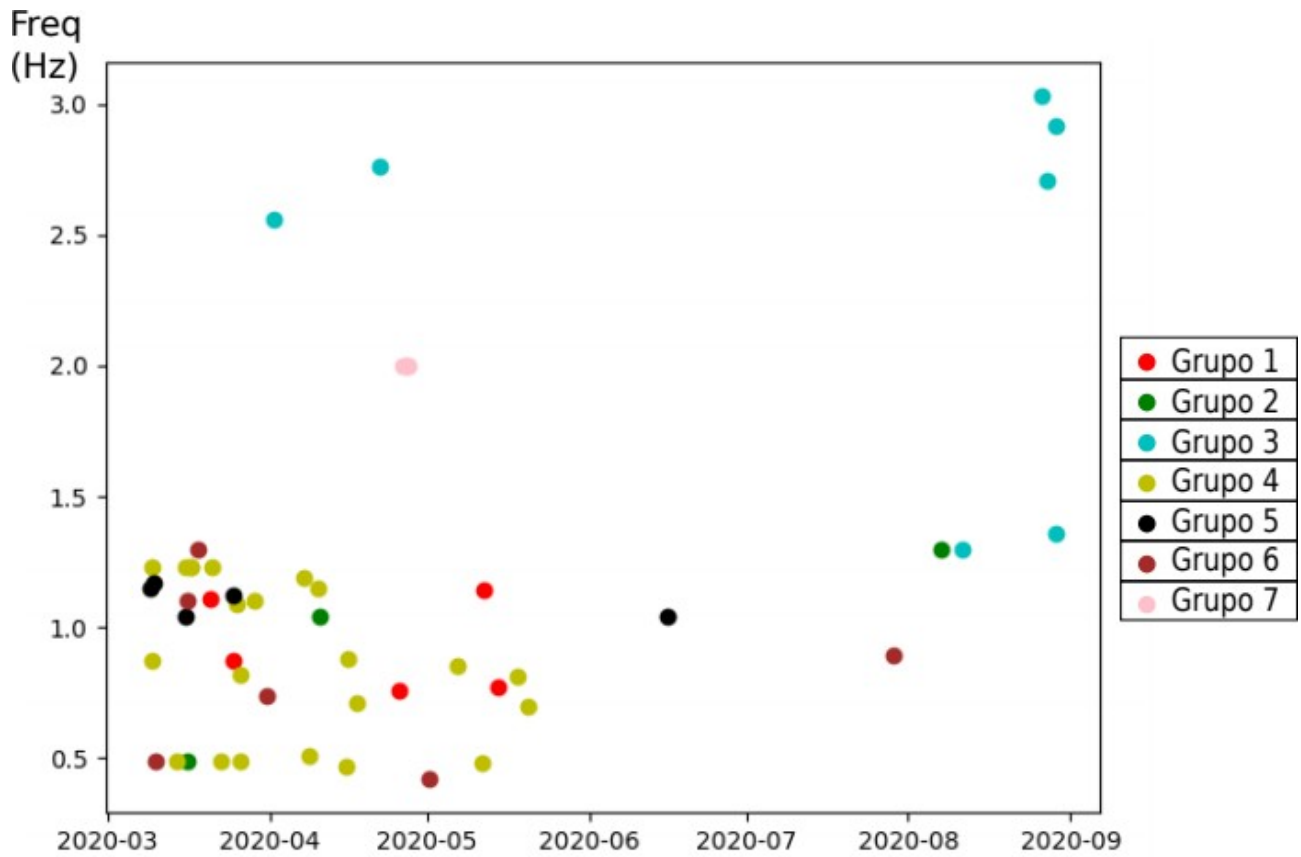


Figura 28: Clasificación de LPs. En el eje vertical se observa la frecuencia dominante y en el eje horizontal la distribución temporal de los eventos.

LP	Familia 1	Familia 2	Familia 3	Familia 4	Familia 5	Familia 6	Familia 7
Cantidad de eventos	5	3	7	22	5	6	6
Rango temporal	marzo a mayo	marzo-abril y agosto	abril y agosto	marzo a mayo	marzo	marzo	abril
Componente de mayor amplitud	N	N	N y E	N	N	N	E
Freq dominante (Hz)	1	1-1,4	1,3 a 3	1-2	1	<1	2
Duración Aprox (seg)	50	30	12	30	60	30	15

Tabla 2: Cuadro resumen de familias de LP con sus características.

La familia 1 se compone de 5 eventos, que suceden entre marzo y mayo del 2020. Se trata de una señal con mayor amplitud en la componente norte (N), y un pico de frecuencia en 1 Hz aprox (Figura 29).

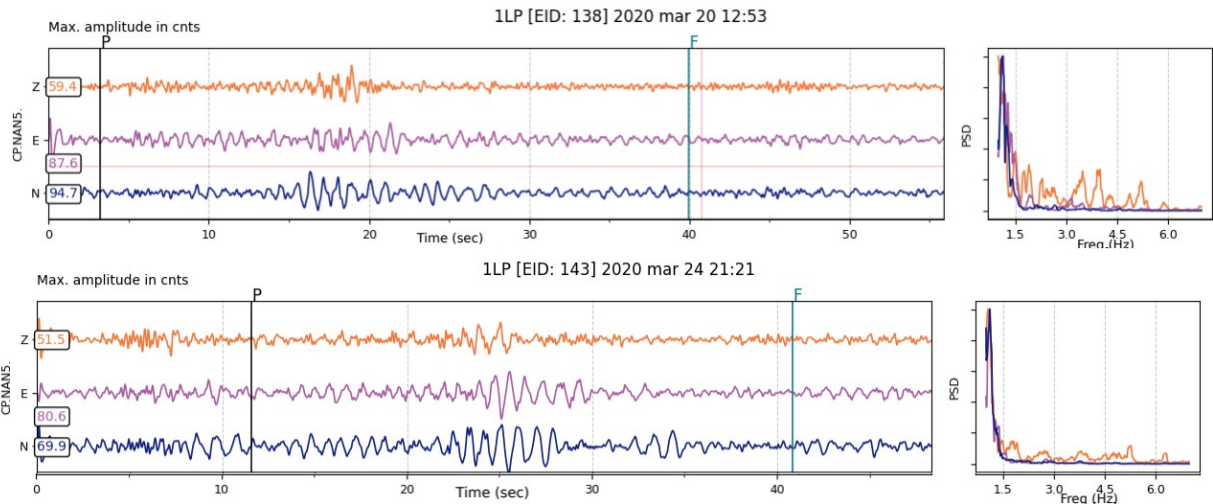


Figura 29: Ejemplo de la familia 1 representada por las señales ID: 138 y 143. En la Figura 1 del Anexo se encuentran el resto de las señales.

La familia 2 contiene 3 eventos de señales que tienen un pico de frecuencia entre 1 y 1,4 Hz aprox, en la componente N que es la de mayor amplitud (Figura 30).

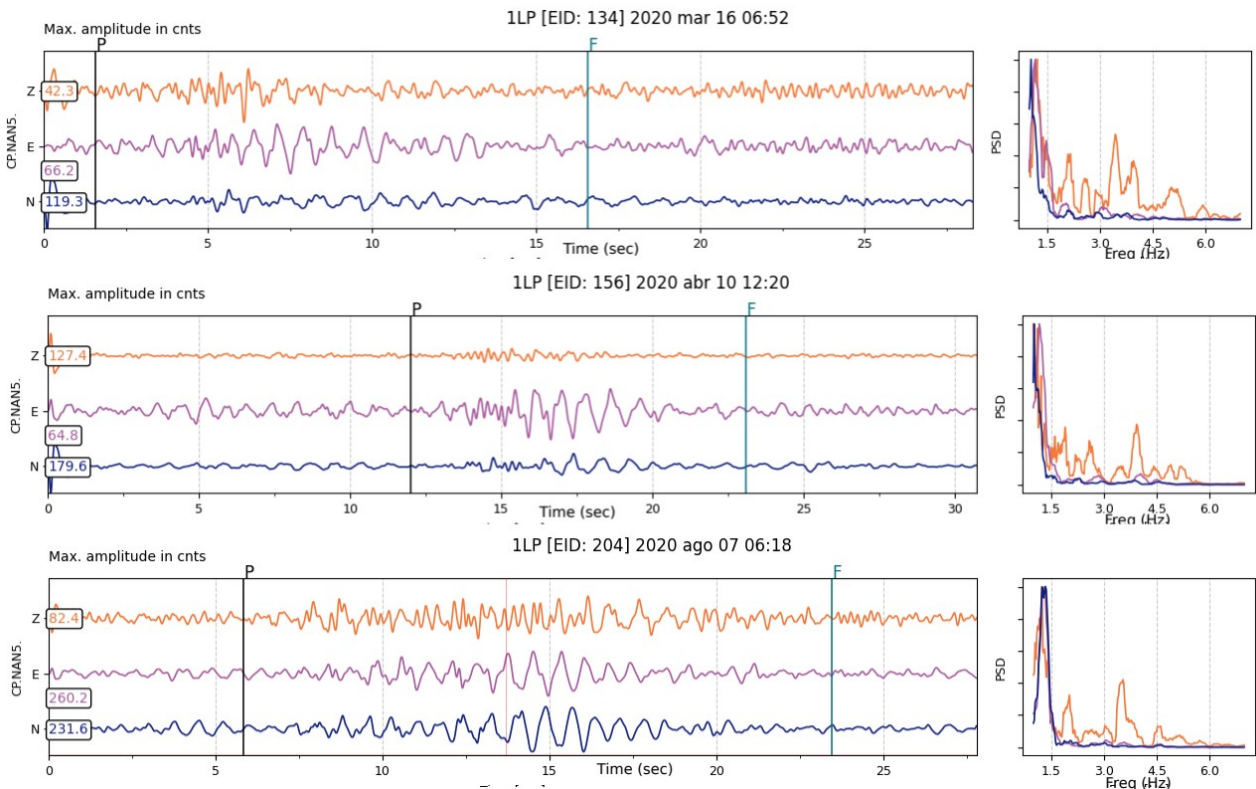


Figura 30: Familia 2 representada por las señales ID: 134, 156 y 204.

La familia 3 cuenta con 7 eventos. Los mismos se caracterizan por tener varios picos de frecuencia en sus tres componentes (Figura 31), la mayoría de ellos ocurren en el mes de agosto y son muy similares a dos eventos que ocurren en el mes de abril.

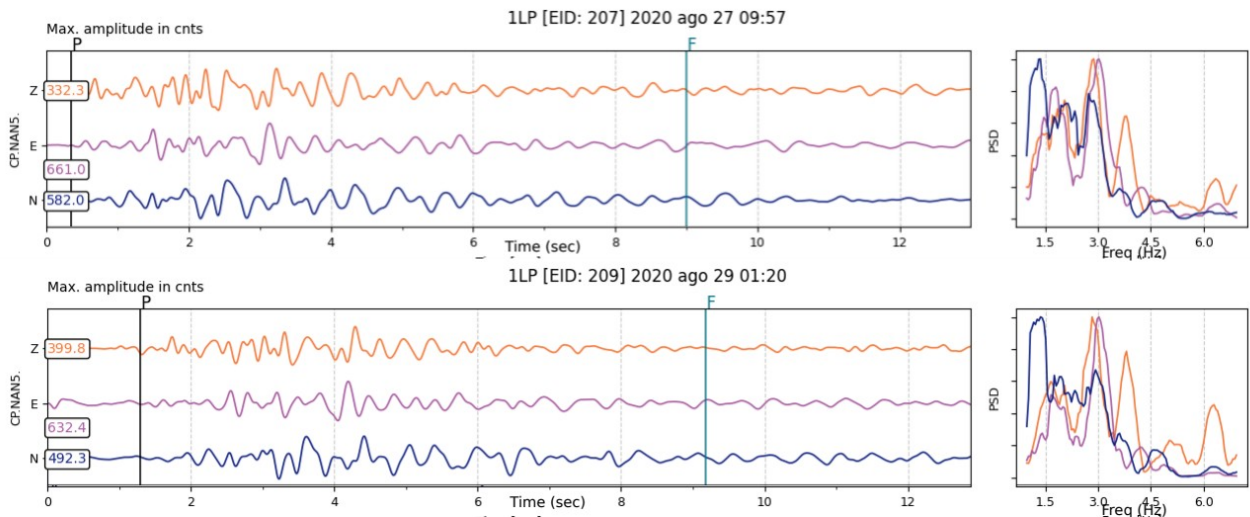


Figura 31: Familia 3 representada por las señales ID: 207 y 209. En la Figura 2 del Anexo se encuentran el resto de las señales que componen al grupo.

La familia 4 es el más numeroso con 22 eventos, la mayoría en el mes de marzo y se extiende hasta mayo. Sus picos de frecuencia se dan entre 1 y 2 Hz en su componente de mayor amplitud, que en este caso es la componente N (Figura 32).

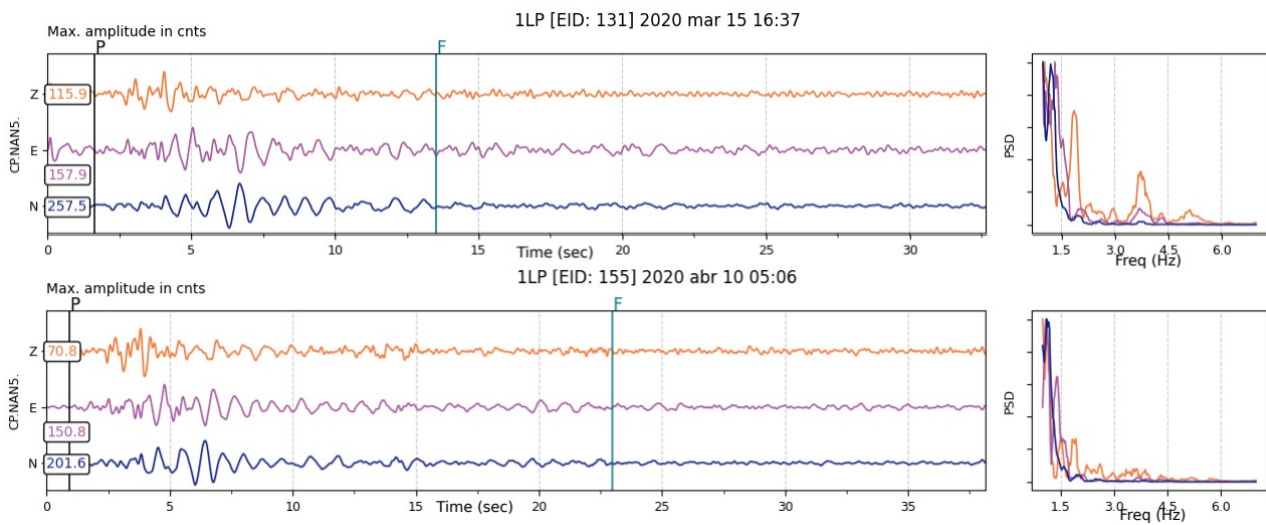


Figura 32: Familia 4 con sus señales ID: 131 y 155. En la Figura 3 del Anexo se observan el resto de las señales.

La familia 5 se compone de 5 eventos y cuatro de ellos suceden en el mes de marzo. Se caracteriza por ser una señal con un pico de frecuencia de 1 Hz en sus tres componentes (Figura 33).

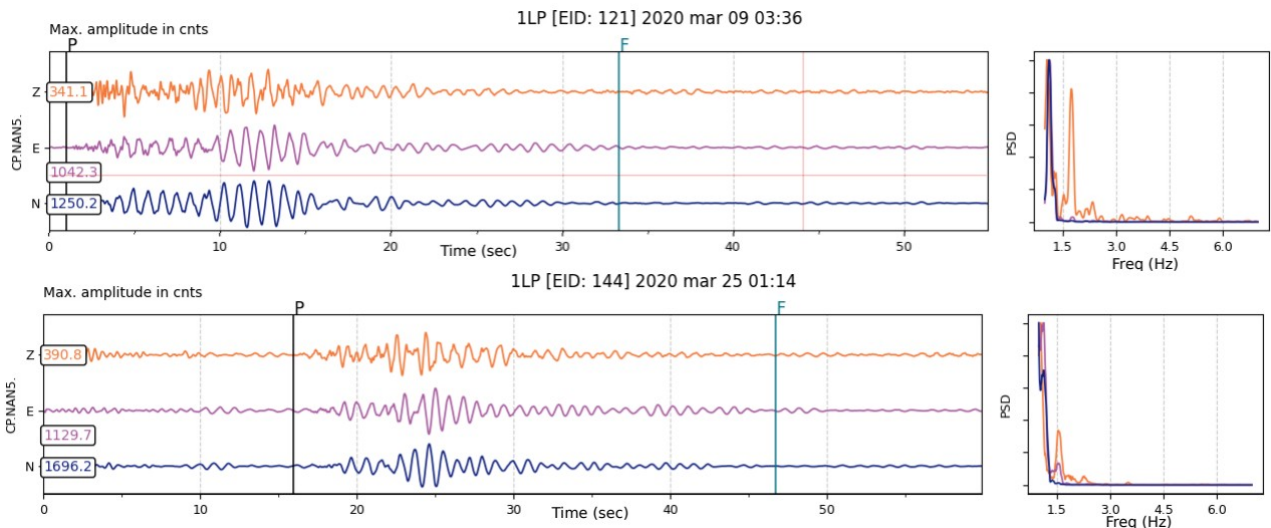


Figura 33: Familia 5 de LPs, caracterizada por las señales ID: 121 y 144. En la Figura 4 del Anexo se encuentran el resto de las señales.

La familia 6 cuenta con 6 eventos, de los cuales 4 suceden en marzo. Los mismos se caracterizan por ser señales que tienen baja frecuencia (Figura 34).

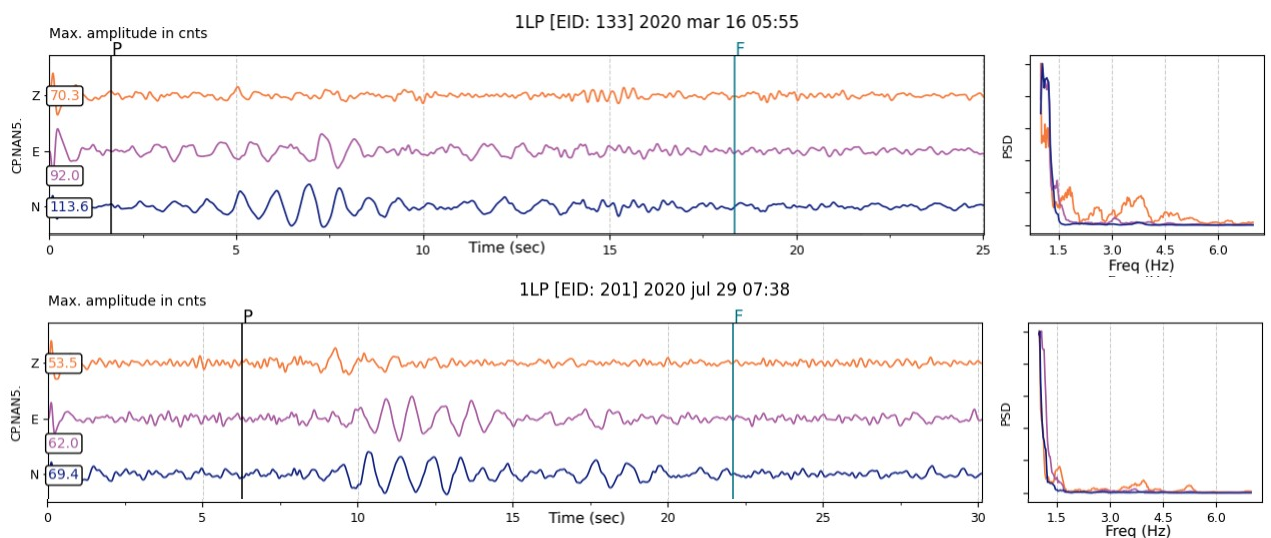


Figura 34: Familia 6 con sus señales ID: 133 y 201. En la Figura 5 del Anexo se encuentra el resto del grupo.

Por último, la familia 7 se compone de 6 eventos con señales de varios picos de frecuencia en sus tres componentes pero en su componente de mayor amplitud (en este caso la componente Este) tiene un pico de frecuencia de 2 Hz. Se trata de una seguidilla de eventos (podría tratarse de un enjambre) que se dan en el mes de abril (Figura 35).

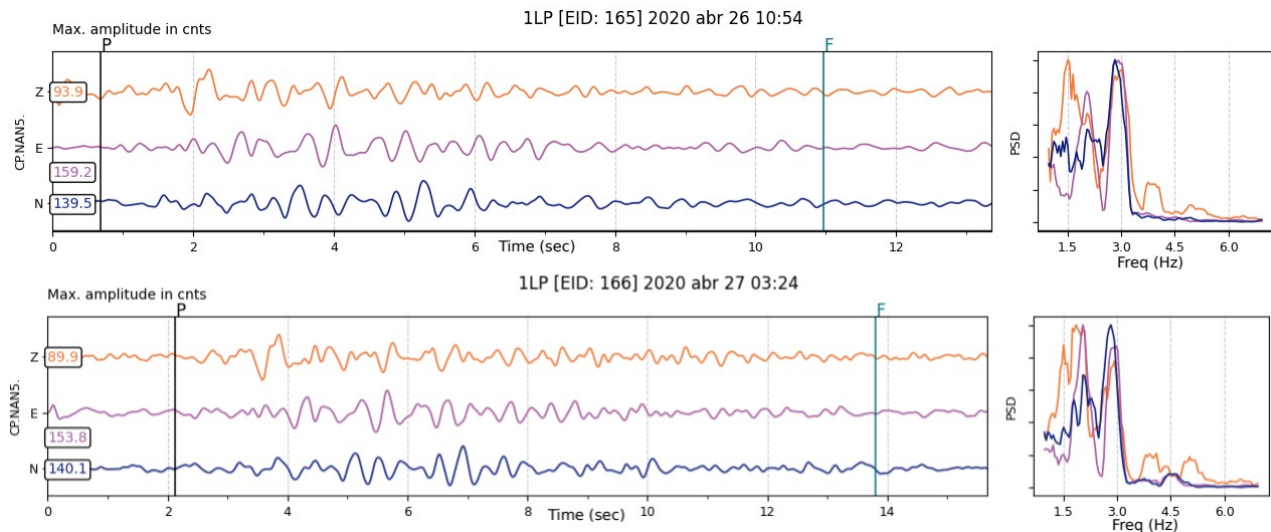


Figura 35: Familia 7 con las señales ID: 165 y 166 como ejemplo. En la Figura 6 del Anexo se pueden observar más ejemplos del grupo.

## 5) Discusiones

### 5.1) Relación de la actividad de VTs y LPs con la actividad del volcán

Tanto los resultados registrados de VTs como los de LPs fueron comparados con las 3 fases eruptivas ocurridas en el periodo de estudio y con el comportamiento del volcán en superficie. La actividad superficial analizada corresponde a la información presentada en el reporte del GVP (2020) en el que se menciona entre otras cosas que durante el mes de abril hubo un ligero hundimiento en el cráter, con una tasa máxima de 0.3 cm/mes. Además, durante el mes de agosto se detectaron aproximadamente 133 eventos explosivos, aparte de las emisiones de gas y vapor y SO<sub>2</sub>.

La ocurrencia de VTs, en general, no muestran relación con la actividad superficial del volcán ya que tienen un comportamiento homogéneo en el tiempo sin perturbarse con las fases eruptivas, solo se puede observar una disminución de eventos a partir del mes de junio (Figura 36 y 37). La zona A es la única que presenta correlación de algunos eventos con el episodio eruptivo del mes de junio de 2020. Sin embargo, la actividad estaría más relacionada a la compleja estructura tectónica del CCVC que a la dinámica magmática. Por ejemplo, en la zona D, si bien es la más cercana al cráter activo, no se observó correlación temporal entre los eventos y la actividad eruptiva. Por otro lado, la actividad sísmica observada en la zona B, estaría asociada a varias fallas normales sometidas a esfuerzos que podrían originarse por variaciones del campo de esfuerzos generados por la dinámica del sistema geotermal (Montenegro *et al.*, 2021). Por último, la zona C es la que mayor cantidad de eventos tiene en el mes de abril, lo cual podría relacionarse al proceso de hundimiento que ocurría en el cráter, el cual genera movimiento de fluidos. Este comportamiento estaría de acuerdo con el estudio de Takahashi *et al.* (2012), que mediante diferentes observaciones de caída del nivel del acuífero en 3 pozos independientes pudieron determinar cambios volumétricos con gran precisión, en el que reconocieron una sincronización en espacio y tiempo entre la activación de los eventos de baja frecuencia profundos, la ocurrencia de sismos volcano-tectónicos someros y el posible proceso de deflación de la fuente, debajo del cráter del volcán Meakan-dake, Japón.

Sin embargo, no se descarta que la falta de relación con la actividad volcánica, pueda ser una consecuencia de la limitada capacidad de los datos (ya que podrían haber más estaciones sísmicas y más cerca del volcán) y la reducida explosividad de las fases eruptivas de 2020. Aun así, resulta importante el monitoreo de este tipo de sismicidad ya que muestra el estado de actividad tectónica de la caldera y su posible relación con los mecanismos eruptivos.

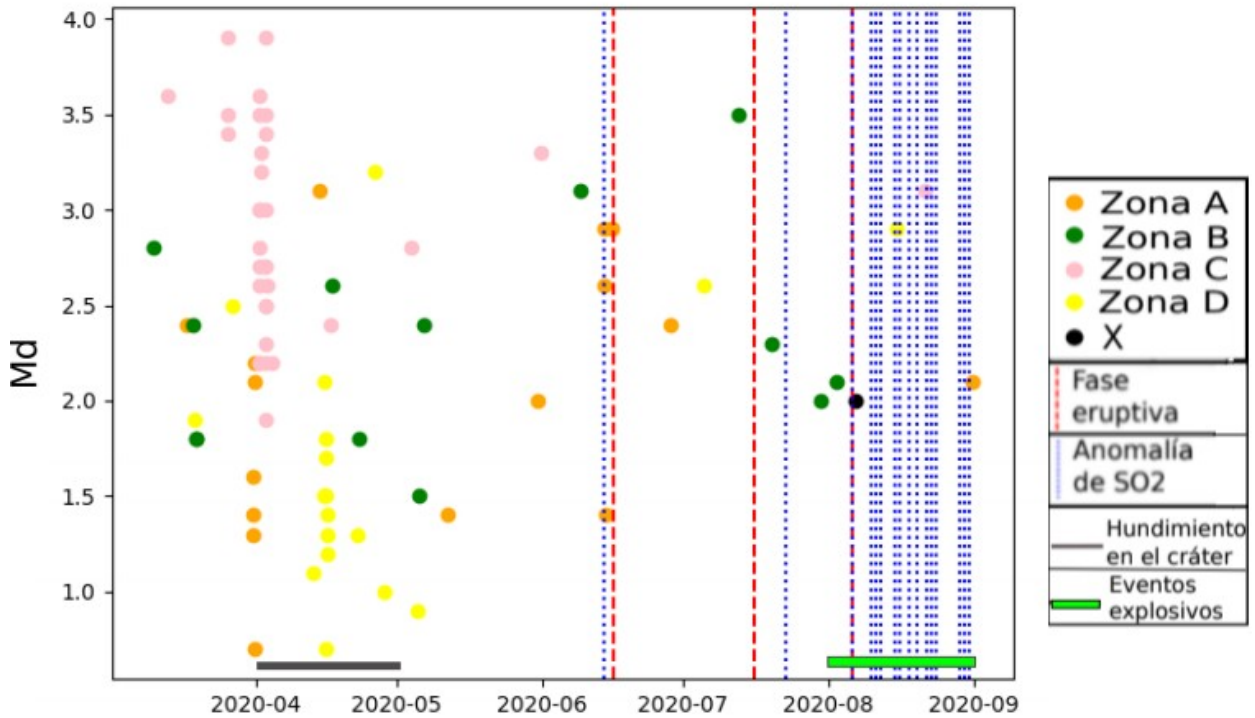


Figura 36: Zonas de VTs con sus magnitudes duración en la vertical.

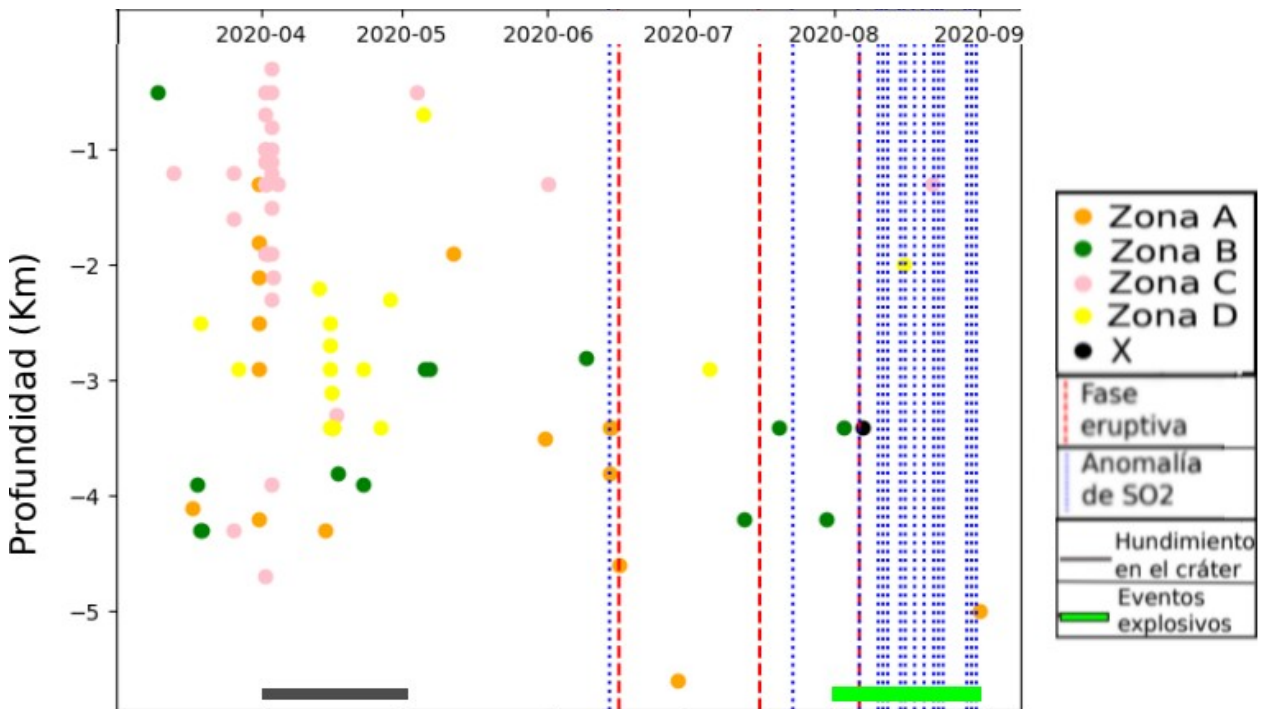


Figura 37: Zonas de VTs con sus profundidades en la vertical. Las líneas verticales rojas representan las tres fases eruptivas, mientras que las azules representan las emisiones de  $SO_2$ . La línea horizontal gris representa el hundimiento del cráter mientras que la verde los eventos explosivos.

En la Figura 38 se marca en amarillo la ubicación del campo geotérmico, en el cual se localizan 4 eventos VT con profundidades entre 2,8 y 4,3 Km. Este comportamiento muestra una buena correlación con el modelo de capas del yacimiento geotérmico Copahue que proponen Barcelona *et al.* (2019a), donde se menciona que la primera capa de arcilla (hasta 800m de profundidad) y la segunda capa de vapor (800-1100m de profundidad) tienen poca actividad sísmica para luego aumentar junto con el aumento de presión intersticial del fluido que se observa en la siguiente capa dominada por líquido.

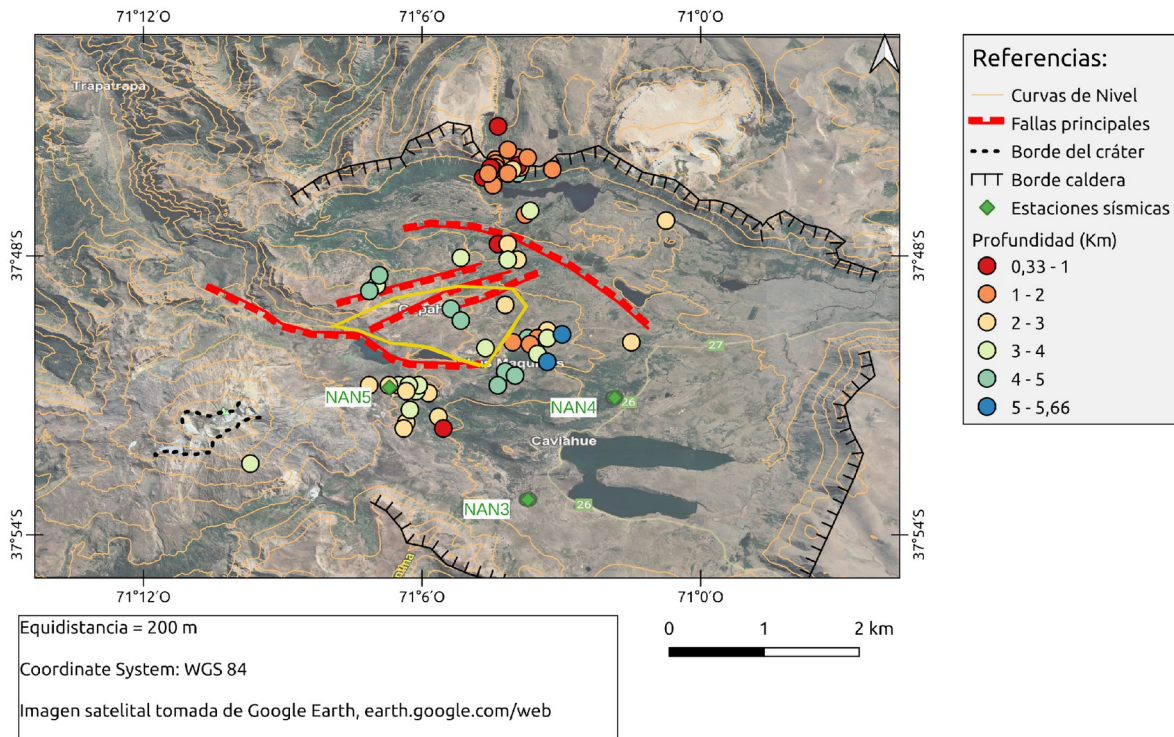


Figura 38: Distribución de la profundidad de VTs en la zona del campo geotérmico marcado en amarillo. Basado en Barcelona *et al.* (2019a).

Los LP ocurren mayormente entre los meses de marzo hasta los primeros días de junio, luego la actividad disminuye hasta los últimos días de julio para retomar en el mes de agosto con un aumento en la frecuencia dominante, lo que se puede observar en la Figura 39. La mayoría de los eventos de todas las familias ocurren antes de las fases eruptivas y con frecuencias dominantes bajas (de 0,5 a 1,5 Hz), se puede observar solo un evento de la familia 5 que se correlaciona temporalmente con el episodio eruptivo de junio de 2020. La familia 3 es la única que muestra un aumento marcado en la frecuencia dominante, llegando hasta los 3 Hz, con ocurrencias en el mes de agosto contemporáneas a las emisiones de SO<sub>2</sub> y a los eventos explosivos.

Se considera que los LP estarían relacionados al sistema hidrotermal, por no tener relación temporal con las fases eruptivas y por ocurrir la mayoría en los meses previos a estas, en conjunto con el hundimiento reportado en el mes de abril, el cual podría desequilibrar el sistema hidrotermal del cráter. La familia 3 se puede considerar de origen diferente, por el contraste de frecuencias que posee. Este comportamiento se puede relacionar a fracturas en material poco consolidado. Los LP podrían ser eventos superficiales, de ruptura lenta (Bean *et al.*, 2014), que podrían proceder del campo geotermal.



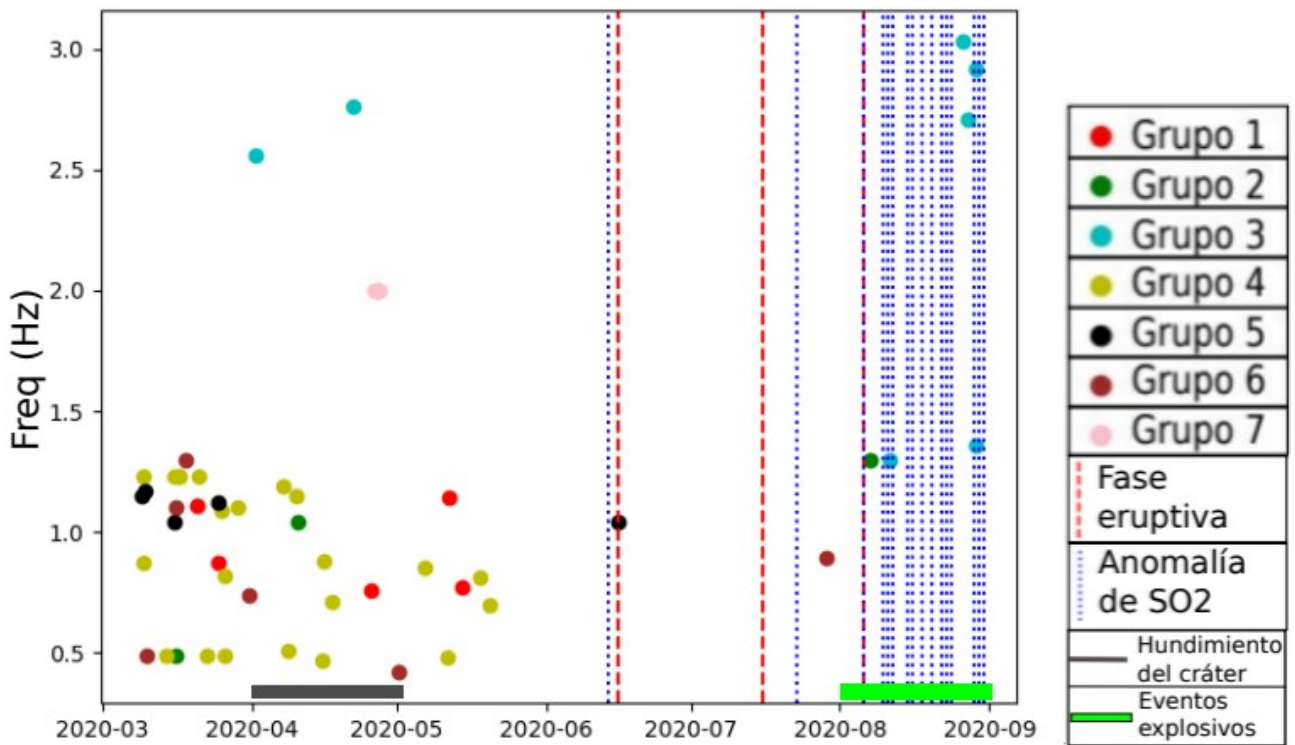
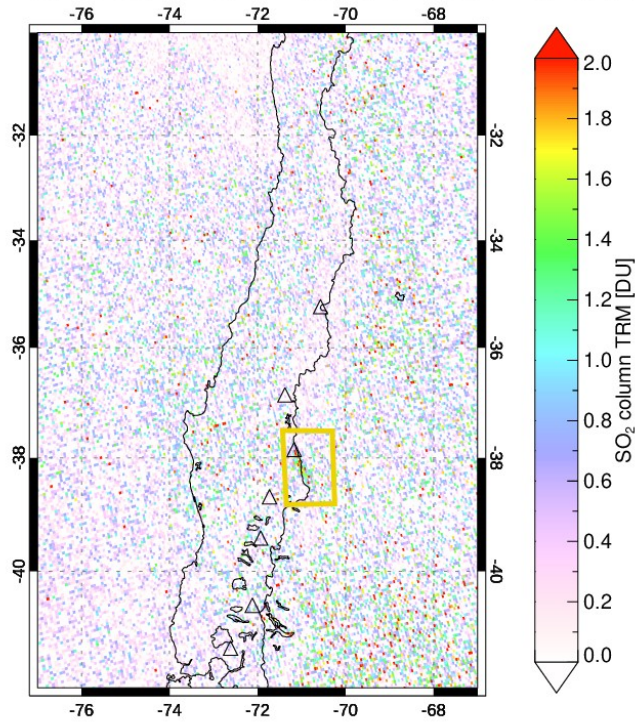


Figura 39: Relación temporal de LPs con sus frecuencias, las fases eruptivas, emisiones de SO<sub>2</sub>, hundimiento del cráter y eventos explosivos.

Las imágenes satelitales mostraron un aumento de actividad en emisiones de SO<sub>2</sub> en los meses de junio, julio y agosto de 2020. En junio se observó una leve anomalía 2 días antes de la erupción registrada (Figura 40); en julio la actividad anómala se observó después de la erupción del mismo mes (Figura 41); y en agosto se observó el mismo día de la erupción (Figura 42) para continuar la actividad anómala durante todo el mes (como se observó en las imágenes de la Figura 8 del Anexo). En la Figura 9 del Anexo se observan algunos ejemplos sin anomalía.

Sentinel-5P/TROPOMI - 06/14/2020 18:39-18:42 UT

SO<sub>2</sub> mass: 0.0341 kt; Area: 717 km<sup>2</sup>; SO<sub>2</sub> max: 34.24 DU at lon: -76.31 lat: -35.58 ; 18:41UTC

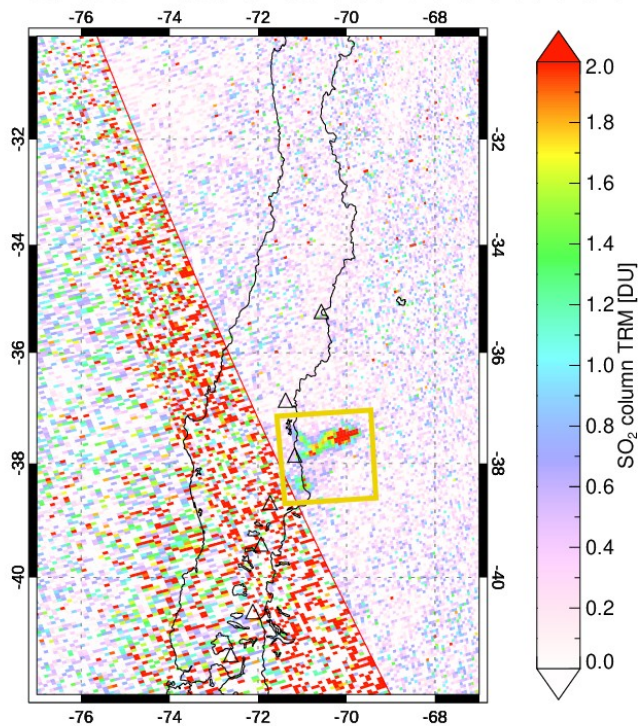


Data: BIRA-IASB/DLR/ESA/EU Copernicus Program

Figura 40: Imagen satelital TROPOMI. El rectángulo amarillo muestra el triángulo correspondiente al volcán Copahue y su pequeña anomalía de SO<sub>2</sub>, representada por una nube color verde el 14 de junio de 2020.

Sentinel-5P/TROPOMI - 07/23/2020 18:07-19:51 UT

SO<sub>2</sub> mass: 0.2441 kt; SO<sub>2</sub> max: 23.06 DU at lon: -67.84 lat: -31.62 ; 18:10UTC



Data: BIRA-IASB/DLR/ESA/EU Copernicus Program

Figura 41: Imagen satelital TROPOMI. En amarillo se encuadra el sector analizado donde se observa la anomalía de SO<sub>2</sub> que se dio el 23 de julio de 2020.

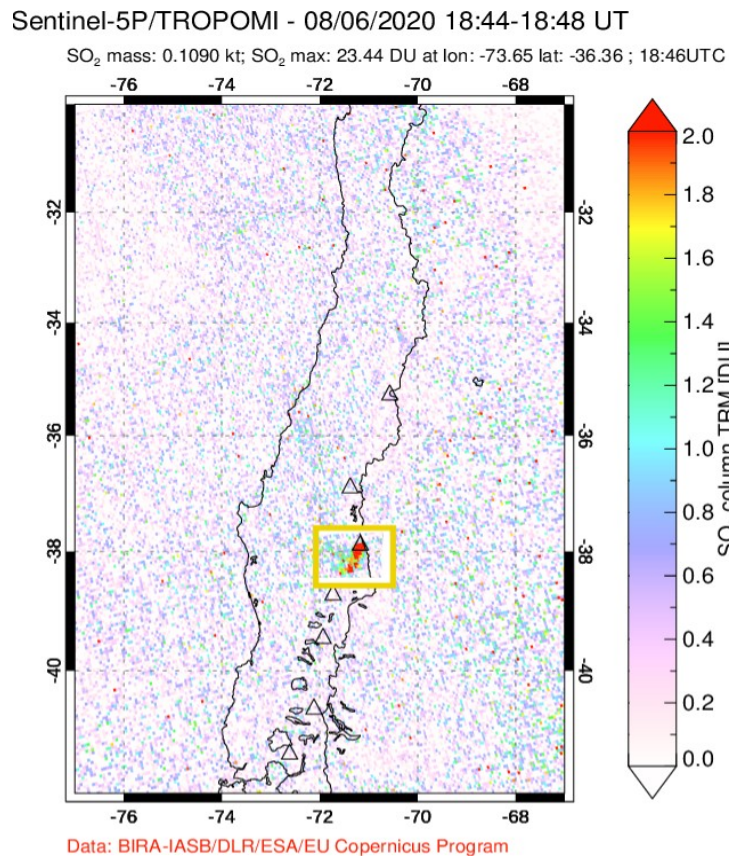


Figura 42: Imagen satelital TROPOMI con la anomalía de SO<sub>2</sub> el 6 de agosto de 2020.

## 5.2) Silencios Sísmicos

Se identificaron anomalías que se clasificaron como silencios sísmicos (SS), registrándolas en la base de datos para determinar la relación que tienen con la actividad del volcán. Estas señales que se observaron a partir del mes de agosto, se dan luego de las tres fases eruptivas, en conjunto con el aumento de SO<sub>2</sub> y los eventos explosivos reportados por el GVP (Figura 43).

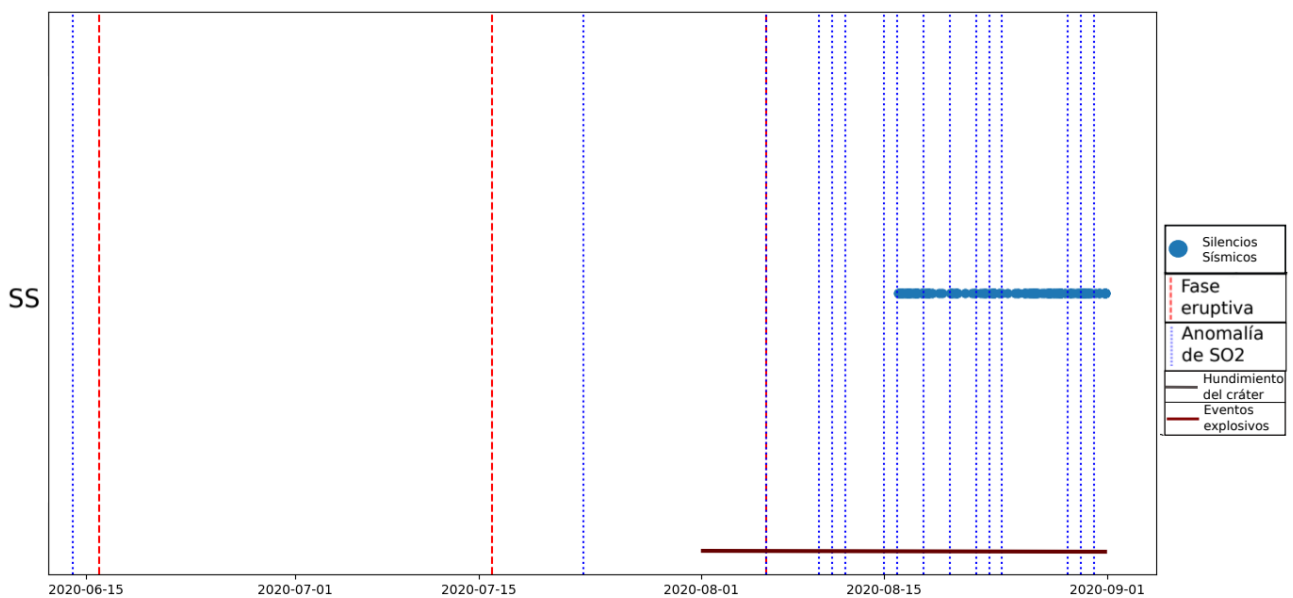


Figura 43: Relación temporal entre los silencios sísmicos, las fases eruptivas y las emisiones de SO<sub>2</sub>.

Se registraron más de 300 eventos, la mayoría de ellos con duraciones menores a un minuto (Figura 44).

Morales *et al.* (2015) observaron que los silencios eran precursores de explosiones, por lo que los asociaron a bloqueos del conducto y a la liberación rápida de la sobrepresión. Sin embargo, en el presente trabajo los SS suceden en conjunto con las emisiones de SO<sub>2</sub> y los eventos explosivos, por lo que no solo se puede atribuir los SS a bloqueos del conducto sino que también podrían estar asociados a una liberación lenta de sobrepresión por un bloqueo débil. El mismo se forma por una disminución de permeabilidad en la parte superior del sistema, como resultado de precipitación de minerales o un aumento de la viscosidad del azufre líquido que conduce al sellado parcial de la parte superior del conducto (Agusto *et al.*, 2017).

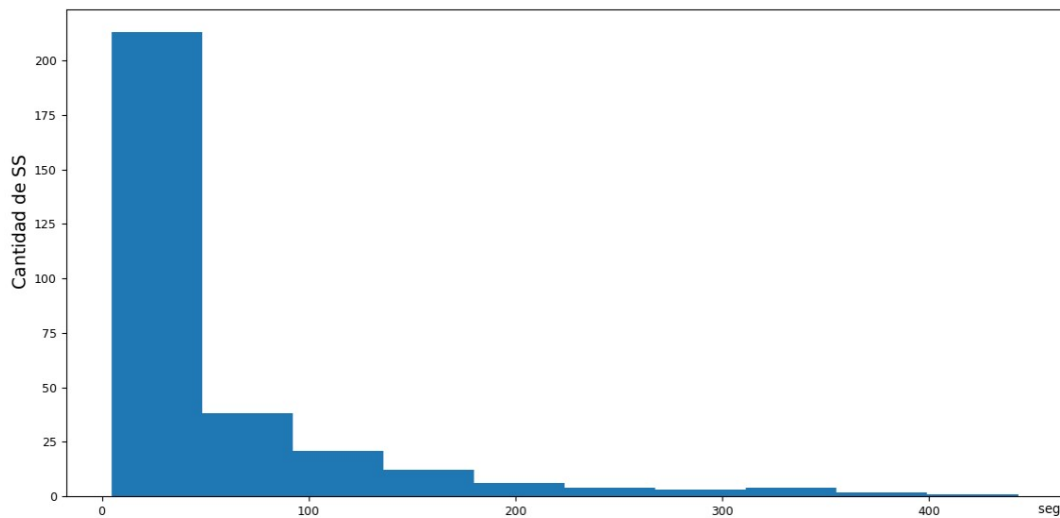


Figura 44: Histograma de Silencios Sísmicos y sus duraciones. En el eje vertical se observan la cantidad de eventos y en el eje horizontal la duración de los mismos.

En la Figura 45 se presentan todos los eventos distribuidos temporalmente con la actividad superficial del volcán. Se puede observar como los VTs y LPs ocurren mayormente entre los meses de marzo a mayo y luego disminuye la cantidad de ocurrencias. La mayor cantidad de eventos se dan en el mes de abril en coincidencia con el hundimiento que se reporta en el cráter. Por otro lado, los SS se concentran en el mes de agosto en conjunto con las emisiones de SO<sub>2</sub> y los eventos explosivos. No se logró encontrar relación directa con las fases eruptivas. Sería interesante observar si este descenso de actividad se repite en futuras erupciones.

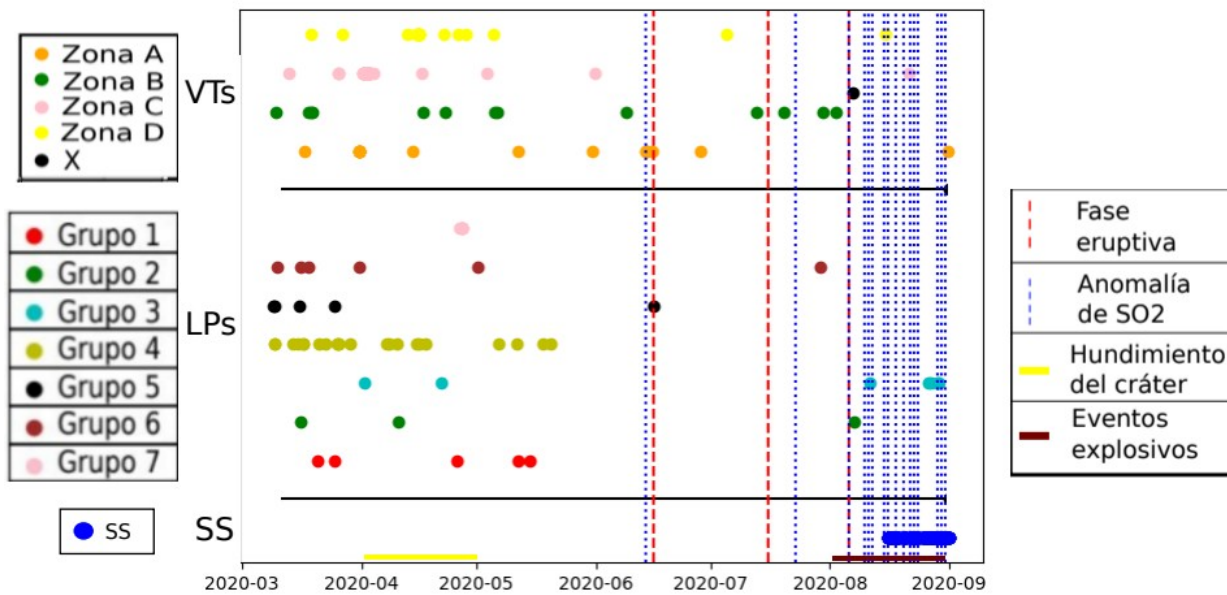


Figura 45: Todos los eventos con la actividad superficial del volcán.

## 6) Conclusiones

Se analizaron los datos sísmicos de marzo a agosto del año 2020 y se encontraron 120 VTs, 88 LPs y 302 SS. Se lograron localizar 84 VTs, encontrando 4 zonas activas sísmológicamente. Se caracterizaron 54 LPs con su forma de onda y contenido espectral y se pudo clasificar los eventos en 7 familias. Por último, se observaron y registraron los SS buscando la relación con la actividad superficial del volcán.

La distribución de los epicentros de VTs es compatible a la establecida por Montenegro (2019). Los VTs no muestran relación directa con la dinámica interna del conducto somero. Los resultados muestran un comportamiento más ligado a las estructuras tectónicas de la zona. Por ejemplo la zona B ocurre alrededor de varias fallas normales por lo que se podría asociar el origen de los sismos al movimiento normal de dichas estructuras de acuerdo a la bibliografía citada.

Los LP tampoco muestran una relación temporal con las fases eruptivas. Se considera que podrían tener un origen hidrotermal. La mayor cantidad de eventos ocurren los meses previos a las erupciones. Solo la familia 3, con ocurrencias en el mes de agosto, tiene altas frecuencias de aproximadamente 3 Hz las cuales podrían estar asociadas a los SS y las anomalías de SO<sub>2</sub>.

Los SS muestran cierta relación con el aumento de las emisiones de SO<sub>2</sub> y los eventos explosivos, lo cual podría significar que estas señales se dan cuando el volcán se encuentra en estado de despresurización. Este trabajo abre puertas a futuras investigaciones enfocadas a este tipo de actividad de naturaleza desconocida por el momento.

En este estudio se busca destacar la importancia del seguimiento de la actividad volcánica y se evidencia la necesidad de continuar y mejorar el estudio en futuros trabajos en busca de herramientas válidas para el monitoreo de volcanes activos. Se considera que con mayor cantidad de estaciones sísmicas, que se encuentren mas cercanas al cráter activo, incluso en el sector oeste del volcán (en el país vecino) y un registro temporal mayor, se podrían obtener mejores resultados.

## 7) Referencias

- Agusto, M., Tassi, F., Caselli, A. T., Vaselli, O., Rouwet, D., Capaccioni, B., Caliro, S., Chiodini, G. y Darrah, T., 2013. Gas geochemistry of the magmatic-hydrothermal fluid reservoir in the Copahue–Caviabue Volcanic Complex (Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 257, 44-56.
- Agusto, M. y Varekamp, J., 2016. The Copahue Volcanic-Hydrothermal System and Applications for Volcanic Surveillance. En: Tassi, F., Vaselli, O. y Caselli, A. (eds.), *Copahue Volcano, Active Volcanoes of the World Book Series*. Springer, 199-238, Berlin-Heidelberg.
- Agusto, M., Caselli, A., Daga, R., Varekamp, J., Trinelli, A., Dos Santos Afonso, M., Vélez, M., Euillades, P. y Ribeiro Guevara, S., 2017. La laguna del cráter del volcán Copahue (Argentina): cambios geoquímicos y térmicos entre 1995 y 2015. Publicación de especificaciones de *Geol Soc London* 437(1):107–130. <https://doi.org/10.1144/SP437.16>.
- Agusto, M. y Vélez, L., 2017. Avances en el conocimiento del sistema volcánico-hidrotermal del Copahue: a 100 años del trabajo pionero de don Pablo Groeber. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 74(1): 109-124.
- Aki, K. y Richards, P. G., 2002. *Sismología cuantitativa (2º)*. Libros universitarios de ciencia.
- Angermann, D., Klotz, J. y Reigber, C., 1999. Space-geodetic estimation of the Nazca – South America Euler vector. *Earth Planet. Sci. Lett.* 171, 329 – 334.
- Baez, A. D., 2015. Estudio de los depósitos post-glaciares del volcán Copahue: análisis de la peligrosidad (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Río Negro).
- Barcelona, H., Yagupsky, D. y Agusto, M., 2019a. The layered model of the Copahue geothermal reservoir, Argentina. *Geotherm Energy* 7, 7 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0124-9>.
- Barcelona, H., Yagupsky, D., Vigide, N. y Senger, M., 2019b. Structural model and slip-dilation tendency analysis at the Copahue geothermal system: Inferences on the reservoir geometry. *Journal of Volcanology and Geo- thermal Research* 375: 18-31.
- Barmin, M. P., Ritzwoller, M. H. y Levshin, A. L., 2001. A fast and reliable method for surface wave tomography. *Pure Appl. Geophys.*, 158(8): 1351-1375.
- Bean, C. J., De Barros, L., Lokmer, I., Métaixian, J. P., O'Brien, G. y Murphy, S., 2014. Long-period seismicity in the shallow volcanic edifice formed from slow-rupture earthquakes. *Nature geoscience*, 7(1), 71-75.
- Bengoa, C. L., 2016. Estudio de la sismicidad volcano-tectónica del volcán Copahue, Cordillera Neuquina-Argentina, 2003-2010. Evidencias de reactivación del sistema. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires (inédita), 292 p., Buenos Aires.
- Bermúdez, A. M., Delpino, D. H. y López Escobar, L., 2002. Caracterización geoquímica de lavas y piroclastos holocenos del volcán Copahue, incluyendo los originados en la erupción

- del año 2000. Comparación con otros volcanes de la Zona Volcánica Sur de los Andes. 15° Congreso Geológico Argentino (Calafate), Actas 1: 377-382, Buenos Aires.
- Bohm, M., Lüth, S., Echtler, H., Asch, G., Bataille, K., Bruhn, C., Rietbrock, A., y Wigger, P., 2002. The Southern Andes between 36° and 40°S latitude: seismicity and average seismic velocities. *Tectonophysics* 356, 275–289.
- Bonali, F., 2013. Earthquake-induced static stress change on magma pathway in promoting the 2012 Copahue eruption. *Tectonophysics*. 608: 127–137.
- Bonali, F., Corazzato, C., Bellotti, F. y Groppelli, G., 2016. Active tectonics and its interactions with Copahue volcano, in: Copahue volcano. Springer, pp. 23–45.
- Bormann, P., 2002. IASPEI new manual of seismological observatory practice. P. Bormann (Ed.) GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- Bui Quang, P., Gaillard, P. y Cano, Y., 2015. Association of array processing and statistical modelling for seismic event monitoring. 1945-1949. 10.1109/EUSIPCO.2015.7362723.
- Candela-Becerra, L. J., Toyos, G., Suárez-Herrera, C. A., Castro-Godoy, S. y Agosto, M., 2020. Evolución térmica del lago del cráter del volcán Copahue con ASTER durante el último período de inactividad entre las erupciones de 2000 y 2012. *J Volcanol Geoth Res* 392:106752. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106752>.
- Caselli, A. T., Vélez, M. L., Agosto, M., Liccioli, C. y Vaselli, O., 2016a. Prehistoric to historic volcanic activity at Copahue Volcano. En: Tassi, F., Vaselli, O. y Caselli, A. T. (Eds.). Copahue Volcano, Active Volcanoes of the World. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 49–59. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-48005-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-48005-2_3).
- Caselli, A. T., Agosto, M., Vélez, M. L., Forte, P., Bengoa, C., Daga, R., Albite, J. y Capaccioni, B., 2016b. The 2012 Eruption. En: Tassi, F., Vaselli, O., Caselli, A. T. (Eds.), Copahue Volcano. Springer Berlin Heidelberg. Active Volcanoes of the World. chapter 4, pp. 61–77.
- Cembrano, J., Hervé, F. y Lavenu, A., 1996. The Liquiñe Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics* 259, 55–66.
- Cembrano, J., Schermer, E., Lavenu, A. y Sanhueza, A., 2000. Contrasting nature of deformation along an intra-arc shear zone, Liquiñe-Ofqui fault zone, southern Chilean Andes. *Tectonophysics* 319, 129–149.
- Cembrano, J., Lavenu, A., Reynolds, P., Arancibia, G., López, G. y Sanhueza, A., 2002. Late Cenozoic transpressional ductile deformation north of the Nazca-South America–Antarctica triple junction. *Tectonophysics* 354, 289–314.
- Chouet, B. A., 1996a. Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting, *Nature*, 380: 309-316.
- Chouet, B., 1996b. New methods and future trends in seismological volcano monitoring. In: R. Scarpa and R.I. Tilling (Editors), *Monitoring and mitigation of volcano hazards*, pp. 23-97.
- Chouet, B., 2003. Volcano Seismology. *Pure appl. Geophys.* 160, 739–788.

- Chouet, B. A. y Matoza, R. S., 2013. Una visión de varias décadas de métodos sísmicos para detectar precursores de movimiento y erupción de magma. *Revista de Vulcanología e Investigación Geotérmica*, 252, 108-175.
- Daga, R., Caselli, A., Ribeiro Guevara, S. y Agosto, M., 2017. Tefras emitidas durante la fase hidromagmática inicial (julio 2012) del ciclo eruptivo 2012-2016 del volcán Copahue (andes del sur). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 74(2): 191-206.
- Delpino, D. y Bermúdez, A., 1993. La actividad del volcán Copahue durante 1992. Erupción con emisión de azufre piroclástico. Provincia de Neuquén. 12° Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 292-301, Mendoza.
- Delpino, D. y Bermúdez, A., 2002. La erupción del volcán Copahue del año 2000. Impacto social y al medio natural. Provincia del Neuquén, Argentina. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas: 365-370. El Calafate.
- Dellapé, D. y Pando, G., 1975. Relevamiento geológico de la cuenca geotérmica de Copahue. Yacimientos Petrolíferos Fiscales, Informe 524 (Inédito), Buenos Aires.
- Díaz-Moreno, A., Barberi, G., Cocina, O., Koulakov, I., Scarfi, L., Zuccarello, L., Prudencio, J., García-Yeguas, A., Alvarez, I., Garcia, L. y Ibáñez, J. M., 2017. New Insights on Mt. Etna's Crust and Relationship with the Regional Tectonic Framework from Joint Active and Passive P-Wave Seismic Tomography. *Surveys in Geophysics*. DOI 10.1007/s10712-017-9425-3.
- Ferrazzini, V. y Aki K., 1992. Preliminary results from a field experiment on volcanic events at Kilauea using an array of digital seismographs.. En *Volcanic Seismology (IAVCEI Proceedings in Volcanology 3)*, Aki, K., Gasparini, P. and Scarpa, R. (ed.), Springer-Verlag: 168-189.
- Folguera, A. y Ramos, V., 2000. Control estructural del volcán Copahue (38°S-71°O): implicancias tectónicas para el arco volcánico cuaternario (36°S-39°S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 55: 229-244.
- Folguera, A., Ramos, V. A., Hermanns, R. L. y Naranjo, J., 2004. Neotectonics in the foothills of the southernmost central Andes (37°–38°S): Evidence of strike-slip displacement along the Antifiñir-Copahue fault zone. *Tectonics* 23, TC5008.
- Folguera, A., Rojas Vera, E., Vélez, L., Tobal, J., Orts, D., Agosto, M., Caselli, A. y Ramos, V. A., 2016. Una revisión de la geología, los controles estructurales y el entorno tectónico del volcán Copahue, zona volcánica del sur, Andes, Argentina. En: Tassi, F., Vaselli, O. y Caselli, A. T. (eds) *Copahue Volcano, Active Volcanoes of the World* capítulo 1. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp 3–22. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48005-1>.
- Forte, P., 2013. Geología del flanco oriental del volcán Copahue, provincia de Neuquén. Tesis de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires (inédita), 138 p., Buenos Aires.
- Gammons, C., Wood, S., Pedrozo, F., Varekamp, J. C., Nelson, B. J., Shope, C. L. y Baffico, G., 2005. Hydrogeochemistry and rare earth element behavior in a volcanically acidified watershed in Patagonia, Argentina. *Chemical Geology*, 222, 249–267.



- Garcés, M. A., y Hansen, R. A., 1998. Waveform analysis of seismoacoustic signals radiated during the fall 1996 eruption of Pavlof Volcano, Alaska. *Geophysical research letters*, 25(7), 1051-1054.
- Geiger, L., 1912. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only. *Bull. St. Louis Univ.* 8, 60-71.
- Global Volcanism Program, 2016. Report on Copahue (Chile-Argentina) (Venzke, E., ed.). *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 41:3. Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN201603-357090>.
- Global Volcanism Program, 2019. Report on Copahue (Chile-Argentina) (Crafford, A. E. and Venzke, E., eds.). *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 44:11. Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN201911-357090>.
- Global Volcanism Program, 2020. Report on Copahue (Chile-Argentina) (Bennis, K. L. and Venzke, E., eds.). *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 45:12. Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN202012-357090>.
- Groeber, P., 1921. La región de Copahue y su glaciación diluvial. *Revista de la Sociedad Argentina de Estudios Geográficos* 1: 92–110.
- Hantusch, M., Lacanna, G., Ripepe, M., Montenegro, V., Valderrama, O., Farias, C., Caselli, A., Gabellini, P. y Cioni, R., 2021a. Dinámica de fragmentación de baja energía en el volcán Copahue (Argentina) revelada por una matriz infrasónica y características de ceniza. *Ciencia de la Tierra Frontal*. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.578437>
- Hantusch, M., Melchor, I., Caselli, A. T., y Pereira Da Silva, S. M., 2021b. Actividad sísmica precursora de las fases eruptivas de junio y julio de 2020 del volcán Copahue. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 78(1): 131–134.
- Havskov, J. y Alguacil, G., 2004. *Instrumentation in earthquake seismology* (Vol. 358). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Havskov, J. y Ottemoller, L., 2010. *Routine data processing in earthquake seismology: With sample data, exercises and software*. Springer Science & Business Media.
- Hervé, M., 1976. Estudio geológico de la falla Liquiñe-Reloncaví en el área de Liquiñe: antecedentes de un movimiento transcurrente (Provincia de Valdivia). I Congreso Geológico Chileno (Santiago), Abstracts B, 39–56.
- Hervé, F., 1994. The southern Andes between 39° and 44°S latitude: the geological signature of a transpressive tectonic regime related to a magmatic arc. In: Reutter, K.J., Scheuber, E., Wigger, P.J. (Eds.), *Tectonics of the Southern Central Andes*. Springer, Berlin, pp. 243–248.
- Ibáñez, J. M., y Carmona, E., 2000. Sísmicidad volcánica. *Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica*, 269–282.
- JICA (Japan International Cooperation Agency), 1992. *The feasibility study on the Northern Neuquén Geothermal Development Project*. Ente Provincial de Energía de la Provincia del Neuquén (inédito), 89 p., Neuquén.

- Jurío, R. L., 1977. Características geoquímicas de los fluidos termales de Copahue (Neuquén-Argentina). Principales implicancias geotérmicas. Apartado de la revista "Minería" N° 172, 11 p.
- Kawakatsu, H. y Yamamoto, M., 2015. Sismología de volcanes. Sismología de terremotos, 389-419.
- Kissling, E., Ellsworth, W. L., Eberhart-Phillips, D. y Kradolfer, U., 1994. Initial reference models in local earthquake tomography. *J. Geophys. Res.*, 99: 19635–19646.
- Lahr, J. C., Chouet, B. A., Stephens, C. D., Power, J. A. y Page, R. A., 1994. Clasificación, ubicación y análisis de errores de terremotos en un entorno volcánico: implicaciones para el sistema magmático de las erupciones de 1989-1990 en Redoubt Volcano, Alaska. *Revista de Vulcanología e Investigación Geotérmica*, 62 (1-4), 137-151.
- Lamberti, M. C., Vigide, N., Venturi, S., Agosto, M., Yagupsky, D., Winocur, D., Barcelona, H., Vélez, M. L., Cardellini, C. y Tassi, F., 2019. Structural architecture releasing deep-sourced carbon dioxide diffuse degassing at the Cavihue–Copahue Volcanic Complex. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 374:131–141.
- Latter, J. H., 1981. Tsunamis de origen volcánico: resumen de las causas, con especial referencia a Krakatoa, 1883. *Bulletin volcanologique*, 44 (3), 467-490.
- Lavenu, A. y Cembrano, J., 1999. Compressional and transpressional stress pattern for Pliocene and Quaternary brittle deformation in forearc and intra-arc zones (Andes of Central and Southern Chile). *Journal of Structural Geology* 21, 1669–1691.
- Lee, W., Bennet, R. y Meaghu, K., 1972. A method of estimating magnitude of local earthquakes from signal duration. U.S. Geological Survey Open File Report, 28 pp.
- Lee, W. H. K., Celebi, M., Todorovska, M. I. e Igel, H., 2009. Introduction to the special issue on rotational seismology and engineering applications. *Bull Seismol Soc Am* 99:945–947.
- Lesage, P., Heap, M. J. y Kushnir, A., 2018. A generic model for the shallow velocity structure of volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 356, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.03.003>.
- Linares, E., Ostera, H. y Mas, L., 1999. Cronología K-Ar del Complejo Efusivo Copahue-Cavihue, Provincia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 54: 240-247.
- Lomax, A., Virieux, J., Volant, P. y Berge, C., 2000. Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations, in *Advances in Seismic Event Location* Thurber, C.H., and N. Rabinowitz (eds.), Kluwer, Amsterdam, 101-134.
- Lomax, A., Michelini, A. y Curtis, A., 2009. Earthquake Location, Direct, Global-Search Methods, in *Encyclopedia of Complexity and System Science*, Part 5, Meyers, R. A. (ed.), Springer, New York, pp. 2449-2473, doi:10.1007/978-0-387-30440-3.
- Lundgren, P., Nikkhoo, M., Samsonov, S., V., Milillo, P., Gil-Cruz, F. y Lazo, J., 2017. Modelo fuente para el sistema de plomería del magma del volcán Copahue restringido por las

- observaciones de deformación superficial de InSAR. *J Geophys Res Solid Earth* 122(7):5729–5747. <https://doi.org/10.1002/2017JB014368>.
- Lüth, S., Wigger, P., Araneda, M., Asch, G., Bataille, K., Bohm, M., Bruhn, C., Giese, P., Quezada, J. y Rietbrock, A., 2003. A crustal model along 39°S from a seismic refraction profile-ISSA 2000. *Revista Geológica de Chile* 30: 83-101.
- Mas, L. C., Mas, G. R. y Bengochea, L., 2000. Heatflow of Copahue geothermal field, its relation with tectonic scheme. En *Proceedings of World Geothermal Congress*: 1419-1424, Tohoku.
- McNutt, S. R., 2005. Sismología volcánica. año *Rev. Planeta Tierra. ciencia*, 32 , 461-491.
- Melchor, I., Almendros, J., Hantusch, M., Samsonov, S., Derauw, D., Martínez, E. y Caselli, A., 2022. La sismicidad de larga duración y su relación con la agitación del volcán Copahue. *Tierra Planetas Espacio* 74, 3 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01561-7>
- Melchor, I. y Almendros, J. (en preparación). SEISVO: A new tool for monitoring seismovolcanic activity.
- Melnick, D., Folguera, A. y Ramos, V., 2006. Structural control on arc volcanism: The Cavihue-Copahue complex, Central to Patagonian Andes transition (38°S). *Journal of South American Earth Science* 22: 66-88.
- Minakami, T., 1974. Sismología de volcanes en Japón. En *Desarrollos en Geofísica de la Tierra Sólida* (Vol. 6, pp. 1-27). Elsevier.
- Montenegro, V. M., 2019. Estudio sismotectónico del volcán Copahue. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, 123p., Córdoba.
- Montenegro, V. M., Spagnotto, S., Legrand, D., y Caselli, A. T., 2021. Seismic evidence of the active regional tectonic faults and the Copahue volcano, at Cavihue Caldera, Argentina. *Bulletin of Volcanology*, 83(4): 1-16.
- Morales, S., Cartes, C., Franco, L., Gil-Cruz, F. y Valderrama, A., 2015. Silencios sísmicos en la señal de tremor volcánico como precursores inmediatos de explosiones durante octubre de 2014 en el volcán Copahue, Chile. En: *Actas del XIV Congreso Geológico Chileno*, pp 69–71.
- Mordret, A., Rivet, D., Landès, M. y Shapiro, N., 2015. Three-dimensional shear velocity anisotropic model of Piton de la Fournaise Volcano (La Réunion Island) from ambient seismic noise. *J. Geophys. Res.*, 120: 406-427.
- Muñoz, J. y Stern, C. R., 1988. The Quaternary volcanic belt of the southern continental margin of South America: transverse structural and petrochemical variations across the segment between 38°S and 39°S. *Journal of South American Earth Sciences* 1: 147-161.
- Naranjo, J. y Polanco, E., 2004. The 2000 AD eruption of Copahue Volcano, Southern Andes. *Revista Geológica de Chile* 31: 279-292.
- Nelson, M. R., Forsythe, R. y Arit, I., 1994. Ridge collision tectonics in terrane development. *Journal of South American Earth Sciences* 7, 271–278.

- Páez, P. A., Cogliati, M. G., Caselli, A. T. y Monasterio, A. M., 2021. Un análisis de las emisiones volcánicas de SO<sub>2</sub> y cenizas del volcán Copahue. *Revista de Ciencias de la Tierra de América del Sur*, 110, 103365.
- Panarello, H. O., 2002. Características isotópicas y termodinámicas de reservorio del campo geotérmico Copahue-Caviahue, provincia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 57 (2): 182-194.
- Panarello, H. O., Levin, M., Alberio, M. C., Sierra, J. L. y Gingsins, M. O., 1988. Isotopic and geochemical study of the vapour dominated geothermal field of Copahue (Neuquén, Argentina). *Revista Brasileira de Geofísica* 5 (2): 275-282.
- Percival, D. B. y Walden, A. T., 1993. *Spectral Analysis for Physical Applications: Multitaper and Conventional Univariate Techniques* Cambridge: Cambridge University Press.
- Pesce, A., 1989. Evolución volcano-tectónica del complejo efusivo Copahue-Caviahue y su modelo geotérmico preliminar. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 44: 307-327.
- Petrinovic, I., Villarosa, G., D'Elia, L., Guzman, S., Paez, G., Outes, V., Manzoni, C., Delmenico, A., Balbis, C., Carniel, R. y Hernando, I., 2014. La erupción del 22 de diciembre de 2012 del volcán Copahue, Neuquén, Argentina: Caracterización del ciclo eruptivo y sus productos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71: 161-173.
- Polanco, E., 1998. Volcanismo Explosivo Postglacial de la Cuenca del Alto Biobío, Andes del Sur (37°45'-38°30'S). Memoria de Título (Inédito), Departamento de Geología, Universidad de Chile, 104 p. Santiago.
- Polanco, E., Naranjo, J. A., Young, S. y Moreno, H., 2000. Volcanismo explosivo holoceno en la cuenca del alto Biobio, Andes del Sur (37°45' -38°30'S). IX Congreso Geológico Chileno. Puerto Varas, Chile. *Actas* 2, (6) 59-61.
- Qian, S. y Chen, D., 1996. *Joint time-frequency analysis*, Prentice Hall PTR, New Jersey, 302 pp.
- Quaas, R., González, R., Guevara, E., Ramos, E. y Cruz-Reyna, S., 1995. Monitoreo volcánico: instrumentación y métodos de vigilancia. En *Volcán Popocatepetl estudios realizados durante la crisis de 1994-1995* (pp. 25-76).
- Radic, J., 2010. Las cuencas cenozoicas y su control en el volcanismo de los Complejos Nevados de Chillán y Copahue-Callaqui (Andes del Sur, 36°-39° S). *Andean geology*, Vol. 37, n. 1, pp. 220-246.
- Richter, C. F., 1935. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 25, 1-32.
- Rojas Vera, E., Folguera, A., Spagnuolo, M. y Ramos, V. A., 2009. La neotectónica del arco volcánico a la latitud del volcán Copahue (38°S). En *Geología de los Andes del Sur*. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65(1): 204-214.
- Rosenau, M., 2004. Tectonics of the southern Andean intra-arc zone (38°– 42°S). Ph.D. Thesis, Freie Universität Berlin, 159 pp.

- Rosenau, M., Melnick, D. y Echtler, H., 2006. Kinematic constraints on intra-arc shear and strain partitioning in the Southern Andes between 38°S and 42°S latitude, *Tectonics* 25, TC4013.
- Sánchez-Sesma, F. J., Rodríguez, M., Iturrarán-Viveros, U., Luzón, F., Campillo, M., Margerin, L., García-Jerez, A., Suarez, M., Santoyo, M. A. y Rodríguez-Castellanos, A., 2011. A theory for microtremor h/v spectral ratio: application for a layered medium. *Geophys. J. Int.*, 186(1): 221-225.
- Sherburn, S., Scott, B. J., Nishi, Y. y Sugihara, M., 1998. Sismicidad en el volcán White Island, Nueva Zelanda: una clasificación revisada e inferencias sobre el mecanismo de origen. *Revista de vulcanología e investigación geotérmica*, 83 (3-4), 287-312.
- Sierra, J., D'Amore, F., Panarello, H. y Pedro, G., 1992. Reservoir characteristics of the vapour dominated geothermal field of Copahue, Neuquén, Argentina, as established by isotopic and geochemical techniques. *Geothermal Investigations with Isotope and Geochemical Techniques in Latin America. Proceeding of a meeting on Nuclear Techniques in Geothermal Resources Investigation. International Atomic Energy Agency (IAEA) Technical Document 641 (inédito)*, 1330 p., San José.
- Spica, Z., Perton, M. y Legrand, D., 2016. Anatomy of the Colima volcano magmatic system, Mexico. *Earth and Planetary Science Letters*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2016.11.010>.
- Sruoga, P. y Consoli, V., 2011a. El volcán Copahue. En: Leanza, H. A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J. C. y Vallés, J. M. (Eds.). *Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino. Asociación Geológica Argentina, Neuquén*, pp. 613–620.
- Sruoga, P. y Consoli, V. C., 2011b. Nueva edad Ar/Ar para la Formación Las Mellizas. Implicancias en la evolución del complejo Caviahue-Copahue (37° 51'S, 71° 09'O), Provincia de Neuquén. En *Proceedings XVIII Congreso Geológico Argentino*, 10a: 512-513, Neuquén, Argentina.
- Takahashi, H., Shibata, T., Yamaguchi, T., Ikeda, R., Okazaki, N. y Akita, F., 2012. Volcanic strain change prior to an earthquake swarm observed by groundwater level sensors in Meakan-dake, Hokkaido, Japan. *JVGR* 215-216, 1-7.
- Tamburello, G., Agosto, M., Caselli, A. T., Tassi, F., Vaselli, O., Calabrese, S., Rouwet, D., Capaccioni, B., Di Napoli, R., Cardellini, C., Chiodini, G., Bitetto, M., Brusca, L., Bellomo, S. y Aiuppa, A., 2015. Intense magmatic degassing through the lake of Copahue volcano, 2013-2014. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 120: 6071–6084.
- Tarantola, A. y Valette, B., 1982. Inverse problems = quest for information. *J. Geophys.*, 50, 159-170.
- Tarantola, A., 1987. *Inverse problem theory: Methods for data fitting and model parameter estimation*. Elsevier, Amsterdam, 613p.
- Varekamp, J. C., Pasternack, G. B. y Rowe, G. L., 2000. Volcanic lake systematics II. Chemical constraints. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 97: 161-179.
- Varekamp, J. C., Maarten deMoor, J., Merrill, M. D., Colvin, A. S., Goss, A. R., Vroon, P. Z. y

- Hilton, D. R., 2006. The geochemistry and isotopic characteristics of the Caviahue-Copahue volcanic complex, Province of Neuquén, Argentina. Geological Society of America, Special Paper 407: 317–342.
- Varekamp, J. C., Ouimette, A. P., Hermann, S. W., Flynn, K. S., Bermúdez, A. y Delpino, D., 2009. Naturally acid waters from Copahue volcano, Argentina. Applied Geochemistry, 24: 208-220.
- Vélez, M. L., Euillades, P., Caselli, A., Blanco, M. y Martínez Díaz, J., 2011. Deformation of Copahue volcano: Inversion of InSAR data using a genetic algorithm. Journal of Volcanology and Geothermal Research 202, 117–126.
- Vélez, M., L., Euillades, P., Blanco, M. y Euillades, L., 2016. Deformación del suelo entre 2002 y 2013 a partir de observaciones InSAR. En: Tassi F, Vaselli O, Caselli AT (eds) Volcán Copahue, volcanes activos del mundo capítulo 8. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp 175–198. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48005-2>.
- Zulfakriza, Z., Saygin, E., Cummins, P. R., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., Lühr, B. G. y Bodin, T., 2014. Upper crustal structure of central Java, Indonesia, from transdimensional seismic ambient noise tomography. Geophys. J. Int., 197: 630-635.

## 8) Anexos

Se presentan las tablas realizadas con los datos de cada evento volcánico registrado. También las imágenes de las familias de LPs que no se muestran en el texto y por último las anomalías de SO<sub>2</sub> totales que se dan en el mes de agosto.

Tabla 1: Lista de eventos VTs. El ID es el nombre con el que se identifica el evento. La fecha y hora es en UTC. La estación es en la cual se observó mejor el evento. La onda P y S muestran la componente de mayor

amplitud y el tiempo en el que se picaron para luego poder sacar el desfase.

ID	Fecha y hora	Estación		P		S	desfase S-P
11	09/03/20 20:59	NAN5	Z	0,42	N	1,38	0,96
88	13/03/20 01:07	NAN4	Z	0,68	E	1,81	1,13
132	15/03/20 22:52	NAN4	Z	1,62	E	1,88	0,26
153	17/03/20 02:02	NAN4	Z	0,48	N	1,38	0,9
170	18/03/20 08:14	NAN5	Z	8,22	N	8,36	0,14
184	18/03/20 22:54	NAN5	Z	1,43	N	2,03	0,6
188	19/03/20 01:38	NAN5	Z	0,73	N	1,55	0,82
189	19/03/20 02:33	NAN5	Z	0,85	N	1,72	0,87
191	19/03/20 04:52	NAN5	Z	1,34	N	1,89	0,55
294	25/03/20 13:51	NAN5	Z	0,32	N	1,41	1,09
295	25/03/20 13:51	NAN5	Z	0,43	N	1,45	1,02
307	25/03/20 21:55	NAN4	Z	1,4	E	2,86	1,46
308	25/03/20 21:56	NAN4	Z	4,74	E	6,2	1,46
309	25/03/20 21:59	NAN5	Z	0,47	N	1,72	1,25
310	25/03/20 22:15	NAN5	Z	3,78	N	5,07	1,29
314	26/03/20 02:44	NAN5	Z	2,23	N	3,58	1,35
331	26/03/20 23:08	NAN4	Z	2,55	E	3,23	0,68
417	31/03/20 08:56	NAN4	Z	0,92	E	1,87	0,95
418	31/03/20 09:08	NAN5	Z	5,18	N	6,09	0,91
421	31/03/20 09:19	NAN4	Z	2,56	E	3,49	0,93
422	31/03/20 09:21	NAN4	Z	6,15	E	6,5	0,35
423	31/03/20 09:22	NAN4	Z	1,19	E	2,1	0,91
427	31/03/20 10:18	NAN4	Z	5,49	E	5,94	0,45
429	31/03/20 10:23	NAN4	Z	0,99	E	1,39	0,4
432	31/03/20 10:25	NAN4	Z	1,18	E	2,11	0,93
433	31/03/20 10:26	NAN4	Z	0,42	E	1,36	0,94
460	01/04/20 09:38	NAN4	Z	1,01	E	2,49	1,48
462	01/04/20 10:27	NAN4	Z	0,92	E	2,44	1,52
469	01/04/20 13:20	NAN4	Z	1,1	E	2,54	1,44
470	01/04/20 13:25	NAN4	Z	2,5	E	3,95	1,45
471	01/04/20 13:31	NAN4	Z	1,01	E	2,51	1,5
472	01/04/20 13:44	NAN4	Z	0,83	E	2,34	1,51
473	01/04/20 13:45	NAN5	Z	1,94	E	3,23	1,29
476	01/04/20 14:16	NAN4	Z	1,01	E	2,47	1,46
481	01/04/20 14:51	NAN4	Z	0,86	E	2,29	1,43
493	01/04/20 17:45	NAN4	Z	0,76	E	2,23	1,47
496	01/04/20 18:36	NAN5	Z	0,95	N	2,34	1,39
512	01/04/20 22:21	NAN5	Z	5,22	N	6,67	1,45
518	01/04/20 23:36	NAN4	Z	2	E	3,44	1,44
536	02/04/20 11:07	NAN4	Z	2,12	E	3,51	1,39
550	02/04/20 21:05	NAN4	Z	1,26	E y N	2,74	1,48
554	02/04/20 22:31	NAN4	Z	0,37	E	1,81	1,44
555	02/04/20 22:34	NAN4	Z	0,12	E	1,57	1,45
556	02/04/20 22:40	NAN4	Z	0,43	E	1,86	1,43
557	02/04/20 22:46	NAN4	Z	0,4	E	1,84	1,44
558	02/04/20 22:53	NAN4	Z	0,29	E	1,7	1,41
563	02/04/20 23:46	NAN4	Z	0,95	E	2,35	1,4
570	03/04/20 00:06	NAN4	Z	0,18	E	1,6	1,42
578	03/04/20 00:30	NAN4	Z	0,44	E	1,85	1,41
592	03/04/20 01:19	NAN4	Z	1,18	E y N	2,63	1,45
595	03/04/20 02:09	NAN4	Z	7,56	E	9,02	1,46
597	03/04/20 02:25	NAN4	Z	1,25	E	2,7	1,45
606	03/04/20 06:36	NAN4	Z	0,98	N	2,37	1,39
630	03/04/20 20:54	NAN4	Z	20,85	E	22,19	1,34
637	04/04/20 06:36	NAN5	Z	0,39	N	1,88	1,49
639	04/04/20 06:55	NAN5	Z	0,46	N	1,94	1,48
773	13/04/20 02:08	NAN5	Z	1,34	E	2	0,66
788	14/04/20 09:34	NAN5	Z	3,7	N	4,4	0,7



VT	791	14/04/20 12:54	NAN4	Z	2,51	N	3,39	0,88
	818	15/04/20 12:15	NAN5	Z	1,11	N	1,78	0,67
	829	15/04/20 12:47	NAN4	Z	0,87	N	1,95	1,08
	835	15/04/20 13:03	NAN5	Z	5,2	N	6,53	1,33
	839	15/04/20 13:09	NAN5	Z	1,27	N	1,96	0,69
	843	15/04/20 13:18	NAN5	Z	1,07	N	1,8	0,73
	849	15/04/20 13:42	NAN5	Z	2	N	2,62	0,62
	859	15/04/20 14:29	NAN5	Z	1,29	N	2	0,71
	866	15/04/20 15:23	NAN5	Z	3,88	N	4,56	0,68
	876	15/04/20 21:31	NAN5	Z	3,73	E	4,46	0,73
	880	15/04/20 22:08	NAN5	Z	1,98	E	2,75	0,77
	882	15/04/20 22:21	NAN5	Z	3,32	E	4,04	0,72
	891	15/04/20	NAN5	Z	3,02	N	3,71	0,69
	892	15/04/20 23:52	NAN5	Z	0,86	N	1,52	0,66
	897	16/04/20 00:30	NAN5	Z	2,55	N	3,2	0,65
	927	16/04/20 20:58	NAN4	Z	1,79	E	2,99	1,2
	930	17/04/20 02:29	NAN5	Z	1,21	N	2,28	1,07
	941	18/04/20 17:43	NAN5	Z	1,89	N	2,48	0,59
	947	19/04/20 22:26	NAN4	Z	2,44	E	3,71	1,27
	967	22/04/20 09:51	NAN5	Z	2,6	N	3,36	0,76
	969	22/04/20 16:21	NAN5	Z	1,42	N	2,35	0,93
	977	24/04/20 02:12	NAN5	Z	2,11	N	3,2	1,09
	1013	26/04/20 07:26	NAN5	Z	1,73	E	2,47	0,74
	1028	28/04/20 08:01	NAN5	Z	1,6	E	2,21	0,61
	1088	03/05/20 19:25	NAN4	Z	1,52	E	3,18	1,66
	1103	05/05/20 09:29	NAN5	Z	0,95	N	1,56	0,61
	1109	05/05/20 18:51	NAN4	Z	1,38	N	2,46	1,08
	1116	06/05/20 12:57	NAN4	Z	1,86	E	2,89	1,03
	1130							0
	1152	11/05/20 17:54	NAN4	Z	1,52	N	2,34	0,82
	1179	13/05/20 14:32	NAN4	Z	25,16	N	27,43	2,27
	1229	20/05/20 04:38	NAN4	Z	15,17	E	16,23	1,06
	1232	20/05/20 06:58	NAN3	Z	9,85	N	11,82	1,97
	1236	20/05/20 08:46	NAN5	Z	166,15	N	167,02	0,87
	1312	31/05/20 02:00	NAN4	Z	4,73	E	5,75	1,02
	1314	31/05/20 09:33	NAN5	Z	1,64	N	2,46	0,82
	1319	31/05/20 17:26	NAN5	Z	1,44	N	3,01	1,57
	1384	08/06/20 21:36	NAN5	Z	0,76	N	1,68	0,92
	1417	11/06/20 03:16	NAN5	Z	106,95	N	107,99	1,04
	1454	14/06/20 01:18	NAN4	Z	39,21	E	40,15	0,94
	1459	14/06/20 02:27	NAN4	Z	1,78	E	2,66	0,88
	1464	14/06/20 08:24	NAN4	Z	1,63	E	2,53	0,9
	1471	15/06/20 04:46	NAN5	Z	1,57	E	2,73	1,16
	1479	15/06/20 21:49	NAN4	Z	1,35	N	2,26	0,91
	1576	28/06/20 08:13	NAN4	Z	1,17	E	2,05	0,88
	1606	01/07/20 08:45	NAN5	Z	0,98	N	1,85	0,87
	1611	02/07/20 09:42	NAN5	Z	1,24	E	2,74	1,5
	1630	05/07/20 05:19	NAN5	Z	1,58	E y N	2,22	0,64
1678	12/07/20 16:54	NAN5	Z	7,57	E	8,48	0,91	
1681	13/07/20 03:22	NAN4	Z	2,16	N	3,37	1,21	
1709	19/07/20 20:23	NAN4	Z	2,21	N	3,31	1,1	
1764	27/07/20 04:16	NAN5	Z	0,44	N	0,99	0,55	
1768	27/07/20 20:37	NAN5	Z	0,44	E	1,34	0,9	
1797	30/07/20 02:45	NAN5	Z	1,21	N	2,12	0,91	
1818	02/08/20 14:54	NAN4	Z	1,8	N	2,89	1,09	
1834	05/08/20 05:20	NAN5	Z	1,62	E	2,54	0,92	
1835	06/08/20 19:08	NAN5	Z	1,58	E	2,47	0,89	
1839	07/08/20 04:54	NAN5	Z	0,94	N	1,5	0,56	
1853	15/08/20 10:29	NAN5	Z	1,08	N	1,6	0,52	
1870	21/08/20 15:46	NAN4	Z	0,76	N	2,19	1,43	
1878	25/08/20 04:31	NAN3	Z	15	N	16,52	1,52	
1889	31/08/20	NAN4	Z	0,96	N	1,8	0,84	



Tabla 2: Lista de eventos LPs con los datos característicos y la familia a la que corresponden.

ID	Fecha y hora	ESTACIÓN	COMPONENTE	FRECUENCIA (Hz)	AMPLITUD	DURACIÓN (s)	DESFASE (s)	FAMILIA	
121	09/03/20 03:36	NAN 5	N	1,15	1118,6	54	NAN 5 Y NAN 3	2,05	5
122	09/03/20 11:37	NAN 5	N	1,23	139,5	24,7	NAN 5 Y NAN 3	1,84	4
124	09/03/20 11:39	NAN 5	N	0,87	217,1	27,3	NAN 5 Y NAN 3	1,16	4
125	09/03/20 12:28	NAN 5	N	1,78		11,66			7
126	09/03/20	NAN 5	N	1,17		22,29			5
128	10/03/20 04:07	NAN 5	N	0,49	110,1	19,55	NAN 5 Y NAN 3	3,28	6
129	14/03/20 01:57	NAN 5	N	0,49	170,7	18,09	NAN 5 Y NAN 3	1,1	4
130	15/03/20 16:03	NAN 5	N	0,55	91,3	14,45	--	--	
131	15/03/20 16:37	NAN 5	N	0,89 y 1,23	301,7	32,66	NAN 5 Y NAN 3	2,02	4
132	15/03/20 20:06	NAN 5	N	1,04	812,1	46,99	NAN 5 Y NAN 3	2,86	5
133	16/03/20 05:55	NAN 5	N	1,1	170,8	25,01	NAN 5 Y NAN 3	1,65	6
134	16/03/20 06:52	NAN 5	N	0,49	70,8	28,29	NAN 5 Y NAN 3	3,87	2
135	16/03/20 21:07	NAN 5	N	0,49 y 1,23	306,3	30,47	NAN 5 Y NAN 3	1,95	4
136	16/03/20 22:24	NAN 5	N	0,86 y 1,06 y 1,23	430,9	20,94	NAN 5 Y NAN 3	1,55	4
137	18/03/20 02:06	NAN 5	N	1,09-1,3	206,6	19,18	NAN 5 Y NAN 3	1,4	6
138	20/03/20 12:53	NAN 5	N	0,5 y 0,79 y 1,11	116,2	55,85	NAN 5 Y NAN 3	0,6	1
139	20/03/20 17:13	NAN 5	N	0,9	352,8	43,87	NAN 5 Y NAN 3	2,26	
140	20/03/20 22:05	NAN 5	N	0,49 y 1,06	237,9	20,88	--	--	
141	20/03/20 22:26	NAN 5	N	1,23	455,5	34,48	NAN 5 Y NAN 3	1,86	4
142	22/03/20	NAN 5	N	0,49	169,1	29,5	NAN 5 Y NAN 3	1,22	4
143	24/03/20 21:21	NAN 5	N	0,87	134,1	48,32	--	--	1
144	25/03/20 01:14	NAN 5	N	0,97 y 1,12	1326,1	59,85	NAN 5 Y NAN 3	2,01	5
145	25/03/20 13:20	NAN 5	N	1,09	700,8	17,62	NAN 5 Y NAN 3	1,73	4
146	26/03/20 03:16	NAN 5	N	0,55 y 0,82	163,7	25,98	NAN 5 Y NAN 3	0,86	4
147	26/03/20 03:32	NAN 5	N	0,49	144,3	35,46	NAN 5 Y NAN 3	1,9	4
148	28/03/20 22:49	NAN 5	N	0,42 y 1,1	170,4	28,9	NAN 5 Y NAN 3	1,88	4
149	29/03/20 03:58	NAN 5	N	0,49	158,6	36,27	NAN 5 Y NAN 3	1,92	
150	31/03/20	NAN 5	N	0,74	85,2	32,66	NAN 5 Y NAN 3	4,66	6
151	01/04/20 18:37	NAN 5	N	2,56	178,4	8,86	NAN 5 Y NAN 3	1,58	3
152	07/04/20 12:41	NAN 5	N	0,71 a 1,19	327,9	28,9	NAN 5 Y NAN 3	2,06	4
153	08/04/20 08:56	NAN 5	N	0,51	134,8	30,72	NAN 5 Y NAN 3	1,98	4
154	08/04/20 10:14	NAN 5	N	0,69 y 0,77	116,4	42,25	NAN 5 Y NAN 3	1,42	
155	10/04/20 05:06	NAN 5	N	0,52 y 1,15	245,1	38,12	NAN 5 Y NAN 3	2,48	4
156	10/04/20 12:20	NAN 5	N	0,49 y 0,85 y 1,04	131,6	30,72	--	--	2
157	11/04/20 10:43	NAN 5	N	0,58 y 0,82	116,5	20,4	NAN 5 Y NAN 3	0,74	
158	15/04/20 10:54	NAN 5	N	0,47	196,3	32,66	NAN 5 Y NAN 3	1,83	4
159	15/04/20 22:22	NAN 5	N	0,49 y 0,88	117,9	32,9	NAN 5 Y NAN 3	2,22	4
160	17/04/20 15:11	NAN 5	N	0,5 y 0,71	354,9	28,77	NAN 5 Y NAN 3	1,82	4
161	21/04/20 22:20	NAN 5	E	2,76	1332,8	7,76	NAN 5 Y NAN 4	1,33	3
162	22/04/20 17:40	NAN 5	E	2,92	247,4	35,45	NAN 5 Y NAN 3	-0,46	
163	25/04/20 19:45	NAN 5	N	0,54 y 0,76	145,9	38,12	NAN 5 Y NAN 3	1,72	1
164	25/04/20 22:51	NAN 5	N	0,49	64,1	19,3	--	--	
165	26/04/20 10:54	NAN 5	N	2	174,6	13,36	NAN 5 Y NAN 3	2,09	7
166	27/04/20 03:24	NAN 5	E	2	161,3	15,66	--	--	7
167	27/04/20 04:07	NAN 5	E	2	122,1	13,36	--	--	7
168	27/04/20 07:19	NAN 5	N	2	148,9	9,89	--	--	7
169	27/04/20 09:06	NAN 5	E	2	149,5	11,23	NAN 5 Y NAN 3	0,96	7
170	29/04/20 10:31	NAN 5	E	0,42	98,5	11,35	--	--	
171	29/04/20 13:39	NAN 5	N	1	115	40,07	--	--	
172	30/04/20 18:38	NAN 5	E	1,24	724,3	41,16	NAN 5 Y NAN 3	1,52	
173	01/05/20 05:38	NAN 5	E	0,42	66,5	20,88	--	--	6
174	02/05/20	NAN 5	N	1,03	91,6	22,34	NAN 5 Y NAN 3	2,67	
175	02/05/20 22:47	NAN 5	E	1,33	148,4	38,73	NAN 5 Y NAN 3	0,66	
176	06/05/20 17:09	NAN 5	N	0,85	168,4	41,76	--	--	4
177	08/05/20 03:26	NAN 5	N	0,52	146,2	13,96	--	--	
178	11/05/20 08:49	NAN 5	N	0,48	79,7	31,93	--	--	4
179	11/05/20 23:07	NAN 5	N	1,14	119	51,72	--	--	1
180	13/05/20 07:13	NAN 5	N	0,48 y 0,9	62,5	35,21	--	--	
181	14/05/20 17:20	NAN 5	N	0,77	120,5	50,26	--	--	
182	18/05/20 04:32	NAN 5	N	0,81	116,8	21,13	--	--	4
183	18/05/20 06:05	NAN 5	E	0,59 y 0,97	137,5	22,34	--	--	
184	20/05/20 05:14	NAN 5	N	0,49 y 0,79 y 1,1	86	53,42	--	--	
185	20/05/20 05:44	NAN 5	N	0,49 y 0,7	110,3	32,29	--	--	
186	28/05/20	NAN 5	N	0,79 y 1,08	167,7	21,85	--	--	
187	01/06/20 04:48	NAN 5	N	0,58-0,75	100,3	5,43	--	--	
188	15/06/20 00:52	NAN 5	E	1,26	252,9	22,34	--	--	
189	15/06/20 07:32	NAN 5	N	1,21	292,6	22,22	NAN 5 Y NAN 3	2,65	
190	15/06/20 08:01	NAN 5	E	1,19	221,2	59,73	NAN 5 Y NAN 3	4,72	
191	15/06/20 08:31	NAN 5	E	1,31	320,8	63,77	NAN 5 Y NAN 3	2,28	
192	15/06/20 13:23	NAN 5	N	1,06 y 1,28	353	63,86	NAN 5 Y NAN 3	3,01	
193	15/06/20 23:14	NAN 5	E	1,26 y 1,82 y 2,76	710,1	16,57	NAN 5 Y NAN 3	2,66	
194	16/06/20 01:50	NAN 5	N	0,69 y 1,04	808,3	37,3	NAN 5 Y NAN 3	0,87	5
195	16/06/20 05:45	NAN 5	E	1,37 y 1,84	1024,2	33,02	NAN 5 Y NAN 3	2,13	
196	26/07/20 06:41	NAN 5	N	0,49 y 1,65	117,9	19,91	--	--	
197	27/07/20 00:12	NAN 5	N	0,42		21,98	--	--	
198	28/07/20 03:05	NAN 5	N	0,49	73,5	12,75	--	--	
199	28/07/20 21:48	NAN 5	E	0,55	83	29,38	--	--	
200	29/07/20 03:17	NAN 5	E	0,52	74,4	14,77	--	--	
201	29/07/20 07:38	NAN 5	N	0,89	111,8	30,11	NAN 5 Y NAN 3	3,31	6
202	01/08/20 13:11	NAN 5	N	0,42	74,4	14,45	NAN 5 Y NAN 3	1,82	
203	04/08/20 12:41	NAN 5	N	0,42	63,2	19,79	--	--	
204	07/08/20 06:18	NAN 5	N	1,3	280	27,8	--	--	2
205	11/08/20 11:41	NAN 5	N	1,3		12,76	--	--	3
206	26/08/20 11:39	NAN 5	E	3,03	609,5	19,55	NAN 5 Y NAN 3	0,76	3
207	27/08/20 09:57	NAN 5	N	1,36 y 1,97 y 2,71	599,2	12,99	--	--	3
208	29/08/20 00:47	NAN 5	N	1,43	606,1	11,41	--	--	
209	29/08/20 01:20	NAN 5	N	1,36	560,4	12,87	--	--	3
210	29/08/20 04:02	NAN 5	E	2,92	695,2	12,75	NAN 5 Y NAN 3	1,02	3



Tabla 3: Tabla con localización de los VTs y sus respectivas profundidades y magnitudes.

id	time	mes	day_year	lat	lat_error	lon	lon_error	depth	depth_error	Md	Zona
11	09Mar20 20:59:05	3	69	-37.795754	0.0755241696177	-71.072736	0.0309068457745	0.537109	6.66266463211	2.86972471022	B
88	13Mar20 01:06:58	3	73	-37.785202	0.0662558991065	-71.06297	0.031806501902	1.254883	6.58619009747	3.65013185592	C
153	17Mar20 02:01:59	3	77	-37.841508	0.0242866957277	-71.070118	0.0227596782655	4.125977	3.30717202022	2.4231520037	A
170	18Mar20 08:14:05	3	78	-37.800672	0.0194859355883	-71.086047	0.0234605756888	3.920898	3.18292318475	2.4690215589	B
184	18Mar20 22:54:00	3	78	-37.846396	0.0342399502898	-71.118942	0.0341594263487	2.587891	3.6674377977	1.90003231175	D
188	19Mar20 01:37:59	3	79	-37.818971	0.023281906195	-71.089617	0.0276464977483	4.331055	3.65350516628	1.85732038602	B
189	19Mar20 02:32:59	3	79	-37.823196	0.0246726714991	-71.086073	0.024175029405	4.331055	3.25791344268	1.89167824418	B
307	25Mar20 21:54:59	3	85	-37.765487	0.01962233128441	-71.073593	0.0235812517461	1.665039	4.18687234102	3.56463124095	C
308	25Mar20 21:56:02	3	85	-37.768303	0.0263902090585	-71.073596	0.024798717864	1.254883	5.4751712302	3.9661809309	C
310	25Mar20 22:15:01	3	85	-37.770417	0.0324498116461	-71.069164	0.0425425699247	4.384766	4.99986999831	3.49367201933	C
331	26Mar20 23:08:01	3	86	-37.846409	0.0373364713004	-71.10474	0.0341550458953	2.998047	4.39175363608	2.57856543665	D
421	31Mar20 09:19:01	3	91	-37.829548	0.0413831609727	-71.05857	0.0350287785798	2.998047	4.9420946976	1.45004247783	A
423	31Mar20 09:22:00	3	91	-37.829548	0.0430701820584	-71.05857	0.037452507147	2.177734	4.95122207137	1.6661206199	A
427	31Mar20 10:18:03	3	91	-37.826734	0.0378855704802	-71.055018	0.0363904239869	2.587891	4.60156495119	1.38469865521	A
429	31Mar20 10:22:59	3	91	-37.829546	0.0362558245747	-71.06212	0.0278380351034	4.228516	4.39085413103	2.21745965417	A
432	31Mar20 10:25:00	3	91	-37.829548	0.0511964446492	-71.05857	0.0386016448905	1.357422	5.00691521798	0.734871076284	A
433	31Mar20 10:25:59	3	91	-37.831658	0.0291438483852	-71.061234	0.0160546665387	1.870117	4.4219000441	2.15861869255	A
469	01Apr20 13:19:58	4	92	-37.767603	0.0361569788331	-71.06515	0.0440556534219	1.923828	5.88587291742	2.28852504319	C
470	01Apr20 13:25:00	4	92	-37.767601	0.030164968034	-71.069162	0.040274649932	0.537109	5.43898887662	2.280652520725	C
471	01Apr20 13:30:58	4	92	-37.76901	0.06032638339	-71.067389	0.0559592707109	1.152344	6.45797181784	2.65547618346	C
472	01Apr20 13:43:58	4	92	-37.770419	0.0355623422058	-71.065617	0.0380738186886	4.794922	5.31114865166	2.77620073945	C
473	01Apr20 13:44:59	4	92	-37.771819	0.050898822231	-71.078033	0.0508353027276	0.742188	5.93720472295	2.280652524262	C
476	01Apr20 14:15:58	4	92	-37.764788	0.0372046424529	-71.065612	0.0249485494207	1.357422	5.50039998546	3.66171836417	C
481	01Apr20 14:50:58	4	92	-37.768308	0.0202481016336	-71.064729	0.0234043156483	1.049805	3.97466979761	1.51698899377	C
493	01Apr20 17:44:58	4	92	-37.766896	0.0223471918993	-71.071821	0.0346175743226	1.049805	4.42329063029	3.02437699453	C
496	01Apr20 18:35:58	4	92	-37.764786	0.0241066842801	-71.069159	0.0348536726503	1.357422	4.5924394389	3.0717766724	C
512	01Apr20 22:21:02	4	92	-37.764788	0.0505865805282	-71.065612	0.0501900422575	1.357422	5.63197123572	3.30432294101	C
518	01Apr20 23:35:59	4	92	-37.76197	0.0303123414265	-71.069156	0.0408205831513	1.923828	5.43977021574	2.280652525238	C
536	02Apr20 11:06:59	4	93	-37.769017	0.0527468797008	-71.053202	0.060309220338	1.972656	6.22385732484	2.75989754206	C
554	02Apr20 22:30:58	4	93	-37.766895	0.0228484154072	-71.073594	0.0370128478163	1.254883	4.49017817018	3.54466133878	C
555	02Apr20 22:33:58	4	93	-37.770415	0.0507823746472	-71.072711	0.0571211535602	2.333984	5.81907209098	2.1820844305	C
556	02Apr20 22:39:58	4	93	-37.774637	0.0286468871599	-71.074489	0.034714512936	1.152344	4.56730774089	3.03286298138	C
557	02Apr20 22:45:58	4	93	-37.768303	0.022165367825	-71.073596	0.0347444379911	1.049805	4.30535712804	3.40906200978	C
558	02Apr20 22:52:58	4	93	-37.769006	0.04911448809	-71.074483	0.0597679558722	0.332031	5.95444371877	3.30313118908	C
563	02Apr20 23:45:58	4	93	-37.768301	0.0234683999769	-71.075369	0.0357231099789	0.844727	4.38831402705	3.90041613902	C
570	03Apr20 00:05:58	4	94	-37.770412	0.0391251412444	-71.076258	0.0501790833106	1.513672	5.27819097798	2.55696404196	C
578	03Apr20 00:29:58	4	94	-37.770417	0.0282730894238	-71.069164	0.0366479899264	3.974609	5.1774607676	2.53052983341	C
592	03Apr20 01:18:59	4	94	-37.767603	0.0460301579518	-71.065615	0.059800829566	1.923828	5.93797103395	1.98086525606	C
597	03Apr20 02:24:59	4	94	-37.767603	0.0423078009401	-71.065615	0.0456320426538	0.537109	6.04097674222	2.72698143758	C
606	03Apr20 06:35:58	4	94	-37.76901	0.01847287590	-71.067389	0.0721932904815	2.128906	7.84001275509	2.69854430766	C
637	04Apr20 06:35:58	4	95	-37.76197	0.0365849290768	-71.069156	0.0334055307539	1.357422	4.95786244263	2.5769966607	C
773	13Apr20 02:08:00	4	104	-37.859782	0.0263078086852	-71.105647	0.0363171185809	2.280273	4.69548719517	1.10767464929	A
791	14Apr20 12:54:01	4	105	-37.842917	0.0332391504111	-71.066569	0.0264024956243	4.331055	3.79557637257	3.10638885241	A
818	15Apr20 12:15:00	4	106	-37.849231	0.0508770483527	-71.097643	0.0480082773256	2.587891	5.83228085743	1.5022015782	D
839	15Apr20 13:09:00	4	106	-37.847818	0.0423162113877	-71.102967	0.0585898190922	2.792969	6.93162318653	2.16445065588	D
849	15Apr20 13:42:00	4	106	-37.846406	0.0301570574937	-71.108291	0.0361740867299	3.408203	4.59522578335	1.56960454299	D
859	15Apr20 14:29:00	4	106	-37.846412	0.0372824941225	-71.10119	0.0307337813503	2.998047	4.3028362739	1.83916926945	D
876	15Apr20 21:31:02	4	106	-37.848523	0.0250244539072	-71.10208	0.0271921305437	3.100586	3.83489243656	1.56444986581	D
880	15Apr20 22:08:00	4	106	-37.846412	0.0336501341779	-71.10119	0.0290653452649	3.408203	4.10164601105	0.71087739947	D
882	15Apr20 22:21:02	4	106	-37.846412	0.0329794856093	-71.10119	0.0288643010086	3.408203	3.9696473395	1.10169506618	D
891	15Apr20 23:44:01	4	106	-37.846409	0.0387871476359	-71.10474	0.0358346653223	3.408203	4.44170012495	1.20188689381	D
892	15Apr20 23:51:59	4	106	-37.846409	0.038788059527	-71.10474	0.0352056555062	3.408203	4.459910313	1.44087558317	D
897	15Apr20 00:30:01	4	107	-37.846409	0.0513240090681	-71.10474	0.0445497455065	3.408203	5.27350926803	1.36062127871	D
927	16Apr20 20:57:59	4	107	-37.783795	0.0543139623552	-71.061195	0.0307992376084	3.305664	4.69295216255	2.46042347652	C
930	17Apr20 02:28:59	4	108	-37.806982	0.0430819168182	-71.11533	0.0523076711029	3.818359	5.07431768812	2.69963588694	B
947	19Apr20 22:26:01	4	110	-37.830968	0.070682616287	-71.024848	0.0914517660382	2.792969	6.86844960672	3.5180439073	D
967	22Apr20 09:51:01	4	113	-37.85768	0.0462481327572	-71.094103	0.0411612337011	2.998047	5.08870317468	1.32754240658	D
969	22Apr20 16:20:59	4	113	-37.810501	0.035042052238	-71.116223	0.0312564396607	3.920898	3.95414971897	1.86799209917	B
1013	26Apr20 07:26:00	4	117	-37.855208	0.017031736174	-71.104309	0.0168726251316	3.459473	2.64994150879	3.244956964	D
1028	28Apr20 08:01:00	4	119	-37.861892	0.455725400577	-71.106358	0.35956560338	2.382812	29.9705688968	0.988286520786	D
1088	03May20 19:24:58	5	124	-37.753522	0.0718844360808	-71.072695	0.0613197542047	0.537109	7.26262349293	2.87654142469	C
1103	05May20 09:29:00	5	126	-37.861904	0.406798662438	-71.092333	0.266537593077	0.742188	28.0068205978	0.912975061851	D
1109	05May20 18:50:59	5	126	-37.795756	0.0612144111896	-71.069188	0.0491890280617	2.998047	5.7543114271	1.5729175055	B
1116	06May20 12:57:00	5	127	-37.801389	0.0473726565819	-71.065645	0.0258919672644	2.998047	4.76888875945	2.40307666742	A
1152	11May20 17:54:00	5	132	-37.830951	0.0902504070057	-71.067446	0.0696751989862	1.972656	7.40711819806	1.48397402495	B
1179	13May20 14:32:20	5	134	-37.871513	0.0609864720774	-71.12575	0.0483649440626	0.537109	5.18616428587	4.15318032524	A
1229	20May20 04:38:13	5	141	-37.78733	0.028469459754	-71.012471	0.0280049383441	2.177734	4.27011709441	3.60609206419	A
1312	31May20 02:00:03	5	152	-37.833057	0.0270669210838	-71.072217	0.025849262729	3.510742	3.97983668007	2.07953358103	A
1319	31May20 17:25:59	5	152	-37.76479	0.0379945019125	-71.062066	0.0243470958427	1.357422	5.49848168059	3.35837203795	C
1384	08Jun20 21:35:59	6	160	-37.817576	0.0288463625982	-71.070095	0.0276201563159	2.895508	4.48494147119	3.16714572703	B
1454	14Jun20 01:18:37	6	166	-37.835179	0.026496767891	-71.058575	0.0251131593194	3.408203	4.07720492495	2.9848051999	A
1459	14Jun20 02:27:00	6	166	-37.82955	0.0624481566905	-71.05502	0.0468724315911	3.818359	5.27632447827	2.32158926891	A
1464	14Jun20 08:24:00	6	166	-37.82955	0.05106198875						

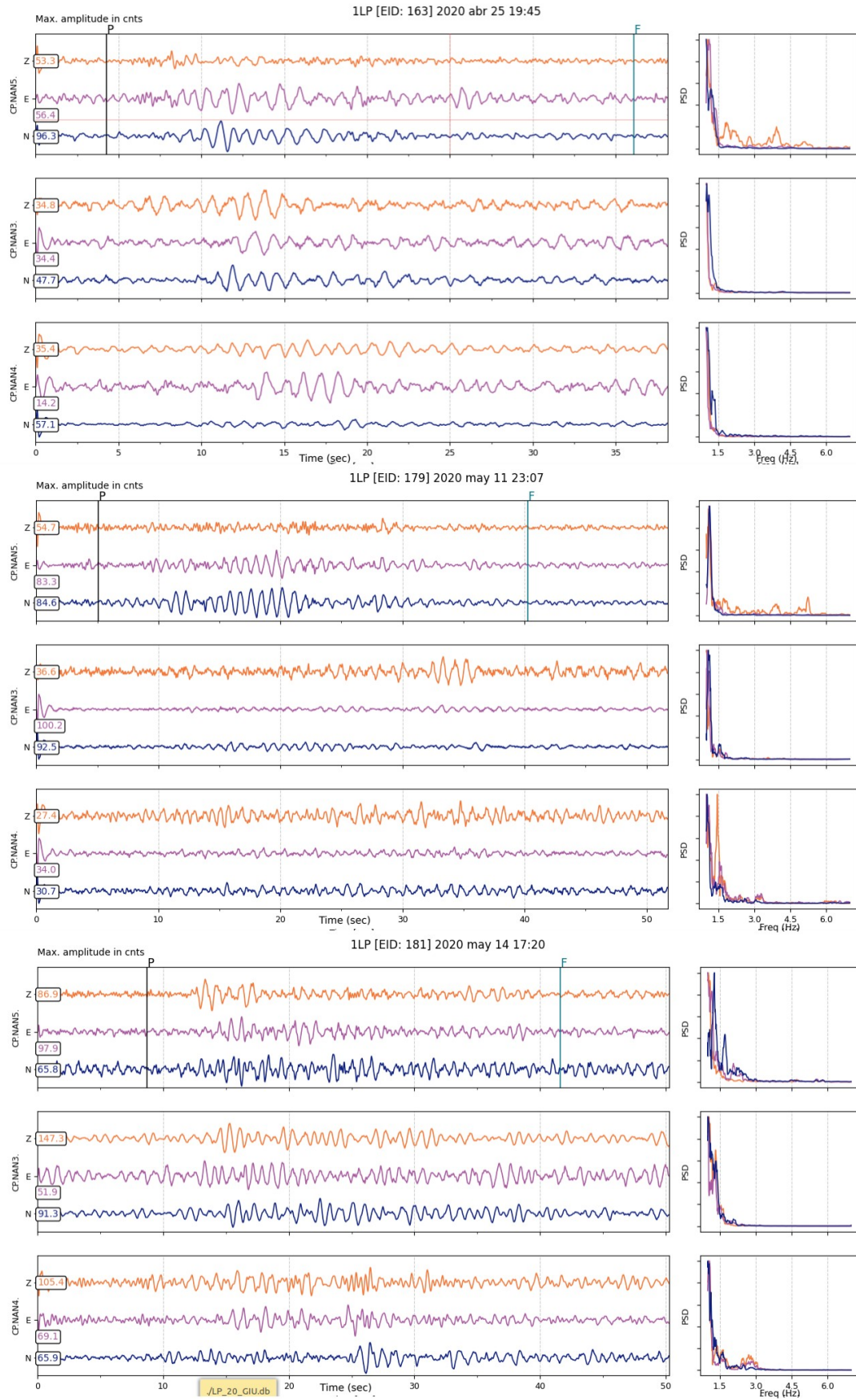


Figura 1: Señales de la familia 1 de LPs.

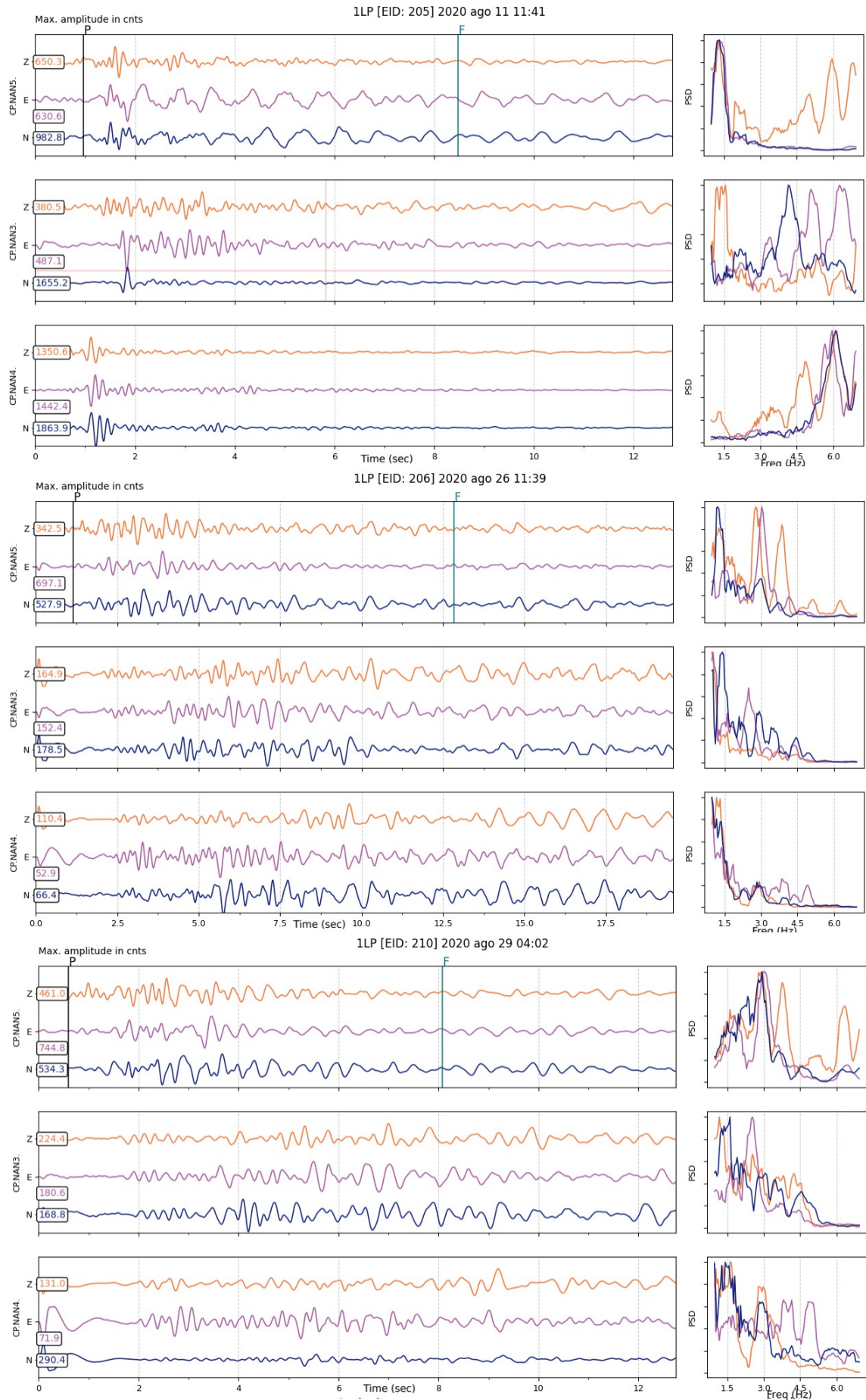


Figura 2: Señales de la familia 3 de LPs.

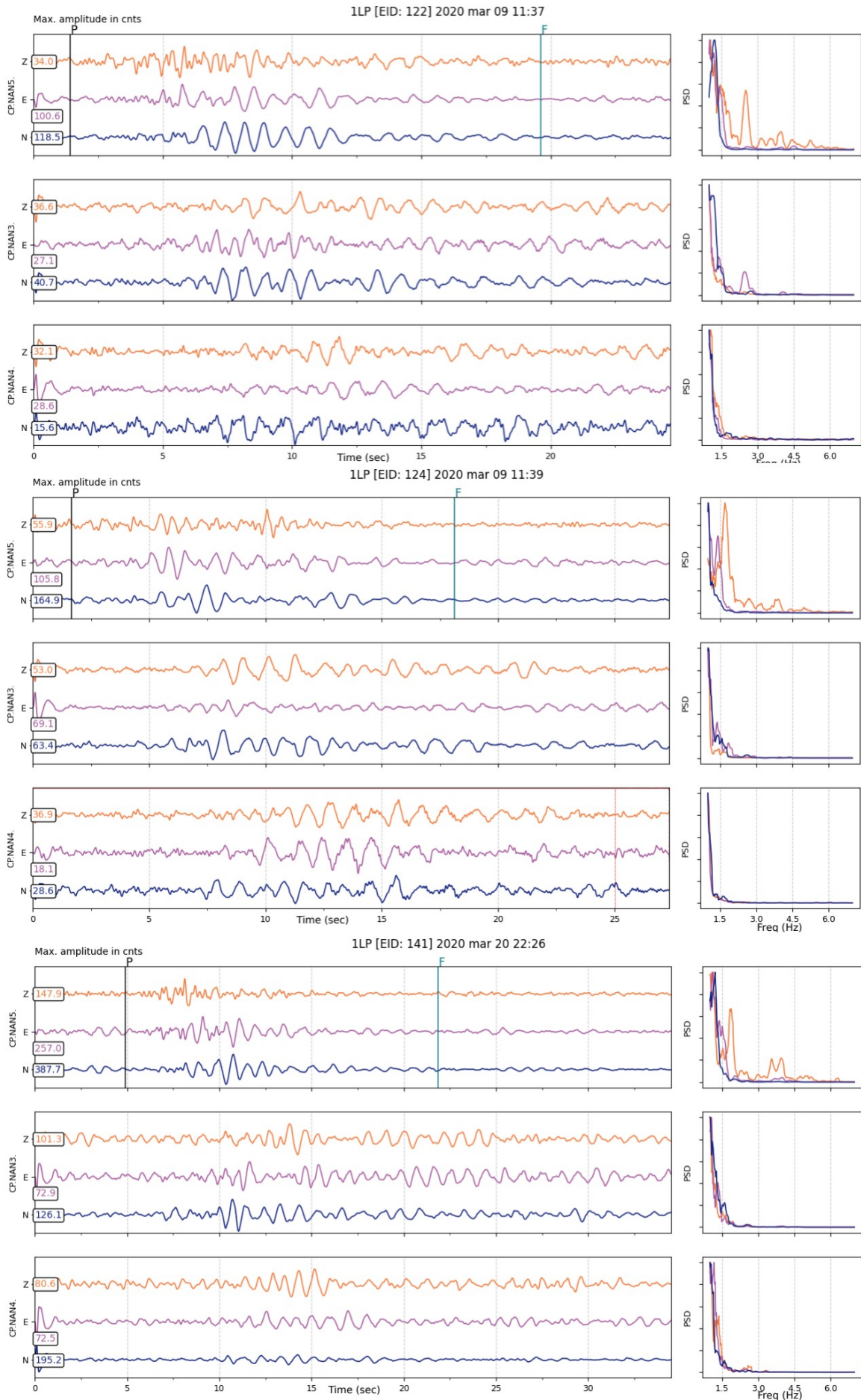


Figura 3: Ejemplos de señales de la familia 4 de LPs, en este caso, 122, 124 y 141.

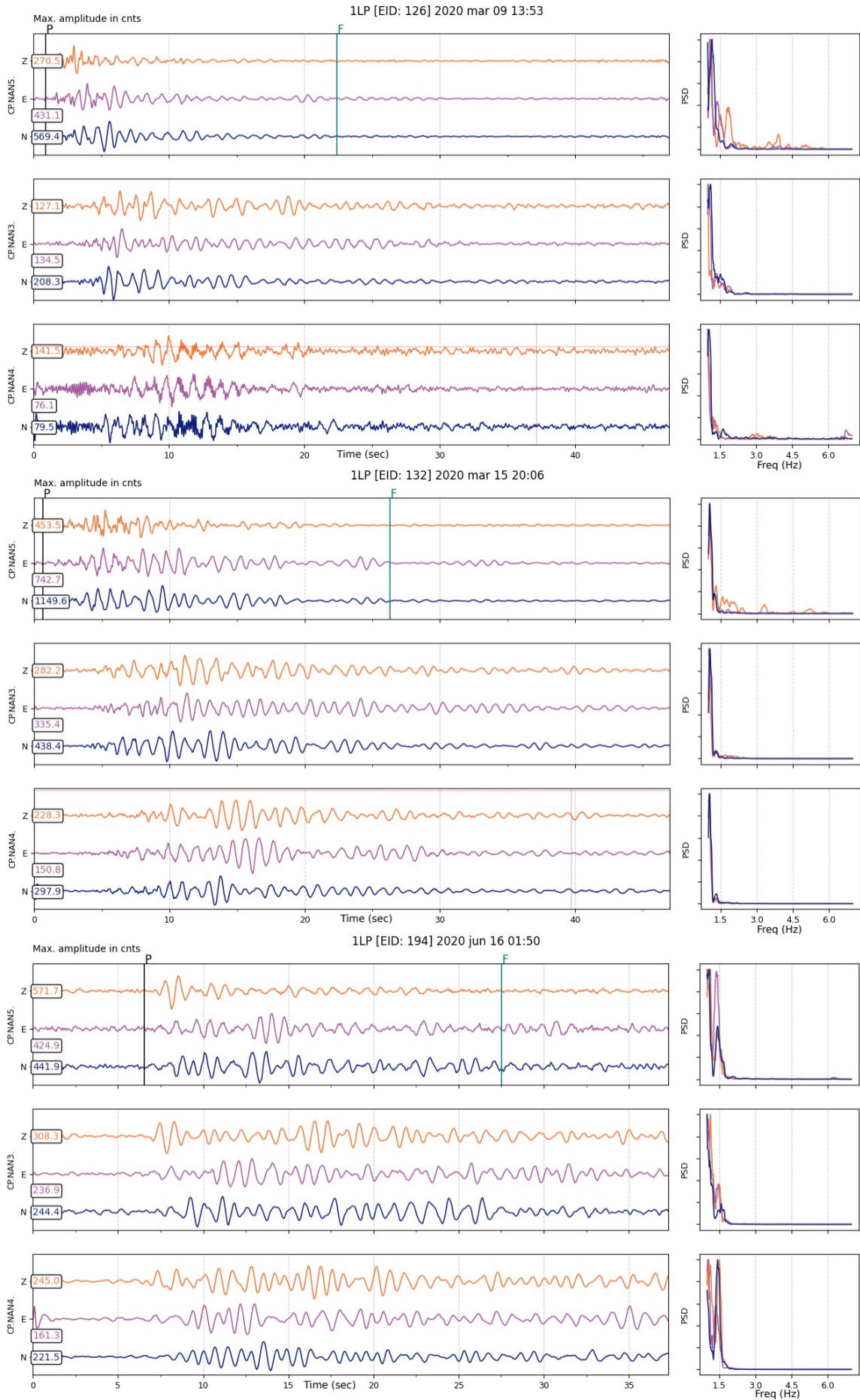


Figura 4: Señales de la familia 5 de LPs.

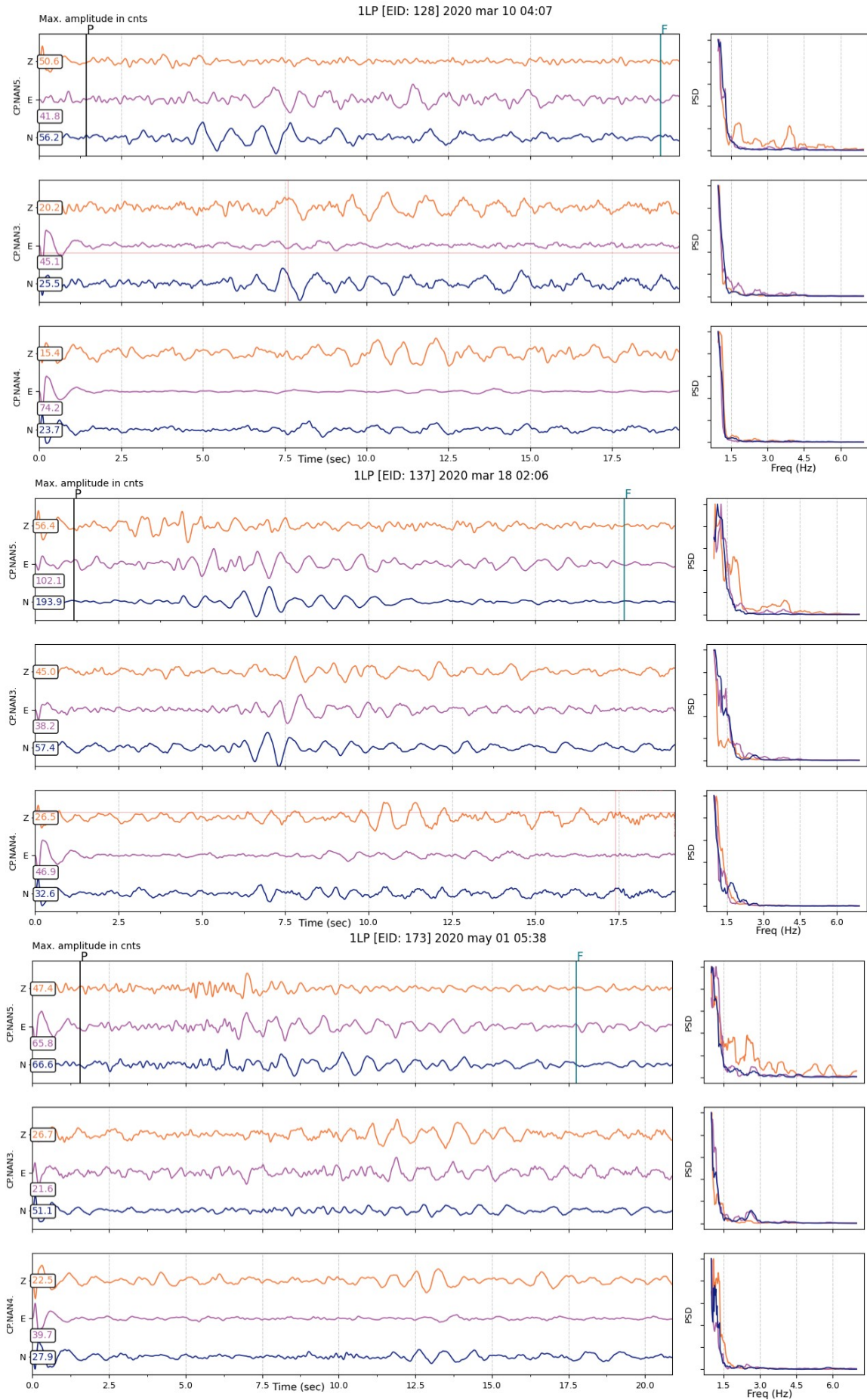


Figura 5: Señales de la familia 6 de LPs.

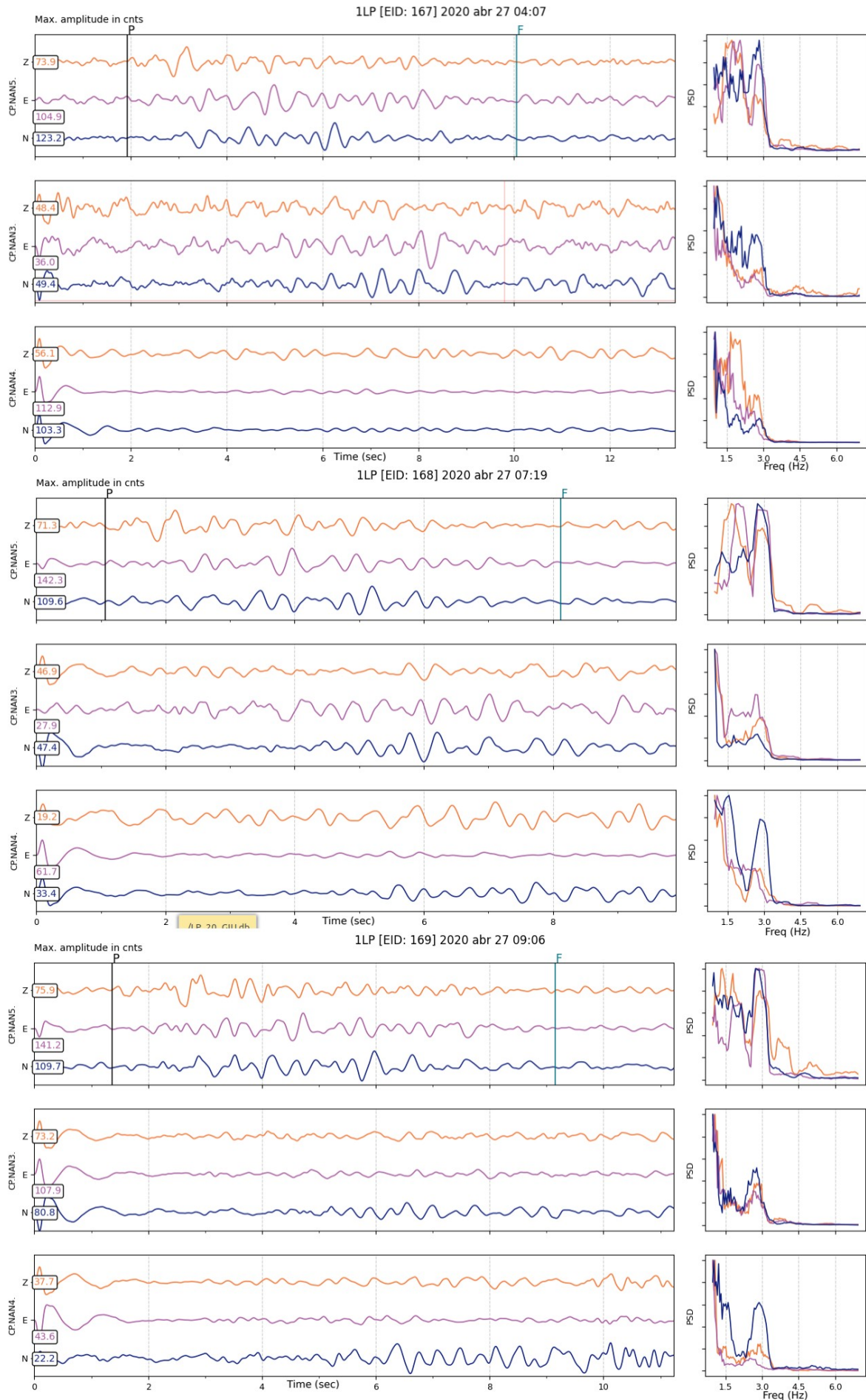


Figura 6: Señales de la familia 7 de LPs.



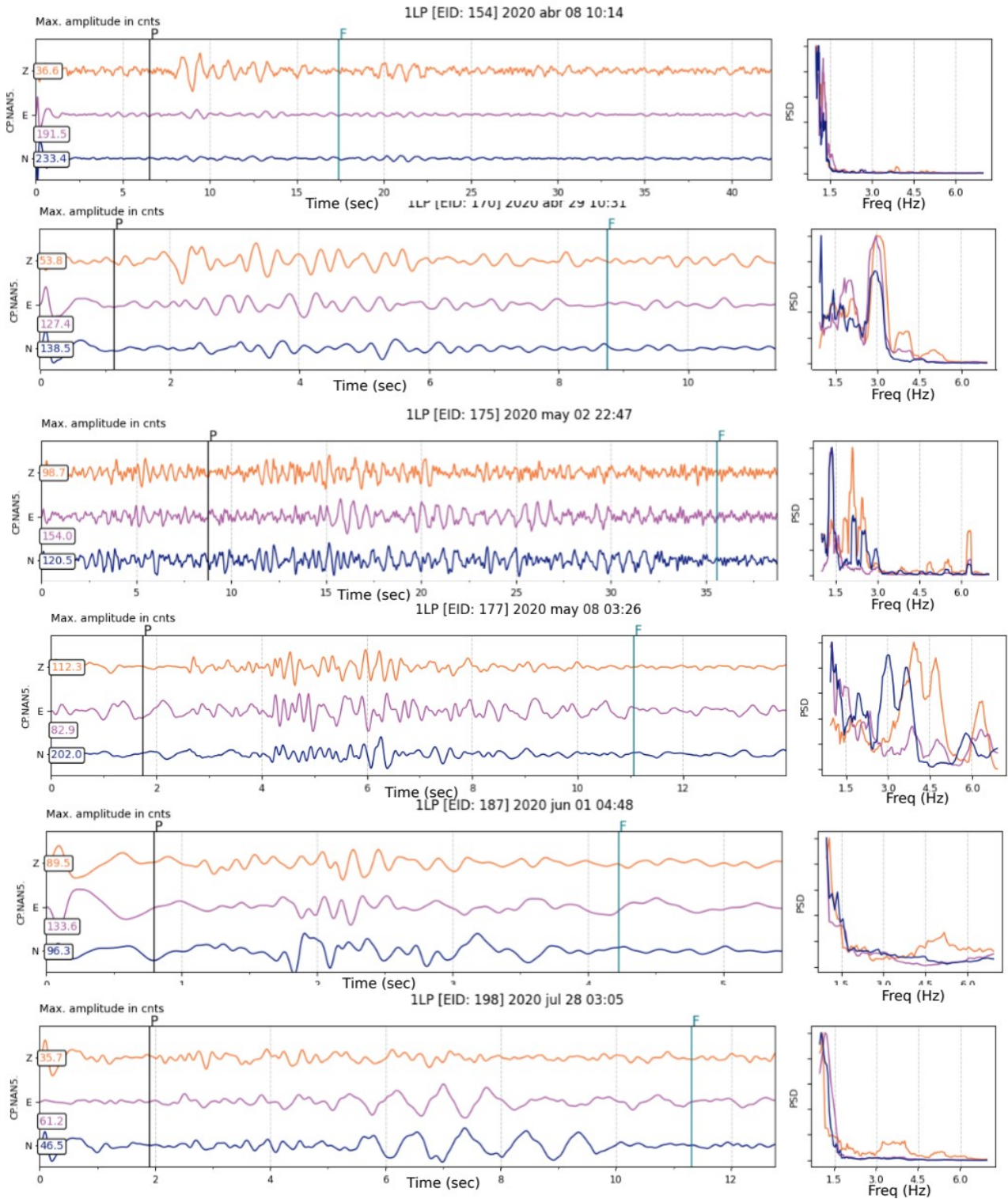
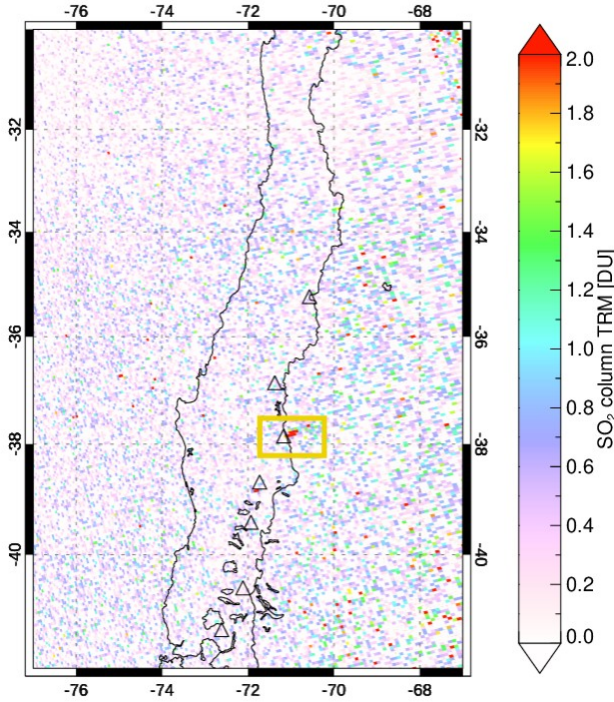


Figura 7: Ejemplos de eventos LP que no fueron agrupados en ninguna familia.

Sentinel-5P/TROPOMI - 08/10/2020 17:29-19:13 UT

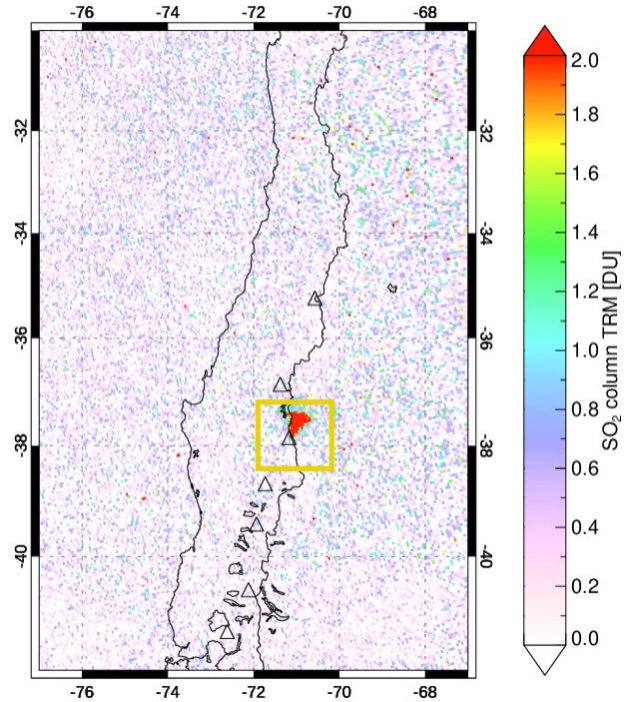
SO<sub>2</sub> mass: 0.0000 kt; SO<sub>2</sub> max: 23.72 DU at lon: -76.22 lat: -35.98 ; 19:12UTC



Data: BIRA-IASB/DLR/ESA/EU Copernicus Program

Sentinel-5P/TROPOMI - 08/11/2020 18:51-18:54 UT

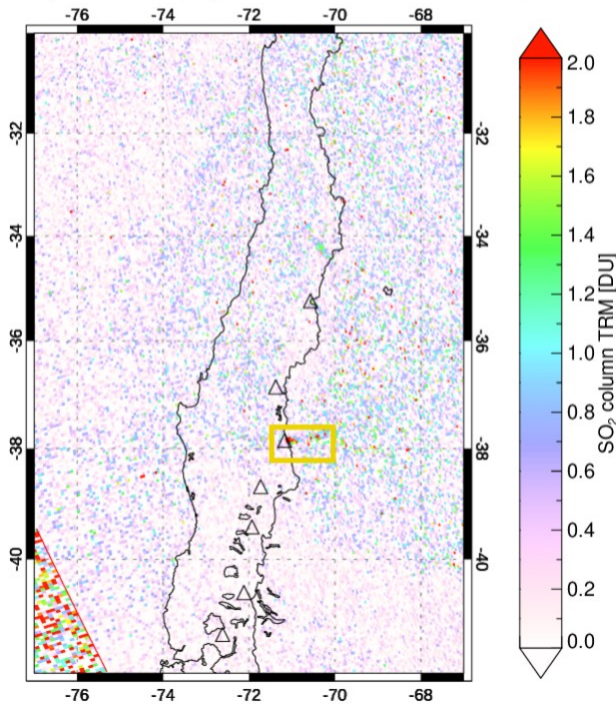
SO<sub>2</sub> mass: 0.2172 kt; SO<sub>2</sub> max: 15.13 DU at lon: -76.79 lat: -30.92 ; 18:54UTC



Data: BIRA-IASB/DLR/ESA/EU Copernicus Program

Sentinel-5P/TROPOMI - 08/12/2020 18:32-20:13 UT

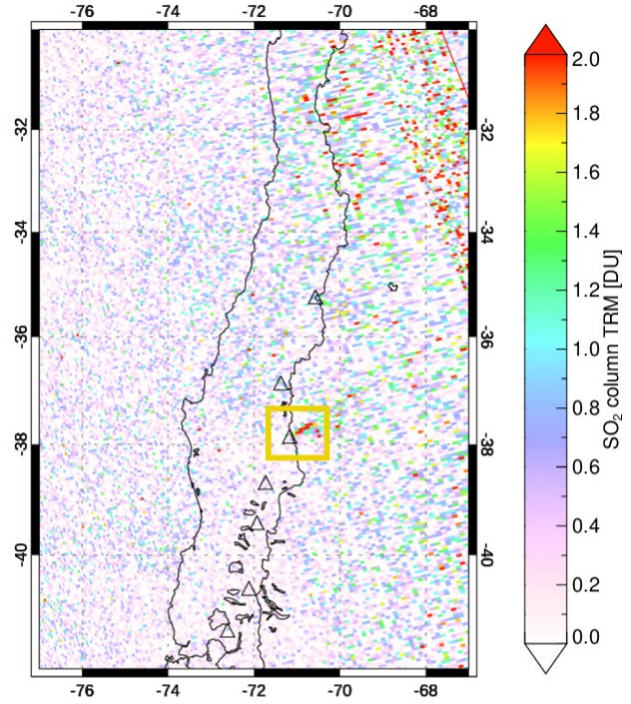
SO<sub>2</sub> mass: 0.0316 kt; SO<sub>2</sub> max: 27.02 DU at lon: -67.52 lat: -30.54 ; 18:35UTC



Data: BIRA-IASB/DLR/ESA/EU Copernicus Program

Sentinel-5P/TROPOMI - 08/15/2020 17:36-19:19 UT

SO<sub>2</sub> mass: 0.0000 kt; SO<sub>2</sub> max: 62.69 DU at lon: -71.03 lat: -31.73 ; 17:39UTC

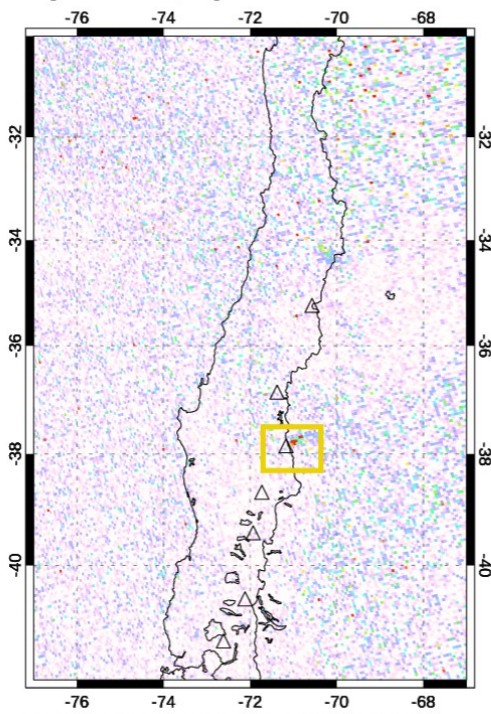


Data: BIRA-IASB/DLR/ESA/EU Copernicus Program

(sigue a continuación)

Sentinel-5P/TROPOMI - 08/16/2020 18:57-19:01 UT

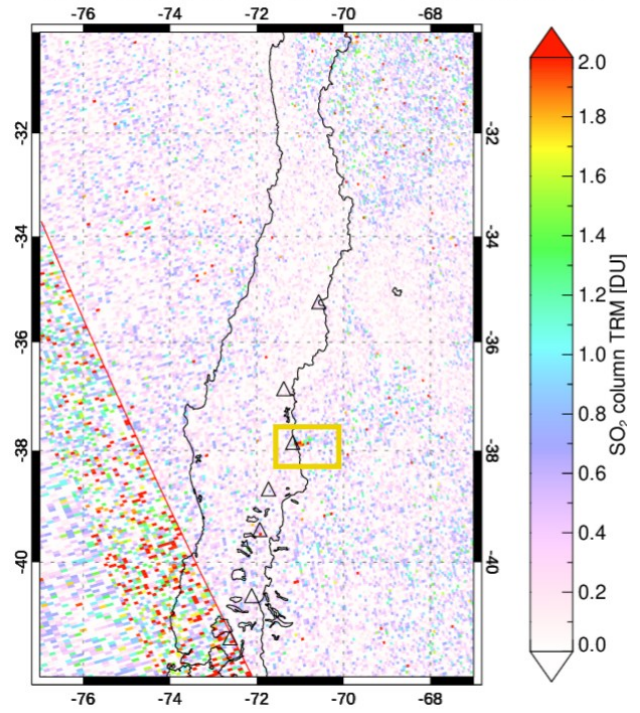
SO<sub>2</sub> mass: 0.0211 kt; SO<sub>2</sub> max: 19.93 DU at lon: -69.63 lat: -40.88 ; 18:57UTC



Data: BIRA-IASB/DLR/ESA/EU Copernicus Program

Sentinel-5P/TROPOMI - 08/18/2020 18:19-20:02 UT

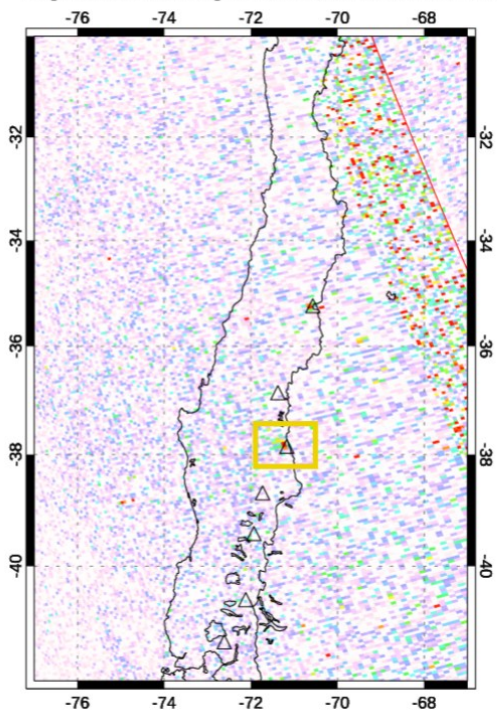
SO<sub>2</sub> mass: 0.0150 kt; SO<sub>2</sub> max: 9.35 DU at lon: -67.96 lat: -33.55 ; 18:22UTC



Data: BIRA-IASB/DLR/ESA/EU Copernicus Program

Sentinel-5P/TROPOMI - 08/20/2020 17:42-19:26 UT

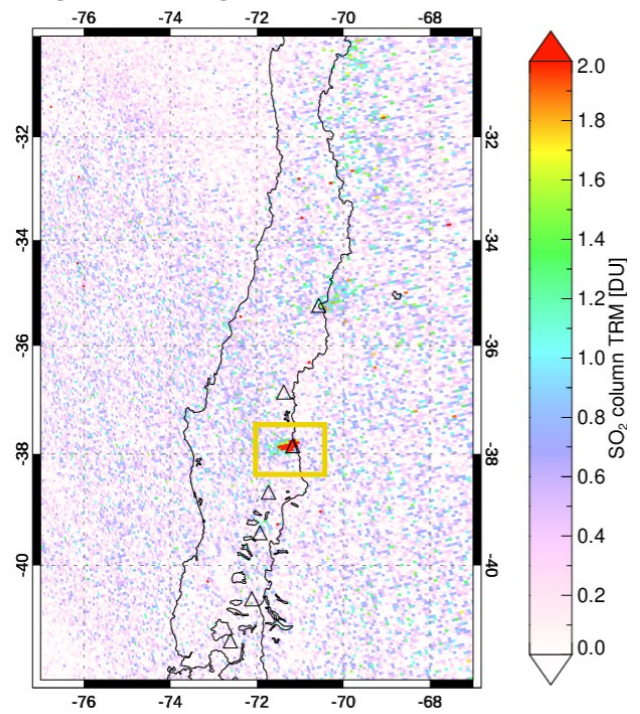
SO<sub>2</sub> mass: 0.0000 kt; SO<sub>2</sub> max: 8.53 DU at lon: -71.36 lat: -31.62 ; 17:45UTC



Data: BIRA-IASB/DLR/ESA/EU Copernicus Program

Sentinel-5P/TROPOMI - 08/21/2020 17:23-19:07 UT

SO<sub>2</sub> mass: 0.1099 kt; SO<sub>2</sub> max: 15.91 DU at lon: -67.86 lat: -30.74 ; 17:26UTC



Data: BIRA-IASB/DLR/ESA/EU Copernicus Program

(sigue a continuación)

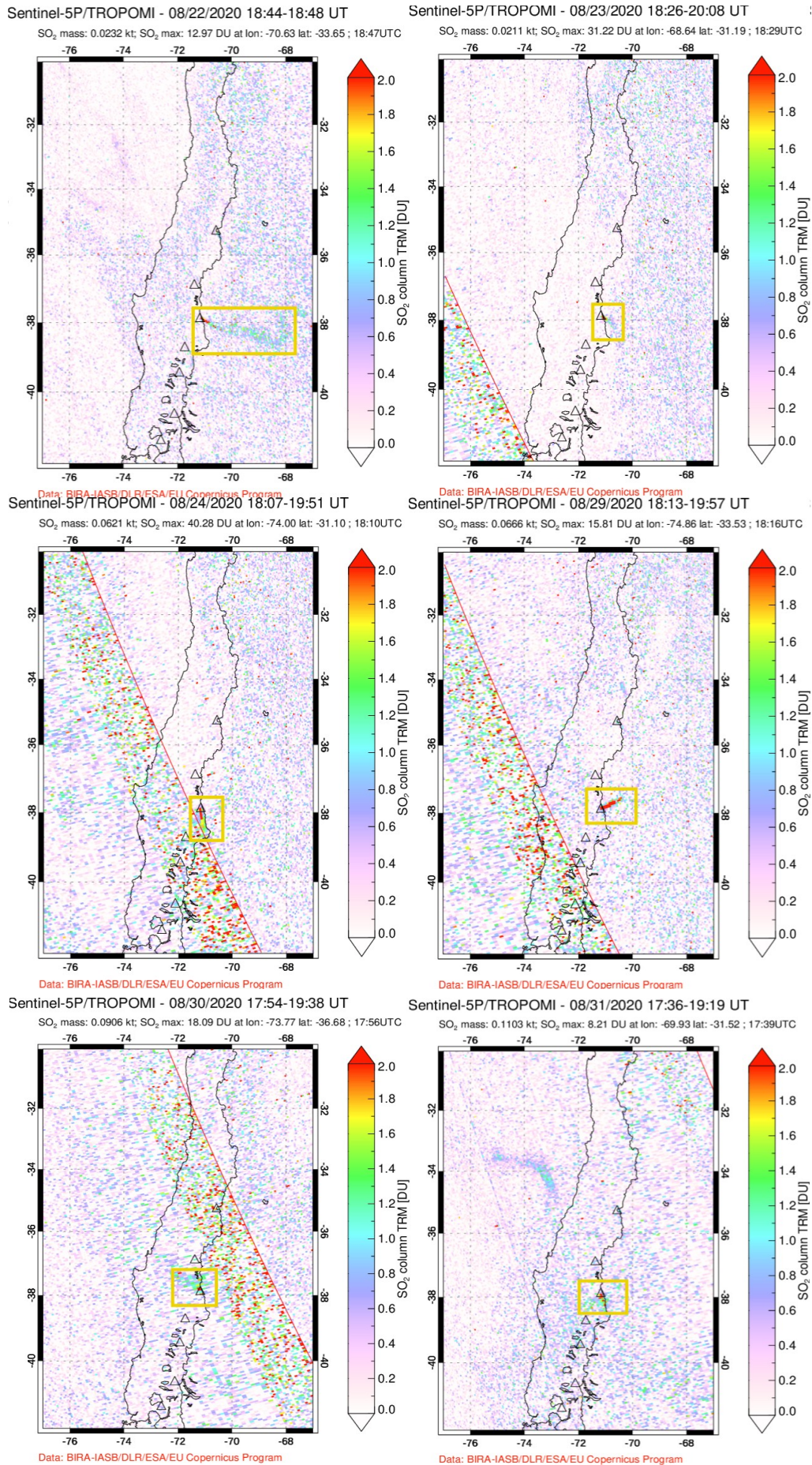


Figura 8: Imágenes satelitales TROPOMI mostrando la variación de anomalía de SO<sub>2</sub> en el mes de agosto del 2020.

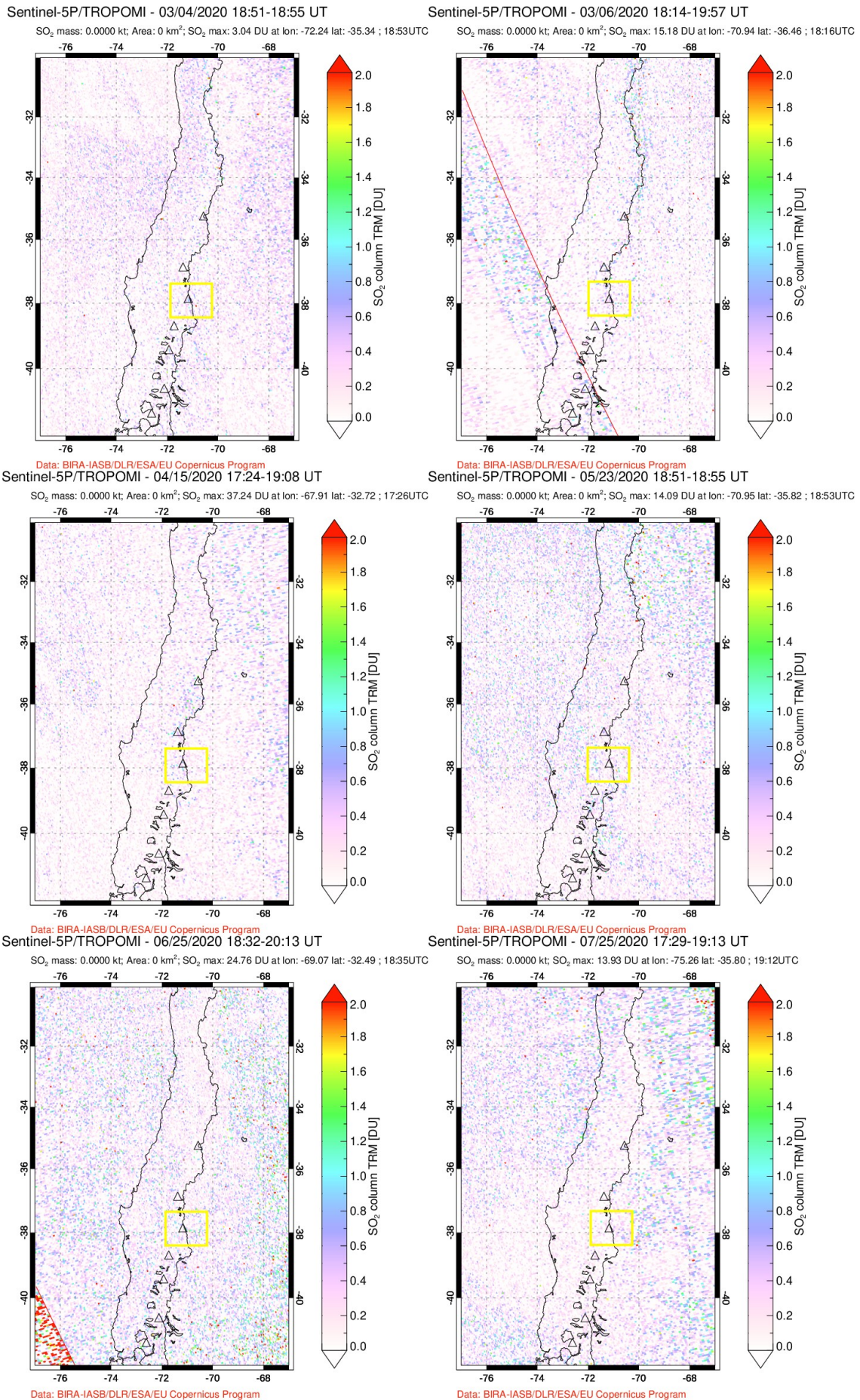


Figura 9: Imágenes satelitales TROPOMI. En amarillo se recuadran los ejemplos del volcán Copahue sin anomalía de SO<sub>2</sub>.