



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD EN LA ZONA DE FALLA LIQUIÑE-OFQUI ENTRE LOS 43°S-46°S

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA
MARIELA FERNANDA GUTIÉRREZ ORMAZÁBAL

PROFESOR GUÍA
SERGIO RUIZ TAPIA
PROFESOR CO-GUÍA
MIGUEL SÁEZ ARIAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
GABRIEL EASTON VARGAS
FRANCISCO PASTÉN ARAYA

SANTIAGO DE CHILE
2021

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Geóloga
POR: Mariela Fernanda Gutiérrez Ormazábal
FECHA: 08 de noviembre de 2021
PROFESOR GUÍA: Sergio Ruiz Tapia

ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD EN LA ZONA DE FALLA LIQUIÑE-OFQUI ENTRE LOS 43°S-46°S

La Región de Aysén se caracteriza por su geografía con cumbres sobre los 3000 [m] y por islas cortadas por fiordos, por su cercanía al punto triple que se encuentra frente a la Península de Taitao, además por su sistema estructural más importante que es la Zona de Falla Liquiñe Ofqui (ZFLO) y el volcanismo que se encuentra directamente relacionado con la ZFLO. En la zona ha habido terremotos de gran magnitud, el más contemporáneo fue el terremoto del 2007 ocurrido en el fiordo Aysén, que partió como un enjambre sísmico el 23 de enero y que alcanzó su magnitud máxima de 6.2 Mw el 21 de abril, provocando deslizamiento de masas de tierra, tsunamis y destrucción en salmoneras, además de pérdidas humanas. Su origen fue tectónico y está relacionado directamente con la ZFLO.

El objetivo principal de esta investigación fue determinar el origen y contexto geológico de la sismicidad para el año 2017 en la Región de Aysén, tanto su distribución como profundidad, poniendo mayor énfasis en la ZFLO dado a que se ha generado sismos de gran magnitud como el terremoto del 2007. La hipótesis que se planteó fue que la sismicidad está asociada a la actividad tectónica de la ZFLO y volcánica de la zona.

Para el análisis de la sismicidad se utilizó un total de 466 eventos sísmicos correspondientes al año 2017, obtenidos por el Centro Sismológico Nacional y el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur. Se confeccionó un catálogo sísmico utilizando el programa SEISAN para la localización de hipocentros, se calculó la magnitud para cada evento para luego elaborar histogramas para analizar su distribución y se graficaron mapas y perfiles para determinar la distribución y profundidad de los eventos.

Los resultados obtenidos marcan un rango de profundidad que llegan hasta los 197 km, concentrándose en profundidades menores a 25 km. Se identificaron 4 agrupaciones sísmicas: Cercano al volcán Cay cuyo origen es tectono-magmático; en el fiordo Aysén también de origen tectono-magmático; cercano al volcán Hudson con origen volcánico; cercano a la localidad de Quellón que corresponden a réplicas del terremoto del 2017 en Chiloé. A partir de las profundidades se concluye que el límite frágil - dúctil de la corteza en la región es heterogénea, en el fiordo Aysén el límite se encuentra entre los 10-12 [km] aprox. y en los volcanes Cay y Hudson estaría entre 27-25 km aprox. Además, se comprueba que la sismicidad está asociada tanto al volcanismo de la zona como a la ZFLO. Por último, se concluye también que el área del fiordo Aysén es altamente sísmica dado a que es una zona de transferencia de esfuerzos entre la rama principal de la ZFLO con las fallas NNE.



*No dejes de soñar,
No dejes la creatividad de lado,
El arte y la sabiduría van de la mano.*

A mi familia y amigos.

AGRADECIMIENTOS

Nunca he sido demasiado buena con las palabras. Siempre he sido de plasmar mis sentimientos en acciones, en arte, en mis dibujos y canciones. Sin embargo, aunque no sepa expresar verbalmente mi sentir, siempre he acompañado a todas las personas que han estado conmigo, porque los quiero y son lo máximo para mí.

Quiero partir agradeciendo a mi familia, mis papás y mis hermanos, quienes han estado conmigo compartiendo día a día, viendo series, jugando videojuegos, comentándome sus ideas, riéndonos y que han estado conmigo preocupándose cuando he tenido días lluviosos. A mi hermana Javiera, a veces pienso que el tiempo no fue suficiente, espero haber hecho tus días más felices cuando te cantaba junto a mi guitarra desafinada. A mi abueli Cheli y mi tata Raúl, que pasé a ser casi su hija y que me recibieron con mucho amor en su casa por los años que estuve en la universidad. A mi abueli Carmen, salí igual de peleadora, aun así, la quiero y echo de menos. Agradezco a mis tíos, a mi bisabuela, a mis primos que han tenido fe en mí.

Quiero agradecer a mi grupo de amigos de cuando éramos mechones, Darío, Dani, Nico, esas fiestas alocadas y las carcajadas fueron geniales. Agradecer Juan P. por ser el más apañador, por ser casi un hermano, por esas tardes de fotografía (donde te hacía mi modelo de fotos) y esos covers de Mazzy Star con tu guitarra, te agradezco por siempre escucharme y ser un apoyo. Agrego al Mati (ex chasca) también amigos de cuando éramos mechones, aún nos falta concretar algún cover. También menciono a Sergio, algún día echaremos partidas de AoE.

A los chicos de geo (Carlos, Abuelo, Juan V., Juanma, Keno, Pili, Rodri, Ale, Javi Q, entre muchos más), las tardes de gatitos explosivos los días viernes no los olvidare (y ganarle al abuelo). Mención especial al Migue G., que pasaste a ser uno de mis mejores amigos, siempre apañando a tus salidas locas de trekking, siempre soportando mis quejas por ser demasiado floja para caminar. Estará en mi memoria el recuerdito que dejamos en el refugio cuando fuimos al cajón. Espero que sigamos con nuestras salidas y que la amistad perdure.

Agradezco a mi guía, co-guías y comisión, a los profesores Sergio y Gabriel, a Miguel y Francisco por sus feedbacks que hicieron que mi trabajo fuese mucho más completo, por responder siempre a mis dudas y por motivarme a investigar en el campo de la Geología en conjunto con sismología. Les agradezco por ayudarme a completar este proceso, por guiarme en este trabajo y tener buena disposición.

Ha habido muchas más personas que poco a poco se han vuelto mis amigos, Rubén con nuestras salidas improvisadas en bicicleta o caminando por el parque, Diego con su humor tan extraño que igual me hace reír, y otros amigos más, quiero agradecerles también, espero que la amistad siga creciendo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación del estudio y formulación del problema	1
1.2. Ubicación y Accesos del Área de Estudio	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. General	5
1.3.2. Específicos	5
1.4. Hipótesis	5
2. Antecedentes Geológicos	6
2.1. Geología Regional	6
2.1.1. Unidades Morfológicas	6
2.1.2. Estratigrafía y Rocas Intrusivas	8
2.2. Geología Local	9
2.3. Geología Estructural y Tectónica	10
2.3.1. Zona de Falla Liquiñe - Ofqui	12
2.4. Volcanismo	14
2.5. Sismos Históricos	16
2.5.1. Terremoto en Aysén 2007	16
2.5.2. Terremoto en Melinka 2016	18
2.6. Estudios Previos Relacionados a la Sismicidad de la Zona	19
2.6.1. Investigación de Lange et al. (2008)	19
2.6.2. Investigación de Pérez-Estay et al. (2020)	20
2.6.3. Investigación de Vargas et al. (2013)	21
2.6.4. Investigación de Villalobos et al. (2020)	23
2.6.5. Investigación de Sáez et al. (20xx)	24
3. Metodología	27
3.1. Obtención de los Datos	27
3.2. Confección del Catálogo Sísmico	29
3.3. Cálculo de Magnitudes	30
3.4. Generación de Mapas y Perfiles	32

4. Resultados	33
4.1. Localización de Hipocentros y Generalidades	33
4.2. Distribución de los Eventos, Profundidad y Magnitudes	35
5. Análisis e Interpretación de Resultados	43
6. Conclusión	46
6.1. Conclusiones Generales	46
6.2. Conclusiones Específicas	46
6.3. Limitaciones y Proyecciones	47
Bibliografía	49
A. Coordenadas de los hipocentros de los eventos sísmicos	53
B. Gráficos Complementarios de los Eventos Sísmicos	58

Índice de figuras

1.1. Sismicidad en Chile durante el año 2016, más perfiles sísmicos a lo largo del país. Extraído del Centro Sismológico Nacional (CSN).	3
1.2. Ubicación de la zona de estudio y distribución de las estaciones sismológicas más volcanes de la zona. Carretera Austral esta simbolizado en naranja, y accesos extras de color calipso.	4
2.1. Mapa con las divisiones morfológicas de la Región de Aysén. Modificado de Niemeyer et al. (1984).	7
2.2. Mapa con las unidades geológicas y los diferentes segmentos que componen la cordillera patagónica. Extraído de Ramos and Ghiglione (2008).	9
2.3. Mapa Geología Local, Modificado de Thomson (2002).	10
2.4. Mapa de las placas tectónicas. Extraído de Thomson (2002).	11
2.5. Esquema de la posición de la dorsal Chilena con respecto a la fosa a través de los años. Extraído de Cande and Leslie (1986).	12
2.6. Mapa regional de la ZFLO. Puntos corresponden a los volcanes cuaternarios y tamaño es proporcional con el volumen de lava eruptado. Extraído de Cembrano et al. (1996).	13
2.7. Esquema tridimensional de la ZFLO interpretado como una flor positiva transpresional. Extraído de Thomson (2002).	14
2.8. Mapa del volcán Mate Grande donde se visualiza su caldera y el cono parcialmente colapsado debido a la acción de la ZFLO. Extraído de De Pascale et al. (2021).	16
2.9. Mapa con los eventos sísmicos más importantes dentro de la zona de estudio. Coordenadas sacadas de Barrientos and CSN (2016), Lange et al. (2008) y Agurto et al. (2012).	17
2.10. Mecanismos focales del sismo ocurrido en el Fiordo Aysén 2007. Extraído de Mora (2009)	18
2.11. Eventos encontrados cerca de Hornopirén con sus mecanismos focales tipo strike-slip. Los hipocentros tienen profundidades menores de 10[km]. Extraído de Lange et al. (2008)	19
2.12. Mapa de los sismos encontrados con sus mecanismos focales. las profundidades de los eventos están sobre los 15 [km]. Extraído de Pérez-Estay et al. (2020).	20

2.13.	Mapa con las fallas principales del área del Fiordo Aysén. RCF: Falla Río Cuervo, PCF: Falla Punta Cola, RF: Falla Riesco, PMLYF: Falla Punta Mano - Lago Yulton, LPF: Falla Los Palos, LMF: Falla Lago Maullín, LYF: Falla Lago Yulton, RCOF: Falla Río Condor, QF: Falla Quitralco, RBF: Falla Río Blanco. Extraído de Vargas et al. (2013)	22
2.14.	Perfil de reflexión sísmica con las unidades encontradas a profundidad y los dominios estructurales Río Cuervo (RCF), Quitralco (QF) y Punta Cola (PCF). Extraído de Villalobos et al. (2020).	23
2.15.	Migración sísmica del evento del 2007. Los diferentes colores corresponden a las fallas que tuvieron lugar en el terremoto. Extraído de Villalobos et al. (2020).	24
2.16.	Modelo en profundidad de las fallas Quitralco, Río Cuervo y Punta Cola. Extraído de Villalobos et al. (2020).	24
2.17.	Zoom de la zona del Fiordo Aysén y como se disponen los sismos en las fallas del área. Datos corresponden al catálogo de Sáez para los años 2018 - 2019 y shapes de las fallas extraídas de Vargas et al. (2013) y Villalobos et al. (2020). QF: Falla Quitralco, PCF: Falla Punta Cola, RCF: Falla Río Cuervo, PMLYF: Falla Punta Mano-Lago Yulton.	25
2.18.	Catálogo sísmico de los años 2018-2019 generado por Sáez en su continuidad con estudio de terremotos repetitivos.	26
3.1.	Diagrama donde se muestran los puntos mas importantes de la metodología.	27
3.2.	Ejemplo de sismograma de 3 componentes aplicado con un filtro. Cuenta con su respectiva localización de ondas P y S. Evento sísmico perteneciente a Enero 2017.	28
3.3.	Distribución espacial de las estaciones sísmicas.	28
3.4.	Visualización de la solución hipocentral en CMD.	29
4.1.	Estaciones sísmicas que estuvieron activa durante el año 2017.	34
4.2.	Distribución de los eventos en el tiempo. Mayor sismicidad en el mes de enero.	34
4.3.	Mapa de la distribución de eventos sísmicos.	36
4.4.	Distribución de la profundidad de los eventos totales con respecto a la longitud y latitud.	36
4.5.	Distribución de la profundidad de los eventos totales en los perfiles A-A', B-B' y C-C' señalados en la figura 4.3. Cada gráfico presenta un slab esquematizado de 30° de acuerdo con Lange et al. (2007). El eje de la profundidad se encuentra exagerado con respecto a la distancia.	37
4.6.	Distribucion espacial de los eventos y profundidad del cluster Maca-Cay. . .	38
4.7.	Distribucion espacial de los eventos y profundidad del cluster Fiordo Aysén.	39
4.8.	Distribucion espacial de los eventos y profundidad del cluster Hudson.	40
4.9.	Distribucion espacial de los eventos y profundidad del cluster Chiloé.	41
4.10.	Gráficos de frecuencias de las magnitudes encontradas.	42
B.1.	Histograma de las profundidades totales encontradas.	58
B.2.	Histograma de las magnitudes totales encontradas.	59

Índice de cuadros

3.1. Modelo de velocidad 1-D usado para la localización de sismos. Extraído de Agurto et al. (2012)	30
A.1. Tabla con los hipocentros de los eventos sísmicos calculados para el año 2017.	57

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación del estudio y formulación del problema

Este estudio tiene la finalidad de analizar la sismicidad en la zona de la Región de Aysén, específicamente en la Zona de Falla Liquiñe Ofqui. Chile, en la generalidad de su territorio, es un país altamente sísmico debido a la convergencia entre las placas de Nazca y Antártica con la Placa Sudamericana (Cisternas and Vera, 2008). Sin embargo, la tasa de sismicidad para la zona sur-austral es baja comparada con la sismicidad de la zona norte y centro (Madariaga, 1998). Esto queda ilustrado en la figura 1.1. El Centro Sismológico Nacional para el año 2016 registró que la sismicidad se concentra mayoritariamente en la zona norte-centro mientras que para la zona sur-austral se concentra la mayor parte en la extensión de la Dorsal Chilena. A pesar de su baja sismicidad, durante el transcurso del tiempo se han producido sismos de grandes magnitudes; el terremoto de Valdivia en 1960 es uno de los más conocidos, terremoto del 2010 en Cobquecura, terremoto del 2016 en Melinka, entre otros.

La zona sur, específicamente la Región de Aysén, tiene una geografía marcada por zonas de alto relieve con cumbres que pasan los 3000 [m] y sectores de relieve más suaves cortados por fiordos, por lo cual su acceso es difícil; debido a esto y a la falta de redes sismológicas permanentes en la zona, los datos y trabajos sismológicos son escasos. Además de poseer una geomorfología abrupta, tiene una de las características importantes que es el punto triple chileno, lugar donde marca la convergencia entre las placas Nazca, Antártica y Sudamericana y que está vinculada a la Zona de Fallas Liquiñe - Ofqui (ZFLO) (Cembrano et al. (1996), Cembrano et al. (2002), Forsythe and Nelson (1985)). La ZFLO es una falla de rumbo que incluye un dúplex y que abarca 1000 [km] de longitud, esta espacialmente ligada al Batolito Nor-Patagónico, con la cadena volcánica del Cuaternario y con las cuencas del Cenozoico temprano (Cembrano et al., 1996). La ZFLO representa un peligro geológico dado a que ya ha habido eventos sísmicos en el pasado de gran magnitud y que han generado catástrofes a nivel de daños a la infraestructura y pérdida de vidas humanas. Uno de los más conocidos es el terremoto de Aysén en el 2007; comenzó como un enjambre sísmico partiendo el 23 de enero con la primera señal de actividad sísmica, y el 21 de abril con el sismo principal de 6.2 Mw el cual provocó deslizamiento de masas de tierra y tsunami (Naranjo et al., 2009).

Se han realizado diversos estudios relacionados a la sismicidad de la ZFLO. Estudios como el de Lange et al. (2008) trabajaron con registros sísmicos de la zona sur entre los $41,5^{\circ}\text{S}$ - $43,5^{\circ}\text{S}$ en el que se han concluido que hay zonas de la ZFLO que pueden producir sismos de gran magnitud y que representarían un peligro sísmico para la región. Estudios como el de Pérez-Estay et al. (2020) han evaluado la actividad volcánica de la zona sur y la tectónica a partir de los registros sísmicos, generando un modelo tectónico de las fallas que facilitan el transporte de magma. Este estudio concluye que la zona de falla Puyuhuapi (correspondiente a una de las ramas de la ZFLO) es una estructura altamente sísmica. También la investigación de Villalobos et al. (2020) evidencia las fallas que dieron origen al terremoto de Aysén en el 2007, y que estas fallas son parte de la ZFLO.

Estudiar la sismicidad es necesario para la comprensión de los sistemas estructurales que configuran la región. La relevancia de este trabajo es poder aportar mayor información con respecto al Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui, estudiando la distribución espacial, la profundidad de los eventos y sus magnitudes, para ello se ha de construir un catálogo sísmico, mapas y perfiles. El alcance de este trabajo está acotado en la Región de Aysén entre los $43^{\circ}50'\text{S}$ y 46°S , los datos fueron otorgados por el Centro Sismológico Nacional y por el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur. Para el trabajo se contó con 11 estaciones y 466 eventos sísmicos. La generación del catálogo se hizo a través del programa SEISAN para las localizaciones de los hipocentros y los mapas más perfiles con el programa ArcGIS.

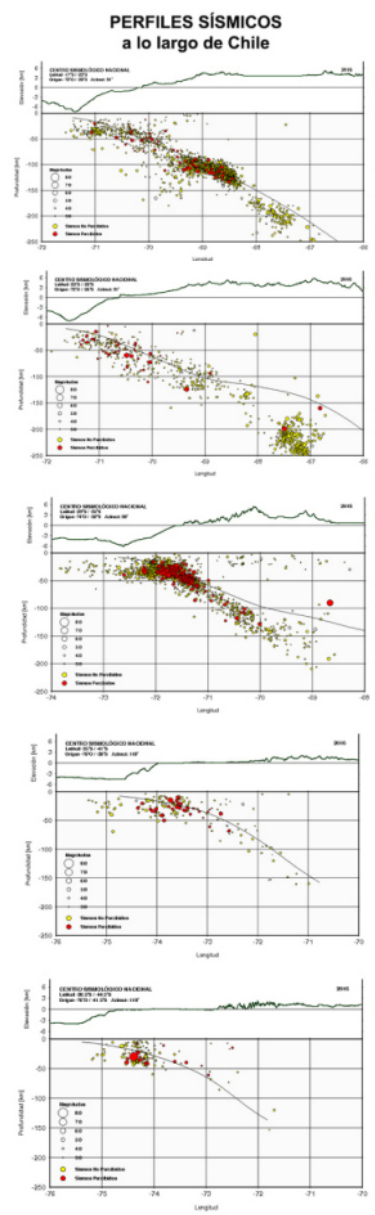
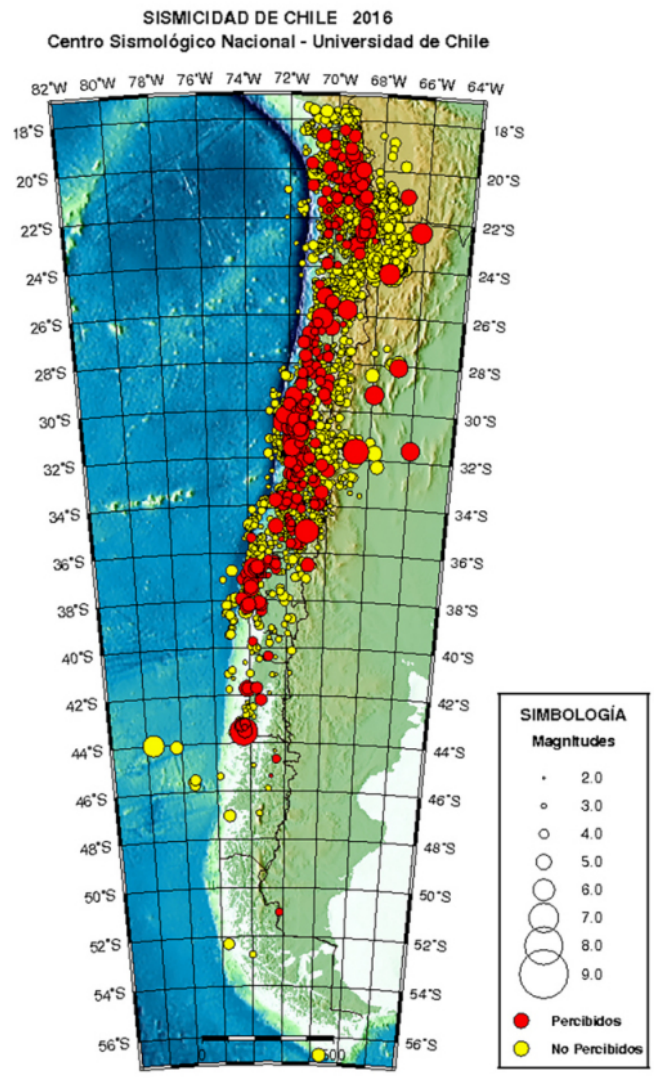


Figura 1.1: Sismicidad en Chile durante el año 2016, más perfiles sísmicos a lo largo del país. Extraído del Centro Sismológico Nacional (CSN).

1.2. Ubicación y Accesos del Área de Estudio

El área de estudio se localiza en la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, acotada por la distribución de las estaciones sismológicas ($43^{\circ}50'S$ - $46^{\circ}S$). Las estaciones se encuentran en las comunas de Aysén, Coyhaique, Cisnes y Río Ibáñez (Cordillera Principal y Pre cordillera). Las formas de acceder al lugar son por red vial, marítimo y aéreo: la red vial principal es la Carretera Austral (CH-7) que comienza en Puerto Montt y termina en Villa O'Higgins; el puerto principal es Puerto Chacabuco que traslada carga y pasajeros desde Puerto Montt, Chaiten, Chonchi y Quellón; el aeropuerto principal es Balmaceda ubicado en la comuna de Coyhaique. También cabe destacar la distribución de los volcanes en la zona que se encuentran principalmente en la Cordillera Principal, en las comunas de Cisnes y Aysén.

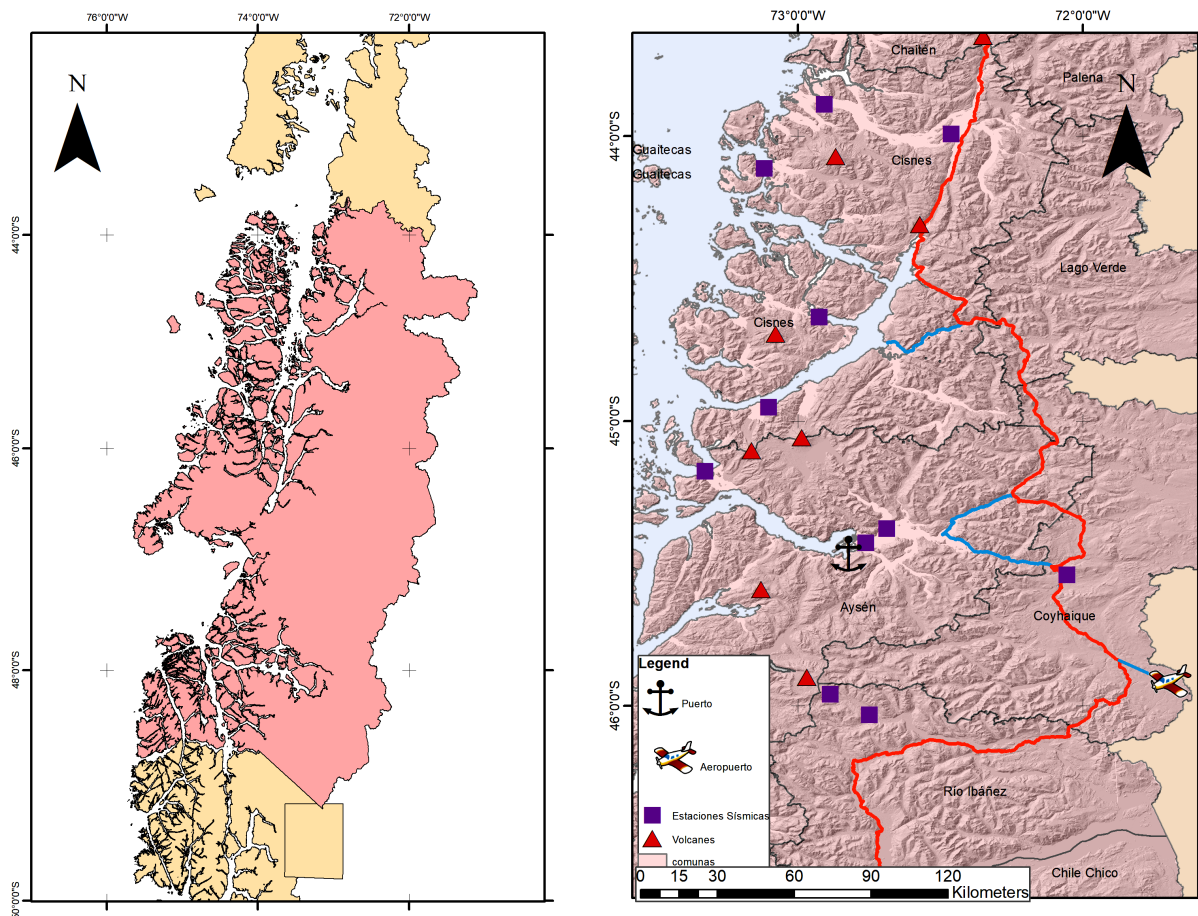


Figura 1.2: Ubicación de la zona de estudio y distribución de las estaciones sismológicas más volcanes de la zona. Carretera Austral esta simbolizado en naranja, y accesos extras de color calipso.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Determinar el origen y contexto geológico de la sismicidad de la Región de Aysén, estudiando su distribución y profundidad.

1.3.2. Específicos

- De acuerdo con la profundidad de los eventos sísmicos, determinar el límite frágil-dúctil de la corteza en distintos contextos geológicos de la región.
- Determinar la distribución espacial de los eventos y establecer agrupaciones sísmicas.
- Determinar los tipos de sismos encontrados e identificar la génesis de los eventos y relacionarlo con el contexto estructural y volcánico de la zona.

1.4. Hipótesis

La sismicidad estaría asociado a la actividad tectónica de la Zona de Falla Liquiñe - Ofqui y a la actividad volcánica de la zona.

Capítulo 2

Antecedentes Geológicos

Esta sección trata sobre los aspectos geológicos y sísmicos más relevantes de la Región de Aysén. Se caracteriza la geología regional del sector, dividiéndose entre unidades morfológicas y estratigrafía general de toda la zona sur. Luego se describe la geología local de la Región de Aysén, dando aspectos importantes sobre la estratigrafía de la zona de estudio. Además, se detalla sobre la tectónica y sistemas estructurales importantes. En este punto específicamente se explica sobre La Zona de Falla Liquiñe Ofqui y sus principales características. También sobre el volcanismo asociado y su vinculación con la Zona de Falla Liquiñe Ofqui. Junto a ello se describe sobre el historial sísmico de la zona y estudios previos que se han hecho sobre la sismicidad del área y su relación con la ZFLO.

2.1. Geología Regional

2.1.1. Unidades Morfológicas

La geomorfología del sector está modelada, en primer lugar, por la tectónica, seguido por procesos glaciares, fluviales y remociones en masa. De acuerdo con la Hoja Península de Taitao y Puerto Aysén (Niemeyer et al., 1984), se describen 4 divisiones morfológicas de rumbo N-S. De este a oeste son: Zona Extra andina, Pre cordillera, Cordillera Principal y Zona de los Archipiélagos:

- **Zona Extra andina:** Solo está parcialmente representada en Chile y tiene mayor desarrollo en Argentina. Es una zona de escaso relieve, con alturas que van desde 400 a 700 [m], formada principalmente por depósitos glaciales, fluvioglaciares y glaciolacustres.
- **Pre cordillera:** Zona de transición entre la Zona Extra andina y Cordillera Principal, con alturas que no sobrepasan los 2000 [m]. Se emplazan grandes lagos de origen glacial como Elizalde, Paloma y General Carrera, y vierten sus aguas al Océano Pacífico a través de los ríos Aysén y Baker. Las rocas más antiguas que se pueden encontrar en esta zona corresponde a rocas metamórficas del Paleozoico. Las rocas meso-cenozoicas corresponden a rocas volcanoclásticas, volcánicas y sedimentarias marinas y continentales.

- **Cordillera Principal:** Zona de alto relieve, con cumbres sobre 3000 [m], en esta unidad se emplaza Campo de Hielo Patagónico Norte y se encuentra dividida por valles de origen glacial y fluvial, además por fiordos. Las rocas que afloran en esta unidad corresponden a plutones graníticos y a centros volcánicos del Cenozoico superior.
- **Zona de los Archipiélagos:** Es una zona con 100-150 [km] de ancho y alturas que no pasan de los 1000 [m]. Está formado por islas de suave relieve, separadas por fiordos de dirección E-W y N-S. En esta unidad afloran rocas metamórficas del Paleozoico, plutones graníticos del Meso-cenozoico, rocas volcanosedimentarias Mesozoicas y rocas sedimentarias Cenozoicas.

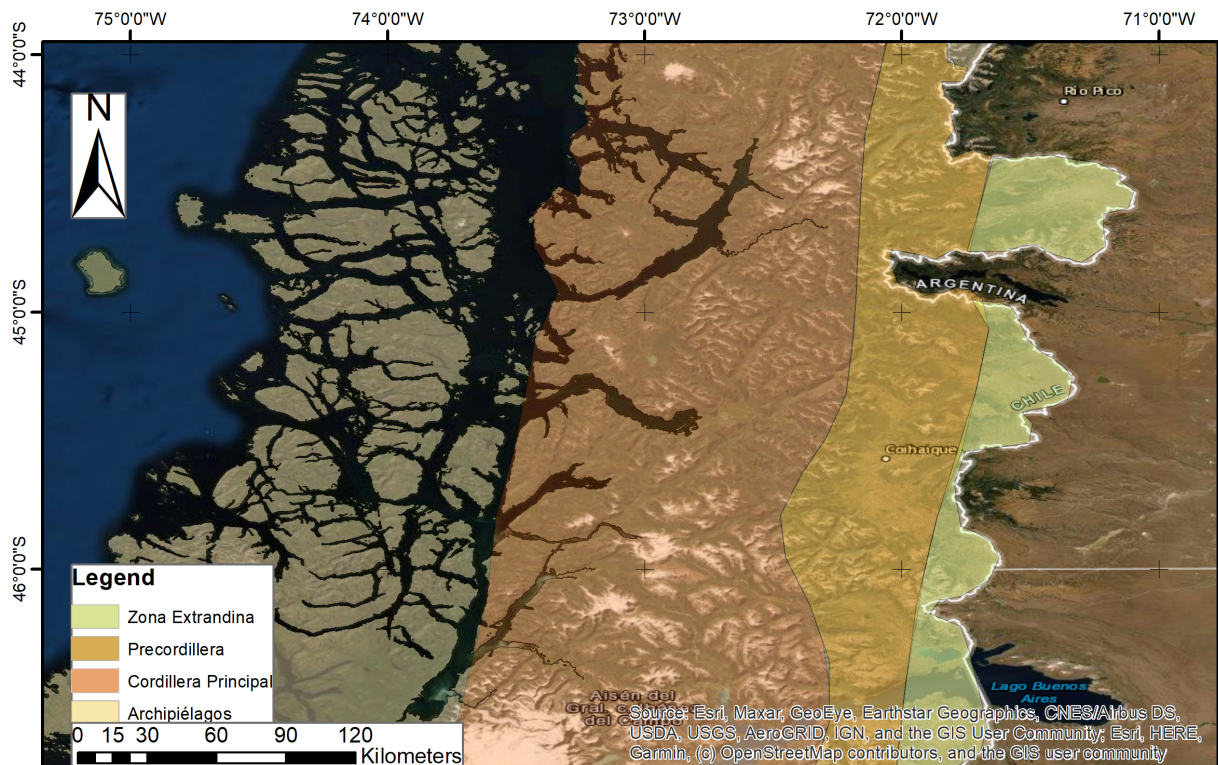


Figura 2.1: Mapa con las divisiones morfológicas de la Región de Aysén. Modificado de Niemeyer et al. (1984).

2.1.2. Estratigrafía y Rocas Intrusivas

Ramos and Ghiglione (2008) describen la cordillera patagónica en 3 segmentos de acuerdo con su evolución tectónica:

- **Segmento Norte (39°00' - 43°30'S):** Este segmento se caracteriza por la presencia de un basamento metamórfico de alto grado asociado a granitoides del Paleozoico tardío. Sobre estas rocas se encuentran una secuencia de rocas sedimentarias marinas y volcánicas asociadas al Jurásico y al mismo tiempo están cubiertas por una secuencia de rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias marinas asociadas al Paleógeno. Estas rocas se encuentran intruidas por el Batolito Patagónico, que en este segmento tiene edad Cretácica. En la ladera occidental se encuentra una serie de estratovolcanes de edad Cenozoico tardío.
- **Segmento Central (43°30" - 46°30"S):** Está caracterizado por una secuencia de rocas volcánicas y volcanoclástica de composición andesítica de edades Jurásica media-tardía a Cretácico temprano. Estas rocas están intercaladas con sucesiones marinas a lo largo de las cuencas de intraarco y retroarco. El Batolito Patagónico en esta sección está caracterizada por un set de pulsos que parten en el Cretácico temprano al oeste de Chile y migran durante el Cretácico medio hacia el este. La actividad volcánica de este segmento está alineada con la ZFLO.
- **Segmento Sur (Desde 46°30"S):** El Basamento Paleozoico en esta zona aflora a lo largo del piedemonte de la cordillera, pero está compuesto mayoritariamente de metasedimentos de edades Devónica-Carbonífera. Las rocas magmáticas se conservan a lo largo del Batolito, con excepción del Complejo El Quemado de edad Jurásica media, donde las rocas volcánicas se encuentran ausentes. Los sedimentos de edad Cretácica están bien preservados en la cuenca de Magallanes y contiene secuencias de sedimentos clásticos marinos, intercaladas con calizas que documentan las primeras transgresiones marinas de edad titoniana.

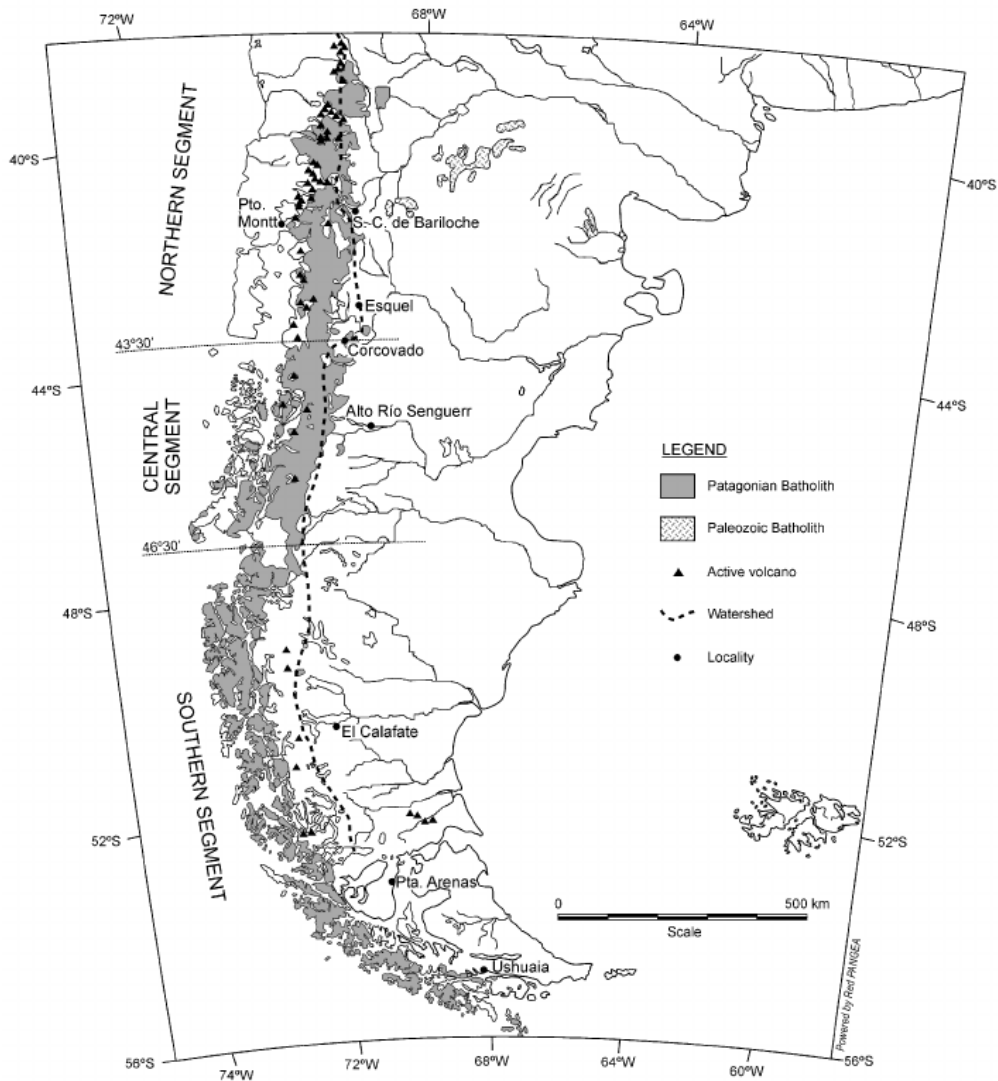


Figura 2.2: Mapa con las unidades geológicas y los diferentes segmentos que componen la cordillera patagónica. Extraído de Ramos and Ghiglione (2008).

2.2. Geología Local

La figura 2.2 representa la geología regional de la zona de estudio. Esto se ha complementado tanto por los estudios de Thomson (2002) y Hoja Península de Taitao y Puerto Aysén (Niemeyer et al., 1984).

El área de estudio comprende en su mayoría al segmento central de la Cordillera Patagónica, incorporando porciones del segmento norte y sur. En general la zona está dominada por las rocas plutónicas calco alcalinas pertenecientes al Batolito Patagónico donde se identifican 3 pulsos magmáticos: Cretácico, Mioceno temprano, Paleoceno - Mioceno (Moreno and Gibbons, 2007). Las rocas Cretácicas incluyen en su mayoría granodioritas metaluminosas y tonalitas, mientras que las rocas del Mioceno-Plioceno las composiciones van desde gabros a granitos (Moreno and Gibbons, 2007). En el flanco oriental intruye al Basamento Metamórfico y a Formaciones Jurásicas como la Formación Ibáñez. En el flanco occidental

intruye al Basamento metamórfico y a la Formación Traiguén que están expuestas en la zona de archipiélagos.

La Formación Ibáñez corresponde a una secuencia de rocas volcanoclásticas y volcánicas, de composición acida a intermedia y se encuentra expuesta a lo largo de la pre cordillera. Se pueden encontrar principalmente tobas líticas, brechas volcánicas, tobas de cristales, tobas de lapilli, flujos andesíticos y riolíticos con alteración producto de un metamorfismo de bajo grado (Niemeyer et al., 1984).

La Formación Traiguén corresponde a una secuencia volcano - sedimentaria expuesta en la zona oriental de la zona de archipiélagos, se pueden encontrar volcanitas brechosas de composición basáltico-andesítico y en menor proporción dacítico. También se pueden encontrar areniscas, lutitas y piroclastitas (Niemeyer et al., 1984).

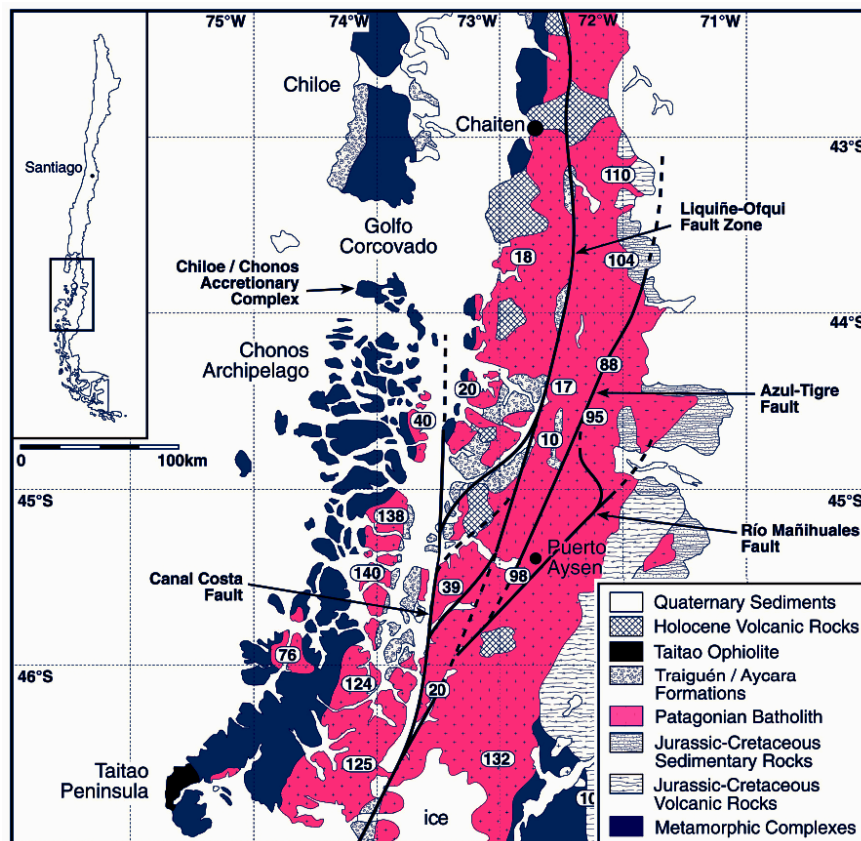


Figura 2.3: Mapa Geología Local, Modificado de Thomson (2002).

2.3. Geología Estructural y Tectónica

Cerca de la zona de estudio se encuentra el Punto Triple Chileno (CTJ) ubicado frente a la Península de Taitao. Es el lugar donde convergen las Placas de Nazca, Antártica y Sudamericana. Entre las placas de Nazca y Antártica se encuentra la Dorsal Chilena. La Placa

Sudamericana subducta a una velocidad aproximada de 6.5 cm/año, mientras que la Placa Antártica subducta a una velocidad de 2cm/año (Thomson, 2002). El CTJ es responsable de la faja plegada y corrida de la Patagonia (Ramos, 1989), el emplazamiento del complejo ofiolítico Taitao (Forsythe et al., 1986), del gap volcánico entre los 46°30'S y 49°S y del plateau basáltico detrás del arco a los 46°30'S y 49°S debido al slab windows que se forma por la subducción del ridge (Ramos and Kay, 1992). Además, guarda relación con la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (Cembrano et al. (1996), Cembrano et al. (2002), Forsythe and Nelson (1985)). El CTJ ha migrado rápidamente hacia el norte hasta tener su ubicación actual frente a la península de Taitao (Cande and Leslie, 1986). La colisión del trench empezó hace 14 Ma y desde ahí se destacan 3 eventos donde el ridge ha colisionado con la fosa: entre los 14-10 Ma donde colisiona cercano a Tierra del Fuego, a los 6 Ma donde el ridge colisiona con el Golfo de Penas y hace 3 Ma donde colisiona entre las penínsulas de Taitao y Tres Montes (Cande and Leslie, 1986).

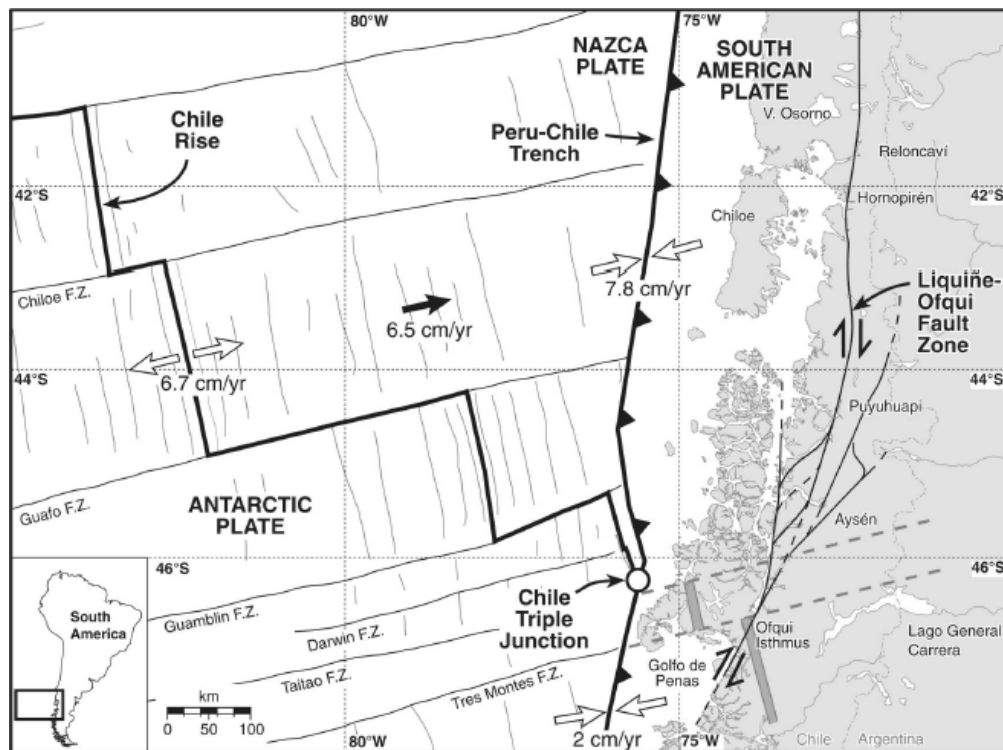


Figura 2.4: Mapa de las placas tectónicas. Extraído de Thomson (2002).

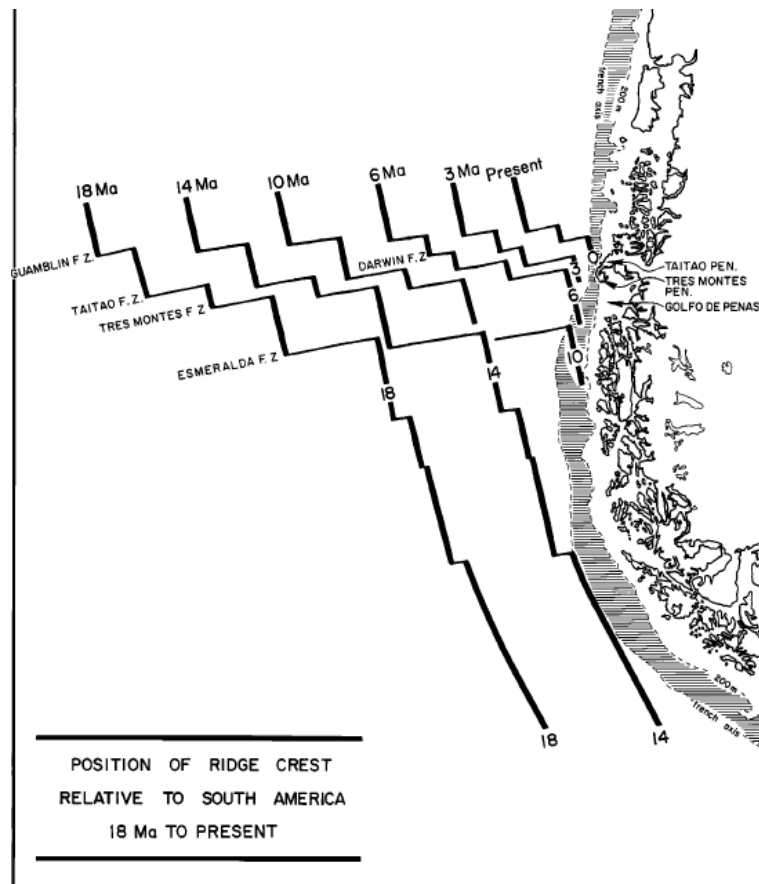


Figura 2.5: Esquema de la posición de la dorsal Chilena con respecto a la fosa a través de los años. Extraído de Cande and Leslie (1986).

2.3.1. Zona de Falla Liquiñe - Ofqui

Una de las características estructurales más importante del área de estudio es la presencia de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO) que se extiende entre los 38°S a 48°S. Cembrano et al. (1996) la describe como una falla de rumbo que incluye un dúplex y que abarca los 1000 [km] de longitud, espacialmente coincide con el Batolito Nor-Patagónico de edad Miocena, con la cadena volcánica Cuaternaria y con las cuencas del Cenozoico Temprano. Forsythe and Nelson (1985) también agregan que en el Golfo de Penas se estima que las fallas son tanto de rumbo como normal. La actividad del ZFLO comienza en el Mesozoico, donde la deformación fue sinistral a lo largo de otros sistemas de fallas andinas y que, de acuerdo con las rocas plutónicas y metamórficas altamente deformadas, la ZFLO está marcada principalmente por un cizalle dextral de edad Miocena-Pliocena acompañado de un emplazamiento sintectónico (Cembrano et al. (1996), Cembrano et al. (2000)). Los volcanes al norte están alineados paralelos a las fallas de rumbo NS, pero los volcanes dentro del dúplex están restringida a las fallas de rumbo NE (Cembrano et al., 1996). El régimen transpresional a largo plazo está vinculado a una subducción oblicua y se le relaciona al movimiento dextral que tiene la falla, mientras que la deformación a corto plazo ha de estar relacionada con el ridge (Cembrano et al. (2002), Cembrano et al. (2000)). También esta falla desplaza al bloque de Chiloé hacia el norte, formando una cuenca pull-apart en el Golfo de Penas (Forsythe and Nelson, 1985).

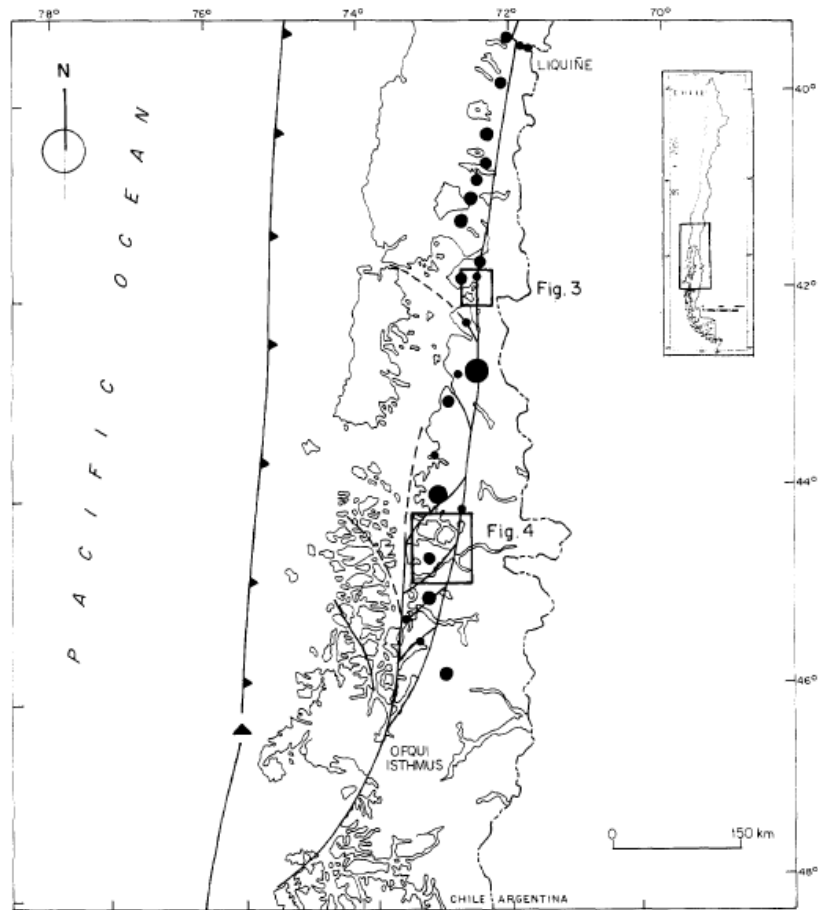


Figura 2.6: Mapa regional de la ZFLO. Puntos corresponden a los volcanes cuaternarios y tamaño es proporcional con el volumen de lava eruptada. Extraído de Cembrano et al. (1996).

La geometría regional del Sistema de Falla Liqueñe Ofqui Cembrano et al. (1996) la describe como:

- 2 fallas rectas de rumbo NNE que abarca varios cientos de kilómetros y que son paralelas entre si y que se unen cercano a los 47°S.
- 4 lineamientos en Echelon de rumbo NE donde el largo va en el orden de 10 kilómetros y que unen a los lineamientos NNE.
- 3 lineamientos curvos de rumbo NNW, que van en el orden de cientos de kilómetros y son cóncavos hacia el suroeste. Se extienden hacia el océano y se encuentran al oeste de los 2 lineamientos NNE.

La ZFLO se puede subdividir en fallas principales:

- Falla Liqueñe Ofqui que corresponde a la zona más oriental del sistema de fallas, con rumbo NS.
- Falla Canal Costa que corresponde a la zona más occidental de la ZFLO. Cembrano et al. (2002) la describe como una zona de cizalle que sigue una dirección norte-sur

deformando las rocas del Batolito Patagónico y las rocas de la Formación Traiguén. Además, se pueden encontrar cataclasitas y milonitas en el flanco este de la falla. Estas rocas se encuentran altamente deformadas y muestran foliación norte-sur.

- Falla Azul Tigre que se ubica al oriente de la Falla Liquiñe Ofqui. Cembrano et al. (2002) describe esta falla como Zona de Cizalle Queulat. Esta zona está compuesta por metasedimentos y rocas metavolcánicas moderadamente deformadas posiblemente pertenecientes a la Formación Traiguén.
- Falla Río Mañihuales, que se encuentra ubicada al este de la falla Liquiñe Ofqui y tiene rumbo NNE.

Thomson (2002) propone que las fallas Azul-Tigre y Río Mañihuales junto a la traza principal de la ZFLO forman una estructura de flor positiva a escala de corteza superior que está asociada a una zona transpresional dúctil y dextral en profundidad.

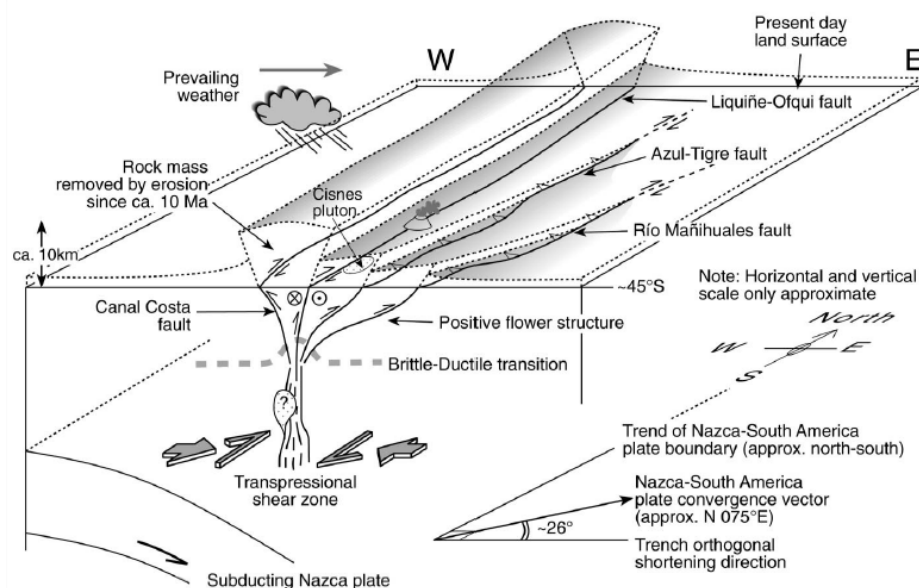


Figura 2.7: Esquema tridimensional de la ZFLO interpretado como una flor positiva transpresional. Extraído de Thomson (2002).

2.4. Volcanismo

La zona de estudio abarca la parte sur de la Zona Volcánica Sur (SSVZ). La SSVZ corresponde a estratovolcanes (la mayoría de ellos han presentado erupciones en el Holoceno (Naranjo and Stern, 2004)), calderas y ciento de centros eruptivos menores formados por conos de escoria y flujos de lava (Moreno and Gibbons, 2007). Estos volcanes y calderas forman un arco volcánico continuo que se extiende desde los 33.3°S a 46°S. Desde los 46°S a 49°S hay un gap volcánico debido al slab window que se forma a partir de la dorsal Chilena (Ramos and Kay, 1992). Naranjo and Stern (2004) señalan que entre los 42°30'S y 45°S ocurre

1 erupción cada 725 años. Comparando con el volcán Hudson, este es mucho más activo que el resto de volcanes en la zona, el cual se cree que es debido a que se encuentra cercano al punto triple. En general la geoquímica del volcanismo en la zona corresponde a magmas calcoalcalinos, abarca desde basaltos, andesita basáltica y dacitas (D’Orazio et al. (2003), Naranjo and Stern (2004)). Dentro de la zona de estudio se encuentran:

- Grupo volcánico Puyuhuapi que corresponde a conos volcánicos.
- Volcán Corcovado que corresponde a un estratovolcán erosionado en el que se han encontrado depósitos de tefra de composición Andesita basáltica. (Naranjo and Stern, 2004).
- Volcán Yanteles que corresponde a un estratovolcán cubierto por glaciares en el que se han encontrado depósitos de tefra de composición andesítica (Naranjo and Stern, 2004).
- Volcán Melimoyu correspondiente a un estratovolcán cubierto por glaciares. Se han encontrado pumita de composición dacítica y con escoria basáltica, además no cuenta con registros de actividad volcánica (Naranjo and Stern, 2004).
- Volcán Mentolat correspondiente a un estratovolcán parcialmente erosionado en el que se han encontrado depósitos de tefra de composición andesita basáltica atribuibles a una erupción de tamaño pequeño-mediano (Naranjo and Stern, 2004).
- Volcán Cay correspondiente a un estratovolcán erosionado, está formado por basaltos y dacitas. No se han encontrado depósitos de tefra y no se cuenta con registros de actividad volcánica (Naranjo and Stern, 2004).
- Volcán Alto Palena correspondiente a un estratovolcán.
- Volcán Hudson que corresponde a una caldera de 10 [km] de diámetro en el que se han registrado 3 erupciones de gran tamaño y otras 9 erupciones de menor escala datadas del Holoceno. Corresponde a uno de los volcanes más activos de la zona (Naranjo and Stern, 2004).

El Sistema de Fallas Liquiñe - Ofqui está directamente relacionado con el emplazamiento de los estratovolcanes y centros eruptivos menores; los estratovolcanes se encuentran en los lineamientos de rumbo NW y NE mientras que los centros eruptivos menores se encuentran en los lineamientos NNE (Cembrano et al., 1996). De acuerdo a (Pérez-Estay et al., 2020), los estratovolcanes tienden a estar en ambientes transtensionales mientras que los centros eruptivos menores se encuentran en ambientes transpresionales dentro de la ZFLO.

Además, cabe destacar el descubrimiento del volcán Mate Grande encontrado por De Pascale et al. (2021). Este volcán corresponde una caldera ubicada dentro de la ZFLO y se encuentra al sur de los volcanes Maca y Cay y al norte del volcán Hudson. El volcán se

compone de una caldera de 5 [km] de diámetro con un cono de 1280 [m] de alto y se encuentra parcialmente colapsado debido a la acción sísmica de la ZFLO. Su antigüedad data del Holoceno por lo que se considera un volcán activo y representaría un peligro geológico. La composición geoquímica del cono más joven corresponde a lavas máficas. Se considera un volcán tipo calco-alcalino relacionado a zonas de subducción.

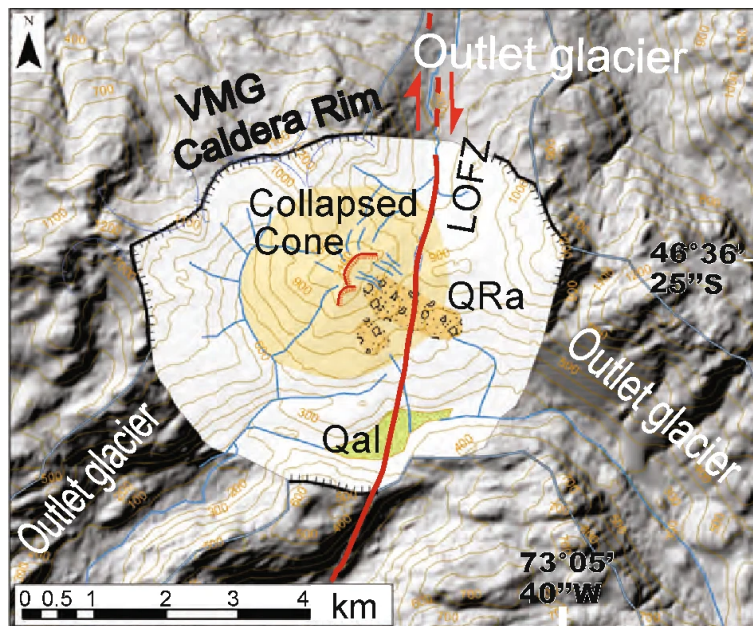


Figura 2.8: Mapa del volcán Mate Grande donde se visualiza su caldera y el cono parcialmente colapsado debido a la acción de la ZFLO. Extraído de De Pascale et al. (2021).

2.5. Sismos Históricos

El registro sísmico de Aysén ocurrió en 1927, año en que Carlos Ibáñez del Campo funda el Territorio de Aysén, en ese año el 21 de noviembre a las 19:17 hrs ocurrió un sismo de magnitud 7.1 con epicentro en el Canal Moraleda generando deslizamiento de tierra y tsunami que arrasó con árboles (CSN, 2018). Posterior a este evento, se han registrado otros sismos como el del 6 de junio de 1960 con una magnitud de 7.8 en Coyahique (Gallardo (2020), Volcano Discovery), fue posterior al terremoto de 9.5 en Valdivia. Durante el transcurso de los años ha habido una serie de eventos sísmicos que han afectado a la zona, uno de los más destacables fue el terremoto en el fiordo Aysén en el 2007 debido a los deslizamientos de tierra y tsunami que generó. En la figura 2.8 ilustra los terremotos que han ocurrido en el área, la mayoría de los datos fueron obtenidos por Lange et al. (2008) y de la página Volcano Discovery.

2.5.1. Terremoto en Aysén 2007

De acuerdo a Naranjo et al. (2009), la actividad sísmica habría empezado el 22 de enero del 2007 donde los epicentros se localizaron en el fiordo Aysén y hasta principios de mayo se

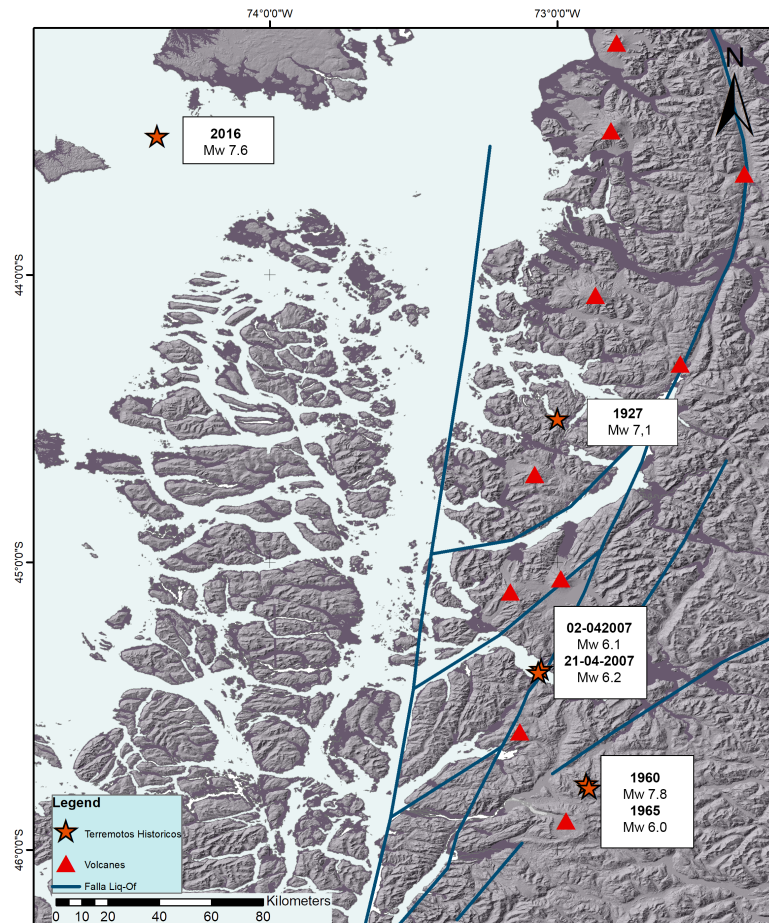


Figura 2.9: Mapa con los eventos sísmicos más importantes dentro de la zona de estudio. Coordenadas sacadas de Barrientos and CSN (2016), Lange et al. (2008) y Agurto et al. (2012).

habrían registrado cerca de 7000 eventos sísmicos. El primer evento registrado fue el 23 de enero con una magnitud de 5.2 Mw. Eventos menores de deslizamiento de tierra ocurrieron entre el 23 de enero a 1 de abril lo cual gatillaron en pequeños tsunamis y daños menores en salmoneras (Naranjo et al., 2009). El 21 de abril del 2007 ocurrió un sismo de Mw 6.2 donde se produjeron alrededor de 300 deslizamientos de tierra que causaron tsunamis en el fiordo, en particular Naranjo et al. (2009) describe 3 grandes deslizamientos los cuales desencadenaron en tsunami (norte de Isla Mentirosa donde hubo múltiples deslizamientos, al este de Aguas Calientes donde hubo solo un deslizamiento, y en Quebrada sin nombre cercano a Punta Cola donde hubo un flujo de escombros) que provocaron la destrucción de salmoneras y la muerte y desaparición de personas. Mora (2009) describe el mecanismo focal del enjambre sísmico como de rumbo (strike-slip) dextral, de dirección NS y que el origen del terremoto es tectónico.

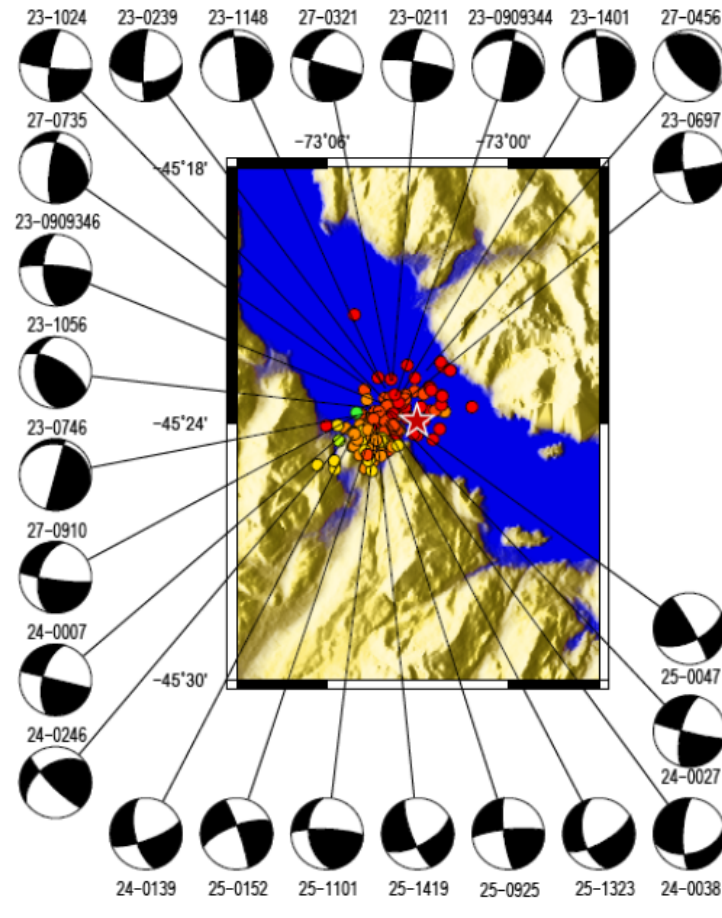


Figura 2.10: Mecanismos focales del sismo ocurrido en el Fiordo Aysén 2007. Extraído de Mora (2009)

2.5.2. Terremoto en Melinka 2016

Otro evento igual de importante fue el terremoto del 25 de diciembre del 2016 de magnitud 7.6 (Mw) con duración entre 20-30 seg. en las costas de la Región de Los Lagos, a 67 [km] al noroeste de Melinka. La zona de ruptura fue de aprox. 60 [km] que se extiende hacia el norte desde el punto hipocentral (Barrientos and CSN, 2016). Es el primer terremoto que ocurre dentro de la zona de ruptura del terremoto de 1960 en Valdivia. Ruiz et al. (2017) propone que existe una relación entre el terremoto del 2010 en Maule y 1960 en Valdivia. El terremoto del 2010 produjo un cambio en las velocidades GPS, el flujo del manto post-sísmico de 1960 fue afectado y detenido por el terremoto del 2010, aumentando el bloqueo de placas en la zona de Chiloé. Ruiz et al. (2017) también propone que el terremoto de Chiloé podría ser el comienzo de un periodo de alta sismicidad para esa zona.

2.6. Estudios Previos Relacionados a la Sismicidad de la Zona

2.6.1. Investigación de Lange et al. (2008)

En este estudio se registró con una red sísmica temporal dando un total de 75 eventos entre Diciembre del 2004 y Noviembre del 2005 entre los 41.5°S - 43.5°S , donde se encontraron 3 clústeres: primer clúster cerca de Hornopirén donde los eventos son de profundidades superficiales entre 5-8[km] y está relacionado directamente a la ZFLO y no a volcanismo, un segundo clúster en las costas de la península de Huequi y está asociado a una falla de rumbo 135° , un tercer clúster debajo del volcán Chaiten en una caldera postglacial, este clúster está asociado a actividad volcánica; un cuarto clúster encontrado en el volcán Corcovado, los eventos no pasan los 2.6 Mw. Lo más destacable de este trabajo es que deja evidenciado la actividad sísmica de la ZFLO, los mecanismos focales son concordantes con el tipo de desplazamiento de esta estructura, lo que sugiere que en otras zonas de la ZFLO también puede ser altamente sísmica.

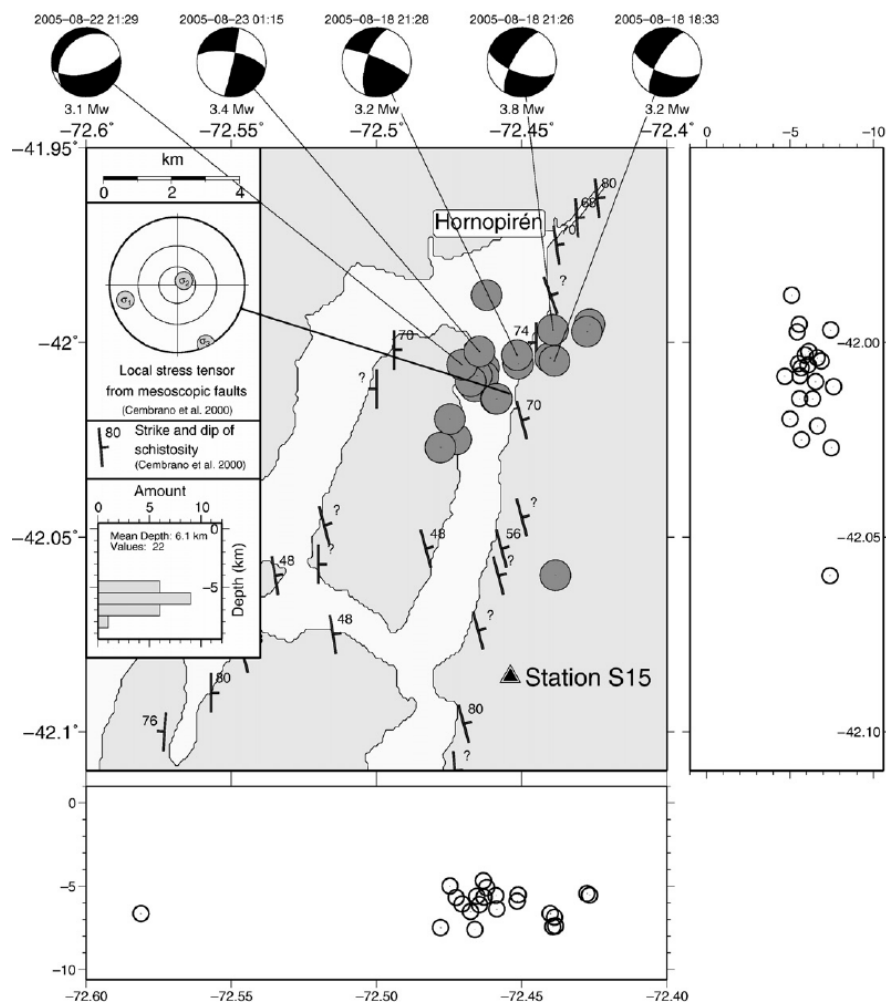


Figura 2.11: Eventos encontrados cerca de Hornopirén con sus mecanismos focales tipo strike-slip. Los hipocentros tienen profundidades menores de 10[km]. Extraído de Lange et al. (2008)

2.6.2. Investigación de Pérez-Estay et al. (2020)

Para esta investigación se realizó un estudio sísmico en el área de Puyuhuapi para ver la relación entre los volcanes y las fallas corticales. Se realizó un catálogo sísmico entre los meses de agosto del 2016 hasta mayo del 2017, obteniendo un total de 81 eventos donde se identificaron 3 clústeres en el este, centro y oeste de la zona de estudio, con profundidades que no van más allá de los 10[km].

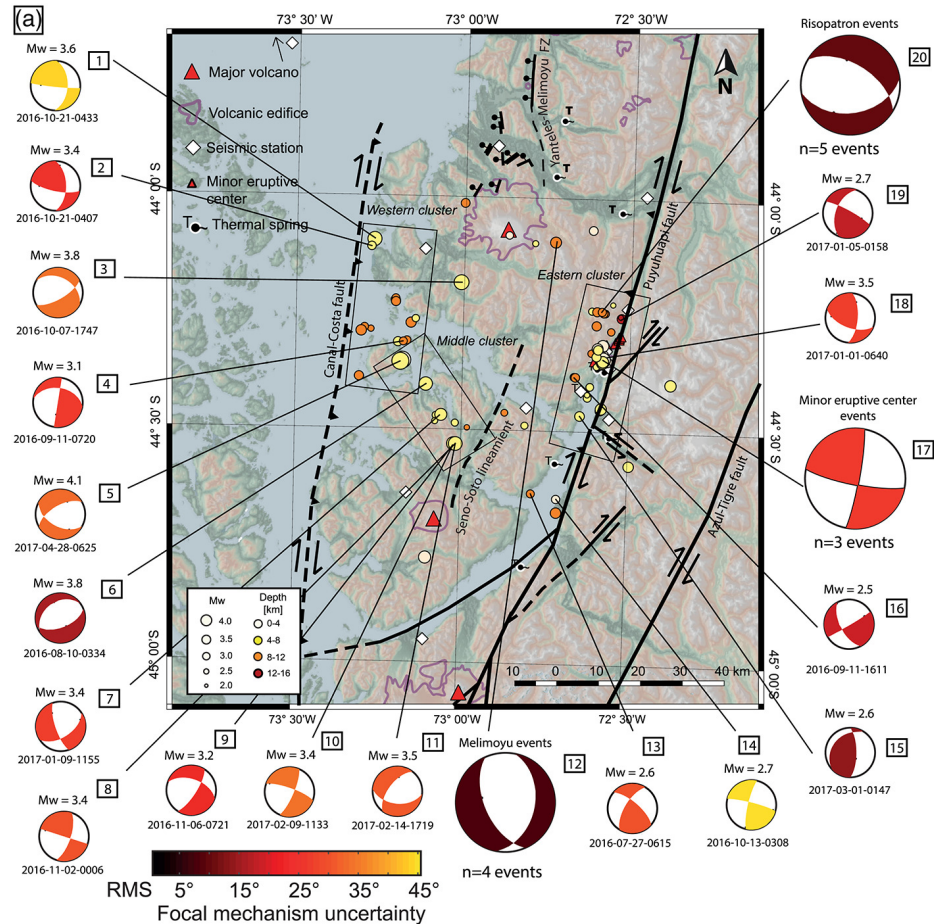


Figura 2.12: Mapa de los sismos encontrados con sus mecanismos focales. las profundidades de los eventos están sobre los 15 [km]. Extraído de Pérez-Estay et al. (2020).

El clúster oriental contó con 35 eventos, de los cuales 21 estuvieron a menos de 5 [km] del Grupo Volcánico Puyuhuapi; el clúster central contó con 15 eventos y la única característica volcánica cercana es el estratovolcán Mentolat que se encuentra a 20[km] hacia al sur y finalmente el clúster occidental que contó con 15 eventos sin evidencia de características volcánicas o geotérmicas, y el estratovolcán más cercano es el volcán Melimoyu que se encuentra a 31 [km]. De acuerdo con estos resultados los autores detallan la geometría y cinemática de las fallas en el Dúplex de Aysén; la zona de falla Puyuhuapi (correspondiente a una de las ramas de la ZFLO) es la estructura más sísmicamente activa de la zona y está asociado a centros eruptivos menores y bajo volúmenes de magma extruido en un ambiente transpresional, mientras que dentro del dúplex se infieren fallas normales y cizalle a partir

de los mecanismos focales. Además, domina un ambiente de transtensión lo que permite el emplazamiento de grandes volúmenes de magma generando estratovolcanes.

2.6.3. Investigación de Vargas et al. (2013)

En el 2007 hubo una secuencia sísmica en el fiordo Aysén, Vargas et al. (2013) realizó una cartografía de las fallas en la zona del fiordo, sugiere que todas las estructuras son activas, los escarpes y lineamientos se disponen en dirección N-S, SW-NE a SSW-NNE y E-W. También sugiere que el mecanismo dominante es cizalle dextral para las fallas N-S y SW-NE y localmente para las fallas NNW-SSE, además algunas fallas EW presentan mecanismos de cizalle sinistral. También existe una componente inversa asociada a los mecanismos de cizalle dextral a lo largo de las fallas N-S y NNW-SSE, esto favorecería a las estructuras de flor positiva, y una componente normal dextral para las fallas de rumbo NE-SW. Las fallas más destacables que describe Vargas et al. (2013) son (figura 2.12):

- Falla Río Cuervo: Segmentos que abarca 30-40[km] de largo con manteo subvertical (60° - 90° E). Se encuentra a lo largo del flanco occidental del valle Río Cuervo cruzando el fiordo Aysén. Esta falla se le asocia a una de las trazas principales de la ZFLO, de rumbo N-S. Se puede identificar deformación frágil en granitoides a lo largo de RCF, brechas de falla, estrías y minerales secundarios como óxidos de hierro y clorita más epidota en planos de falla.
- Falla Punta Cola: Estructura de rumbo N-S de 15 a 20 [km] de largo que cruza el Fiordo Aysén y se encuentra a 5 [km] hacia el este de RCF. Las rocas en esta zona tienen una intensa deformación frágil. Entre RCF y PCF hay una serie de estructuras de rumbo SW-NE.
- Falla Punta Mano - Lago Yulton y Falla Los Palos: fallas de rumbo norte sur, LPF se encuentran brechas de fallas subverticales asociados a planos N-S, NNW-SSE, con estrías y minerales secundarios que evidencian un mecanismo de rumbo dextral.
- Falla Riesco: Coincide con una de las ramas de la ZFLO de rumbo NE-SW, la cual es nombrada como Falla Mañihuales.
- Falla Quitralco: También situada en una de las ramas de la ZFLO, esta falla se une con la RCF en la parte sur del fiordo y contiene una serie de centros volcánicos monogenéticos.

También en este trabajo se destaca que para la zona del Fiordo Aysén se considera como una zona de transición entre la rama principal NS de la ZFLO y las fallas NNE.

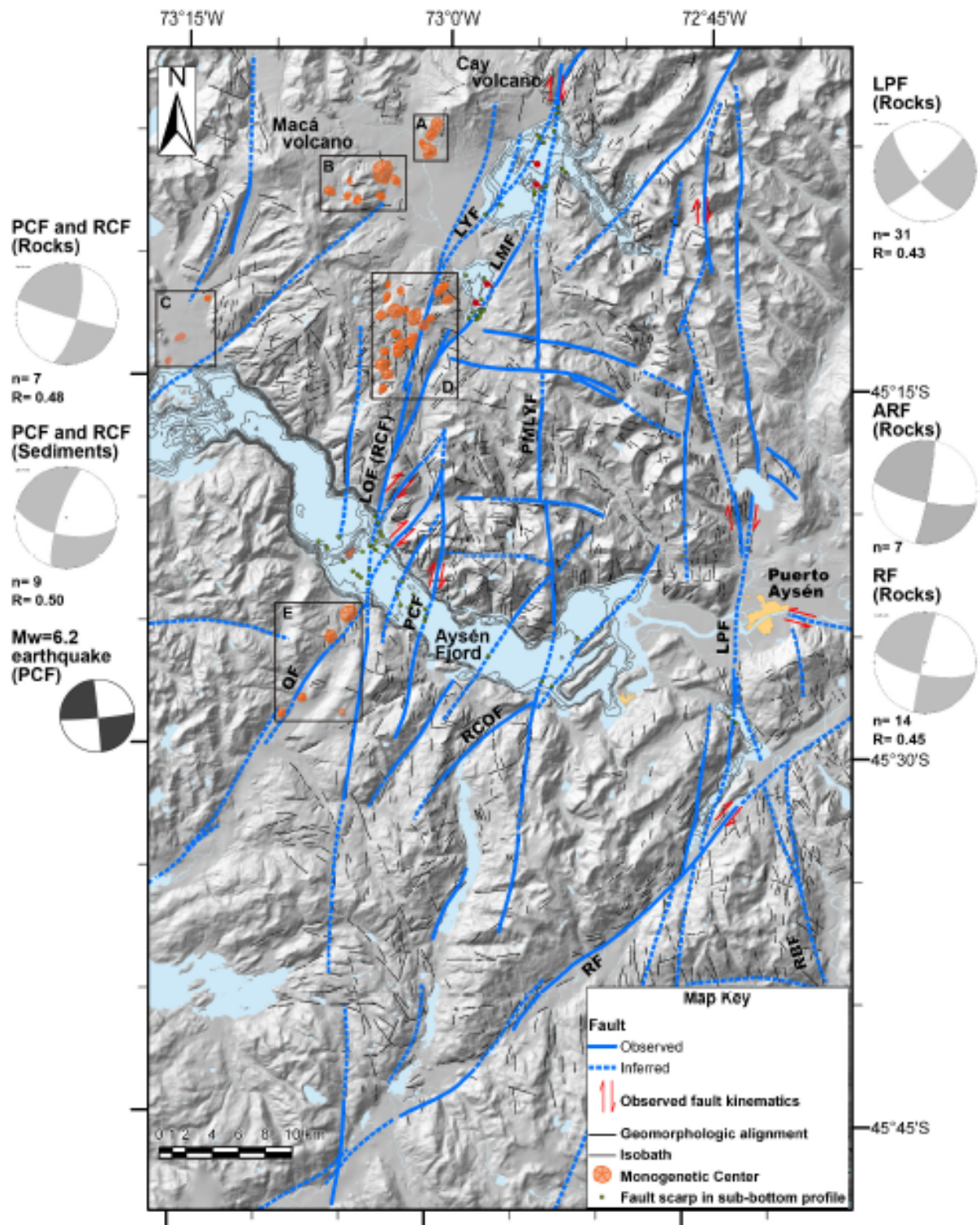


Figura 2.13: Mapa con las fallas principales del área del Fiordo Aysén. RCF: Falla Río Cuervo, PCF: Falla Punta Cola, RF: Falla Riesco, PMLYF: Falla Punta Mano - Lago Yulton, LPF: Falla Los Palos, LMF: Falla Lago Maullín, LYF: Falla Lago Yulton, RCOF: Falla Río Condor, QF: Falla Quitralco, RBF: Falla Río Blanco. Extraído de Vargas et al. (2013)

2.6.4. Investigación de Villalobos et al. (2020)

Villalobos et al. (2020) realizó estudios batimétricos y sísmicos para relatar sobre cómo es la evolución de la secuencia del 2007 y además cómo ha evolucionado el fiordo en el tiempo. Este estudio generó 3 perfiles sísmicos, donde se identificaron 4 unidades estratigráficas: Unidad Cuervo Ridge (CR), Morrena (MU), Unidades laminadas paralelas (PLU) y unidades deformadas. De las unidades deformadas, se identificaron al menos 7 de estos eventos. La Unidad laminada es una unidad postglacial que se superpone a la morrena con una edad de 12000 años, esta se divide en 2 subunidades: transgresiva (PLUT) que se generó durante la desglaciación del área y una unidad progradacional (PLUP) que se generó después de la estabilización del nivel del mar y que está representado por los deltas de los ríos Aysén, Los Cóndor y Cuervo.

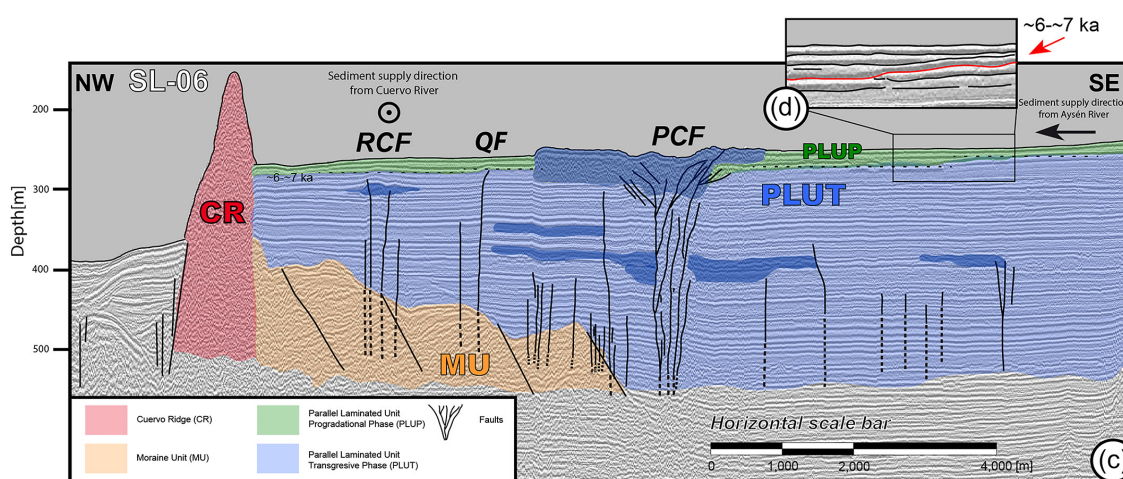


Figura 2.14: Perfil de reflexión sísmica con las unidades encontradas a profundidad y los dominios estructurales Río Cuervo (RCF), Quitralco (QF) y Punta Cola (PCF). Extraído de Villalobos et al. (2020).

También se identifican 3 fallas: Punta Cola, Río Cuervo y Quitralco. Para el evento sísmico del 2007, la falla Punta cola rompió en superficie, mientras que las otras 2 fallas no se encontraron evidencias de ruptura en superficie. De acuerdo a la figura 2.15, la secuencia sísmica parte a 8 [km] de profundidad con la acción de las fallas Punta Cola y Quitralco y luego migra hacia otras estructuras como la falla Río Cuervo, además sugiere que el limite frágil-dúctil (BDT) estaría a los 10[km]. Los 7 eventos de deformación identificados ocurrieron dentro de los últimos 12000 años y se cree que ocurrieron de la misma forma que la deformación producto al evento del 2007, es decir la fuente de estas deformaciones fueron por terremotos corticales locales. Aunque las fallas Quitralco y Río Cuervo no rompieron en superficie, combinando los registros de deslizamiento en los últimos 12000 años, estas fallas se consideran una fuente importante de peligro sísmico.

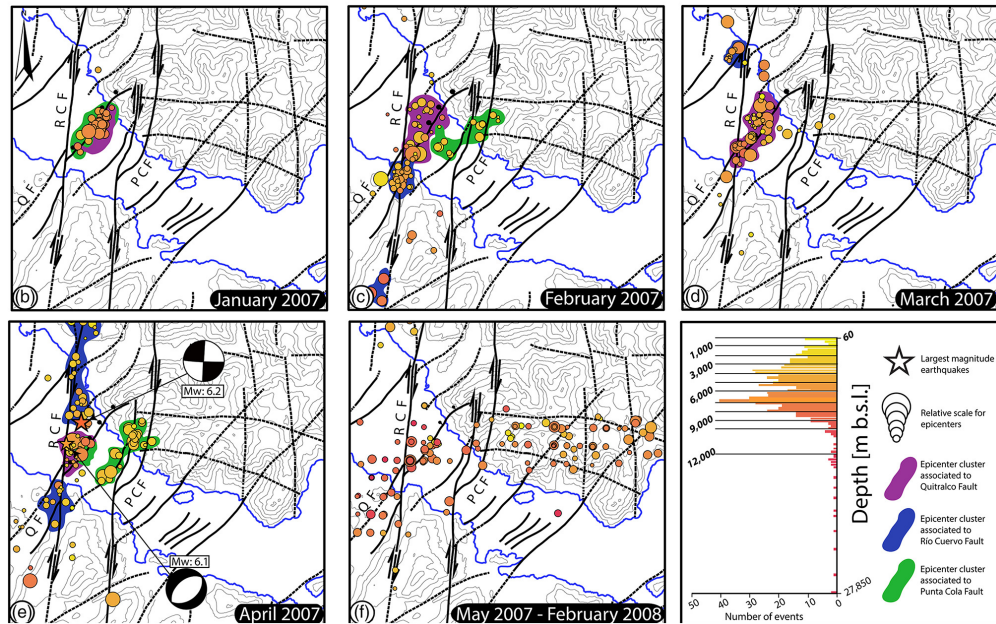


Figura 2.15: Migración sísmica del evento del 2007. Los diferentes colores corresponden a las fallas que tuvieron lugar en el terremoto. Extraído de Villalobos et al. (2020).

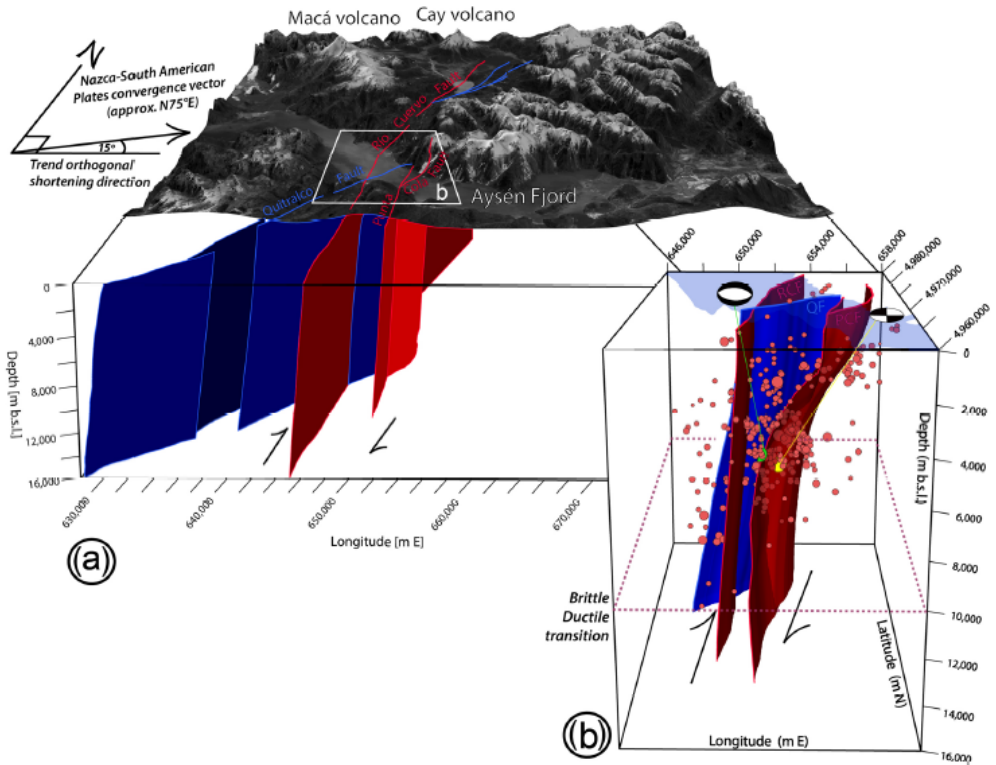
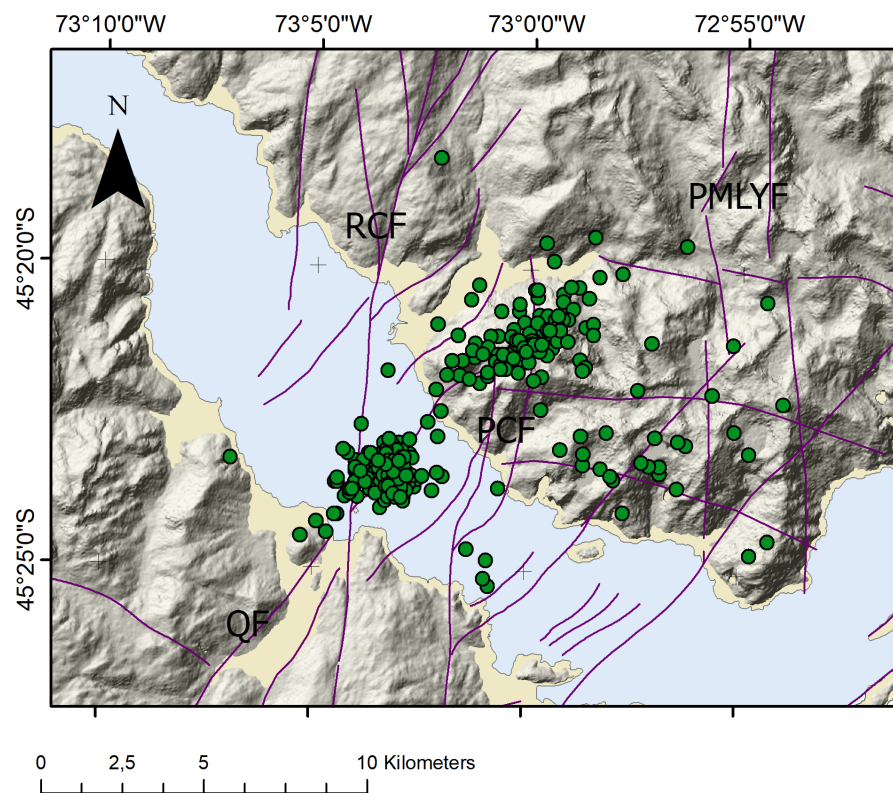


Figura 2.16: Modelo en profundidad de las fallas Quitralco, Río Cuervo y Punta Cola. Extraído de Villalobos et al. (2020).

2.6.5. Investigación de Sáez et al. (20xx)

Sáez et al. (2019) desde Marzo del 2009 hasta Febrero del 2010 realizó un catálogo con

sismómetros de fondo oceánico cerca del punto triple Chileno, proponen que cerca del punto triple se pueden generar terremotos repetitivos y tremors no volcánicos superficiales. La ocurrencia de potenciales terremotos repetitivos evidencia un deslizamiento lento en la zona de fractura cerca del punto triple y que además la actividad intensa de tremors corresponde a deslizamientos lentos continuos. Sáez ha seguido su estudio con respecto a los terremotos repetitivos, generando un catálogo entre los años 2018-2019 dentro del área de estudio, donde se puede observar que la mayoría de los sismos se encuentran sobre los 30[km] de profundidad, además se identifican varios cúmulos; en el área del fiordo Aysén, en el volcán Cay, cúmulos con dirección noroeste cercanos a la estación MGDN y en la zona de archipiélagos frente al parque nacional Isla Magdalena. También se observa actividad sísmica cercano al volcán Hudson y nula actividad para el volcán Mate Grande. En la figura 2.17 se observa que los eventos se ubican en su mayoría en las fallas que unen Río Cuervo y Punta Cola y algunos eventos esparcidos cercano a la falla Punta Mano-Lago Yulton y las fallas EW que la cortan.



Leyenda

- Eventos 2018-2019

Figura 2.17: Zoom de la zona del Fiordo Aysén y como se disponen los sismos en las fallas del área. Datos corresponden al catálogo de Sáez para los años 2018 - 2019 y shapes de las fallas extraídas de Vargas et al. (2013) y Villalobos et al. (2020). QF: Falla Quitralco, PCF: Falla Punta Cola, RCF: Falla Río Cuervo, PMLYF: Falla Punta Mano-Lago Yulton.

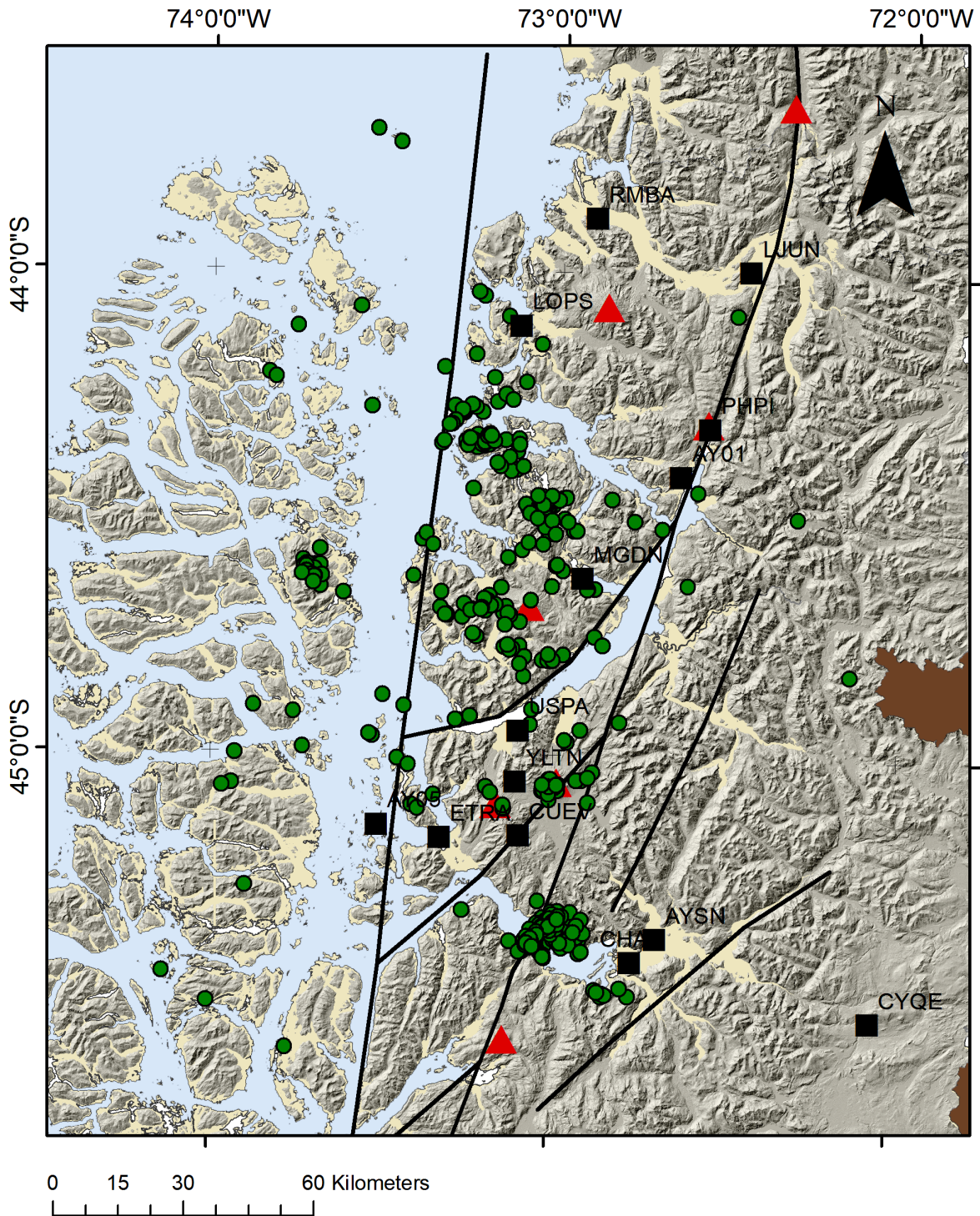


Figura 2.18: Catálogo sísmico de los años 2018-2019 generado por Sáez en su continuidad con estudio de terremotos repetitivos.

Capítulo 3

Metodología

En esta sección se explica el procedimiento para llevar a cabo los objetivos. En primer lugar, se describe la obtención de los datos, la distribución de las estaciones y el tipo de instrumento que se utilizó. Luego se explica cómo se localizaron los hipocentros dando una breve explicación del programa SEISAN y su forma de operar. Asimismo, se relata la forma de calcular las magnitudes locales. Finalmente se detalla la confección de los mapas y perfiles.

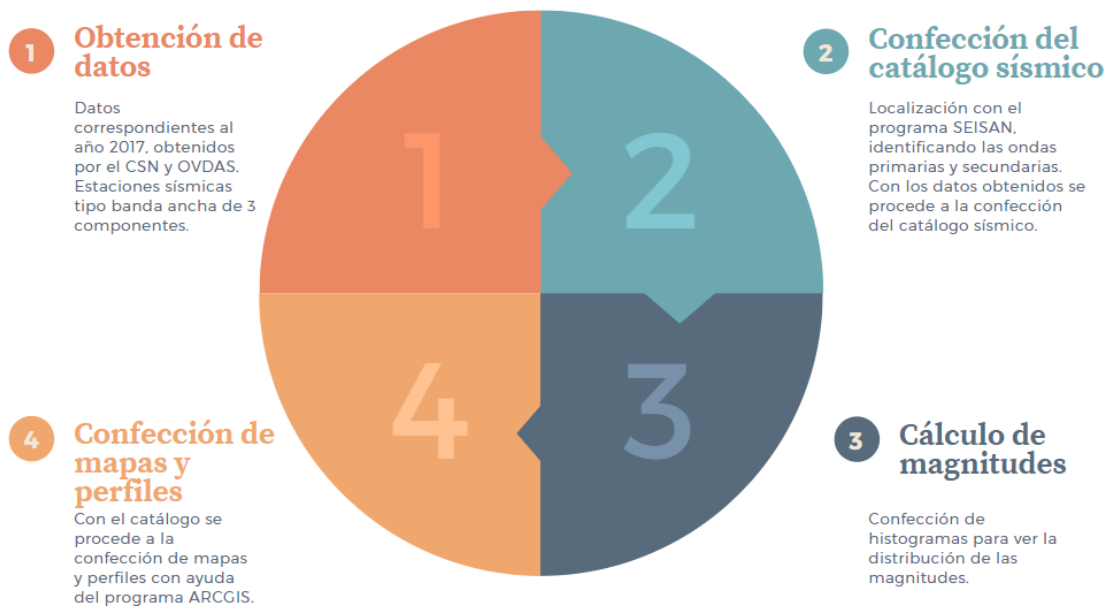


Figura 3.1: Diagrama donde se muestran los puntos mas importantes de la metodología.

3.1. Obtención de los Datos

Para este estudio se contó con 11 estaciones sísmicas desplegadas entre los $43^{\circ}50'S$ y $46^{\circ}S$. Las estaciones son de 3 componentes (norte, este, Z) y corresponden a instrumentos tipo banda ancha, es decir, la respuesta instrumental es proporcional a la velocidad. Los datos

fueron obtenidos del Centro Sismológico Nacional y del Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur. Se contó con un total de 466 eventos entre los meses de enero a diciembre del 2017.

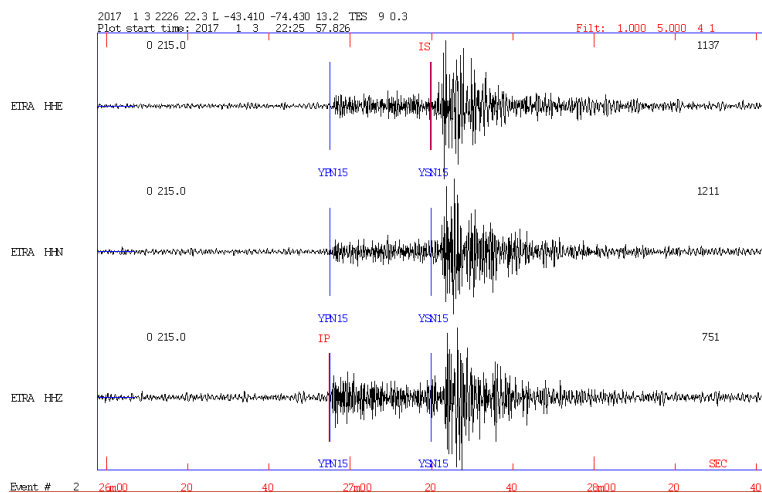


Figura 3.2: Ejemplo de sismograma de 3 componentes aplicado con un filtro. Cuenta con su respectiva localización de ondas P y S. Evento sísmico perteneciente a Enero 2017.

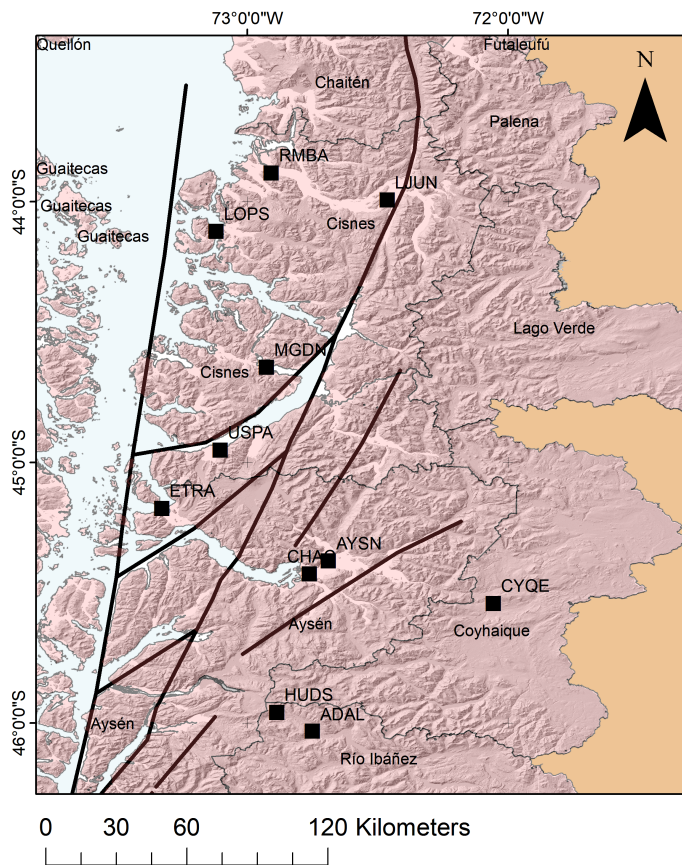


Figura 3.3: Distribución espacial de las estaciones sísmicas.

3.2. Confección del Catálogo Sísmico

Para la confección del catálogo es necesario obtener las coordenadas de los hipocentros de los sismos. Para localizar los hipocentros es necesario identificar en los sismogramas la llegada de las ondas primarias (P) y secundarias (S). Para llevar a cabo este objetivo fue necesario el uso del programa SEISAN. SEISAN es un programa de análisis sísmico, tanto para eventos locales como globales. Con este programa se visualizan las ondas previamente registrados en la base de datos y con ello es posible localizar hipocentros identificando de forma manual los tiempos de llegada de las ondas P y S, calcular momento sísmico, calcular mecanismos focales, entre otras cosas. Además de entregar las coordenadas del hipocentro, también entrega un error asociado a la localización (RMS), error residual asociado al tiempo (res) y error en las 3 componentes. SEISAN tiene una serie de directorios, para esta investigación se utilizaron los directorios REA y WAV que corresponden a los archivos que contienen la solución hipocentral de los eventos y las ondas en formato digital respectivamente. Los archivos que contienen las ondas poseen la extensión mseed. Para ver los resultados de las localizaciones se puede ver tanto en el comando CMD como en los archivos REA.

```

Seleccin Smbolo del sistema - eev 201701 liqof
date hrnm sec lat long depth no m rms damp erln erlt erdp
17 1 3 2119 7.44 4324.43S 74 32.2W 4.8 19 3 0.37 0.000 6.3 8.9 7.2
stn dist azm ain w phas calcphs hrnm tsec t-obs t-cal res wt di
LOPS 139 125.0 54.1 0 P C PN8 2119 30.3 22.88 22.73 0.14 1.00 6
LOPS 139 125.0 54.1 0 S SN8 2119 47.3 39.83 40.01 -0.18 1.00 13
RMBA 142 112.7 54.1 0 P C PN8 2119 31.6 24.19 23.26 0.93 1.00 5
RMBA 142 112.7 54.1 0 S SN8 2119 48.3 40.90 40.94 -0.04 1.00 11
LJUN 179 112.0 40.6 0 P C PN15 2119 35.9 28.42 29.06 -0.65 1.00 7
LJUN 179 112.0 40.6 0 S SN15 2119 58.6 51.19 51.15 0.04 1.00 17
MGDN 188 137.1 40.6 0 S SN15 2119 59.7 52.29 52.95 -0.67 1.00 2
USPA 206 146.8 40.6 0 P C PN15 2119 39.8 32.39 32.42 -0.03 1.00 2
USPA 206 146.8 40.6 0 S SN15 2120 4.2 56.71 57.05 -0.35 1.00 3
ETRA 219 154.3 40.6 0 P PN15 2119 41.3 33.88 34.00 -0.12 1.00 3
ETRA 219 154.3 40.6 0 S SN15 2120 7.3 59.83 59.84 -0.01 1.00 5
AYSN 264 146.7 40.6 0 P C PN15 2119 46.8 39.37 39.67 -0.30 1.00 2
AYSN 264 146.7 40.6 0 S SN15 2120 17.5 70.05 69.81 0.24 1.00 3
CHAC 265 148.4 40.6 0 P C PN15 2119 47.0 39.53 39.85 -0.32 1.00 2
CHAC 265 148.4 40.6 0 S SN15 2120 17.9 70.46 70.13 0.33 1.00 3
CYQE 308 141.1 35.7 0 P PN17 2119 52.4 45.01 44.82 0.18 1.00 3
CYQE 308 141.1 35.7 0 S SN17 2120 26.8 79.31 78.89 0.42 1.00 5
ADAL 324 154.7 35.7 0 P PN17 2119 54.3 46.89 46.79 0.10 1.00 3
Return to continue, q to end listing
ADAL 324 154.7 35.7 0 S SN17 2120 30.1 82.64 82.34 0.29 1.00 5

2017 1 3 2119 7.4 L -43.407 -74.536 4.8 TES 10 0.4
OLD: 1 3 2119 7.4 L -43.407 -74.536 4.8 TES 10 0.4

Return to continue
U to update

```

Figura 3.4: Visualización de la solución hipocentral en CMD.

SEISAN también tiene una serie de filtros los cuales se utilizaron para eliminar el ruido en la señal sísmica. Para obtener una buena localización debe tener un error (RMS) mínimo de 1, idealmente menor a 0.3 y ser localizados con un mínimo de 3 estaciones. A pesar de que idealmente se espera un error menor a 0.3, para este trabajo se consideraron todos aquellos bajo un RMS de 1. Asimismo se consideraron solo aquellos eventos donde se visualizaba tanto ondas P como S en la mayoría de las estaciones. Quedaron descartados aquellos eventos donde se podía visualizar solos las ondas P o solo ondas S. Además de lo anterior, se debe contar con un modelo de velocidad de capas para poder realizar esta localización. Para esta investigación se utilizó un modelo de velocidad 1D correspondiente al calculado por Agurto

et al. (2012), el cual fue hecho para la zona del fiordo Aysén. Agurto et al. (2012) utilizó el programa VELEST; este programa su objetivo es establecer un modelo de capas 1D mínimo con correcciones de estaciones utilizadas para la ubicación de terremotos, invirtiendo los parámetros de velocidad V_p , V_s y los hipocentros. Lo más importante de la investigación de Agurto et al. (2012) es que el modelo de velocidad alcanza hasta 60[km] de profundidad. En la tabla 3.1 se puede encontrar en detalle las velocidades del modelo.

Profundidad(km)	$V_p(km \cdot s^{-1})$	$V_s(km \cdot s^{-1})$
0	4.93	2.53
2	4.94	2.66
3	4.97	2.76
4	5.17	3.10
5	5.57	3.28
6	5.92	3.50
7	6.24	3.61
8	6.38	3.67
10	6.38	3.71
14	6.38	3.71
18	6.38	3.71
22	6.38	3.87
26	6.78	3.98
30	7.31	4.18
39	7.94	4.51
45	7.98	4.53
60	8.85	5.03

Cuadro 3.1: Modelo de velocidad 1-D usado para la localización de sismos. Extraído de Agurto et al. (2012)

3.3. Cálculo de Magnitudes

Se calculó magnitudes locales para los sismos localizados. La magnitud local fue originalmente propuesta por Richter, es una medida para cuantificar el tamaño de un terremoto. Sirve para periodos y distancias hipocentrales cortas con respecto a las estaciones sísmicas, a partir de registros de un sismógrafo de torsión Wood-Anderson (Richter (1935), Espinosa (1989)). La fórmula para calcular la magnitud esta descrita como:

$$M_l = \log_{10}(A) - \log_{10}(A_0) \quad (3.1)$$

$$\log_{10}(A_0) = \log_{10}\left(\frac{\Delta}{100}\right) + 3 \quad (3.2)$$

Donde:

- A : Corresponde a la amplitud máxima de un sismo medida en [mm]

- A_0 : Corresponde a la amplitud máxima de un sismo referencial medido en [mm] por un sismómetro W-A que cumple que a 100 [km] de distancia epicentral, A_0 es 0,001 mm.

El cálculo de magnitudes fue con colaboración del equipo docente. Primero se debe detectar los terremotos para luego calcular las magnitudes. La metodología que se utilizó para la detección de terremotos fue por medio del algoritmo STA/LTA modificado. El algoritmo STA/LTA se usa para la detección de sismos; procesa señales filtradas en 2 ventanas de tiempos móviles: en una ventana promedio de corto plazo (STA) que mide la amplitud instantánea de la señal sísmica e identifica si hay terremotos y en una ventana promedio de largo plazo (LTA) en el que se encarga de la amplitud media del ruido sísmico. La razón STA/LTA se compara con un nivel umbral de activación, si se excede este umbral podría indicar un posible terremoto, se guarda esta información hasta que STA/LTA sea menor a ese umbral. El procedimiento para generar la detección fue el siguiente:

- Preparación de los registros: remover tendencia, promedio y agregar un filtro pasa banda entre 1-20Hz con el objetivo de realzar la señal sísmica por sobre el ruido ambiental.
- La razón STA/LTA se calculó para las estaciones MGDN y CHAC, tomando una ventana de 60 seg para LTA y 2 seg para STA. Se tomó como umbral de activación 10, por lo que si la razón $STA/LTA \geq 10$, se guarda la detección como un potencial terremoto, registrando fecha y tiempo en que ocurrió.
- Cada detección obtenida es utilizada para verificar si es observada en un mínimo de 3 estaciones, a cada detección se le aplica:
 - Para cada detección y estación disponible en el día de la detección, se corta una ventana de tiempo en el que considera 40 seg antes y después del tiempo de detección.
 - Se realiza la correlación cruzada entre las estaciones CHAC o MGDN con el resto de las estaciones disponibles. Si el coeficiente de correlación de las componentes horizontal y vertical es mayor a 0,4 en al menos 3 estaciones, se considera la detección de un posible terremoto.
 - Las detecciones que cumplen lo anterior se procede al picado y localización de terremotos.

Luego con los datos de la detección se procedió con el cálculo de las magnitudes:

- A cada localización se le extrae los tiempos de origen y picado de las ondas P y S. Se realiza para todos los eventos y estaciones.
- A cada registro se le remueve la respuesta instrumental, tendencia y promedio.
- Utilizando los tiempos extraídos, se corta una ventana de 2 [seg] antes de la llegada de la onda P y $2(t_s - t_p)$ [seg] antes de la llegada de la onda S. T_s y T_p corresponden a los tiempos de llegada de las ondas S y P respectivamente.

- Utilizando las componentes horizontales, se calcula la amplitud máxima de las señales utilizando la formula:

$$MlHE = \log_{10}(\max(HE) \cdot 10^9) - 5,36 + 0,42 \cdot \log_{10}(r) + 0,005 \cdot r \quad (3.3)$$

Donde:

HE: corresponde a la ventana que contiene al terremoto.

r: corresponde a la distancia del terremoto con respecto a la estación.

- Se calcula MI para cada terremoto en sus componentes horizontales y se escoge el valor máximo. La magnitud local final es el promedio de los valores calculados de cada estación.

3.4. Generación de Mapas y Perfiles

Para la generación de mapas se utilizó ArcGIS. ArcGIS es un programa que edita, diseña y analiza información geográfica. La herramienta para la elaboración de mapas es ArcMap. ArcGis posee una serie de mapas predeterminados para trabajar, como también se pueden elaborar desde el principio. Se exportaron tablas Excel en este programa para la elaboración del mapa. Se utilizaron tanto los mapas predeterminados como también se utilizaron Dems Alos Palsar obtenidos de la página IDE Chile, para confeccionar Hillshades para las regiones de Aysén y Los Lagos. Los shapes de las fallas del área del Fiordo Aysén fueron extraídos de Villalobos et al. (2020) y Vargas et al. (2013). Para la confección de perfiles se utilizó Python, el cual es un lenguaje de programación. Se realizaron gráficos de dispersión donde se incluyeron profundidad y magnitud para la totalidad de los sismos y se realizaron graficos de profundidad para los clústeres. Además, se graficaron histogramas de las magnitudes de cada clúster y estas fueron realizadas en excel.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos con respecto a la localización de los eventos. En primer lugar, se describe la cantidad de eventos localizados, estaciones que permanecieron activas durante el año 2017 y ver cómo se comportan en el tiempo. Luego se describe como se distribuyen espacialmente, cuáles son sus profundidades y magnitudes. También se describe las agrupaciones encontradas, ubicación, estaciones cercanas, profundidades y magnitudes.

4.1. Localización de Hipocentros y Generalidades

En total fueron 11 estaciones sísmicas las que se utilizaron, sin embargo, dentro del año 2017 hubo algunas estaciones que permanecieron inactivas (figura 4.1), por lo que la localización de hipocentros y profundidades no ha de ser tan preciso. De 466 eventos sísmicos, se localizaron 189 que se distribuyen entre los 48°S a 36°S de latitud y que se concentran entre los 48°S a 42°S (en Apéndice A se encuentra la tabla con los hipocentros) en su mayoría se concentran en el mes de enero con un total de 40 eventos (figura 4.2). En las figuras 4.4 y 4.5 se observa que se encuentran 3 tipos de sismos: interplaca, intraplaca (muy localizados) y corticales. Hay diferentes fuentes sísmicas; asociada al ridge, a la subducción, a volcanismo y a la ZFLO. Las profundidades llegan a 197 [km] y la mayoría se concentra a profundidades menores a 25 [km] (ver en anexos, figura B.1, corresponde a un histograma de las profundidades encontradas). Las magnitudes en general se encuentran en un rango de 0,5 a 3 M_l (observar en anexos, figura B.2 el histograma de las magnitudes totales) y solo algunos eventos están cercanos a 5,5 M_l .

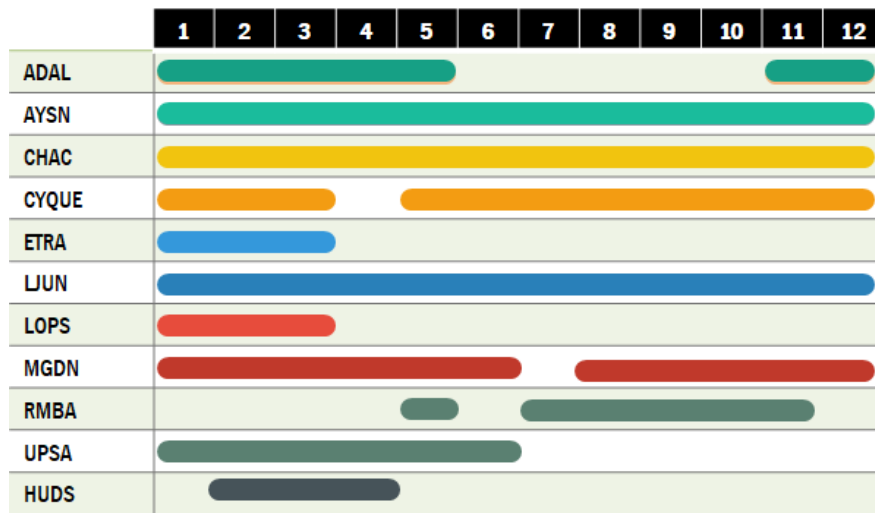


Figura 4.1: Estaciones sísmicas que estuvieron activa durante el año 2017.

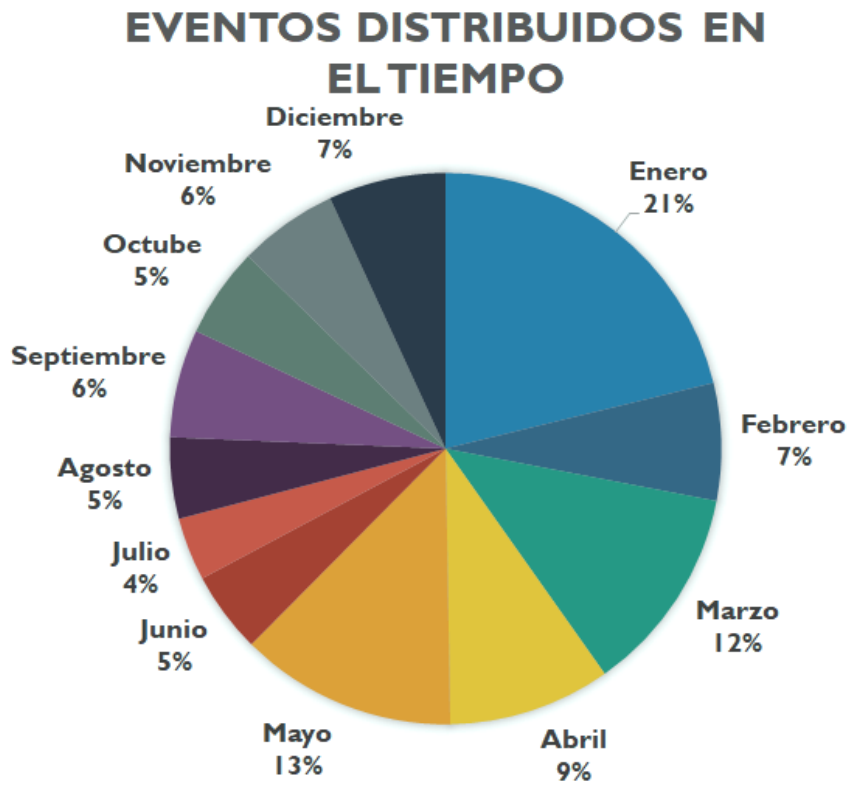


Figura 4.2: Distribución de los eventos en el tiempo. Mayor sismicidad en el mes de enero.

4.2. Distribución de los Eventos, Profundidad y Magnitudes

Dentro del área de estudio se identificaron 4 cúmulos que se encuentran cercanos a volcanes y en la ZFLO:

- 3 cúmulos ubicados en la zona oriental:
 - Clúster A ubicado a los 45°S y 73°W de rumbo noreste, las estaciones más cercanas a este clúster son USPA y ETRA, cuenta con 18 eventos, con profundidades que van desde 8 hasta 26,8 [km] con una media de 10,74 [km]. Las magnitudes encontradas van desde los 0,7 a 1,8 *Ml* con una media de 1,2 *Ml*. Las magnitudes se concentran entre los 0,5-1 *Ml*. Cercano a este clúster se encuentran los volcanes Macá - Cay. Los sismos se encuentran en un radio de 19,6 [km] con respecto al volcán Cay.
 - Clúster B ubicado en el Fiordo Aysén a los 45°20'S y 73°W-72°50'W, las estaciones CHAC y AYSN son las más cercanas, cuenta con 21 eventos donde las profundidades van desde 6,2 hasta 11,8 [km] con una media de 8,1 [km]. Las magnitudes encontradas van desde 0,3 a 1,9 *Ml* con una media de 1 *Ml*. Las magnitudes en general se concentran entre un rango de 0,5-1 *Ml*. No se encuentran volcanes cercanos a los eventos.
 - Clúster C ubicado a los 45°50'S y 73°W-72°50'W, la estación ADAL es la más cercana a este clúster, con un total de 26 eventos y profundidades que llegan hasta 25,2 [km] con una media de 8,31 [km]. Las magnitudes encontradas en este clúster van desde los 0,5 a 1,75 *Ml*, con una media de 1,14 *Ml*. Las magnitudes se concentran entre los 1 y 1,5 *Ml*. Cercano a este clúster se encuentra el volcán Hudson, los sismos se encuentran en un radio de 18 [km] con respecto al volcán.
- Clúster D ubicado en la zona occidental en las cercanías de Chiloé, entre los 43°S-43°50'S y 74°30'W-74°W. Este grupo es el que tiene mayor cantidad de sismos, con 36 eventos en total y con profundidades que van llegar hasta 21,3 [km] con una media de 4,71 [km]. Las magnitudes encontradas van de 1 a 4,9 *Ml*, concentrándose entre los 2 y 3 *Ml*. Promedio de las magnitudes es 2,5 *Ml*. Cabe destacar que la mayoría de los sismos de este clúster se encuentran en el mes de Enero.

En la figura 4.7 se aprecia que el clúster B se encuentra cercano a lo que Vargas et al. (2013) define como Falla Punta Mano - Lago Yulton y las fallas de rumbo EW que están también en la zona. También hay algunos eventos cercanos a la falla Quitralco y un evento en la falla Punta Cola. No se observan sismos cercanos al volcán Mate Grande.

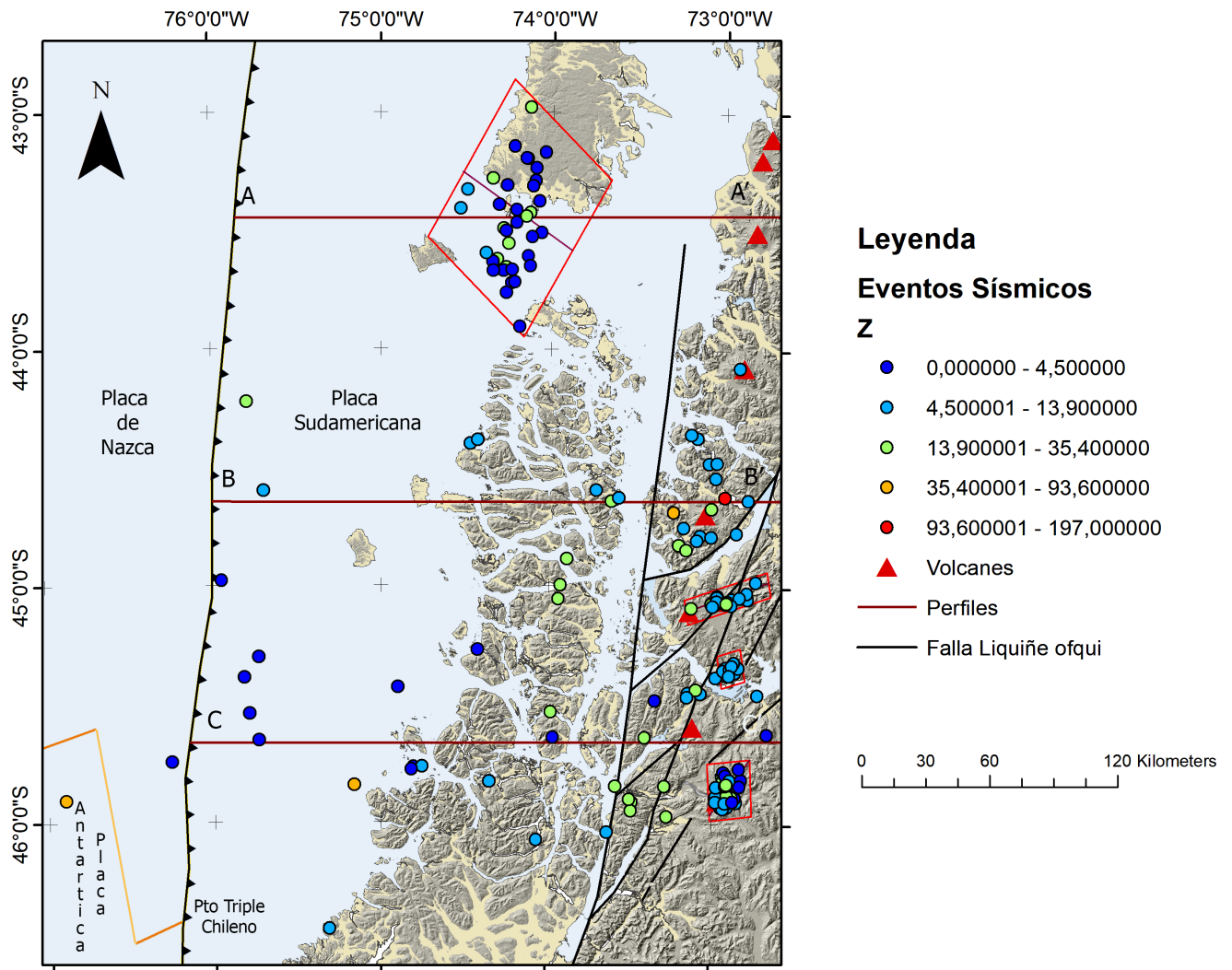


Figura 4.3: Mapa de la distribución de eventos sísmicos.

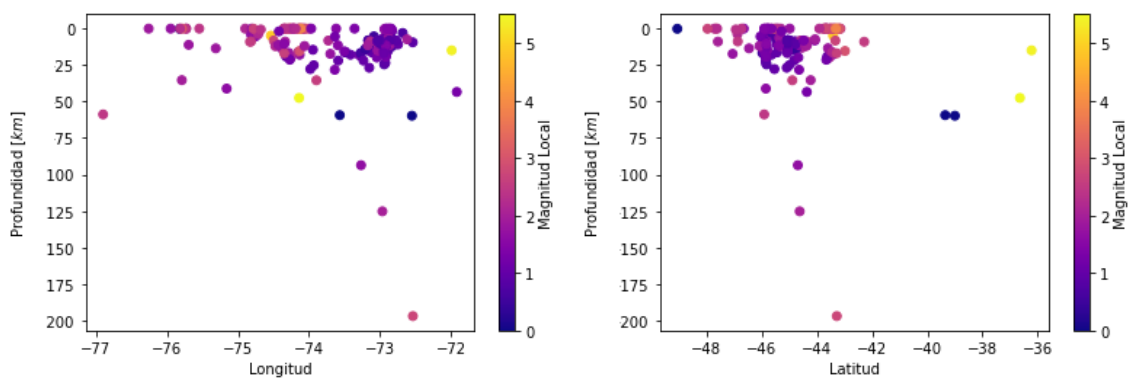
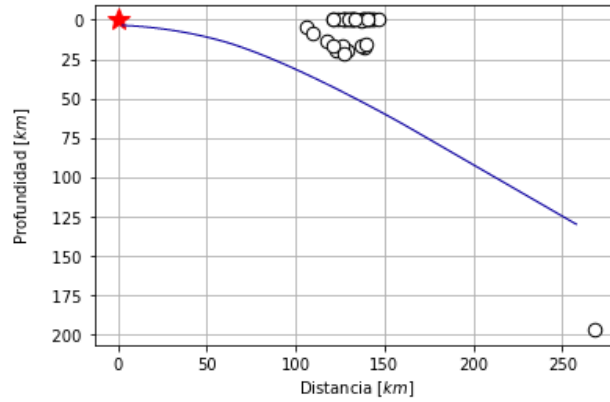
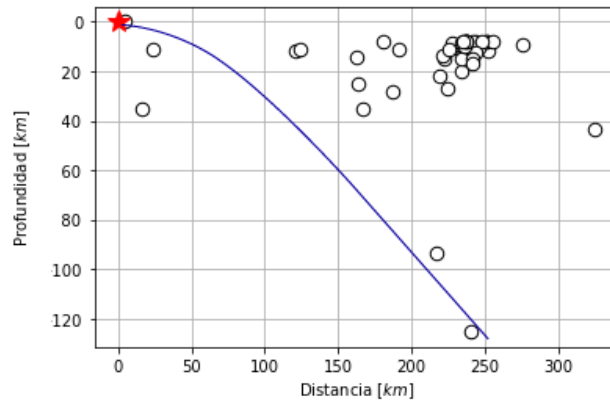


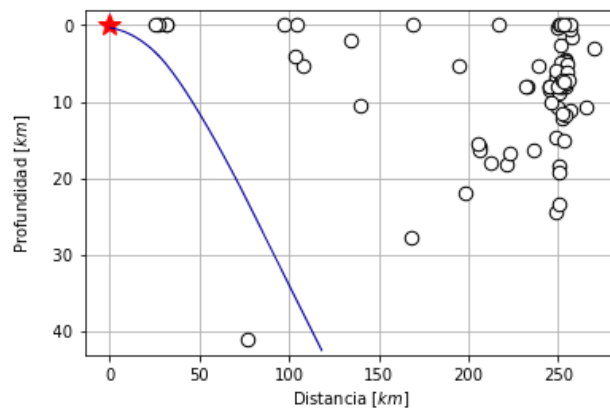
Figura 4.4: Distribución de la profundidad de los eventos totales con respecto a la longitud y latitud.



(a) Gráfico del perfil A-A'

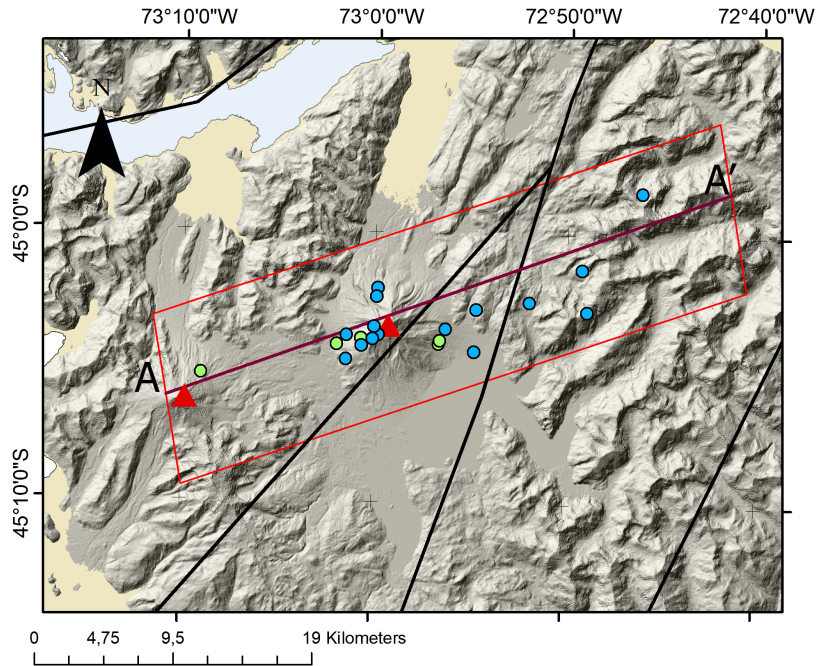


(b) Gráfico del perfil B-B'



(c) Gráfico del perfil C-C'

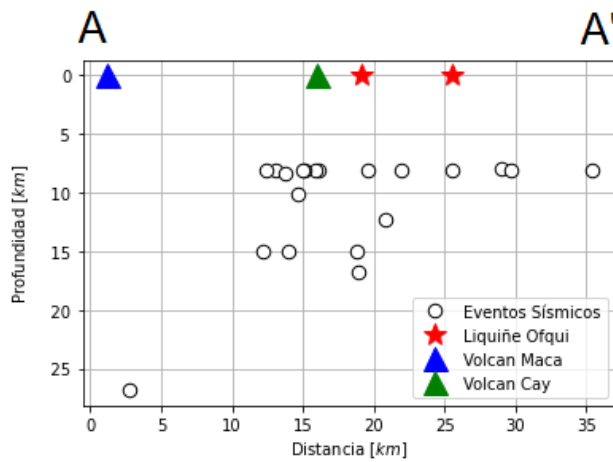
Figura 4.5: Distribución de la profundidad de los eventos totales en los perfiles A-A', B-B' y C-C' señalados en la figura 4.3. Cada gráfico presenta un slab esquematizado de 30° de acuerdo con Lange et al. (2007). El eje de la profundidad se encuentra exagerado con respecto a la distancia.



Leyenda

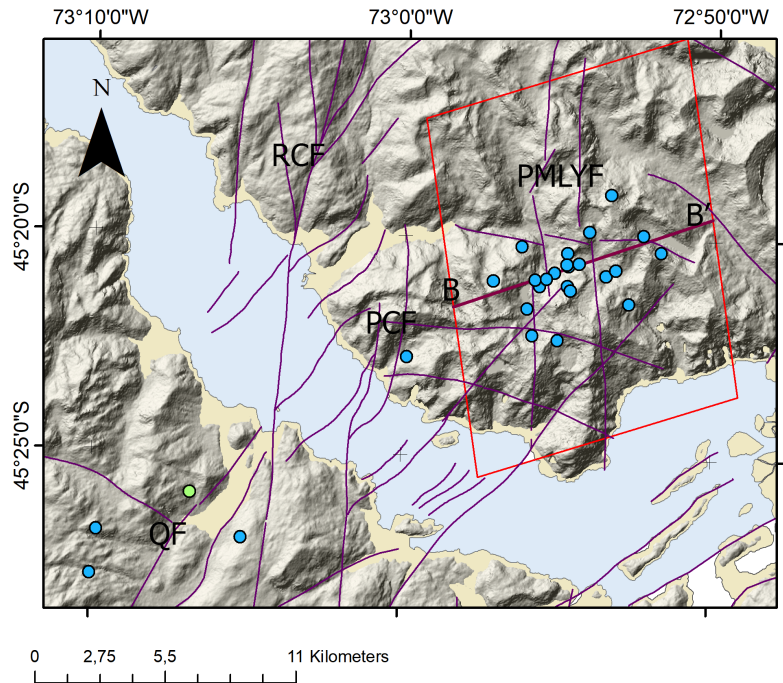
Eventos Sísmicos	● 13,900001 - 35,400000
Z	● 35,400001 - 93,600000
● 0,000000 - 4,500000	● 93,600001 - 197,000000
● 4,500001 - 13,900000	▲ Volcanes
	— Falla Liquiñe ofqui

(a) Distribución de los sismos cercanos al volcán Cay y Maca.



(b) Distribución de las profundidades de los eventos en el cluster de los volcanes Maca-Cay.

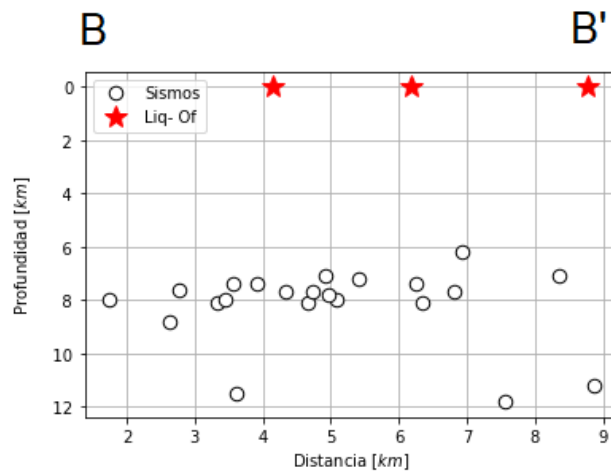
Figura 4.6: Distribución espacial de los eventos y profundidad del cluster Maca-Cay.



Leyenda

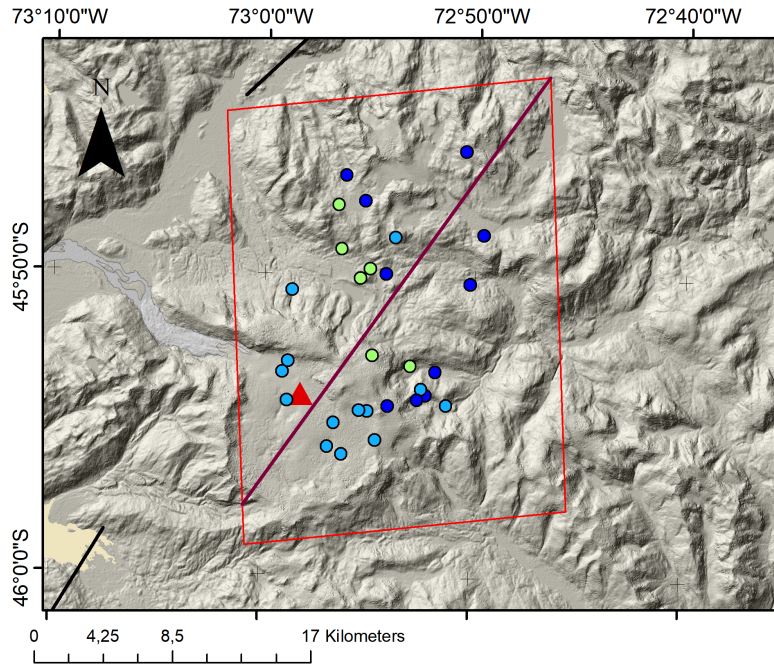
Eventos Sísmicos	● 13,900001 - 35,400000
Z	● 35,400001 - 93,600000
● 0,000000 - 4,500000	● 93,600001 - 197,000000
● 4,500001 - 13,900000	

(a) Distribución de los sismos cercanos al Fiordo Aysén. QF: Falla Quitralco, RCF: Falla Río Cuervo, PMLY: Falla Punta Mano-Lago Yulton, PCF: Falla Punta Cola.



(b) Distribución de las profundidades de los eventos en el cluster Fiordo Aysén.

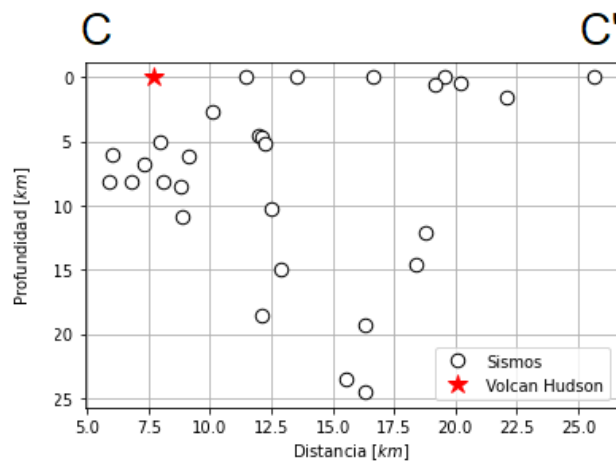
Figura 4.7: Distribución espacial de los eventos y profundidad del cluster Fiordo Aysén.



Leyenda

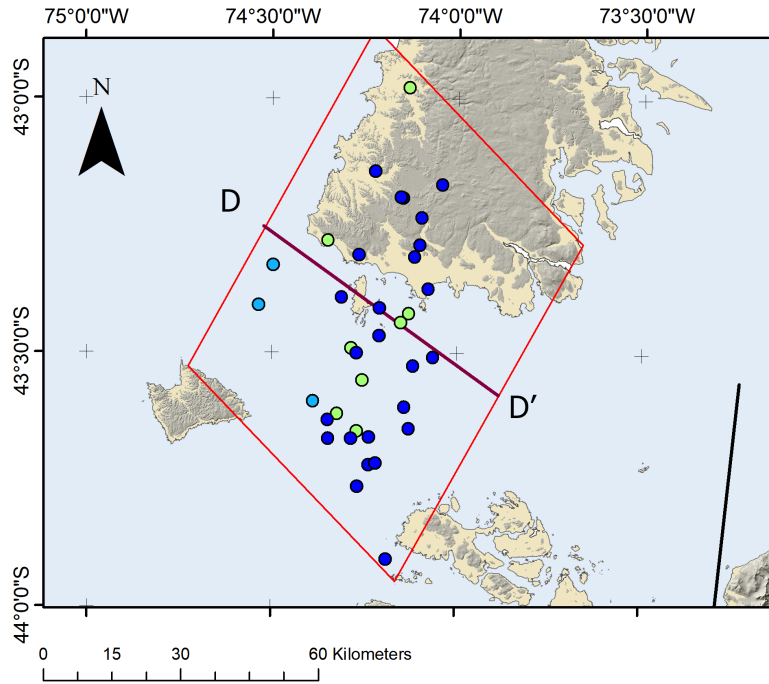
Eventos Sísmicos	● 13,900001 - 35,400000
Z	● 35,400001 - 93,600000
● 0,000000 - 4,500000	● 93,600001 - 197,000000
● 4,500001 - 13,900000	▲ Volcanes
	— Falla Liquiñe ofqui

(a) Distribución de los sismos cercanos al volcán Hudson.



(b) Distribución de las profundidades de los eventos en el cluster volcán Hudson.

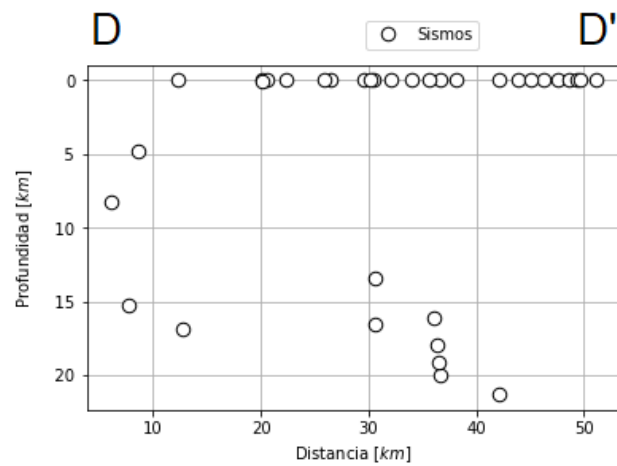
Figura 4.8: Distribución espacial de los eventos y profundidad del cluster Hudson.



Leyenda

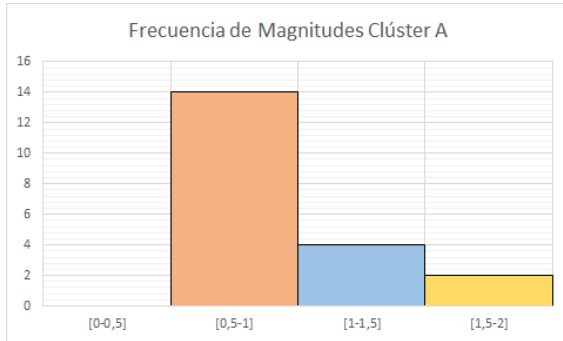
Eventos Sísmicos	● 13,900001 - 35,400000
Z	● 35,400001 - 93,600000
● 0,000000 - 4,500000	● 93,600001 - 197,000000
● 4,500001 - 13,900000	

(a) Distribución de los sismos cercanos a Chiloé

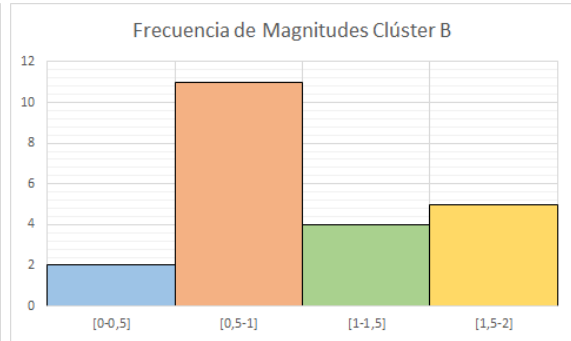


(b) Distribución de las profundidades de los eventos en el cluster Chiloé.

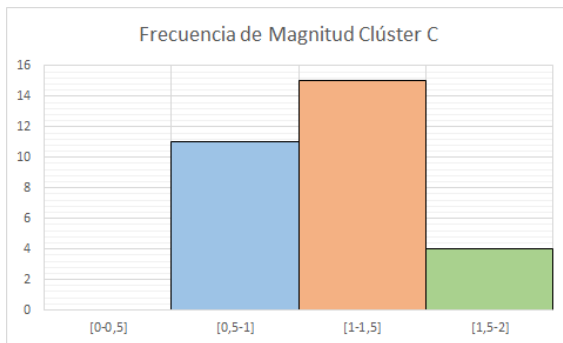
Figura 4.9: Distribucion espacial de los eventos y profundidad del cluster Chiloé.



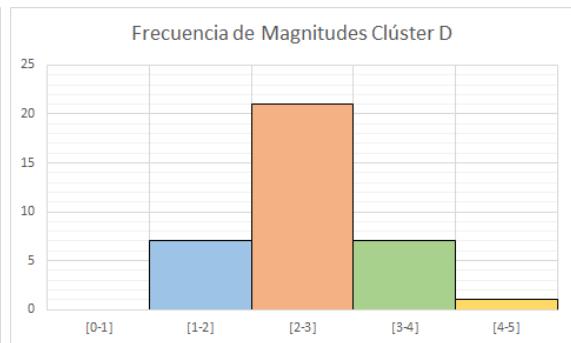
(a) Gráfico de frecuencias de las magnitudes encontradas para el clúster Cay. Las magnitudes se acumulan entre los 0,5-1.



(b) Gráfico de frecuencias de las magnitudes encontradas para el clúster Fiordo Aysén. Las magnitudes se acumulan entre los 0,5-1.



(c) Gráfico de frecuencias de las magnitudes encontradas para el clúster Hudson. Las magnitudes se acumulan entre los 1-1,5.



(d) Gráfico de frecuencias de las magnitudes encontradas para el clúster Chiloé. Las magnitudes se acumulan entre los 2-3.

Figura 4.10: Gráficos de frecuencias de las magnitudes encontradas.

Capítulo 5

Análisis e Interpretación de Resultados

La mayor sismicidad se encontró entre los 48°S a 42°S y 75W-73°30'W, la poca cantidad de estaciones operando y registros ruidosos disminuyó la cantidad de eventos localizados. Los eventos corresponden a sismos corticales, sismos asociados al ridge, interplaca, e intraplaca. De acuerdo con la distribución, efectivamente parte de la sismicidad está asociada a la ZFLO y al volcanismo. Asimismo, está asociada con la dorsal y subducción. Con respecto a las profundidades encontradas, estas llegaron hasta los 197 [km] aunque está sujeto a error debido a la poca cantidad de estaciones activas. En la generalidad la mayoría de los eventos se encuentran a profundidades menores a 25[km], aunque su distribución es heterogénea; la zona del fiordo tiene profundidades que llegan hasta aproximadamente 12 [km] mientras que en los volcanes Cay y Hudson se encuentran profundidades entre los 27 [km] y 25 [km] respectivamente.

La profundidad de un sismo depende de la temperatura, presión, tasa de deformación, composición de la roca, presión de fluidos en los poros y régimen tectónico (Tullis and Yund (1977), Rolandone et al. (2004), Paterson and Wong (2005)). El límite frágil - dúctil de la corteza (Brittle - ductile transition, BDT), que corresponde al límite donde se producen los sismos, está definido por estos parámetros. Las profundidades encontradas en el fiordo Aysén concuerdan con las encontradas por Villalobos et al. (2020), él propone que el BDT de la corteza se encuentra a los 10 [km]. Esta profundidad puede deberse a una fuente de calor, en el área se encuentra una serie conos monogenéticos que podrían verificar esta fuente. Las profundidades encontradas en el volcán Cay puede deberse a la presencia de fluidos más la acción tectónica de la ZFLO, es la misma situación para el volcán Hudson. Se necesita una mayor cantidad de eventos sísmicos para calcular el BDT para el resto de la Región de Aysén.

De acuerdo con la distribución de los eventos, se encontraron 4 clústeres:

- Clúster A: Se encuentra cercano al volcán Cay, los eventos sísmicos se encuentran en un radio de 19 [km]. Las magnitudes locales se encuentran agrupadas entre 0,5-1. No se tiene registros eruptivos para el volcán y tampoco se han encontrado depósitos de tefra de edad Holocena (Naranjo and Stern, 2004), aun así, se registra actividad sísmica.

Además, los resultados de Sáez et al. (20xx) también registran actividad cercana al volcán por lo que se considera un peligro geológico. Se propone que esta agrupación sísmica es volcano-tectónico, es decir, no solo la actividad del volcán Cay es responsable de la actividad sísmica, sino que también la ZFLO dado a la cercanía que tienen los eventos con respecto a la rama principal NS de la ZFLO (Figura 4.4).

- Clúster B: Está ubicado en las cercanías del Fiordo Aysén. Sus magnitudes locales se concentran entre los 0,5-1. Comparando con los resultados de Sáez et al. (20xx), es una zona recurrente de actividad sísmica. Villalobos et al. (2020) identificó 3 fallas participantes del terremoto del 2007: Punta Cola, Río Cuervo y Quitralco. En este estudio los sismos se encuentran cercanos a la falla Punta Mano-Lago Yulton y las fallas de rumbo EW. A pesar de que el evento del 2007 tuvo lugar en las fallas anteriormente mencionadas, las fallas que se encuentran alrededor también son activas. Comparando con los resultados de Sáez et al. (20xx), para el año 2017 no hubo tanta actividad sísmica en la falla Quitralco o las fallas que conectan entre las fallas Río Cuervo con Punta cola como la hubo para los años 2018-2019. Esta zona Vargas et al. (2013) la considera una zona de transferencia entre la falla principal NS de la ZFLO y las fallas NNE que forman parte del sistema y que la tasa de deslizamiento es mayor en las estructuras N-S NE-SW con respecto a las estructuras E-W. Se propone que el origen de estos sismos son tectono - magmático tal como el clúster A, dado a la cercanía que hay con los centros monogenéticos, estos producirían el fracturamiento de la corteza frágil debido a la presión que generan los fluidos, este mecanismo es similar a lo que propone Hill (1977). Otro mecanismo que puede generar enjambres sísmicos en la zona es la inyección de agua al sistema, si es que la presión que ejerce es capaz de producir un fracturamiento hidráulico y generar “diques”, tal como describe Hill (1977). De todas formas, para asegurar la presencia de fluidos es necesario calcular la razón V_p/V_s . También estos eventos son el inicio de un enjambre sísmico que tiene mayor desarrollo para los años 2018-2019.
- Clúster C: Estaría asociado al volcanismo de Hudson con magnitudes que se centran entre los 1 a 1,5 M_l . Comparando los resultados de este estudio con las localizaciones de Sáez et al. (20xx), hubo mayor actividad en el volcán Hudson en el año 2017. Se considera un peligro geológico por su alta actividad sísmica. El último registro volcánico fue en el 2011 donde se registró un sismo de 4.6 el 25 de octubre seguido de un aumento de eventos sísmicos, el material emitido correspondió a una bruma de ceniza fina, la columna eruptiva fue menor a 10[km] de altura y además generó 3 cráteres formados en el glaciar. (Amigo et al., 2012).
- Cluster D: Ubicado en las cercanías de Chiloé correspondería a réplicas del terremoto del 2016. Las magnitudes encontradas en esta agrupación se concentran entre los 2-3 M_l aunque estas no son totalmente certezas dado a que las estaciones sísmicas utilizadas para este estudio se encuentran lejos de la zona. Además, la mayoría de los eventos para este grupo se encuentra en el mes de enero.

No se registraron eventos cercanos al volcán Mate Grande por lo que su comportamiento es estable para el año 2017, además comparando con los resultados de Sáez et al. (20xx) tampoco hay registros de actividad cercana al volcán. Sin embargo, cabe destacar que no hay estaciones cercanas al volcán, por lo que no se puede argumentar que este volcán no posee actividad. Queda propuesto monitorear su actividad sísmica a lo largo del tiempo. Dado el alcance de este estudio, también queda propuesto calcular mecanismos focales para poder comprobar la hipótesis propuesta por Pérez-Estay et al. (2020) la ocurrencia de estratovolcanes y centros eruptivos menores con respecto a los distintos tipos de estructuras asociadas. También para observar si en profundidad es consistente con el modelo de flor positiva propuesto por Thomson (2002) donde las fallas principales se unen en el límite frágil-dúctil.

No se encontraron los cúmulos de la zona del Parque Nacional Isla Magdalena ni los cúmulos ubicados en la zona de archipiélagos, probablemente por la poca cobertura de estaciones sísmicas en esos sectores. Los resultados de esta investigación dejan evidenciado que hay zonas puntuales de la ZFLO que son altamente sísmicas, particularmente en el Fiordo Aysén, esta zona es capaz de generar sismos de gran magnitud como el terremoto del 2007 que generó varios deslizamientos de tierra.

Capítulo 6

Conclusión

6.1. Conclusiones Generales

El principal objetivo de este estudio era determinar el origen de la sismicidad en la Región de Aysén y relacionarlo con el contexto geológico. Se confeccionó un catálogo sísmico con la finalidad de determinar el límite frágil-dúctil de la corteza, la distribución de los eventos y establecer agrupaciones sísmicas. Se trabajó con datos del CSN y OVDAS, 11 estaciones sísmicas y 466 eventos. Para encontrar la solución hipocentral de los eventos se utilizó el programa SEISAN, los cuales estos datos fueron presentados en un mapa. De las 11 estaciones, no todas estuvieron activas durante el 2017, además de tener registros ruidosos. De un total de 466 eventos se pudieron localizar 189. Con respecto a los resultados, se encontraron sismos tipo interplaca, intraplaca y corticales. Se verifica la hipótesis ya que, de acuerdo con la distribución espacial de estos eventos, el origen de la sismicidad está asociada al volcanismo de la zona y a la acción tectónica de la ZFLO, además de estar asociada a la dorsal y subducción. Dentro de la distribución de los eventos, se encontraron 4 clústeres que están asociados a volcanismo y a la acción tectónica de la ZFLO. Las profundidades encontradas abarcan hasta los 197 km, concentrándose en profundidades menores a 25 km.

6.2. Conclusiones Específicas

- De acuerdo con los resultados de las profundidades, el límite frágil-dúctil es heterogéneo en la Región de Aysén. Las profundidades encontradas en el Fiordo Aysén llegan hasta los 12 km mientras que en otros sectores como los clústeres encontrados en los volcanes Cay y Hudson abarcan los 27 y 25 km respectivamente. Esto indica que en el Fiordo Aysén debe tener una fuente de calor (esta la existencia de una fuente magmática por la presencia de conos monogenéticos en el área), mientras que en los clústeres de los volcanes Cay y Hudson se debe a la presencia de fluidos. Se debe tener en cuenta que estas profundidades tienen un error asociado dado a la poca cantidad de estaciones activas.
- Dentro de las agrupaciones encontradas, algunas se repiten en el trabajo de Sáez et al.

(20xx) como el clúster del fiordo Aysén. Los sismos se encuentran cercanos a la falla Punta Mano - Lago Yulton y sus magnitudes locales se concentran entre 0,5 y 1. A pesar de que el terremoto del 2007 tuvo lugar las fallas Punta Cola, Río Cuervo y Quitralco, no son las únicas fallas que son activas. Los resultados apoyan las conclusiones propuestas por Vargas et al. (2013), en la que menciona que la zona del fiordo es altamente activa debido a que es una zona de transferencia entre la falla principal NS de la ZFLO y fallas NNE. El origen de esta agrupación es tectono-magmático por la cercanía que hay con los conos monogenéticos. Además se puede apreciar que en el año 2017 es el inicio de un enjambre sísmico que tiene mayor desarrollo para los años 2018-2019.

- También se encuentran clústeres cercanos a los volcanes Cay y Hudson. Hudson es una de las fuentes principales de sismicidad dentro de la zona, la última erupción fue en el 2011. Aunque no se tengan registros eruptivos recientes para el volcán Cay, también presenta sismicidad asociada e indicaría que hay un peligro geológico asociado. El origen del clúster ubicado en las cercanías del volcán Cay es tectono-magmático ya que los eventos se encuentran cercanos a la falla principal NS de la ZFLO.
- También se encontró una agrupación en las cercanías de Chiloé, estos corresponden a réplicas del terremoto del 2016, la mayoría de los eventos se encuentran en el mes de enero. Las magnitudes encontradas están sujetas a error porque las estaciones se encuentran lejanas.
- No hubo registro sísmico para el volcán Mate Grande y tampoco es evidenciada en los resultados de Sáez, se considera su actividad estable para los años 2017 a 2019. Esta estabilidad puede deberse a que no hay estaciones cercanas al volcán.
- Comparando con los resultados de Sáez para los años 2018-2019, no se encontraron clústeres en la zona del Parque Nacional Isla Magdalena ni en la zona de archipiélagos por la poca cobertura en estaciones.

6.3. Limitaciones y Proyecciones

- Una de las limitaciones para este trabajo fue el cálculo de los mecanismos focales dado a que hubo pocas estaciones sísmicas activas y pocos sismos localizados. Se puede seguir trabajando en este estudio calculando los mecanismos focales para visualizar los campos de esfuerzos para corroborar otras hipótesis como la relación que hay entre el tipo de volcanismo de la zona y el régimen tectónico, como también cómo se comportan las fallas en profundidad.
- También se recomienda extender la red de estaciones para tener una mayor cobertura. Específicamente se recomienda agregar estaciones cerca del volcán Mate Grande y monitorearlo mínimo por 1 año, ya que es reciente su descubrimiento y no se sabe cuál es riesgo volcánico asociado. También se recomienda agregar estaciones cerca de la estación MGDN, ya que en los estudios de Sáez para los años 2018-2019 se encontraron

cúmulos en esa zona y no se visualizaron para esta investigación, probablemente por la falta de estaciones cercanas a ese lugar.

- Asimismo se recomienda seguir monitoreando el área del fiordo Aysén, ya que es un lugar altamente sísmico y se sabe que puede provocar terremotos de gran magnitud como el del 2007.

Bibliografía

- Agurto, H., Rietbrock, A., Barrientos, S., Bataille, K., and Legrand, D. (2012). Seismotectonic structure of the aysén region, southern chile, inferred from the 2007 mw = 6.2 aysén earthquake sequence. *Geophysical Journal International*, 190:116–130.
- Amigo, , Silva, C., Orozco, G., Bertin, D., and Lara, L. (2012). La crisis eruptiva del volcán Hudson durante octubre-noviembre 2011. *Congreso Geológico Chileno*, pages 457–459.
- Barrientos, S. and CSN (2016). Informe técnico terremoto chiloé 25 diciembre 2016. *Centro Sismológico Nacional*.
- Cande, S. and Leslie, R. (1986). Late cenozoic tectonics of the southern chile trench. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 91.
- Cembrano, J., Hervé, F., and Lavenu, A. (1996). The liquiñe ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern chile. *Tectonophysics*, 259(1):55 – 66. Geodynamics of The Andes.
- Cembrano, J., Lavenu, A., Reynolds, P., Arancibia, G., López, G., and Sanhueza, A. (2002). Late cenozoic transpressional ductile deformation north of the nazca-south america-antarctica triple junction. *Tectonophysics*, 354:289–314.
- Cembrano, J., Schermer, E., Lavenu, A., and Sanhueza, A. (2000). Contrasting nature of deformation along an intra-arc shear zone, the liquiñe–ofqui fault zone, southern chilean andes. *Tectonophysics*, 319:129–149.
- Cisternas, A. and Vera, E. (2008). Sismos históricos y recientes en Magallanes. *Magallania (Punta Arenas)*, 36:43 – 51.
- CSN (2018). Efemérides sísmicas: Terremoto de Aysén de 1927. *Centro Sismológico Nacional*.
- De Pascale, G. P., Froude, M., Penna, I., Hermanns, R. L., Sepúlveda, Sergio A. Moncada, D., Persico, M., Easton, G., Villalobos, A., and Gutiérrez, F. (2021). Liquiñe-Ofqui’s fast slipping intra-volcanic arc crustal faulting above the subducted Chile Ridge. *Sci Rep* 11, 7069.
- D’Orazio, M., Innocenti, F., Piero, M., Tamponi, M., Tonarini, S., Ferrán, O., Lahsen, A., and Omarini, R. (2003). The quaternary calc-alkaline volcanism of the patagonian andes

- close to the chile triple junction: Geochemistry and petrogenesis of volcanic rocks from the cay and maca volcanoes (45°s, chile). *Journal of South American Earth Sciences*, 16.
- Espinosa, A. F. (1989). Determinación de la magnitud local a partir de acelerogramas de movimientos fuertes del suelo, física de la tierra. *Ed. Universidad Complutense de Madrid*, num. 1:105–129.
- Forsythe, R. and Nelson, E. (1985). Geological manifestations of ridge collision: Evidence from the golfo de penas-taitao basin, southern chile. *Tectonics*, 4(5):477–495.
- Forsythe, R., Nelson, E., Carr, M., Kaeding, M., Herve, M., Mpodozis, C., Soffia, J., and Harambour, S. (1986). Pliocene near-trench magmatism in southern chile: A possible manifestation of ridge collision. *Geology*, 14.
- Gallardo, L. (2020). 1960: El año en que chile tuvo 6 grandes terremotos y el riñihuazo. *Biobio Chile*.
- Hill, D. P. (1977). A model for earthquake swarms. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 82(8):1347–1352.
- Lange, D., Cembrano, J., Rietbrock, A., Haberland, C., Dahm, T., and Bataille, K. (2008). First seismic record for intra-arc strike-slip tectonics along the liquine-ofqui fault zone at the obliquely convergent plate margin of the southern andes. *Tectonophysics*, 455.
- Lange, D., Rietbrock, A., Haberland, C., Bataille, K., Dahm, T., Tilmann, F., and Flüh, E. (2007). Seismicity and geometry of the south chilean subduction zone (41.5°s–43.5°s): Implications for controlling parameters. *Geophysical Research Letters*, 34.
- Madariaga, R. (1998). Sismicidad de Chile. *Física de la tierra, Universidad Complutense de Madrid*, 31:221–258.
- Mora, C. (2009). Análisis del Enjambre Sísmico del Fiordo de Aysén Durante Enero de 2007.
- Moreno, T. and Gibbons, W. (2007). *The Geology of Chile*. Geological Society of London.
- Naranjo, J. A., Arenas, M., Clavero, J., and Muñoz, O. (2009). Mass movement-induced tsunamis: main effects during the Patagonian Fjordland seismic crisis in Aisén (45°25'S), Chile. *Andean geology*, 36:137 – 145.
- Naranjo, J. A. and Stern, C. R. (2004). Holocene tephrochronology of the southernmost part (42°30'–45°s) of the andean southern volcanic zone. *Revista Geológica de Chile*, 31:225–240.
- Niemeyer, H., Skarmeta, J., Fuenzalida, R., and Espinosa, W. (1984). Hojas península de taitao y puerto aisé, región de aisé del general carlos ibañez del campo. carta geológica de chile, 60-61, 1:500.000. *Servicio Nacional De Geología y Minería, Chile*.
- Paterson, M. and Wong, T.-f. (2005). Experimental rock deformation - the brittle field. *Experimental Rock Deformation - The Brittle Field*, 348.

- Pérez-Estay, N., Yáñez, G., Crempien, J., Roquer, T., Cembrano, J., Valdenegro, P., Aravena, D., Arancibia, G., and Morata, D. (2020). Seismicity in a transpressional volcanic arc: The liquiñe-ofqui fault system in the puyuhuapi area, southern andes, chile (44°s). *Tectonics*, 39(11):e2020TC006391. e2020TC006391 2020TC006391.
- Ramos, V. (1989). Andean foothills structures in northern magallanes basin, argentina. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 73:887–903.
- Ramos, V. and Ghiglione, M. (2008). Tectonic evolution of the patagonian andes. *Developments in Quaternary Sciences*, 11:57–71.
- Ramos, V. and Kay, S. (1992). Southern patagonian plateau basalts and deformation: Backarc testimony of ridge collisions. *Tectonophysics*, 205:261–282.
- Richter, C. E. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. Seism. Soc. Am* 25, pages 105–129.
- Rolandone, F., Bürgmann, R., and Nadeau, R. M. (2004). The evolution of the seismic-aseismic transition during the earthquake cycle: Constraints from the time-dependent depth distribution of aftershocks. *Geophysical Research Letters*, 31(23).
- Ruiz, S., Moreno, M., Melnick, D., Campo, F., Poli, P., Baez, J., Leyton, F., and Madariaga, R. (2017). Reawakening of large earthquakes in south-central chile: The 2016 mw7.6 chiloé event. *Geophysical Research Letters*.
- Sáez, M., Ruiz, S., Ide, S., and Sugioka, H. (2019). Shallow non-volcanic tremor activity and potential repeating earthquakes in the chile triple joint: Seismic evidence of the subduction of the active nazca-antartic spreading center. *Seismological Research Letters*.
- Sáez, M., Ruiz, S., Pastén, F., Carrasco, S. an Torres, R., and Ide, S. (20xx). Revealing the seismic behaviour of the southern portion of the liquiñe-ofqui system fault.
- Thomson, S. (2002). Late cenozoic geomorphic and tectonic evolution of the patagonian andes between latitudes 42°s and 46°s: an appraisal based on fission-track results from the transpressional intra-arc liquiñe-ofqui fault zone. *Geological Society of America Bulletin*, 114:1159–1173.
- Tullis, J. and Yund, R. A. (1977). Experimental deformation of dry westerly granite. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 82(36):5705–5718.
- Vargas, G., Rebolledo, S., Sepúlveda, S., Lahsen, A., Thiele, R., Townley, B., Padilla, C., Rauld, R., Herrera, M. J., and Lara, M. (2013). Submarine earthquake rupture, active faulting and volcanism along the major Liquiñe-Ofqui Fault Zone and implications for seismic hazard assessment in the Patagonian Andes. *Andean geology*, 40:141 – 171.

Villalobos, A., Easton, G., Maksymowicz, A., Ruiz, S., Lastras, G., De Pascale, G., and Agurto-Detzel, H. (2020). Active faulting, submarine surface rupture, and seismic migration along the liquiñe-ofqui fault system, patagonian andes. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 125:26.

Anexo A

Coordenadas de los hipocentros de los eventos sísmicos

Mes	Long	Lat	Prof	RMS	Mag
Enero	-43,40717	-74,536	4,8	0,37	4,926179482
Enero	-43,32883	-74,49633	8,2	0,31	2,699459589
Enero	-43,28867	-74,1015	0	0,68	2,76504973
Enero	-45,63717	-73,4145	17,9	0,26	0,992303256
Enero	-45,74367	-76,25767	0	0,36	1,854897531
Enero	-47,65333	-74,323	0	0,84	3,396424809
Enero	-47,57933	-74,33583	8,9	0,34	2,011476717
Enero	-47,70283	-73,99483	0	0,53	2,261929153
Enero	-47,608	-74,3515	0	0,3	2,244266316
Enero	-43,39183	-74,31183	0	0,46	2,470533257
Enero	-43,2355	-74,0965	0	0,57	3,391302553
Enero	-45,53417	-73,98117	27,7	0,27	0,998268134
Enero	-45,88783	-72,98467	8,1	0,29	1,056426124
Enero	-45,4315	-74,89733	0	0,4	2,158634607
Enero	-43,42367	-74,13017	17,9	0,34	1,607983314
Enero	-44,47817	-73,063	10,1	0,35	1,660947041
Enero	-43,55483	-74,255	20	0,49	2,071210116
Enero	-43,37483	-74,07833	0	0,57	2,078129229
Enero	-43,276	-72,536	197	0,53	2,746178002
Enero	-43,50967	-74,06383	0	0,59	2,214227286
Enero	-43,608	-74,141	0	0,22	1,682222488
Enero	-43,527	-74,11833	0	0,46	2,525407146
Enero	-45,84117	-73,291	18,2	0,29	1,196034057
Enero	-45,92883	-72,948	8,1	0,35	1,403646862

Mes	Long	Lat	Prof	RMS	Mag
Enero	-45,35167	-72,92717	7,4	0,13	0,348181018
Enero	-45,36033	-72,93383	7,6	0,15	0,465361106
Enero	-43,72117	-74,23683	0	0,3	2,377712719
Enero	-43,14433	-74,223	0	0,46	2,227010421
Enero	-45,84383	-75,15917	41,1	0,11	1,634135499
Enero	-45,88183	-72,98033	8,5	0,29	1,055098544
Enero	-43,62083	-74,32217	19,1	0,17	1,044244334
Enero	-43,63283	-74,34817	0	0,52	2,745702575
Enero	-45,089	-73,15033	26,8	0,32	0,995511925
Enero	-43,59617	-74,38733	13,4	0,39	1,86446238
Enero	-44,63133	-72,82633	12	0,27	0,695900159
Enero	-43,4675	-74,21033	0	0,46	3,125773505
Enero	-43,49183	-74,28583	16,6	0,07	1,825107417
Enero	-45,795	-72,94267	14,6	0,19	1,566686339
Enero	-45,4495	-73,08517	5,3	0,26	0,523960167
Enero	-43,76367	-74,26683	0	0,26	3,366859851
Febrero	-47,046	-73,6985	17,3	0,52	1,743495668
Febrero	-43,65533	-74,26933	21,3	0,26	1,215122736
Febrero	-44,4435	-72,538	9,4	0,36	0,925163351
Febrero	-45,91083	-73,48733	16	0,33	1,142585309
Febrero	-45,94733	-73,48933	16,3	0,19	0,818126314
Febrero	-45,96933	-73,27283	16,7	0,19	0,604556202
Febrero	-44,7835	-73,10867	10,7	0,35	1,182572653
Febrero	-43,30867	-74,26533	0	0,47	3,296494689
Febrero	-43,441	-74,152	16,1	0,16	2,164030304
Febrero	-46,64367	-73,61717	0	0,32	1,510546029
Febrero	-46,45133	-75,31183	13,5	0,3	1,849031743
Febrero	-44,80183	-73,1275	9,6	0,14	0,56008009
Febrero	-44,53917	-73,02067	13,1	0,35	1,987271912
Marzo	-45,8995	-72,87083	4,5	0,15	0,716607936
Marzo	-45,89633	-72,8745	4,6	0,25	0,599487133
Marzo	-45,92483	-72,91	5	0,33	0,851545386
Marzo	-45,3705	-72,93083	8,8	0,31	0,659515221
Marzo	-45,905	-72,85433	5,1	0,34	0,519257587
Marzo	-45,3795	-72,99783	8	0,3	0,755747147
Marzo	-39,353	-73,56567	59,3	0,54	NaN
Marzo	-45,8865	-72,8635	0	0,33	1,758221813
Marzo	-45,90883	-72,91667	6,1	0,33	0,615591325
Marzo	-43,413	-74,20983	0	0,4	2,5838095
Marzo	-45,9155	-72,94317	6,8	0,35	0,835845439
Marzo	-44,824	-73,2325	21,9	0,29	1,026161735
Marzo	-45,933	-72,93633	6	0,34	1,401067365
Marzo	-42,97967	-74,13183	15,3	0,52	2,963078111

Mes	Long	Lat	Prof	RMS	Mag
Marzo	-45,90583	-72,90083	2,7	0,25	0,989186856
Marzo	-43,50167	-74,2715	0	0,34	2,931292962
Marzo	-36,22583	-71,98983	14,9	0,28	5,404113699
Marzo	-45,44733	-73,16317	8,1	0,21	0,642529025
Marzo	-45,43267	-73,11333	16,3	0,11	0,970762362
Marzo	-45,3515	-72,91233	8,1	0,13	0,701601647
Marzo	-45,339	-72,91267	8	0,21	0,576132625
Marzo	-45,76817	-74,80383	0	0,23	1,752653686
Marzo	-45,8835	-72,8835	15	0,34	0,871240534
Abril	-45,76567	-74,75183	5,3	0,22	1,367851222
Abril	-45,77767	-74,8155	4,1	0,32	1,664277025
Abril	-45,46417	-73,1665	8,1	0,18	0,703475719
Abril	-45,81933	-72,9395	24,5	0,12	0,758837054
Abril	-45,81017	-72,8275	1,5	0,33	1,108780401
Abril	-45,6165	-72,67983	3	3,82	0,717599431
Abril	-44,97867	-75,94767	0	0,33	1,739758346
Abril	-43,66967	-74,2845	0	0,29	2,453485946
Abril	-44,843	-73,1895	14,8	0,32	0,858030349
Abril	-45,8445	-73,58817	21,9	0,21	1,044679529
Abril	-46,872	-74,71433	3,8	0,34	2,184364731
Abril	-46,86067	-74,8165	8,8	0,34	2,476437999
Abril	-45,9035	-72,9805	8,1	0,31	1,073705449
Abril	-45,45167	-72,74483	10,8	0,08	1,032839135
Abril	-44,37133	-73,13433	8,7	0,3	2,226300656
Abril	-45,3465	-72,91933	7,7	0,17	0,602305802
Abril	-49,04917	-75,8195	0,1	0,35	NaN
Abril	-43,28	-74,34883	16,9	0,35	2,63374009
Mayo	-45,3025	-75,72933	0	0,43	2,034692719
Mayo	-45,878	-72,91367	18,5	0,44	1,113580743
Mayo	-45,33683	-72,93733	8,1	0,16	0,839460113
Mayo	-45,7785	-72,93717	0,4	0,33	1,629172739
Mayo	-45,34733	-72,89183	8,1	0,14	0,687327908
Mayo	-44,75	-73,207	13,9	0,31	0,472322984
Mayo	-45,34383	-72,912	7,8	0,2	0,949824914
Mayo	-45,056	-73,94383	14,5	0,17	1,075552457
Mayo	-45,34283	-72,90633	7,2	0,19	1,191770443
Mayo	-45,35317	-72,91083	7,7	0,2	1,184155679
Mayo	-45,9085	-72,92333	10,8	0,19	1,3742652
Mayo	-43,71783	-74,21783	0	0,31	1,963671023
Mayo	-45,899	-73,50217	15,6	0,33	1,31932841
Mayo	-45,34933	-72,92967	8	0,25	0,8892789
Mayo	-45,34517	-72,8865	7,7	0,13	0,642244077
Mayo	-45,84233	-72,97833	10,2	0,08	1,31909363
Mayo	-44,787	-73,04283	8,6	0,32	1,070779817

Mes	Long	Lat	Prof	RMS	Mag
Mayo	-45,7925	-72,92183	0	0,29	1,723139212
Mayo	-44,88583	-73,89483	35,4	0,18	2,602391111
Mayo	-45,653	-75,73083	0	0,25	2,425110693
Mayo	-45,34883	-72,92367	7,4	0,22	0,501492402
Mayo	-45,83533	-72,92433	23,5	0,25	0,91049577
Mayo	-45,35	-72,95233	8	0,2	0,579427607
Mayo	-36,6475	-74,1385	47,5	0,7	5,508772958
Junio	-45,35783	-72,879	6,2	0,2	1,815097282
Junio	-45,83267	-72,90417	0	0,19	1,448013652
Junio	-43,6665	-74,23583	0	0,31	2,141877336
Junio	-44,5945	-73,727	8,2	0,2	2,18521836
Junio	-45,48083	-73,35817	0	0,08	1,357022562
Junio	-44,59917	-75,69383	11,1	0,27	1,828053585
Junio	-44,68583	-73,26617	93,6	0,13	1,663785233
Junio	-39,00183	-72,5495	59,7	0,29	NaN
Junio	-45,04783	-72,81567	8	0,29	0,897787589
Julio	-45,02183	-72,82067	8,1	0,35	0,69770936
Julio	-45,34333	-72,91283	7,1	0,26	1,37707204
Julio	-45,035	-72,99783	8,1	0,27	0,96131243
Julio	-45,04017	-72,9985	8,1	0,3	0,982774937
Julio	-43,67017	-74,346	0	0,43	2,3291792
Julio	-45,8375	-72,8375	0,6	0,32	1,451035573
Julio	-44,63983	-73,63633	28,2	0,22	1,369847046
Agosto	-46,72217	-75,54467	0	0,36	2,424157996
Agosto	-45,33167	-72,872	7,1	0,27	1,839278918
Agosto	-45,338	-72,86233	11,2	0,33	1,798690585
Agosto	-42,2835	-74,82983	9	0,33	2,556278206
Agosto	-44,626	-73,5925	11,4	0,34	1,545897614
Agosto	-43,65033	-74,12867	0	0,33	2,817577612
Agosto	-43,19633	-74,148	0	0,69	3,212406879
Agosto	-44,77	-72,89167	10,5	0,3	0,881141701
Agosto	-46,07433	-74,062	11,9	0,33	1,884961049
Septiembre	-43,16967	-74,042	0	0,62	2,871838057
Septiembre	-44,66733	-73,04417	19,8	0,28	1,271696628
Septiembre	-45,76417	-72,843	0	0,29	1,343162651
Septiembre	-45,8125	-72,89733	12,1	0,23	1,212694404
Septiembre	-45,83	-72,917	19,3	0,11	1,27256059
Septiembre	-45,04733	-72,912	8,1	0,3	0,802838071
Septiembre	-44,2225	-75,79017	35,3	0,19	1,971409505
Septiembre	-43,195	-74,15317	0,1	0,58	3,076701955
Septiembre	-44,402	-74,47333	12	0,3	2,190386328
Septiembre	-43,3125	-74,1155	0	0,31	3,857315871
Septiembre	-44,38483	-74,43	11,2	0,34	1,739051928
Septiembre	-44,97367	-72,76967	8,1	0,31	0,887237909
Octubre	-45,54133	-75,78767	0	0,5	3,100484628

Mes	Long	Lat	Prof	RMS	Mag
Octubre	-45,38817	-75,816	0	0,32	2,291908031
Octubre	-45,3165	-72,88983	11,8	0,42	1,945896646
Octubre	-44,07233	-72,89267	8,1	0,45	1,511156257
Octubre	-44,61917	-72,9655	125,2	0,17	2,009017716
Octubre	-43,90667	-74,18717	0	0,22	2,232437047
Octubre	-44,35617	-73,17083	11,4	0,37	1,955042816
Octubre	-45,05967	-72,93833	8,1	0,38	0,965768057
Octubre	-45,33067	-72,901	7,4	0,27	1,816896109
Octubre	-45,64067	-73,96767	0	0,51	1,385448348
Noviembre	-46,03817	-73,63367	5,4	0,17	1,261390816
Noviembre	-45,90217	-72,8775	0	0,31	1,474036397
Noviembre	-44,99683	-73,93217	25,1	0,34	0,955918786
Noviembre	-45,90317	-76,899	58,8	0,3	2,474521768
Noviembre	-47,9555	-74,78117	0,1	0,49	2,675230825
Noviembre	-46,93183	-74,67767	0,6	0,32	2,347698156
Noviembre	-45,06417	-73,02433	8,1	0,37	1,388645117
Noviembre	-45,066	-73,0115	15	0,38	1,419945664
Noviembre	-45,06983	-73,0325	15	0,46	1,786693356
Noviembre	-45,04233	-72,86583	8,1	0,27	0,817741081
Noviembre	-45,0705	-73,01133	8,4	0,43	1,702321617
Diciembre	-45,828	-74,34717	10,5	0,31	1,545018338
Diciembre	-45,06367	-72,99667	8,1	0,24	0,736850087
Diciembre	-45,27233	-74,42317	1,9	0,29	1,24593384
Diciembre	-45,0735	-72,91333	12,3	0,35	1,008084423
Diciembre	-45,06883	-72,94417	15	0,33	0,993507416
Diciembre	-45,06633	-73,00167	10,1	0,33	0,735024553
Diciembre	-45,37217	-72,917	11,5	0,3	1,453481993
Diciembre	-44,4755	-73,0155	8,1	0,19	1,318042386
Diciembre	-45,05883	-73,0005	8,1	0,32	0,945661855
Diciembre	-45,07917	-73,0245	8,1	0,37	0,765233022
Diciembre	-44,06433	-72,61883	7,3	0,33	1,971173577
Diciembre	-44,36083	-71,918	43,4	0,65	1,306392516
Diciembre	-45,06683	-72,94317	16,8	0,31	1,089634422

Cuadro A.1: Tabla con los hipocentros de los eventos sísmicos calculados para el año 2017.

Anexo B

Gráficos Complementarios de los Eventos Sísmicos

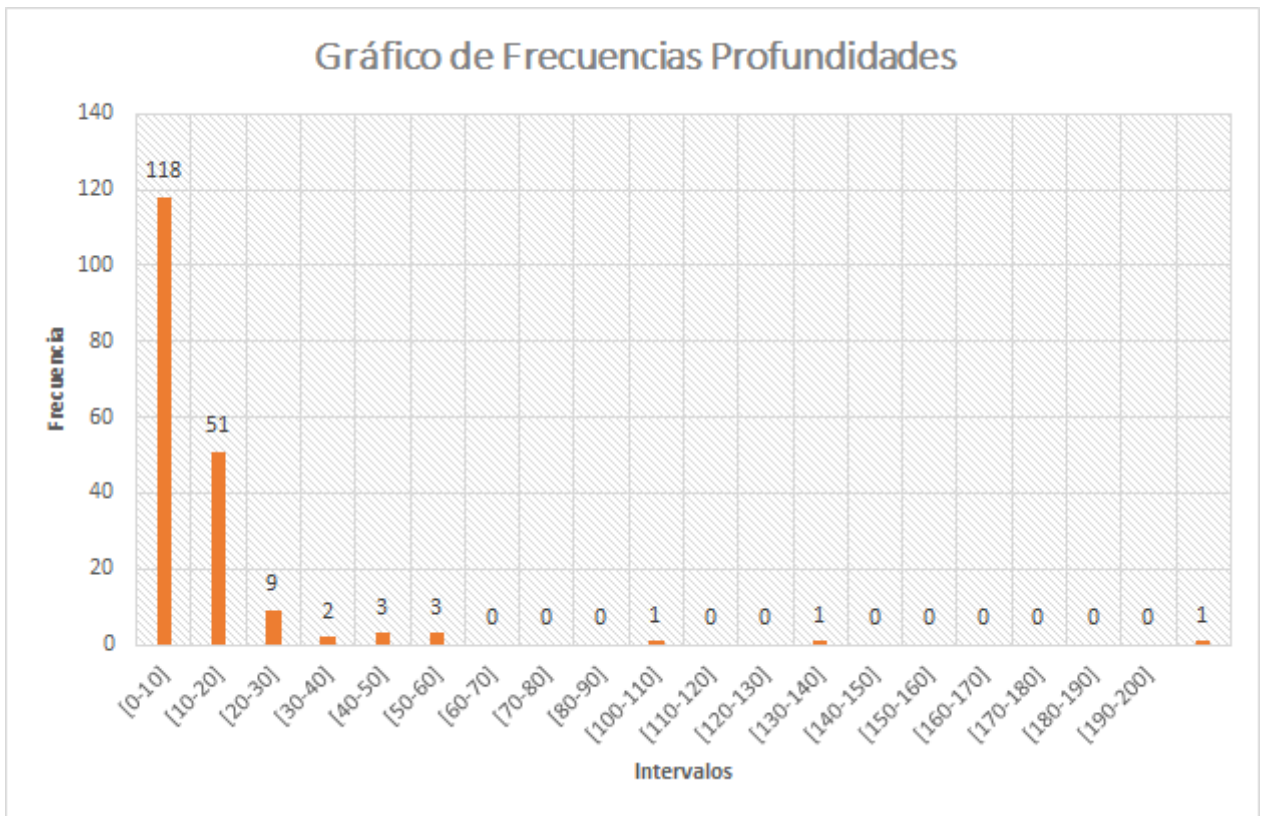


Figura B.1: Histograma de las profundidades totales encontradas.

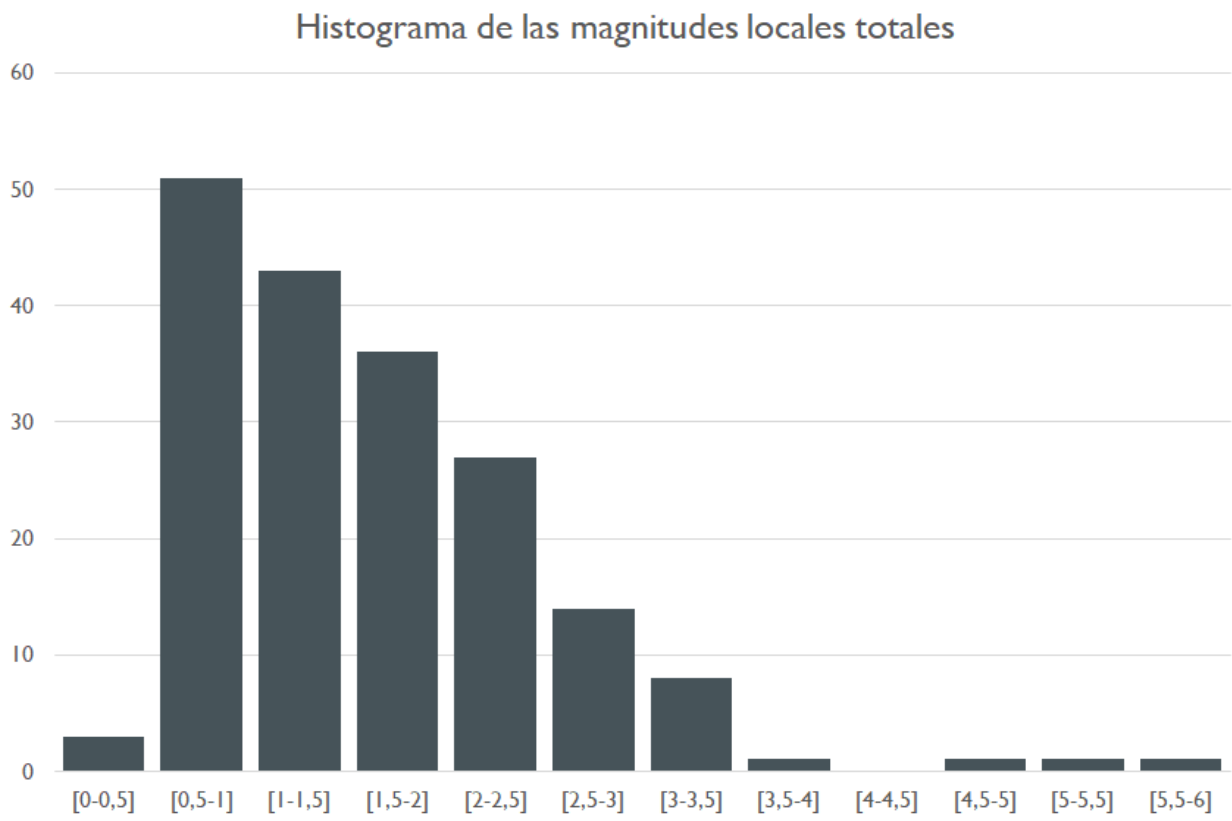


Figura B.2: Histograma de las magnitudes totales encontradas.