



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

ESTUDIO DE SISMICIDAD LOCAL EN LA REGIÓN DE MAGALLANES, UTILIZANDO LA RED SISMOLÓGICA DE ENAP

Nadia Macarena Caniupán Torres

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la
Universidad de Concepción para optar al título profesional de Geofísica

Profesor Guía:

Dr. Arturo Belmonte-Pool

Comisión de Evaluación:

Dr. Matthew Miller

Msc. Rodrigo Adaros

Agosto 2021

Concepción, Chile

© 2021, NADIA MACARENA CANIUPÁN TORRES

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

**ESTUDIO DE SISMICIDAD LOCAL EN LA
REGIÓN DE MAGALLANES, UTILIZANDO LA
RED SISMOLÓGICA DE ENAP**

Nadia Macarena Caniupán Torres

Habilitación profesional presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y
Matemáticas para optar al título profesional de Geofísica.

Profesor Guía:

Dr. Arturo Belmonte-Pool

Comisión de Evaluación:

Dr. Matthew Miller

Msc. Rodrigo Adaros

Agosto 2021

Concepción, Chile

A las mujeres de mi vida: Silvia, Lorena y Nicole.

AGRADECIMIENTOS

A mis abuelos Silvia y Luis, quienes me educaron para convertirme en quien soy y siempre creyeron en mí. A mi madre Lorena, para quien nunca hubo un no de por medio e hizo todo lo posible para que yo lograra cumplir mis sueños. A mi hermana Nicole, quien me ha entregado un apoyo y amistad incondicional durante el desarrollo de esta tesis, alentándome siempre a seguir adelante. A mi hermano Javier, gracias por todo tu cariño y comprensión. Agradezco tener los mejores hermanos que la vida me pudo dar. A Bastian, gracias por el amor, alegría y apoyo incondicional que me entregas cada día. A mi tía Danitza y a la memoria de mi tío Aldo, quienes fueron un gran apoyo para iniciar el desarrollo de esta tesis.

A todas mis amigas y amigos que hice durante mi período universitario, gracias por todos los inolvidables momentos compartidos. A mis queridos compañeros de la sala de tesistas, quienes me entregaron su amistad y siempre estuvieron disponibles para brindarme su apoyo ante cualquier duda.

A mis profesores, en especial a Arturo Belmonte, gracias por aceptar guiarme en este desafío, por su paciencia, apoyo y anécdotas. A ENAP Magallanes, por proporcionarme los datos para desarrollar este trabajo, en especial a Rodrigo Adaros, quien me ofreció este tema y siempre estuvo disponible ante cualquier duda.

Resumen

Se ha localizado nueva actividad sísmica en la región de Magallanes y la Antártica Chilena durante el período 2019-2020 utilizando la red de estaciones sismológicas de la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) instalada desde el año 2019. Históricamente se conocen dos eventos con magnitudes mayores a 7.5, los que ocurrieron en los años 1879 y 1949. En los últimos años, solo se han registrado sismos de mediana y baja intensidad. El objetivo de este estudio fue crear un nuevo catálogo de sismicidad para la zona, ya que las características geográficas de la región y la cantidad de estaciones sísmicas instaladas no han sido suficientes para obtener datos de todo el territorio de interés.

Para el período seleccionado se lograron identificar 168 sismos, mediante el programa Hypocenter incorporado en Seisan, utilizando el modelo de velocidad 1-D de [Guzmán Marín \(2020\)](#). Luego, se determinaron las soluciones de mecanismos focales para 16 de estos eventos, a través del programa Focmec y se analizaron con respecto a las estructuras geológicas presentes en el área de estudio.

Se identifica el carácter sísmico activo de la región relacionado a la falla Magallanes-Fagnano, a la subducción de la placa Antártica bajo la placa de Scotia y a la Faja Plegada y Corrida de Magallanes. Además, se realiza una comparación entre los datos obtenidos por esta nueva red con los antecedentes obtenidos por redes anteriormente instaladas. El Centro Sismológico Nacional (CSN) solo captó datos de 12 de los 168 eventos percibidos por ENAP.

Índice general

AGRADECIMIENTOS	I
Resumen	III
1. Introducción	1
2. Hipótesis y Objetivos	3
2.1. Hipótesis	3
2.2. Objetivo General	3
2.3. Objetivos Específicos	3
3. Zona de Estudio	5
3.1. Región de Magallanes y la Antártica Chilena	5
3.1.1. Configuración Tectónica Regional	5
3.1.1.1. Sistema de Fallas Magallanes-Fagnano	7
3.1.2. Geología Regional	9
3.1.2.1. El Batolito Patagónico	9
3.1.2.2. La cuenca de Rocas Verdes	9
3.1.2.3. La Faja Plegada y Corrida de Magallanes	10
3.1.2.4. La cuenca de antepaís de Magallanes	10
3.2. Terremotos históricos	13
3.3. Soluciones de Mecanismos focales previos	14
4. Marco Teórico	16
4.1. Localización	16
4.2. Mecanismos Focales	22
4.2.1. Geometría de una falla	23
5. Metodología	25
5.1. Base de datos sísmicos	25
5.2. Procesamiento de datos	27
5.3. Localización manual de los eventos	33
5.4. Magnitud Local (M_L)	34
5.5. Modelo de Velocidad	35
5.5.1. Cálculo de la Razón V_p/V_s	35
5.6. Cálculo de Modelo de Velocidad 1-D con Velest	36

5.7. Modelo de velocidad 1-D	38
5.8. Determinación de Mecanismos focales usando el programa Focmec	41
6. Resultados y Análisis	43
6.1. Resultados Hipocentrales	43
6.2. Errores de localización	45
6.3. Soluciones de Mecanismos focales para la zona de estudio	48
6.3.1. Mecanismos focales grupo 1 (sector Puerto Natales)	51
6.3.2. Mecanismos focales grupo 2 (sector Punta Arenas)	52
6.3.3. Mecanismos focales grupo 3 (sector falla Magallanes-Fagnano)	53
6.3.4. Mecanismos focales grupo 4 (sector sur de Punta Arenas) .	54
6.3.5. Mecanismos focales grupo 5 (sector Tierra del Fuego)	55
7. Discusión	56
7.1. Localizaciones Hipocentrales	56
7.2. Mecanismos Focales	64
8. Conclusión	66
Referencias	68
Apéndices	73
A. Catálogos	73
A1. Catálogo sismicidad ENAP	73
A2. Catálogo sismicidad CSN	78
A3. Catálogo sismicidad IRIS	78
B. Sismicidad CSN-ENAP	79
C. Archivo STATION0.HYP	82
D. Archivo de control velest.cmn	85

Índice de tablas

3.3.1. Parámetros de los mecanismos focales previamente calculados por Forsyth (1975), Pelayo and Wiens (1989), Adaros (2003), incluyendo las tres soluciones presentadas de la base de datos Harvard-CMT del USGS y las SMF entregadas por el catálogo gCMT (https://www.globalcmt.org/ ; Dziewonski et al. (1981); Ekström et al. (2012)). Magnitud: Mag. Profundidad: Prof.	14
5.1.1. Localizaciones geográficas y elevación de las estaciones de la red sísmológica ENAP.	25
5.5.1. Modelo de Velocidad de Guzmán Marín (2020).	35
5.7.1. Modelo de Velocidad final que se obtuvo luego de reiteradas iteraciones utilizando el programa Velest.	38
6.3.1. Parámetros de los mecanismos focales desplegados en la figura 6.3.1.	50

Índice de figuras

3.1.1.Principales características tectónicas que encierran la región del Mar de Scotia (Sue and Ghiglione, 2016). El rectángulo blanco encierra la ubicación del punto triple.	6
3.1.2.Sistema de fallas Magallanes-Fagnano correspondiente al límite de la placa de rumbo-deslizamiento continental y a fallas de rumbo individuales. BCF Falla del Canal Beagle; CF Falla del valle de Carbajal; LFF Falla Fagnano (parte oriental del SFMF); LDF Falla Lago Deseado; MF Falla Magallanes (parte occidental del sistema SFMF) (Sue and Ghiglione, 2016).	8
3.1.3.Mapa que muestra las principales unidades geomorfológicas expuestas en el área de estudio (Herve et al. (2007), Klepeis et al. (2010), Betka et al. (2016)). Los contornos grises muestran la profundidad de la cuenca de antepaís de Magallanes en metros (Biddle et al., 1986). Las líneas negras muestran las principales estructuras asociadas al SFMF (Betka et al., 2016). Modificado de Ammirati et al. (2020).	11

- 3.1.4. Figura que resume la evolución geológica de la cuenca de las Rocas Verdes, la Cordillera Darwin y el FTB en la latitud de Tierra del Fuego. (a) El rift, el diking y el volcanismo forman la cuenca de rift casi-oceánica de Rocas Verdes en el Jurásico Tardío. El relleno de la cuenca se engrosa hacia el sur, su anchura es incierta y el magmatismo de arco está ausente. (b) La compresión se inicia hacia ~ 100 Ma, conduce a la subducción del suelo basáltico bajo el batolito y forma una estrecha cuña de empuje compuesta principalmente por fragmentos de suelo máfico volcánico deformado y relleno de cuenca sedimentaria. (c) A medida que continúa el cierre, la corteza continental adelgazada y las secuencias de roca volcánica silícica se hunden bajo la cuña de empuje, formando la zona de cizalle de alto grado expuesta en algunas bahías, dando lugar al levantamiento y obducción del suelo máfico de la cuenca antes de ~ 86 Ma. El magmatismo del arco, la fusión de la corteza y el emplazamiento de los granitoides de la serie Beagle son el resultado del hundimiento. La carga y la flexión de la corteza crean la cuenca de antepaís de Magallanes. (d) La colisión entre el batolito patagónico y la corteza continental sudamericana da como resultado el engrosamiento interno, el levantamiento y la exhumación de los cabalgamientos del interior en la Cordillera Darwin. En respuesta a este engrosamiento de la parte interna de la cuña, la FTB de Magallanes se propaga hacia el interior, terminando en el Eoceno-Oligoceno. Modificado de Klepeis et al. (2010). 12
- 3.3.1. Distribución de la sismicidad histórica según catálogo del CSN (1980-2021) <http://www.sismologia.cl/>, el catálogo IRIS (1971-2021) www.iris.edu/ y el catálogo NEIC http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html. Mecanismos focales blancos-rojos son extraídos del catálogo gCMT (<https://www.globalcmt.org/>; Dziewonski et al. (1981); Ekström et al. (2012)). Mecanismos focales blanco-gris son obtenidos por Adaros (2003). Mecanismos Focales blanco-azules son calculados por Forsyth (1975). Las líneas color negro en el mapa representan estructuras geológicas activas. Línea negra con triángulos invertidos representa la Faja Plegada y Corrida de Magallanes. Estrella amarilla representa el epicentro del terremoto $7.5 M_s$ del 17 diciembre del 1949. Los triángulos rojos corresponden los volcanes que forman parte de la Zona Volcánica Austral de los Andes. 15
- 4.1.1. Diagrama de Flujo del algoritmo Hypocenter. Modificado de Lienert et al. (1986). 21
- 4.2.1. Primeros movimientos de la onda P llegando desde diferentes direcciones a un sismómetro proporcionando información sobre la orientación de la falla. El plano de falla corta transversalmente al plano auxiliar, formando dos cuadrantes de compresión y dos cuadrantes de dilatación (Stein and Wyssession (2009)). 22

4.2.2.Geometría de una falla. El plano de falla es definido por el strike y dip de la superficie de la falla junto con la dirección del vector de deslizamiento (rake) (Shearer (2019)).	23
4.2.3.Ejemplos de mecanismos focales y sus correspondientes geometrías de falla. De arriba hacia abajo se muestra un mecanismo strike-slip, normal, inverso y oblicuo. Los cuadrantes de compresión son de color gris mientras que los de dilatación son de color blanco. Extraído de Shearer (2019).	24
5.1.1.Frecuencia de Respuesta del Sismómetro MBB-2.	26
5.1.2.Mapa de la Región de Magallanes que muestra la distribución de las estaciones sismológicas de la red ENAP en la zona de estudio.	26
5.2.1.Ejemplo de la inspección visual realizada a los datos cada una hora.	27
5.2.2.Evento tipo 1 en la componente Z de las 8 estaciones. Se muestra su forma de onda, donde se puede identificar claramente la llegada de la onda P y S en los datos filtrados entre 5-10 Hz.	29
5.2.3.Evento tipo 2 en la componente Z de las 8 estaciones. Se muestra su forma de onda, donde se puede identificar claramente la llegada de la onda P en los datos filtrados entre 2-4 Hz.	30
5.2.4.Evento tipo 3 en la componente Z de las 8 estaciones. Se muestra su forma de onda, donde se puede identificar claramente la llegada de la onda S en los datos filtrados entre 5-10 Hz.	31
5.2.5.Evento tipo 4 en la componente Z de las 8 estaciones. Se muestra su forma de onda, donde no se puede identificar claramente la llegada de la onda P en los datos filtrados entre 5-10 Hz.	32
5.3.1.Ejemplo del picking manual de un evento en Seisan.	33
5.4.1.Determinación de la magnitud local en forma manual.	34
5.6.1.Distribución de la sismicidad según catálogo ENAP (2019-2020) según magnitud (escala de círculos de colores, según se indica). Estos son los eventos seleccionados ($GAP < 300^\circ$) y relocalizados usando el software Velest.	37
5.7.1.Modelo de velocidad obtenido en la inversión 1-D en el programa Velest. En color negro se puede apreciar el modelo de velocidad inicial de Guzmán Marín (2020) y en rojo se aprecia el modelo de velocidad final obtenido. En la figura de la izquierda se muestra el modelo V_p , en la central el modelo V_s y en la figura de la derecha la razón V_p/V_s	39
5.7.2.Varianza de datos, RMS medio residual y RMS vs Número de iteraciones.	39
5.7.3.Mapa con los tiempos de retardo de las estaciones para las fases P (arriba) y S (abajo). El triángulo amarillo representa la estación de referencia usada RGND, que es la que se encuentra en el centro de la red, además esta posee un alto número de observaciones. Los círculos rojos indican estaciones con tiempos de retardo positivos, mientras que las cruces azules indican estaciones con tiempos de retardo negativos.	40

5.8.1. Selección de polaridad para la componente Z del sismograma usada para el cálculo de los mecanismos focales.	41
5.8.2. Solución de mecanismo focal generado por Focmec.	42
6.1.1. Distribución de la sismicidad según catálogo ENAP (2019-2020) según magnitud (escala de círculos de colores, según se indica). Sismicidad total localizada mediante picking manual en Seisan. . .	44
6.2.1. Distribución del Root Mean Square (RMS) según su distribución en longitud oeste.	45
6.2.2. Cambios observados en los hipocentros de los 50 eventos que ingresaron a Velest para ser relocalizados. Los círculos morados representan la localización original realizada en Hypocenter mientras que los círculos en color naranja representan los eventos relocalizados en Velest.	46
6.3.1. Se observan las soluciones de mecanismos focales obtenidas para 16 eventos. Las líneas color negro en el mapa representan estructuras geológicas activas. Los triángulos rojos corresponden los volcanes que forman parte de la Zona Volcánica Austral de los Andes. . . .	49
6.3.2. Soluciones de mecanismos focales obtenidas para el grupo 1: sector Puerto Natales.	51
6.3.3. Soluciones de mecanismos focales obtenidas para el grupo 2: sector Punta Arenas.	52
6.3.4. Solución del mecanismo focal obtenida para el grupo 3: sector falla Magallanes-Fagnano.	53
6.3.5. Soluciones de mecanismos focales obtenidas para el grupo 4: sur de Punta Arenas.	54
6.3.6. Soluciones de mecanismos focales obtenidas para el grupo 5: sector Tierra del Fuego.	55
7.1.1. Sismograma y espectrogramas de evento registrado el 25-5-2019 que fue localizado en Tierra del Fuego por la estación LAVG. . . .	59
7.1.2. Distribución de la sismicidad según catálogo del CSN (2019-2020) (escala de círculos de colores según magnitud).	60
7.1.3. Distribución de la sismicidad según catálogo de ENAP (2019-2020) (escala de círculos de colores según magnitud).	61
7.1.4. Distribución de la sismicidad con la profundidad para los catálogos del CSN (color negro) y ENAP (color rojo).	62
7.1.5. Distribución de la sismicidad en profundidad respecto a la latitud para los eventos localizados con la red ENAP.	62
7.1.6. Distribución de la magnitud en profundidad para los catálogos del CSN (color negro) y ENAP (color rojo). La línea de la derecha indica la magnitud máxima y la línea de la izquierda la magnitud mínima.	63

7.2.1.Principales estructuras del Cenozoico en el sur de Sudamérica. Las flechas negras indican la dirección de acortamiento o expansión regional dentro de la cuenca de Magallanes. La elipse grande (color rojo) destaca la flecha con dirección SE que indicaría una zona de expansión regional. La elipse pequeña (color rojo) corresponde al sector de Laguna Blanca donde se encontraron 4 SMF. Modificado de Diraison et al. (1997)	65
A0.1.Distribución de la sismicidad con la magnitud para catálogos del CSN (color negro), ENAP Hypocenter (color verde) y ENAP Velest (color rojo).	80
A0.2.Distribución temporal de la sismicidad (en días desde el 01 de enero de 2019) para catálogos del CSN (color negro), ENAP Hypocenter (color verde) y ENAP Velest (color rojo).	80
A0.3.Relación entre la M_L de los 12 eventos en común registrados por la red ENAP y la red del CSN durante el período de estudio 2019-2020. Dos de estos eventos registraron una magnitud 3.2 M_L . La línea recta representa el ajuste lineal.	81

Capítulo 1

Introducción

Chile es conocido por ser el país más sísmico del mundo, desde su zona norte hasta el sur extremo es afectado por la tectónica de las placas sobre las que se encuentra ubicado. Debido a su larga longitud, este movimiento entre placas no afecta a todas las áreas por igual. En este trabajo, nos enfocaremos de manera más específica en la región de Magallanes y la Antártica Chilena, cuya sismicidad es relativamente menor a la del resto del territorio. Sin embargo, no está exenta de la ocurrencia de terremotos.

En el extremo sur de Sudamérica se produce la interacción entre tres placas tectónicas: Sudamericana, Antártica y Scotia. Es un área de gran interés geofísico y geológico, pero ha sido poco estudiada debido a que la obtención de datos de manera regular ha sido impedida por la ausencia de caminos, las condiciones climáticas y las características topográficas del sector (Lodolo et al. (2003)). Además, son escasas las estaciones sismológicas desplegadas en la zona y estas no son suficientes para cubrir los sitios de interés que se ubican en lugares más extremos.

En el año 2019, la Empresa Nacional del Petróleo implementó una red de ocho estaciones sismológicas a lo largo de sus instalaciones en la región de Magallanes. El objetivo principal de este estudio es realizar la localización y determinación de magnitud local (M_L) de sismos registrados en estas estaciones durante el período de marzo de 2019 a marzo de 2020, para así poder realizar un posterior análisis y caracterización sismotectónica de la zona con los mecanismos focales obtenidos. Para la localización y análisis de estos eventos se utiliza el software

de procesamiento sísmológico Seisan, luego se determina un nuevo modelo de velocidad para la zona de estudio utilizando Velest para finalmente obtener las soluciones de los mecanismos focales (SMF) en Focmec.

Capítulo 2

Hipótesis y Objetivos

2.1. Hipótesis

La existencia de sismicidad local de baja magnitud en torno a la red de ENAP durante el período de estudio.

2.2. Objetivo General

El objetivo general de este estudio es caracterizar la microsismicidad de la región de Magallanes a partir de la determinación de mecanismos focales con datos captados por una red local de sismógrafos que ha instalado ENAP.

2.3. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis y tratamiento general de la base de datos.
- Determinar las coordenadas hipocentrales de los eventos sísmicos realizando una localización manual de ondas P y S utilizando el software Seisan.
- Elaborar un catálogo de la sismicidad local captada por la red de ENAP.
- Interpretar las localizaciones de los eventos en el contexto de la geología local de la zona.
- Obtener un modelo de velocidad 1-D para la zona de estudio y relocalizar los eventos dentro del entorno de la red sísmica.

- Determinar mecanismos focales para eventos locales de baja magnitud utilizando el programa Focmec.

Capítulo 3

Zona de Estudio

3.1. Región de Magallanes y la Antártica Chilena

3.1.1. Configuración Tectónica Regional

La región de Magallanes y de la Antártica Chilena se encuentra ubicada en el extremo sur de Chile, abarcando territorio Antártico y Sudamericano continental e insular. La zona continental comprende el sector meridional de la Patagonia y la insular la conforma la sección occidental de isla de Tierra del Fuego y los archipiélagos adyacentes que se sitúan al sur y al oeste. Esta zona austral se caracteriza por ser tectónicamente compleja (Pelayo and Wiens, 1989), pues en ella se produce la interacción de las placas tectónicas Sudamericana (SA), Antártica (AN) y Scotia (SC) conformando así un punto triple (Figura 3.1.1).

En el Atlántico sur, el borde norte de la placa de Scotia se define con una orientación E-W, siguiendo el borde de la dorsal norte de Scotia. Hacia el oeste del punto de encuentro de Scotia con Sudamérica este borde continúa a lo largo del lago Fagnano, del Seno Almirantazgo y el brazo oeste del estrecho de Magallanes, hasta la intersección con la Fosa Chilena (52° S, 76° W) al noroeste del faro Evangelistas, donde se define la ubicación exacta del punto triple entre las placas SA, AN y SC. Al norte de este punto, las placas Sudamericana y Antártica, que convergen a razón de 1.9 cm. por año (Cisternas and Vera, 2008), están en contacto con la placa de Scotia a través de las dorsales norte y sur de Scotia respectivamente, según lo planteado en el trabajo de Pelayo and Wiens (1989), quienes a través

de mecanismos focales determinaron la cinemática y los límites de estas placas tectónicas. Estos mecanismos mostraron fallas de empuje y de deslizamiento a lo largo de la dorsal de Scotia norte y fallas normales de deslizamiento a lo largo de la dorsal de Scotia sur. Además, evidenciaron una convergencia difusa de la placa Antártica a lo largo del margen occidental de la placa de Scotia, que se desarrollaría a una razón menor de unos 1.3 cm por año. Esta convergencia es aproximadamente frontal a 52° S, pero se pone rápidamente oblicua hacia el sur llegando a unos 60° de oblicuidad a 57° S (Cisternas and Vera, 2008).

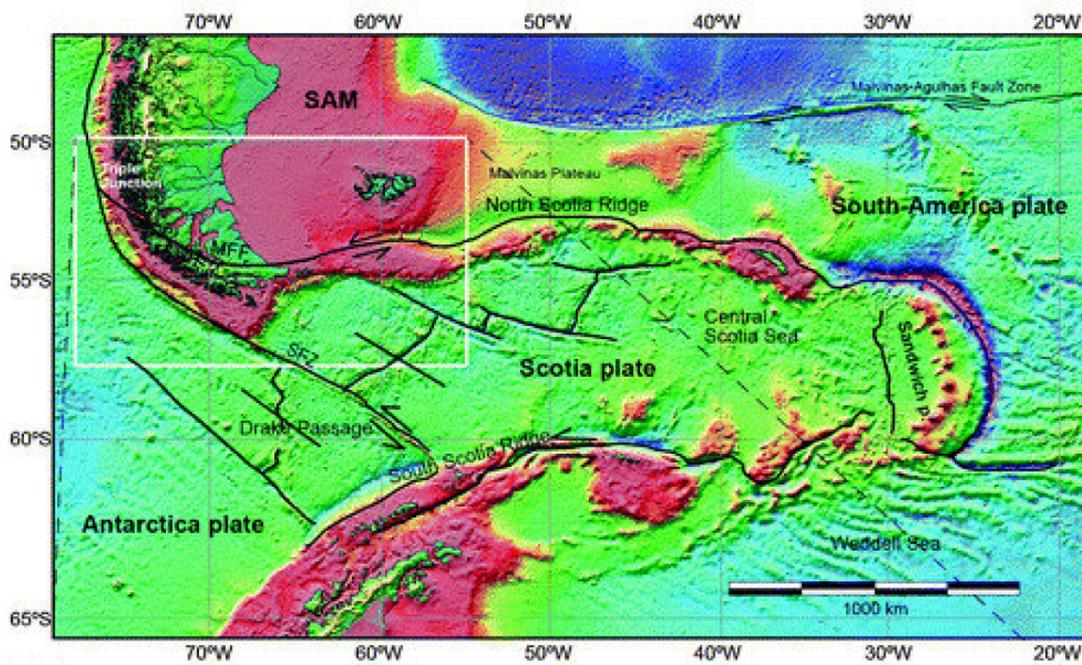


Figura 3.1.1: Principales características tectónicas que encierran la región del Mar de Scotia (Sue and Ghiglione, 2016). El rectángulo blanco encierra la ubicación del punto triple.

3.1.1.1. Sistema de Fallas Magallanes-Fagnano

El sistema de Fallas Magallanes-Fagnano (SFMF) corresponde a un sistema transformante sinistral entre la placa Sudamericana (norte) y la placa de Scotia (sur). Este lineamiento tectónico de 600 km de longitud tiene rumbo NW-SE y se extiende desde la entrada pacífica del Estrecho de Magallanes hasta el Atlántico frente a la costa dividiendo la zona en dos bloques continentales (Lodolo et al. (2003), Ammirati et al. (2020)).

El bloque sur presenta una fuerte evidencia morfológica de actividad cuaternaria relacionada con fallas de rumbo sinistral E-W, en cambio el bloque norte está afectado por la tectónica de extensión asociada con el sistema de fallas normales hacia el brazo este del Estrecho de Magallanes (Menichetti et al., 2008).

La traza principal del SFMF se conoce como Falla Magallanes-Fagnano (FMF) y pertenece a un grupo de fallas de rumbo subparalelas. Esta última recorre la Isla de Tierra del Fuego de este a oeste en la latitud del lago Fagnano y es una falla activa. También pertenecen a este sistema la falla del canal de Beagle, la falla Lasifashaj, la falla del Lago Deseado, la falla del valle de Carbajal y la falla de Río Turbio (Menichetti et al. (2008), Klepeis (1994))(Figura 3.1.2).

Diversas campañas llevadas a cabo en Tierra del Fuego para estudiar la cinemática del lugar han evidenciado un movimiento de acomodo que se estaría llevando a cabo a lo largo de este sistema de fallas (Buffoni et al., 2009). Mediciones de las estaciones GPS entre las placas de Sudamérica y Scotia muestran movimientos relativos del SFMF de 6.6 ± 1.3 mm/año (Smalley Jr et al., 2003). Por otra parte, Roy et al. (2020) obtuvieron una tasa de deslizamiento lateral izquierdo para la falla de 6.4 ± 0.9 mm/año que sugiere un comportamiento estable desde el Pleistoceno. Recientemente, un estudio realizado por Sandoval and De Pascale (2020) determinó una tasa de deslizamiento sinistral de 10.5 ± 1.5 mm/año usando geomorfología y datos de terreno, con una velocidad 3.5 mm/año más rápida de lo que se calculaba mediante registros GPS.

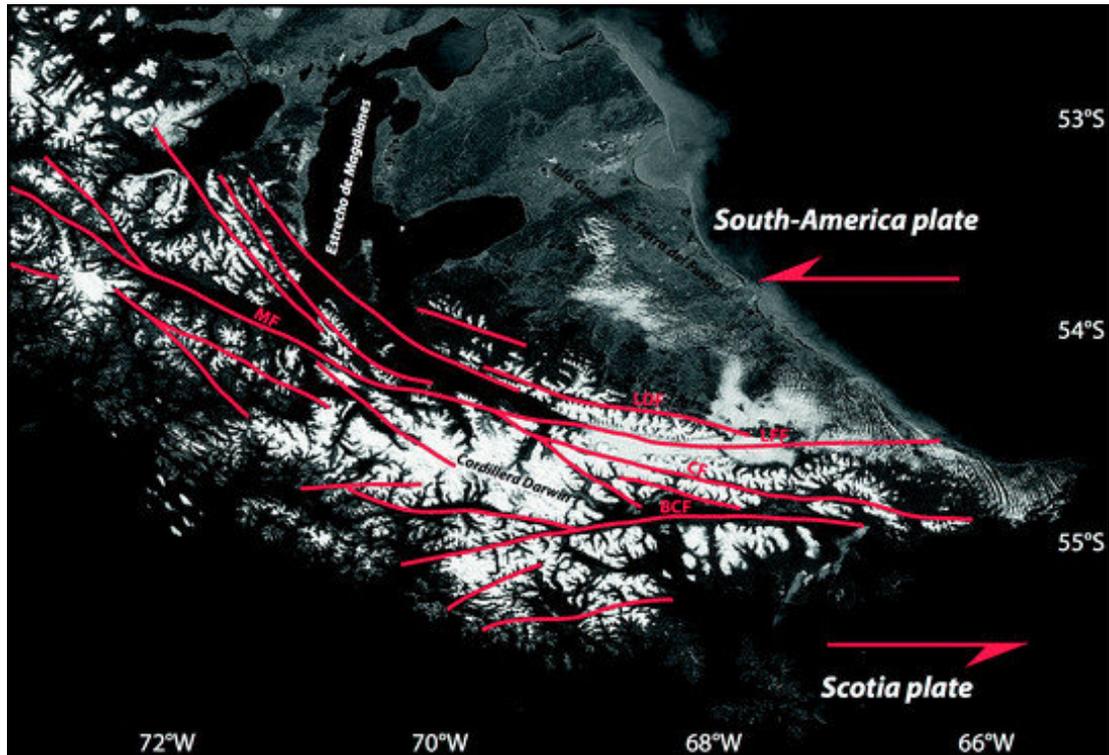


Figura 3.1.2: Sistema de fallas Magallanes-Fagnano correspondiente al límite de la placa de rumbo-deslizamiento continental y a fallas de rumbo individuales. BCF Falla del Canal Beagle; CF Falla del valle de Carbajal; LFF Falla Fagnano (parte oriental del SFMF); LDF Falla Lago Deseado; MF Falla Magallanes (parte occidental del sistema SFMF) (Sue and Ghiglione, 2016).

3.1.2. Geología Regional

La geología de nuestra zona de estudio es diversa y bastante compleja. De este a oeste la Falla Magallanes-Fagnano intersecta variadas formaciones geológicas de interés y en este estudio las resumiremos en cuatro unidades principales, las que son: el Batolito Patagónico (BP), la Cuenca de Rocas Verdes (CRV), la Faja Plegada y Corrida (FTB) y por último la Cuenca de Antepaís de Magallanes (MFB) (Figura 3.1.3). En términos de estructura se observa una notable continuidad temporal en su proceso evolutivo (Figura 3.1.4). La escala temporal de deformación que afectó a esta zona puede ser resumida en cuatro etapas principales:

- Formación del Batolito Patagónico desde el Jurásico al Neógeno.
- Apertura en el Jurásico tardío de la Cuenca de Rocas Verdes.
- Cierre de la Cuenca de Rocas Verdes, seguido por la obducción de la corteza oceánica de esta sobre el basamento de Sudamérica y relleno de la parte sur de la falla Magallanes-Fagnano durante el Cretácico tardío.
- Exhumación de la Cuenca de Rocas Verdes, propagación de la Faja Plegada y Corrida y la formación de la cuenca de Antepaís desde el Cretácico al Neógeno tardío.

3.1.2.1. El Batolito Patagónico

El Batolito Patagónico es el núcleo y columna vertebral de la cordillera de los Andes del sur, abarca rocas de arco magmático calco-alcalino del Jurásico al Neógeno (Herve et al. (2007), Calderón et al. (2007), Calderón et al. (2016) y Guillot (2016)) y está rodeada a ambos lados este-oeste por complejos metamórficos del Paleozoico tardío (Ghiglione et al., 2016). Se relaciona con rocas plutónicas, principalmente granitoides que se localizan a lo largo del margen pacífico, entre 40° S a 56° S (Suárez (1979), Stern and Stroup (1982), Hervé et al. (1984), Bruce et al. (1991), Herve et al. (2007) en Betka et al. (2016)).

3.1.2.2. La cuenca de Rocas Verdes

La cuenca de Rocas Verdes ha sido interpretada normalmente como una cuenca marginal de trasarco la que aflora desde los 51° S hasta los 56° S (Coloma Bozzo (2010)). La CRV presenta características de una antigua cuenca de rift con

evidencias de magmatismo basáltico y formación de corteza oceánica. El rift se abrió durante el Jurásico Tardío en una fase de expansión, llenándose de productos de alteración procedentes del Batolito Patagónico y se cerró en una fase de compresión durante el Cretácico superior (Klepeis et al., 2010) por subempuje y obducción del suelo oceánico recientemente formado bajo el basamento sudamericano. A medida que la cuenca fue comprimida, el frente de deformación avanzó hacia el antepaís y provocó el fallamiento inverso y plegamiento de la cobertura sedimentaria, dando origen a la Faja Plegada y Corrida de Magallanes (Agurto, 2013).

3.1.2.3. La Faja Plegada y Corrida de Magallanes

La Faja Plegada y Corrida de Magallanes corresponde a un sistema de fallas de cabalgamiento y pliegues asimétricos (Lodolo et al., 2003) que se encuentra ubicada en los Andes Patagónicos, específicamente a lo largo del lado este de la cordillera (Guzmán Marín, 2020). Este sistema se originó a partir de una fase compresional que afectó la parte sur extrema de los Andes y se extendió desde el periodo Cretácico medio hasta el Terciario, avanzando de manera progresiva hacia el norte (Ghiglione et al., 2002). Esta misma etapa afectó a formaciones metamórficas y volcanoclásticas de bajo grado en la CRV (Dalziel et al., 1974).

3.1.2.4. La cuenca de antepaís de Magallanes

La cuenca de Magallanes es una depresión tectónica desarrollada sobre la corteza continental (Ramos, 1989), se encuentra delimitada por la FTB desde la latitud 46°30' S hasta la 55° S, mostrando una tendencia NW-SE en el lado de antepaís de los Andes Patagónicos (Lodolo et al., 2003). Dentro del marco de tectónica de placas se sitúa próxima al borde SW de la placa Sudamericana. El margen tectónico sur es una zona compleja y deformada que constituye el límite entre la placa SA y la de SC, se presume que las interacciones entre estas placas han marcado la historia geológica de la cuenca (Malumián et al., 2013). La apertura del atlántico al término del Cretácico inferior, marcó el cambio en la evolución de esta zona, generando una cuenca de antepaís hacia el este y norte (Mella, 2001) al entrar en una fase de compresión. Este proceso culminó en el Mioceno inferior al finalizar la subsidencia flexural asociada a la carga tectónica en la Cordillera (Gallardo, 2012 en Agurto (2013)). La componen sedimentos de hasta 7 km de espesor hasta la

actualidad (Sebastián Galeazzi, 1998) y contiene relleno de material detrítico desde el Paleozoico. La parte sur ha sido afectada posteriormente por la subsidencia y deposición de nuevos sedimentos procedentes de la exhumación de la CRV, así como por la deformación compresiva (Biddle et al. (1986), Klepeis et al. (2010), Fosdick et al. (2011)) asociada a la Faja Plegada y Corrida de Magallanes del Cretácico-Neógeno tardío (Ammirati et al., 2020).

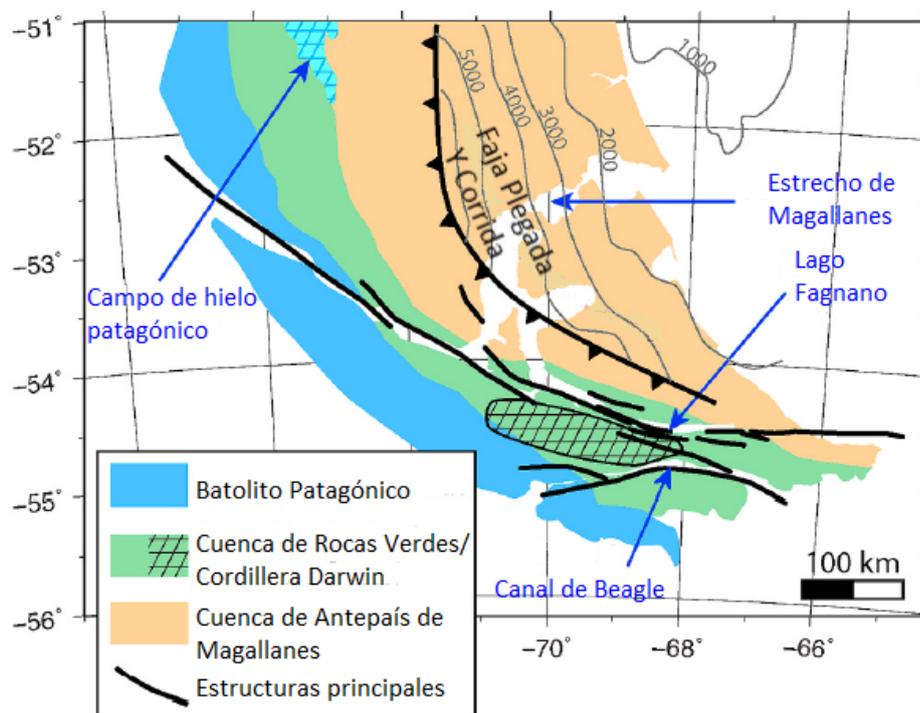


Figura 3.1.3: Mapa que muestra las principales unidades geomorfológicas expuestas en el área de estudio (Herve et al. (2007), Klepeis et al. (2010), Betka et al. (2016)). Los contornos grises muestran la profundidad de la cuenca de antepaís de Magallanes en metros (Biddle et al., 1986). Las líneas negras muestran las principales estructuras asociadas al SFMF (Betka et al., 2016). Modificado de Ammirati et al. (2020).

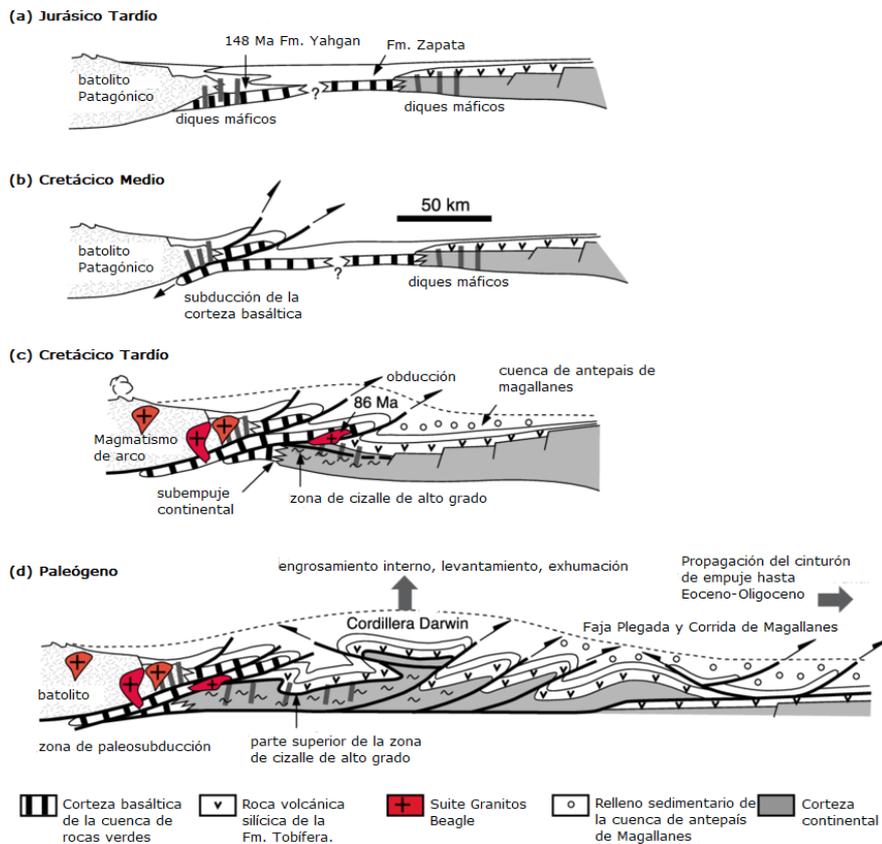


Figura 3.1.4: Figura que resume la evolución geológica de la cuenca de las Rocas Verdes, la Cordillera Darwin y el FTB en la latitud de Tierra del Fuego. (a) El rift, el diking y el volcanismo forman la cuenca de rift casi-oceánica de Rocas Verdes en el Jurásico Tardío. El relleno de la cuenca se engrosa hacia el sur, su anchura es incierta y el magmatismo de arco está ausente. (b) La compresión se inicia hacia ~ 100 Ma, conduce a la subducción del suelo basáltico bajo el batolito y forma una estrecha cuña de empuje compuesta principalmente por fragmentos de suelo máfico volcánico deformado y relleno de cuenca sedimentaria. (c) A medida que continúa el cierre, la corteza continental adelgazada y las secuencias de roca volcánica silícica se hunden bajo la cuña de empuje, formando la zona de cizalle de alto grado expuesta en algunas bahías, dando lugar al levantamiento y obducción del suelo máfico de la cuenca antes de ~ 86 Ma. El magmatismo del arco, la fusión de la corteza y el emplazamiento de los granitoides de la serie Beagle son el resultado del hundimiento. La carga y la flexión de la corteza crean la cuenca de antepaís de Magallanes. (d) La colisión entre el batolito patagónico y la corteza continental sudamericana da como resultado el engrosamiento interno, el levantamiento y la exhumación de los cabalgamientos del interior en la Cordillera Darwin. En respuesta a este engrosamiento de la parte interna de la cuña, la FTB de Magallanes se propaga hacia el interior, terminando en el Eoceno-Oligoceno. Modificado de Klepeis et al. (2010).

3.2. Terremotos históricos

Escasos terremotos de gran magnitud han ocurrido en la región de Magallanes en comparación con el resto del territorio chileno.

El primero fue registrado el 2 de febrero de 1879 alrededor de las 3:30 am, hora local. [Lomnitz \(1970\)](#) estimó que el evento tuvo una magnitud 7.0-7.5 M_s , con una intensidad 7 en Punta Arenas y 8 en Tierra del Fuego en la escala de Mercalli Modificada (MM) ([Cisternas and Vera, 2008](#)). Se conocen pocos detalles de este terremoto debido a que no había instrumentación sismológica en esa época.

El segundo fue registrado el 17 de diciembre de 1949 a las 6:53 GMT con una magnitud 7.7 M_s , seguido por un segundo evento a las 15:07 GMT de magnitud 7.4 M_s ([Geller and Kanamori \(1977\)](#), [ISC \(2020\)](#)). Las rupturas fueron localizadas a lo largo de la falla Magallanes-Fagnano ([Costa et al. \(2006\)](#)). Según mediciones realizadas por [Roy et al. \(2020\)](#) estas alcanzaron hasta 6.5 metros de desplazamiento en el este de Tierra del Fuego. Esto produjo deslizamientos de tierra a las orillas del Lago Fagnano y olas de tsunami en zonas locales ([Lomnitz, 1970](#)).

La sismicidad registrada desde 1930 es bastante baja (la mayoría de los eventos $M_L < 3.5$) y poco profunda, como revelan los registros de las estaciones instaladas desde mediados de los años noventa ([Vuan et al., 1999](#)).

3.3. Soluciones de Mecanismos focales previos

En el año 1975, Forsyth presenta 3 mecanismos focales, 2 de los cuales están incluidos en la zona de estudio. Posteriormente, Pelayo and Wiens (1989) reevalúan una de las soluciones de Forsyth. Adaros (2003) calcula 2 mecanismos de foco, los cuales son obtenidos por la red del proyecto SEPA. La solución para el evento del año 1998 de magnitud 4.5 m_b muestra un mecanismo de falla tipo inverso con una componente de rumbo. Por otro lado, para el evento del año 1997 cuya magnitud fue de 4.3 m_b , se obtuvo una solución de mecanismo focal de falla inversa con un rumbo de dirección norte, el cual indicaría que en el área cercana a Seno Skyring la subducción de la placa Antártica bajo la placa Sudamericana sería causante de la actividad sísmica del área. Además, muestra tres mecanismos focales de la base de datos Harvard-CMT del USGS, destacando una singular solución que corresponde a un mecanismo de falla de rumbo, el que evidencia la actividad de la FMF. El resto de los mecanismos focales del periodo 2003-2012 son obtenidos por redes globales del catálogo gCMT (<https://www.globalcmt.org/>; Dziewonski et al. (1981); Ekström et al. (2012)) y son de eventos que tuvieron una magnitud tal que fue posible su detección por estaciones lejanas. La distribución de la sismicidad histórica de la región de Magallanes es presentada en la figura 3.3.1 y los parámetros de todas estas SMF previas se muestran en la tabla 3.3.1.

Fecha	Latitud (°)	Longitud (°)	Prof. (km)	Mag.	Strike	Dip	Rake	Referencia
14-06-1970	-73.80	-52.00	33.0	6.0	315	12	14	Forsyth- Pelayo & Wiens
15-06-1970	-63.60	-54.30	10.0	5.6	179	87	192	Forsyth
09-02-1972	-74.00	-51.80	33.0	5.5	305	27	27	Forsyth
06-06-1979	-74.65	-52.93	15.0	5.6	7	8	104	CMT
30-07-1992	-72.59	-51.12	15.0	5.5	31	25	114	CMT
31-08-1996	-73.12	-53.43	30.2	4.9	316	59	-16	CMT
26-04-1997	-71.60	-52.20	19.0	4.3	2	50	90	Adaros
27-05-1998	-72.40	-51.50	22.0	4.5	5	55	90	Adaros
12-09-2003	-75.25	-51.28	33.0	5.5	253	2	-54	CMT
28-10-2003	-75.05	-51.34	33.0	5.2	87	56	-180	CMT
30-08-2004	-72.10	-50.65	12.0	5.1	355	35	73	CMT
07-09-2004	-72.53	-51.05	14.1	4.9	32	34	130	CMT
05-07-2005	-72.13	-51.08	12.0	4.9	181	22	121	CMT
12-12-2018	-74.64	-50.79	21.5	4.9	217	83	177	CMT

Tabla 3.3.1: Parámetros de los mecanismos focales previamente calculados por Forsyth (1975), Pelayo and Wiens (1989), Adaros (2003), incluyendo las tres soluciones presentadas de la base de datos Harvard-CMT del USGS y las SMF entregadas por el catálogo gCMT (<https://www.globalcmt.org/>; Dziewonski et al. (1981); Ekström et al. (2012)). Magnitud: Mag. Profundidad: Prof.

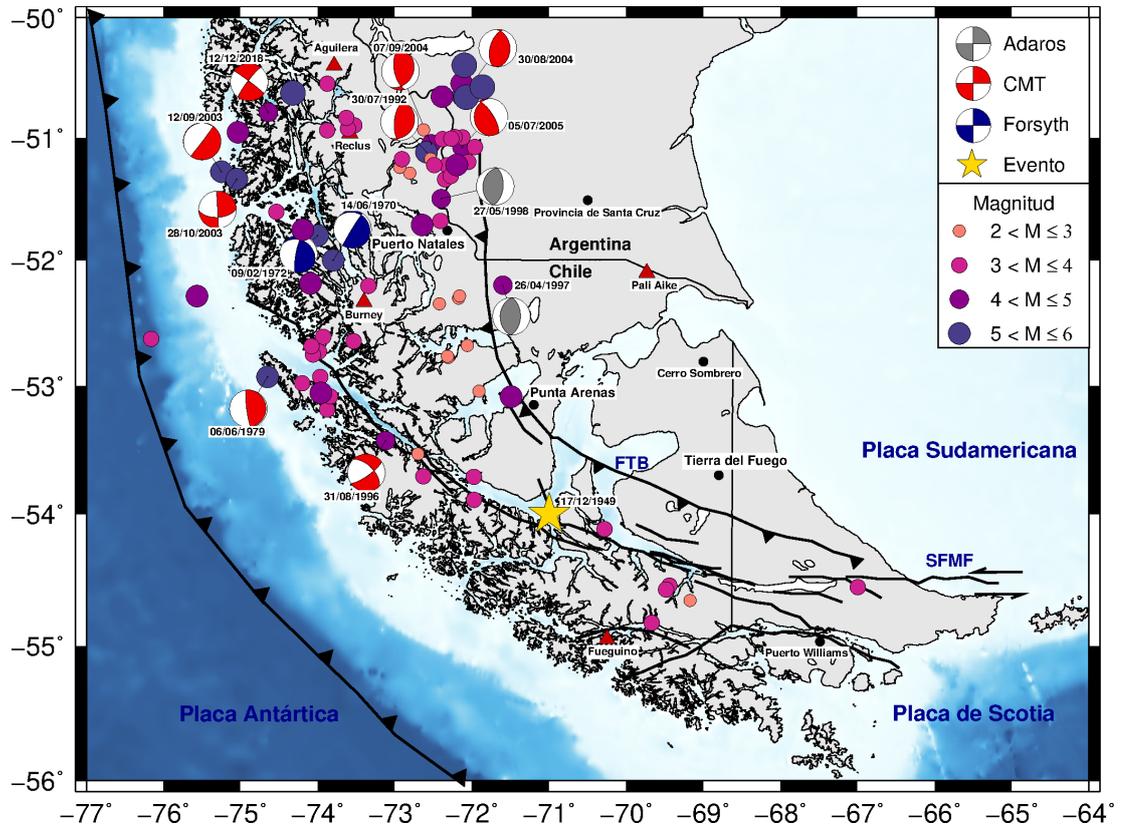


Figura 3.3.1: Distribución de la sismicidad histórica según catálogo del CSN (1980-2021) <http://www.sismologia.cl/>, el catálogo IRIS (1971-2021) www.iris.edu/ y el catálogo NEIC http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html. Mecanismos focales blancos-rojos son extraídos del catálogo gCMT (<https://www.globalcmt.org/>; Dziewonski et al. (1981); Ekström et al. (2012)). Mecanismos focales blanco-gris son obtenidos por Adaros (2003). Mecanismos Focales blancos-azules son calculados por Forsyth (1975). Las líneas color negro en el mapa representan estructuras geológicas activas. Línea negra con triángulos invertidos representa la Faja Plegada y Corrida de Magallanes. Estrella amarilla representa el epicentro del terremoto 7.5 M_s del 17 diciembre del 1949. Los triángulos rojos corresponden los volcanes que forman parte de la Zona Volcánica Austral de los Andes.

Capítulo 4

Marco Teórico

4.1. Localización

Para resolver el problema de localizar un terremoto, es decir, encontrar el punto de origen en el que se comienza a liberar la energía sísmica, debemos encontrar cuatro parámetros que definen su hipocentro los cuales son: el tiempo de origen (t_0) y los valores que determinan su ubicación, que corresponden a latitud (x_0), longitud (y_0) y profundidad (z_0). La localización de hipocentros se realizó con una versión mejorada de Hypocenter (Lienert et al. (1986), Lienert (1991), Lienert and Havskov (1995)), un algoritmo escrito en Fortran, utilizado para la localización de eventos locales, regionales y telesísmicos, el cual combina características de los algoritmos HYPO71 e HYPOINVERSE. Esta versión añade una nueva técnica denominada amortiguación adaptativa, que se combina muy bien con los métodos de centrado y escalado que diferencian a los dos algoritmos mencionados.

Con el propósito de encontrar la solución del problema inverso, se contará con un conjunto de estaciones sísmicas de las cuales se conoce su ubicación y elevación, realizando además una elección del modelo de velocidades 1-D.

Para cualquier ubicación de terremoto (x_0, y_0, z_0) y tiempo de origen t_0 , podemos calcular un conjunto de tiempos de viaje $T_i(x, y, z)$ hasta la i -ésima estación, mediante el conjunto de derivadas parciales $\frac{\partial T_i}{\partial x}$, $\frac{\partial T_i}{\partial y}$, $\frac{\partial T_i}{\partial z}$.

La diferencia Δt_i entre los tiempos de llegada calculados y observados t_i , será dada por:

$$\Delta t_i = t_i - T_i(x, y, z) - t_0 \quad (4.1.1)$$

Aproximamos los residuales Δt_i , con la expansión de las series de Taylor de primer orden $T_i(x, y, z)$ para así obtener un conjunto de residuales ponderados, como se muestra a continuación:

$$\tau_i = \omega_i \left(t_i - T_i - t_0 - \Delta t_0 - \Delta x \frac{\partial T_i}{\partial x} - \Delta y \frac{\partial T_i}{\partial y} - \Delta z \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) \quad (4.1.2)$$

El término ω_i representa los factores de pesos normalizados de tal manera que $\sum \omega_i = 1$. Así se adopta la siguiente notación matricial:

$$\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)^T \quad (4.1.3)$$

$$\Delta t = (\omega_1 \Delta t_1, \dots, \omega_n \Delta t_n)^T \quad (4.1.4)$$

y

$$dX_4 = (\Delta t_0, \Delta x, \Delta y, \Delta z) \quad (4.1.5)$$

Ahora podemos reescribir la ecuación 4.1.2 de la siguiente manera:

$$\tau = \Delta t - T dX_4 \quad (4.1.6)$$

Donde:

$$T = \begin{bmatrix} \omega_1 & \omega_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} & \omega_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} & \omega_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \omega_n & \omega_n \frac{\partial T_n}{\partial x} & \omega_n \frac{\partial T_n}{\partial y} & \omega_n \frac{\partial T_n}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4.1.7)$$

La inversión estándar por mínimos cuadrados de la ecuación 4.1.6 que minimiza a $\sum_i \tau_i^2$ es por lo tanto:

$$dX_4 = (T^T T)^{-1} T^T \Delta t \quad (4.1.8)$$

Ocupando el método de la inversión generalizada por [Lanczos \(1996\)](#):

$$dX_4 = (V\Lambda)^{-1} U^T \Delta t \quad (4.1.9)$$

Donde las columnas de V y U son los vectores propios de $T^T T$ y $T T^T$ respectivamente, a la vez que Λ es la matriz de las diagonales de los valores propios ([Jackson \(1972\)](#), [Wiggins \(1972\)](#), [Lienert et al. \(1986\)](#)).

Las ecuaciones 4.1.8 y 4.1.9 son la base de todas las soluciones de mínimos cuadrados linealizados para el problema inverso de localización de terremotos.

Para simplificar el problema inverso y mejorar la precisión numérica, ahora se utilizará el método centrado.

Considerando a $\sum \tau_i$ con respecto a t_0 , donde τ_i está dado por 4.1.2, esto nos dará como resultado:

$$t_0 + \Delta t_0 = \sum_i \omega_i t_i - \sum_i \omega_i T_i - \Delta x \sum_i \omega_i \frac{\partial T_i}{\partial x} - \Delta y \sum_i \omega_i \frac{\partial T_i}{\partial y} - \Delta z \sum_i \omega_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \quad (4.1.10)$$

que se puede reescribir como:

$$t_0 + \Delta t_0 = \langle t_i \rangle - \langle T_i \rangle - \Delta x \left(\frac{\partial T_i}{\partial x} \right) - \Delta y \left(\frac{\partial T_i}{\partial y} \right) - \Delta z \left(\frac{\partial T_i}{\partial z} \right) \quad (4.1.11)$$

Donde los corchetes $\langle \rangle$ representan las medias ponderadas.

Sustituyendo la ecuación 4.1.11 dentro de la ecuación 4.1.2 obtenemos:

$$\tau_i = \omega_i \left[t_i - \langle t_i \rangle - \left(\frac{\partial T_i}{\partial x} - \left\langle \frac{\partial T_i}{\partial x} \right\rangle \right) \Delta x - \left(\frac{\partial T_i}{\partial y} - \left\langle \frac{\partial T_i}{\partial y} \right\rangle \right) \Delta y - \left(\frac{\partial T_i}{\partial z} - \left\langle \frac{\partial T_i}{\partial z} \right\rangle \right) \Delta z \right] \quad (4.1.12)$$

Así, se ha reemplazado el tiempo de origen corregido $t_0 + \Delta t_0$ con las medias ponderados de cada uno de los términos resultantes al lado derecho de la ecuación 4.1.2.

Este proceso denominado centrado, es un método usado en la regresión estadística (Smith and Draper (1981), Lienert et al. (1986)) y además, fue utilizado por Lee and Lahr (1972) en HYPO71.

Definiendo la matriz condicional centrada T_c como:

$$T_c = \begin{bmatrix} \omega_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial x} - \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x} \right\rangle \right) & \omega_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial y} - \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial y} \right\rangle \right) & \omega_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial z} - \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial z} \right\rangle \right) \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \omega_n \left(\frac{\partial T_n}{\partial x} - \left\langle \frac{\partial T_n}{\partial x} \right\rangle \right) & \omega_n \left(\frac{\partial T_n}{\partial y} - \left\langle \frac{\partial T_n}{\partial y} \right\rangle \right) & \omega_n \left(\frac{\partial T_n}{\partial z} - \left\langle \frac{\partial T_n}{\partial z} \right\rangle \right) \end{bmatrix} \quad (4.1.13)$$

la cual posee la solución de mínimos cuadrados:

$$dX_3 = (T_c^T T_c)^{-1} T_c^T \Delta t \quad (4.1.14)$$

Donde $dX_3 = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$.

Podemos observar de la ecuación 4.1.12 que el promedio de los residuos centrados $\sum \tau_i$ ahora es cero:

$$\sum \tau_i = 0 \quad (4.1.15)$$

Para obtener la solución final Δx , Δy , Δz y Δt_0 son cero. La ecuación 4.1.11 entonces nos proporcionará la ecuación para el tiempo de origen.

$$t_0 = \langle t_i \rangle - \langle T_i \rangle \quad (4.1.16)$$

Pasando ahora al segundo método, el escalado, un procedimiento estándar utilizado en la regresión estadística Smith (1976) observó que el número de condiciones de la matriz T o T_c puede mejorarse escalando las columnas de T para que todas tengan la norma unitaria.

Entonces se define a T_{cs} por la ecuación:

$$T_{cs} = T_c S \quad (4.1.17)$$

donde:

$$S = \text{diag} \left(\sum_i T_{ci1}^2, \sum_i T_{ci2}^2, \sum_i T_{ci3}^2 \right) \quad (4.1.18)$$

Inicialmente se obtiene una solución de dX_3 a la ecuación 4.1.14 usando T_{cs} en lugar de T_c . Luego, se eliminan los factores de escala de la solución, dividiendo dX_3 por S para así obtener las correcciones hipocentrales Δx , Δy , Δz . Aunque el escalamiento es matemáticamente equivalente a resolver la ecuación 4.1.14 siempre mejora la precisión numérica de la solución.

Finalmente, una solución a los mínimos cuadrados de la ecuación 4.1.18 es lograda mediante el esquema de “mínimos cuadrados amortiguados” realizado por [Levenberg \(1944\)](#), “ridge regression” por [Hoerl and Kennard \(1970\)](#) y “tapered cut off” por [Wiggins \(1972\)](#).

Un término constante positivo “ θ^2 ” es añadido a cada uno de los elementos de la diagonal de la matriz $T_{cs}^T T_{cs}$ antes de invertirla y obtener:

$$dX = (T_{cs}^T T_{cs} + \theta^2 I)^{-1} T_{cs}^T \Delta t \quad (4.1.19)$$

o en términos de inversa generalizada:

$$dX_3 = V (\Lambda^2 + \theta^2 I)^{-1} U^T \Delta t \quad (4.1.20)$$

El tamaño del término θ^2 , denominado “amortiguación adaptativa”, ha sido sujeto de muchos estudios ([Marquardt \(1970\)](#), [Franklin \(1970\)](#), [Wichern and Churchill \(1978\)](#)). El diagrama de flujo de la figura 4.1.1 muestra el procedimiento realizado por el Algoritmo Hypocenter, desde los valores con los que iniciará, hasta su convergencia con el resultado final.

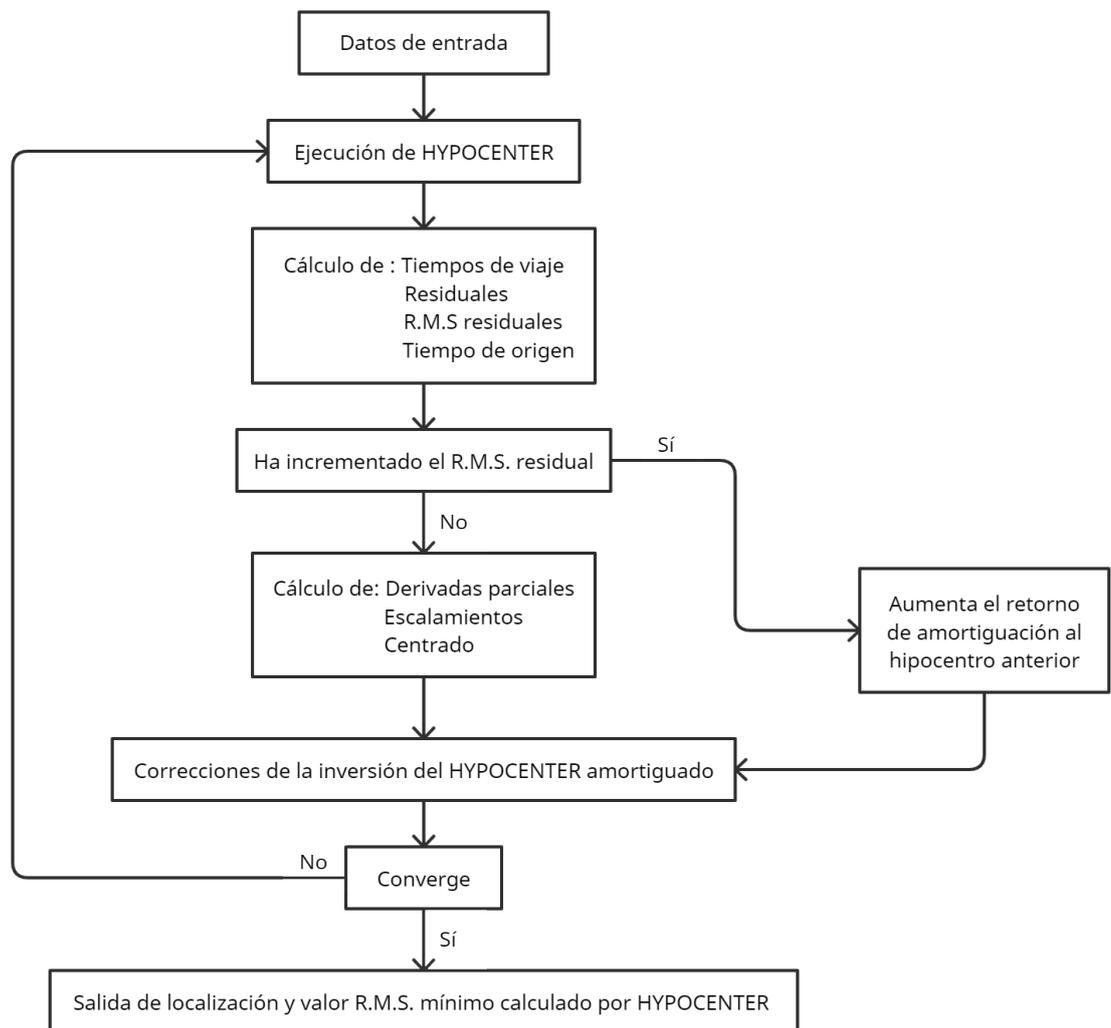


Figura 4.1.1: Diagrama de Flujo del algoritmo Hypocenter. Modificado de Lienert et al. (1986).

4.2. Mecanismos Focales

Los mecanismos focales, pelotas de playa o “beach ball” son una representación gráfica que describe la geometría de una falla asociada a un terremoto, utilizando sismogramas registrados por estaciones que se encuentran distribuidas geográficamente alrededor del epicentro. Señalan un patrón de las ondas sísmicas radiadas que depende de la geometría de la falla.

El método principal se basa en la lectura del sentido de la primera llegada de la onda P (polaridad) registrada en un sismograma. El principio básico es que la dirección de la polaridad del primer movimiento de la onda P varía entre las estaciones sísmicas situadas en diferentes direcciones de un terremoto (Stein and Wysession (2009)), véase la figura 4.2.1. Si el primer movimiento es hacia arriba, este es de compresión y la falla se mueve “hacia” la estación, en cambio si el movimiento es hacia abajo, el movimiento es de dilatación y la falla se está “alejando” de la estación. Estos movimientos dependen de la ubicación de la estación respecto de la fuente y representan dos sistemas de fuerzas ortogonales, tensión y compresión, donde los ejes son definidos por un plano de falla y un plano auxiliar, los cuales son perpendiculares entre sí. Estos planos se denominan planos nodales y definen dos cuadrantes de compresión y dos de dilatación.

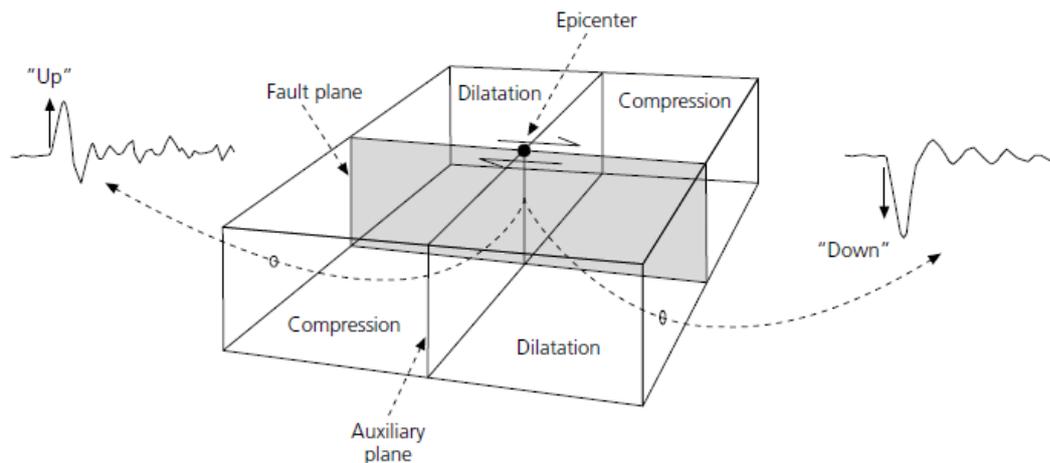


Figura 4.2.1: Primeros movimientos de la onda P llegando desde diferentes direcciones a un sismómetro proporcionando información sobre la orientación de la falla. El plano de falla corta transversalmente al plano auxiliar, formando dos cuadrantes de compresión y dos cuadrantes de dilatación (Stein and Wysession (2009)).

4.2.1. Geometría de una falla

La geometría de una falla se define al obtener la orientación del plano de falla y la dirección del deslizamiento a lo largo del plano como se muestra en la figura 4.2.2. Se define un vector de deslizamiento D como el movimiento del lado superior de la falla (bloque de techo) con respecto al lado inferior (bloque de piso).

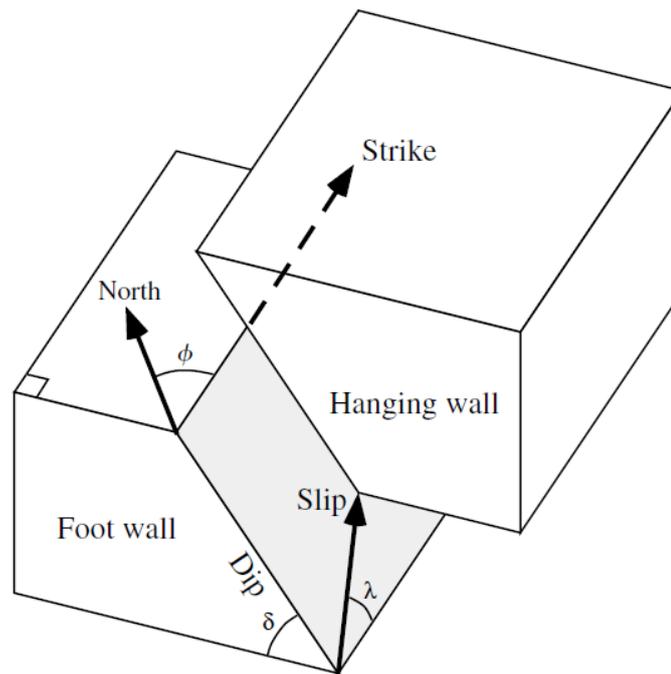


Figura 4.2.2: Geometría de una falla. El plano de falla es definido por el strike y dip de la superficie de la falla junto con la dirección del vector de deslizamiento (rake) (Shearer (2019)).

Los ángulos strike, dip y rake, junto con la magnitud del vector de deslizamiento D , describen el mecanismo focal de un evento.

- El strike (rumbo) ϕ se define como el ángulo con respecto al norte (azimut) que forma la orientación de la falla. Este ángulo es medido en sentido horario y se encuentra entre $0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$.
- El dip (manteo o buzamiento) δ es un ángulo que indica la orientación del plano de falla con respecto a la superficie, caracterizando la inclinación de esta y se encuentra entre $0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$.
- El rake (slip) λ corresponde al ángulo de deslizamiento que se forma entre la dirección del rumbo y el plano de falla. Este ángulo es medido en sentido

antihorario y se encuentra entre $-180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$.

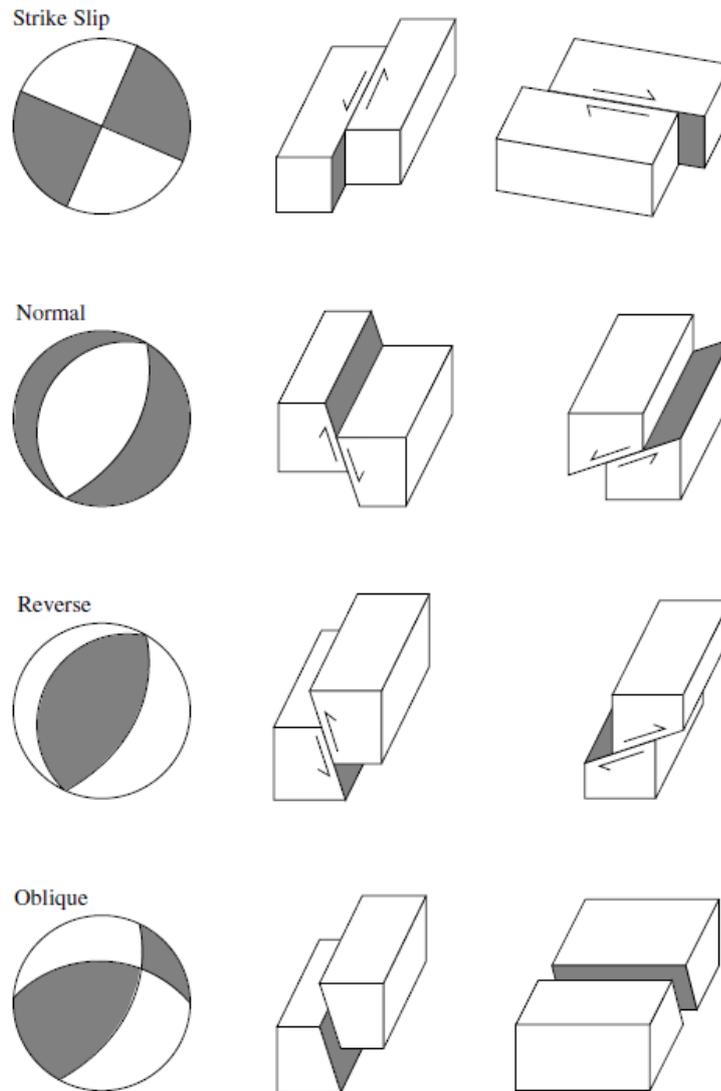


Figura 4.2.3: Ejemplos de mecanismos focales y sus correspondientes geometrías de falla. De arriba hacia abajo se muestra un mecanismo strike-slip, normal, inverso y oblicuo. Los cuadrantes de compresión son de color gris mientras que los de dilatación son de color blanco. Extraído de [Shearer \(2019\)](#).

Capítulo 5

Metodología

5.1. Base de datos sísmicos

ENAP instala una red permanente de 8 sismógrafos triaxiales en la región de Magallanes. Estos corresponden al modelo Kinematics MBB-2 de banda ancha y poseen una frecuencia de respuesta entre 120 segundos y 160 Hz (Figura 5.1.1). Para este trabajo se cuenta con una base de datos de registros sísmológicos continuos desde el 4 de marzo del año 2019 hasta el 11 de marzo del 2020. La figura 5.1.2 muestra la distribución de las estaciones sísmicas en la zona. Se puede observar que dos estaciones se encuentran ubicadas en Punta Arenas y las otras seis están desplegadas en los alrededores de la Isla de Tierra del Fuego (Figura 5.1.2).

Estaciones			
Nombre	Latitud (°)	Longitud (°)	Elevación [msnm]
ANMA	-53.05	-70.38	1.0
BQON	-53.45	-70.24	262.0
DGER	-52.72	-69.58	26.0
LAVG	-52.36	-70.49	131.0
LOSC	-53.35	-69.45	23.0
MJTA	-53.12	-69.39	55.0
RGND	-52.85	-69.87	28.0
TROP	-52.55	-70.29	217.0

Tabla 5.1.1: Localizaciones geográficas y elevación de las estaciones de la red sísmológica ENAP.

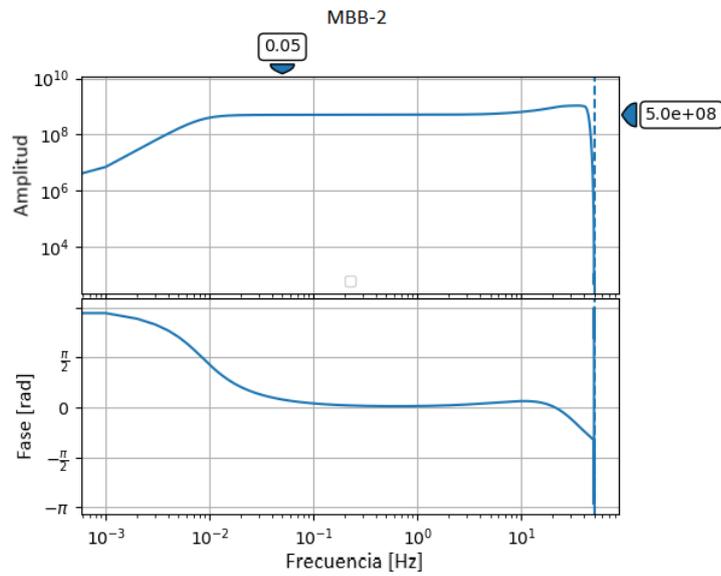


Figura 5.1.1: Frecuencia de Respuesta del Sismómetro MBB-2.

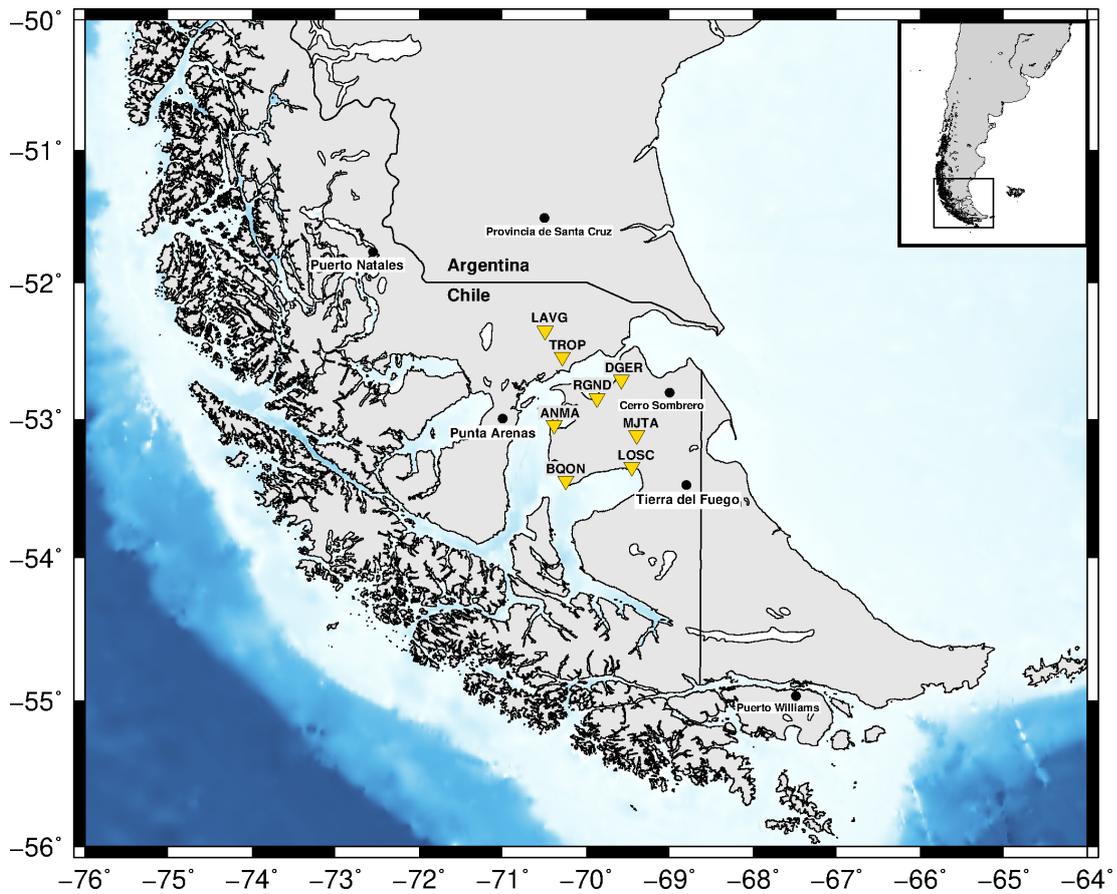


Figura 5.1.2: Mapa de la Región de Magallanes que muestra la distribución de las estaciones sismológicas de la red ENAP en la zona de estudio.

5.2. Procesamiento de datos

Previo al picking manual de fases P y S, se realiza una inspección visual de datos de cada estación en la componente Z de los sismogramas en Obspy (Beyreuther et al., 2010), un software de código abierto basado en Python para el procesamiento de datos sísmológicos. Cada día de datos fue visualizado en trazas de una hora y con un filtro pasa banda entre 5 a 10 Hz (Figura 5.2.1). Luego, se seleccionó la fecha y hora UTC en que es identificado un evento, para ser preparados para ingresar a la base de datos del programa y que puedan ser leídos en sus tres componentes sísmicas (vertical, norte y este). Se continua con una posterior localización en Hypocenter (Lienert et al. (1986), Lienert (1991), Lienert and Havskov (1995)) y se determina manualmente la magnitud de los eventos.

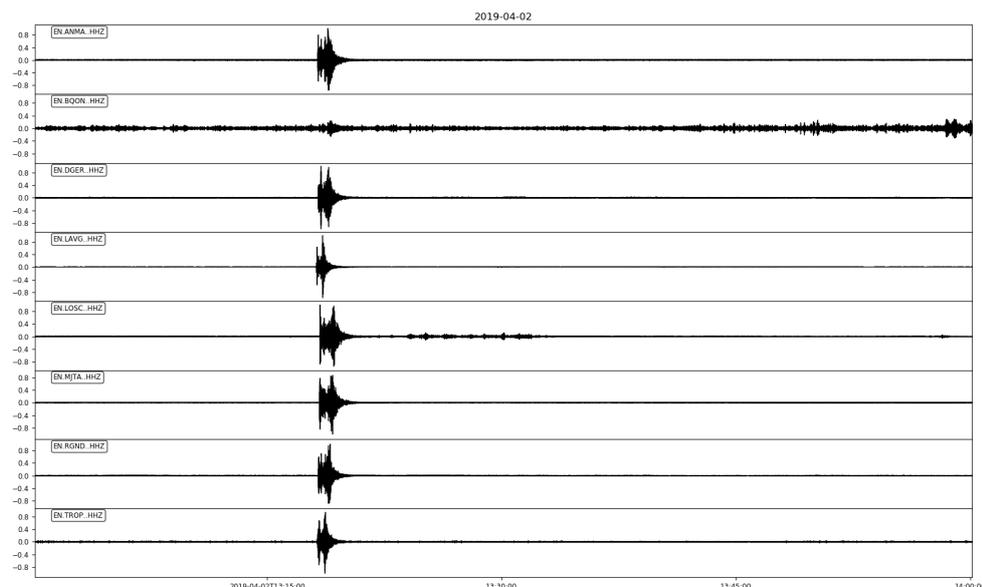
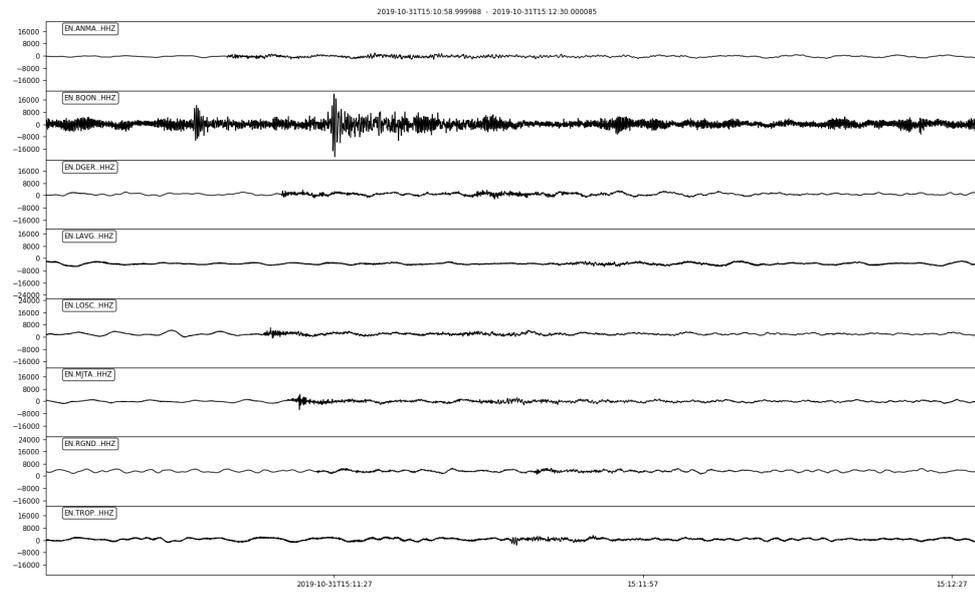


Figura 5.2.1: Ejemplo de la inspección visual realizada a los datos cada una hora.

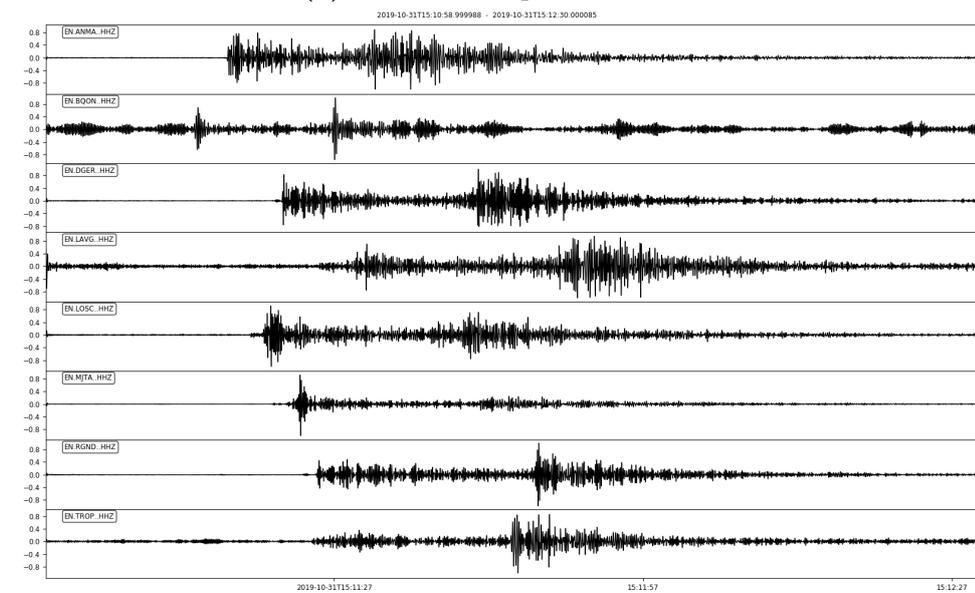
Además, se realiza una clasificación a los eventos según como sea su forma de onda de acuerdo a 4 categorías:

- Eventos tipo 1: Onda P y onda S impulsivas, fáciles de identificar (Figura 5.2.2).
- Eventos tipo 2: Onda P es impulsiva, onda S es emergente y atenuada (Figura 5.2.3).

- Eventos tipo 3: Onda S es impulsiva, onda P es emergente y atenuada (Figura 5.2.4).
- Eventos tipo 4: Onda P y S emergentes, atenuadas y difíciles de identificar (Figura 5.2.5).

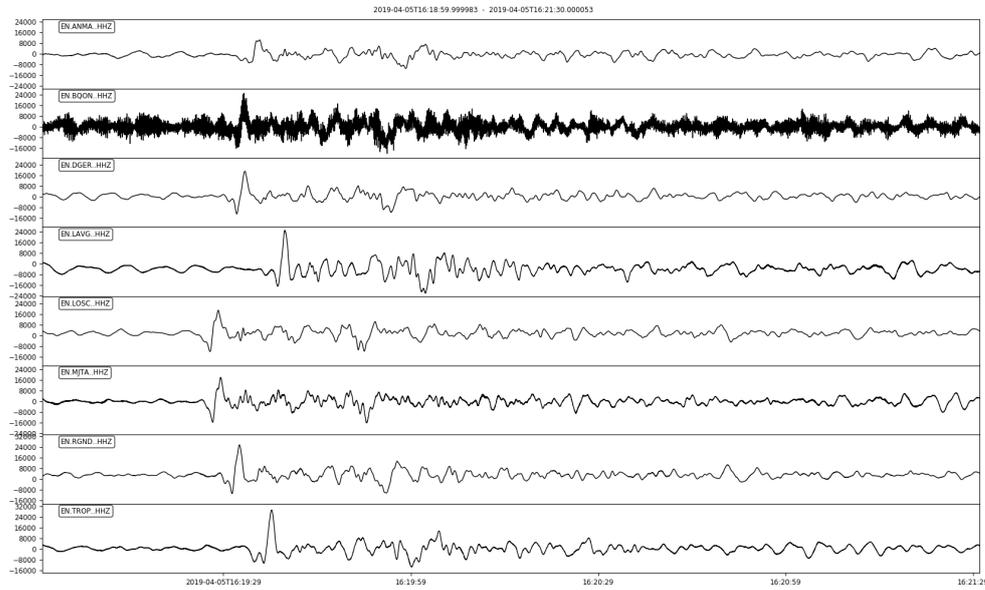


(a) Serie de tiempo sin filtro

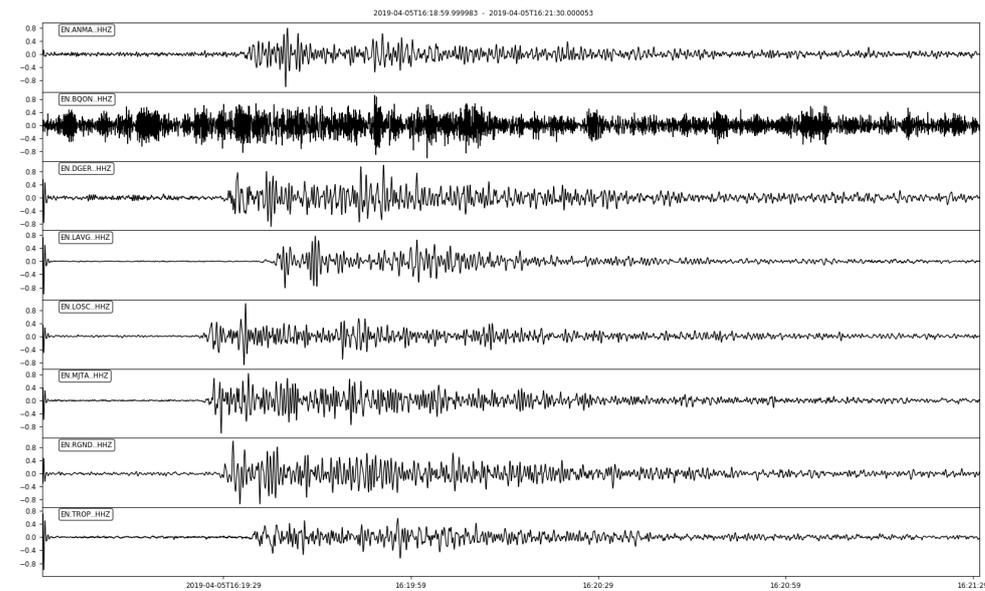


(b) Serie de tiempo con filtro

Figura 5.2.2: Evento tipo 1 en la componente Z de las 8 estaciones. Se muestra su forma de onda, donde se puede identificar claramente la llegada de la onda P y S en los datos filtrados entre 5-10 Hz.

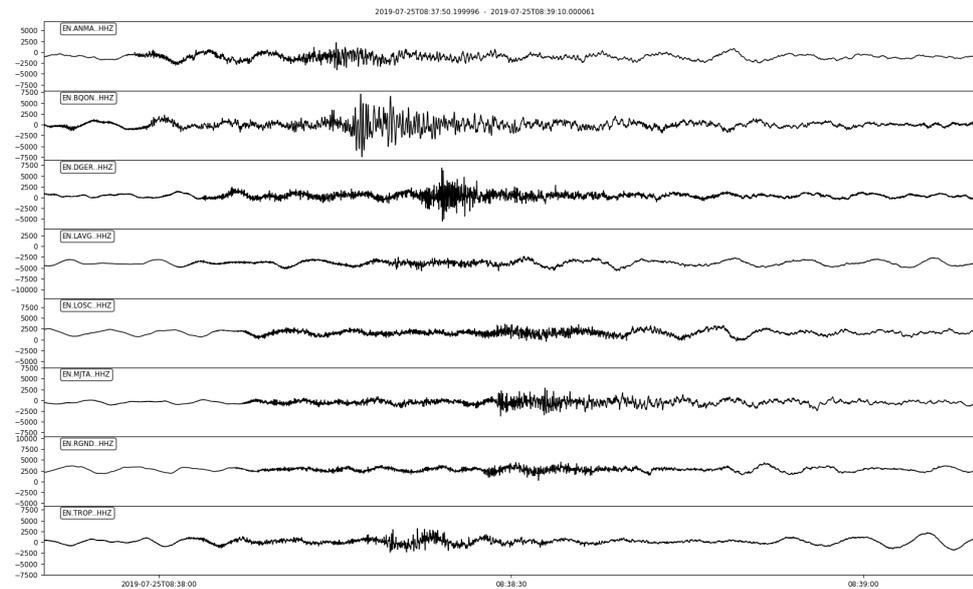


(a) Serie de tiempo sin filtro

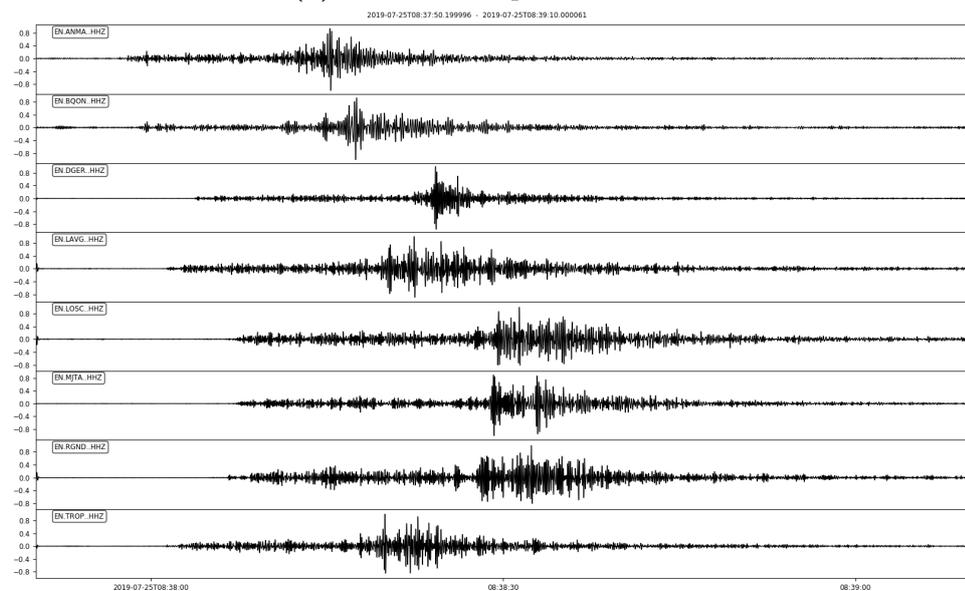


(b) Serie de tiempo con filtro

Figura 5.2.3: Evento tipo 2 en la componente Z de las 8 estaciones. Se muestra su forma de onda, donde se puede identificar claramente la llegada de la onda P en los datos filtrados entre 2-4 Hz.

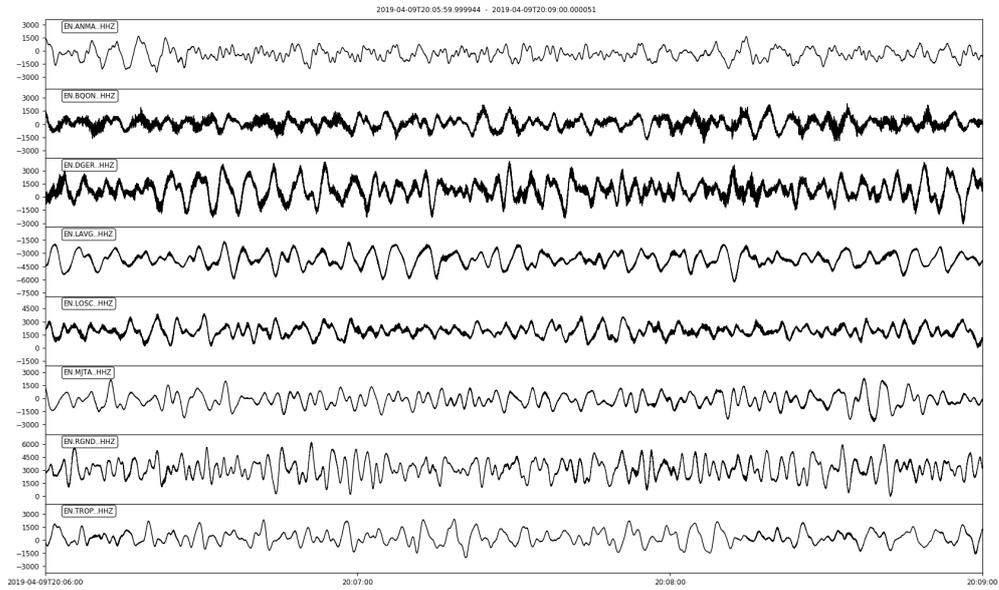


(a) Serie de tiempo sin filtro

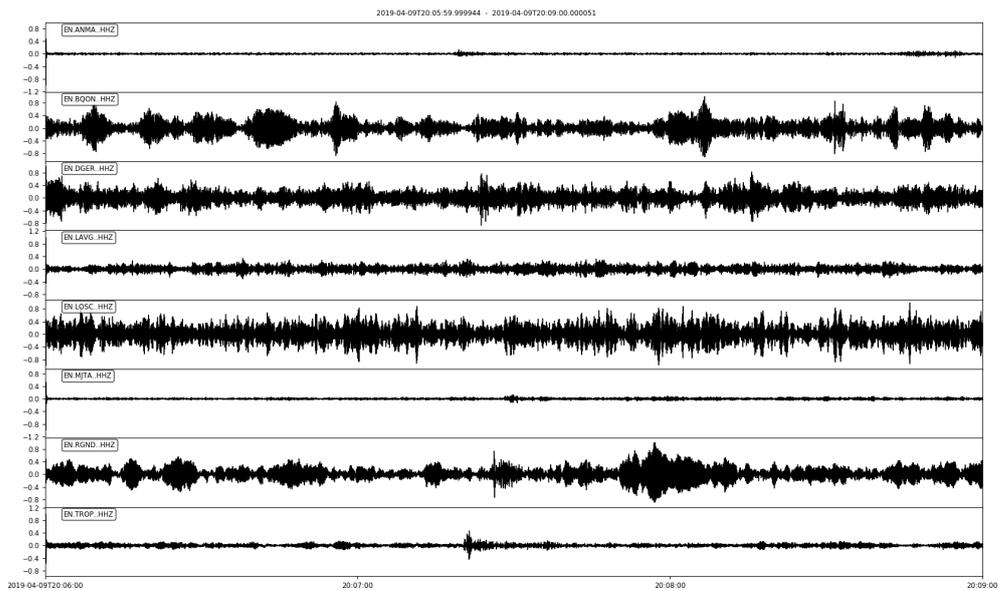


(b) Serie de tiempo con filtro

Figura 5.2.4: Evento tipo 3 en la componente Z de las 8 estaciones. Se muestra su forma de onda, donde se puede identificar claramente la llegada de la onda S en los datos filtrados entre 5-10 Hz.



(a) Serie de tiempo sin filtro



(b) Serie de tiempo con filtro

Figura 5.2.5: Evento tipo 4 en la componente Z de las 8 estaciones. Se muestra su forma de onda, donde no se puede identificar claramente la llegada de la onda P en los datos filtrados entre 5-10 Hz.

5.3. Localización manual de los eventos

Para la localización de sismos se utiliza el programa Hypocenter de [Lienert and Havskov \(1995\)](#). Inicialmente, es necesario generar la respuesta de los instrumentos de manera que se obtenga un valor de amplitud que refleje el real desplazamiento del suelo. Las respuestas de los 8 sensores se obtuvieron mediante el programa de IRIS *rdseed*. Estas respuestas son entregadas en formato RESP y brindan la respuesta completa del instrumento.

Ya teniendo una base de datos preparada, los eventos son ingresados a Seisan y ya es posible observarlos. Se añadieron las trazas en crudo y luego en el programa se utilizaron 3 tipos de filtros dependiendo de cómo se ajustara la relación señal-ruido para la visualización del sismograma. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro pasa banda entre 1 y 5 [Hz].
- Filtro pasa banda entre 2 y 4 [Hz].
- Filtro pasa banda entre 5 y 10 [Hz].

Posteriormente se procedió a realizar una detallada identificación y picking manual de las ondas P y S de cada evento (Figura 5.3.1). Luego, se procede a la localización de los sismos llevada a cabo con el programa Hypocenter.

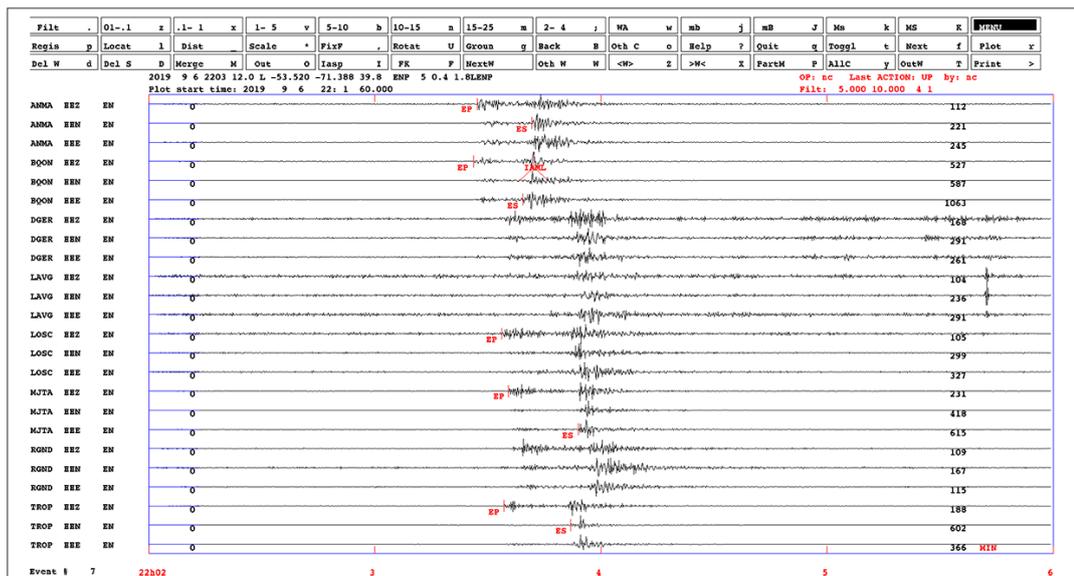


Figura 5.3.1: Ejemplo del picking manual de un evento en Seisan.

5.4. Magnitud Local (M_L)

Las magnitudes locales se calcularon manualmente seleccionando las amplitudes máximas en el canal Z. Se selecciona la traza del sismograma en donde se observe la máxima amplitud en modo de seguimiento único (toggl). Luego, aparece una ventana con la traza corregida (amplitudes en nm), manualmente se selecciona la máxima amplitud y luego se marca la fase IAML (Figura 5.4.1).

La ecuación usada para calcular la magnitud local de los sismos es la siguiente:

$$M_L = \log_{10}(amp) + 1,1 * \log_{10}(dist) + 0,00189 * dist - 2,09$$

En donde \log_{10} es el logaritmo en base 10, amp es la amplitud máxima de la tierra en nanómetros y $dist$ es la distancia hipocentral en kilómetros. Este procedimiento se realizó para cada evento que se identificó.

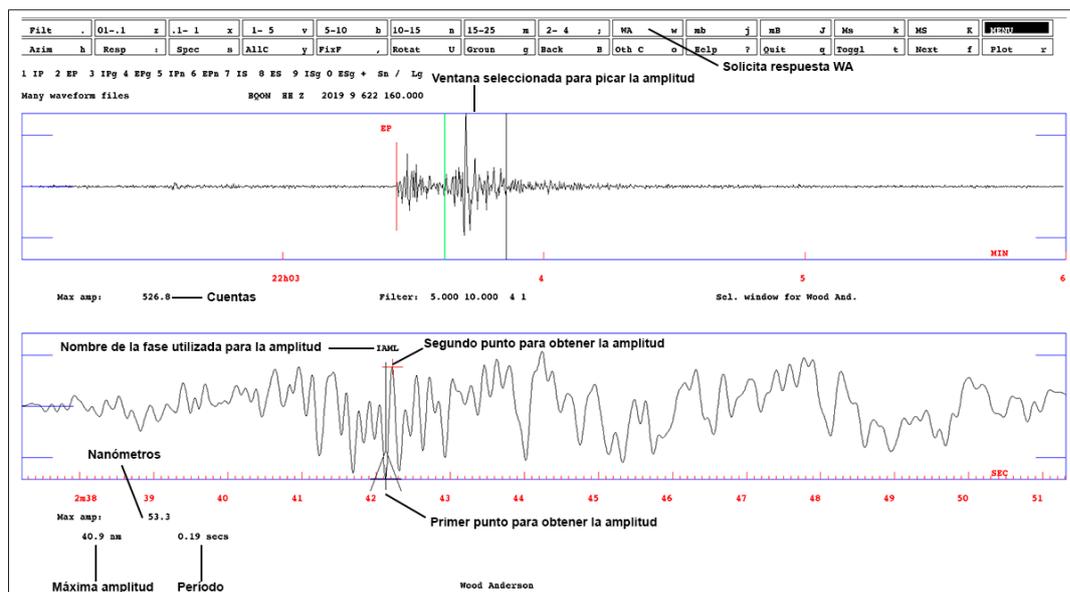


Figura 5.4.1: Determinación de la magnitud local en forma manual.

5.5. Modelo de Velocidad

A efectos de estudiar la sismicidad de la zona y localizar todos los eventos de carácter local registrados por las estaciones, se adopta un modelo de velocidad de 12 capas derivado del estudio publicado por [Guzmán Marín \(2020\)](#), el cual proviene de una interpolación de tres modelos de velocidad diferentes (de los trabajos de [Adaros \(2003\)](#), [Febrer et al. \(2000\)](#) y [Lawrence and Wiens \(2004\)](#)) (Tabla 5.5.1).

Profundidad(km)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	Vp/Vs
-5	3.47	1.65	2.10
0	5.43	2.02	2.69
3	5.60	2.85	1.96
6	5.85	3.54	1.65
15	5.89	3.54	1.66
20	6.61	3.74	1.77
25	6.62	3.83	1.73
30	6.65	3.83	1.74
35	7.48	4.13	1.81
40	7.91	4.13	1.92
50	7.92	4.13	1.92
60	7.92	4.13	1.92

Tabla 5.5.1: Modelo de Velocidad de [Guzmán Marín \(2020\)](#).

5.5.1. Cálculo de la Razón Vp/Vs

La relación Vp/Vs (cociente de velocidades entre la onda P y S) es un parámetro importante para usar en el algoritmo de inversión. Para los eventos seleccionados con el modelo de [Guzmán Marín \(2020\)](#), se obtiene un valor Vp/Vs de 1.74 al calcular el promedio ponderado entre la profundidad del estrato con Vp/Vs para eventos dentro del entorno de la red. Adicionalmente, este valor es confirmado con el programa Wadati integrado en Seisan, el cual calcula la relación Vp/Vs para eventos individuales o el promedio para un grupo de eventos. En este caso, se utilizó el cálculo promedio para un grupo de eventos que estuviera dentro de un GAP menor a 300 grados. Para calcular esta relación se requiere información de la identificación de las fases P y S de los sismogramas.

5.6. Cálculo de Modelo de Velocidad 1-D con Velest

Luego de haber realizado la localización manual de los eventos, se realiza una inversión simultánea, para hipocentros y para el modelo de velocidad utilizando el programa Velest (Kissling et al., 1995). Esto con el objetivo de mejorar la localización de los eventos y obtener un mejor modelo de velocidad para la zona. En esta etapa, mediante el programa incorporado en Seisan SELECT se seleccionaron eventos dentro y cercanos a la red, con un GAP menor a 300 grados. De esta selección se obtuvieron 50 eventos que posteriormente ingresaron a Velest.

Velmenu es el programa que ejecuta Velest y genera todos los archivos de entrada junto con los parámetros necesarios para correr el programa, los cuales se pueden modificar de forma interactiva. Los archivos generados son los siguientes:

- **velest.cmn**: Parámetros de control para ejecutar Velest.
- **input.mod**: Modelo de velocidad inicial.
- **selstat.lis**: Localización de las estaciones seleccionadas.
- **data.cnv**: Datos sismológicos de las localizaciones de entrada a Velest.

Luego de que estos archivos han sido generados, es posible iniciar la inversión al ejecutar Velest. Para este trabajo se realizaron 5 iteraciones en modo simultáneo y 9 corridas. Se ha seguido un esquema de inversión intercalada, invirtiendo los hipocentros en cada iteración, pero tanto los retardos de las estaciones como los parámetros de velocidad, solo en la segunda iteración.

Para ello, se debe modificar el parámetro *Invertratio* en el archivo `velest.com` y establecerlo en 2. Se repite este procedimiento siete veces, actualizando el modelo de velocidad en cada corrida hasta que la ubicación de los sismos, los retardos de las estaciones y los valores de velocidad no varíen significativamente. Además, los valores RMS totales a lo largo de todas las inversiones deben mostrar una reducción significativa respecto a las primeras corridas. Así mismo, el cálculo del modelo de velocidad 1-D y los retardos calculados en cada una de las estaciones deben tener su correspondencia desde el punto de vista geológico.

Finalmente, hay que relocalizar los eventos utilizando el nuevo modelo de velocidad en conjunto con los residuos de las estaciones obtenidos (Los 50 eventos que se relocalizaron se pueden observar en la figura 5.6.1). Para esto es necesario fijar en el archivo de parámetros (velest.cmn) los parámetros de las estaciones y el modelo de velocidad (con el número 999) en las últimas corridas. En el Apéndice D se adjunta el archivo velest.cmn que controla los parámetros del programa Velest.

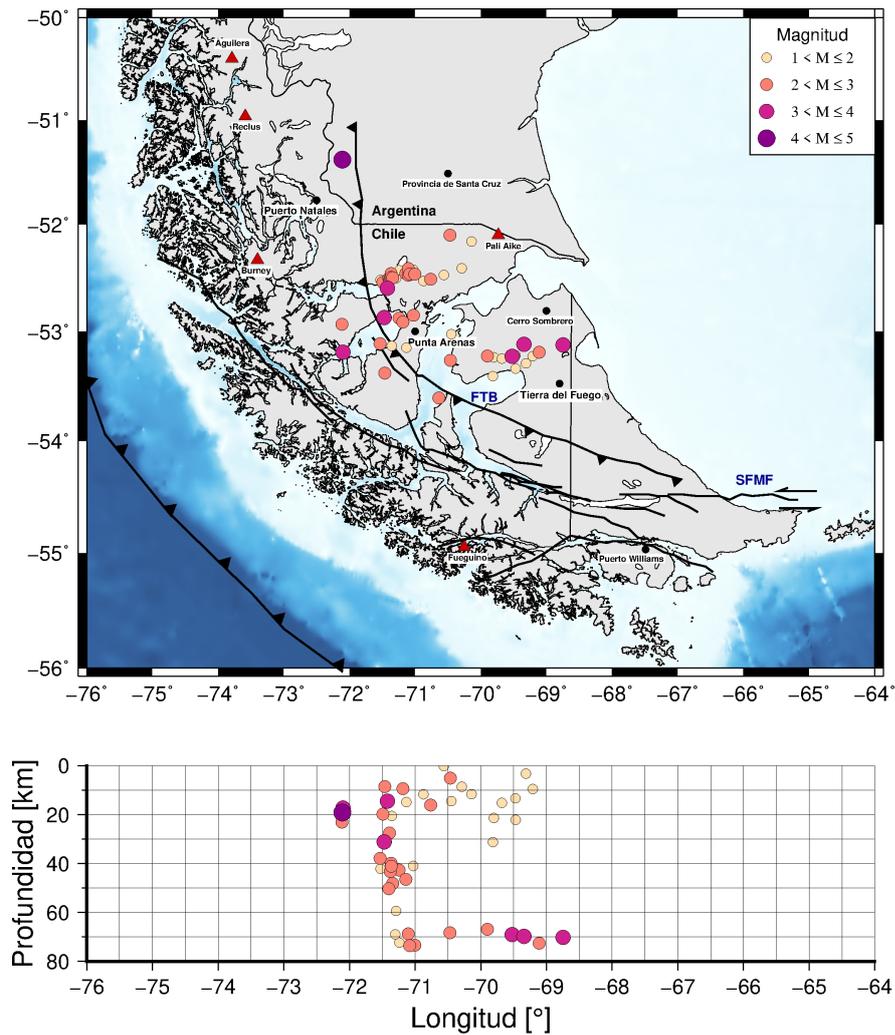


Figura 5.6.1: Distribución de la sismicidad según catálogo ENAP (2019-2020) según magnitud (escala de círculos de colores, según se indica). Estos son los eventos seleccionados ($GAP < 300^\circ$) y relocalizados usando el software Velest.

5.7. Modelo de velocidad 1-D

El modelo de velocidad 1-D obtenido se puede observar en la figura 5.7.1. En la tabla 5.7.1 se muestra detalladamente la solución final de este modelo para la zona de estudio. Además, se ha generado un mapa del retraso de las estaciones para la onda P y S que se observa en la figura 5.7.3. El mapa de las diferencias hipocentrales entre la localización realizada en Hypocenter y la relocalización mediante Velest se muestra en la figura 6.2.2.

Profundidad(km)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	Vp/Vs
-5	3.48	1.74	2.00
0	5.24	1.84	2.85
3	5.74	2.94	1.95
6	5.75	3.04	1.89
15	5.75	3.72	1.55
20	6.87	3.88	1.77
25	6.95	3.88	1.79
30	7.10	4.22	1.68
35	7.33	4.22	1.74
40	7.37	4.22	1.75
50	7.62	4.32	1.76
60	7.85	4.32	1.84

Tabla 5.7.1: Modelo de Velocidad final que se obtuvo luego de reiteradas iteraciones utilizando el programa Velest.

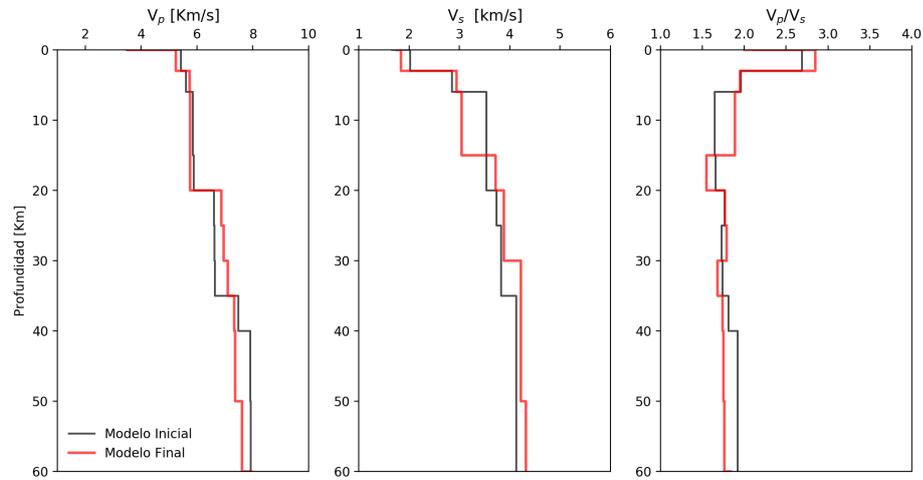


Figura 5.7.1: Modelo de velocidad obtenido en la inversión 1-D en el programa Velest. En color negro se puede apreciar el modelo de velocidad inicial de Guzmán Marín (2020) y en rojo se aprecia el modelo de velocidad final obtenido. En la figura de la izquierda se muestra el modelo V_p , en la central el modelo V_s y en la figura de la derecha la razón V_p/V_s .

Para verificar gráficamente el comportamiento de los eventos que fueron seleccionados en Velest en cada corrida se presenta la figura 5.7.2. La varianza de datos, los valores RMS medio residual y los valores totales RMS de los eventos evidencian una reducción significativa con respecto a la primera corrida y son estables.

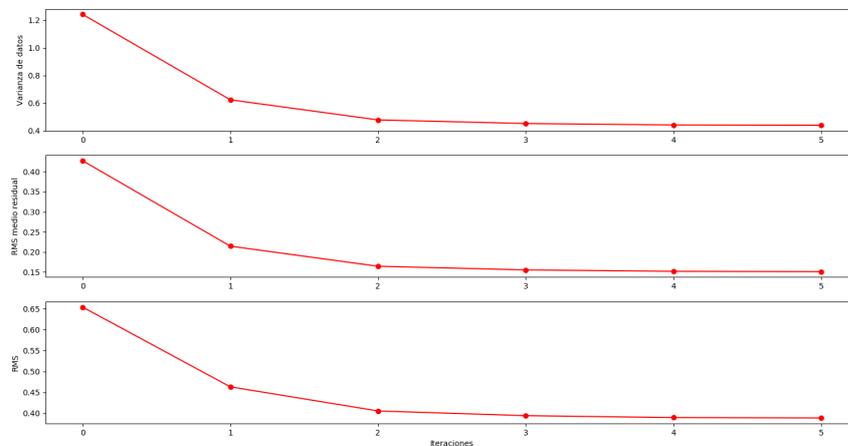


Figura 5.7.2: Varianza de datos, RMS medio residual y RMS vs Número de iteraciones.

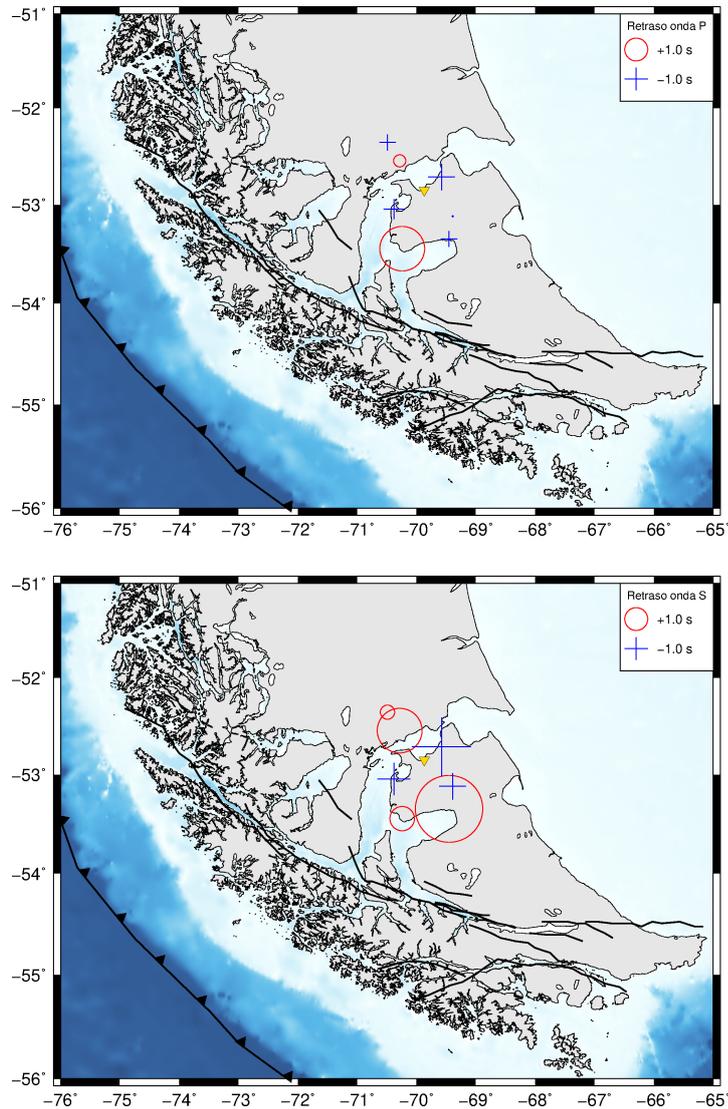


Figura 5.7.3: Mapa con los tiempos de retardo de las estaciones para las fases P (arriba) y S (abajo). El triángulo amarillo representa la estación de referencia usada RGND, que es la que se encuentra en el centro de la red, además esta posee un alto número de observaciones. Los círculos rojos indican estaciones con tiempos de retardo positivos, mientras que las cruces azules indican estaciones con tiempos de retardo negativos.

5.8. Determinación de Mecanismos focales usando el programa Focmec

Las soluciones de los mecanismos focales son obtenidas mediante el software Focmec (Snoke, 2003) integrado en Seisan. A partir de la identificación de la polaridad del primer impulso de la onda P, en sus formas de arribo ya sea de compresión o dilatación.

Se determinaron mecanismos focales de los eventos que fueron relocalizados y que tuvieran lecturas de fase P en un mínimo de cinco estaciones sísmicas. Al iniciar Focmec, se despliega un menú en el que se permite imponer restricciones tanto en el número máximo de errores de polaridad admitidas en la solución como en el incremento de búsqueda en grados. Para obtener las soluciones de los mecanismos se consideró una búsqueda cada 2 grados dando como resultado en algunos casos hasta 125 soluciones. Se escogió visualmente la solución que fuera más acorde con respecto a la polaridad y ubicación de las estaciones. Focmec presenta gráficamente los principales ejes de esfuerzo (tensión y compresión) y los parámetros strike, dip y rake (rumbo, manteo y ángulo de deslizamiento) del plano de falla. Como resultado, se obtuvieron 16 soluciones de mecanismos focales para la zona dentro de la cual se encuentra la red con lecturas de polaridad clara y correcta.

En la figura 5.8.1 se muestra cómo se realiza la selección de la polaridad para la onda P en una estación. Estas polaridades posteriormente serán leídas en Focmec para el cálculo de las SMF (Figura 5.8.2).

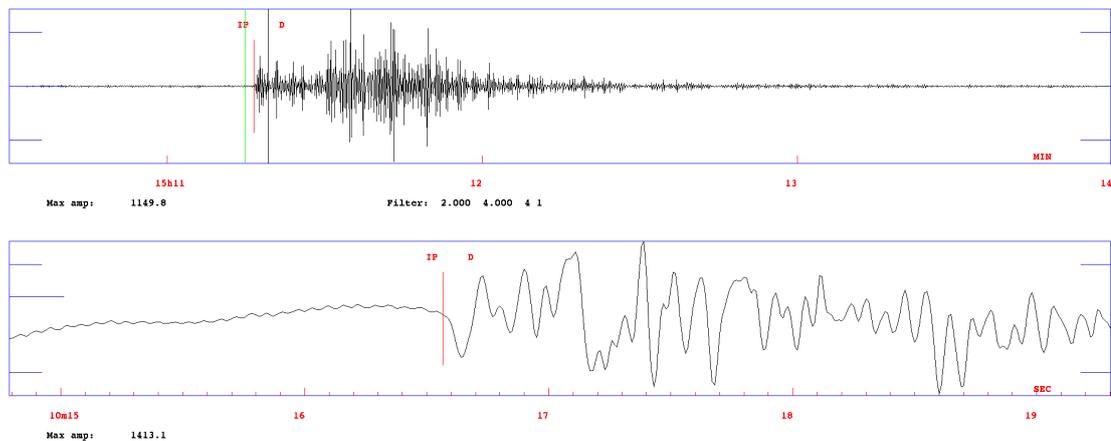


Figura 5.8.1: Selección de polaridad para la componente Z del sismograma usada para el cálculo de los mecanismos focales.

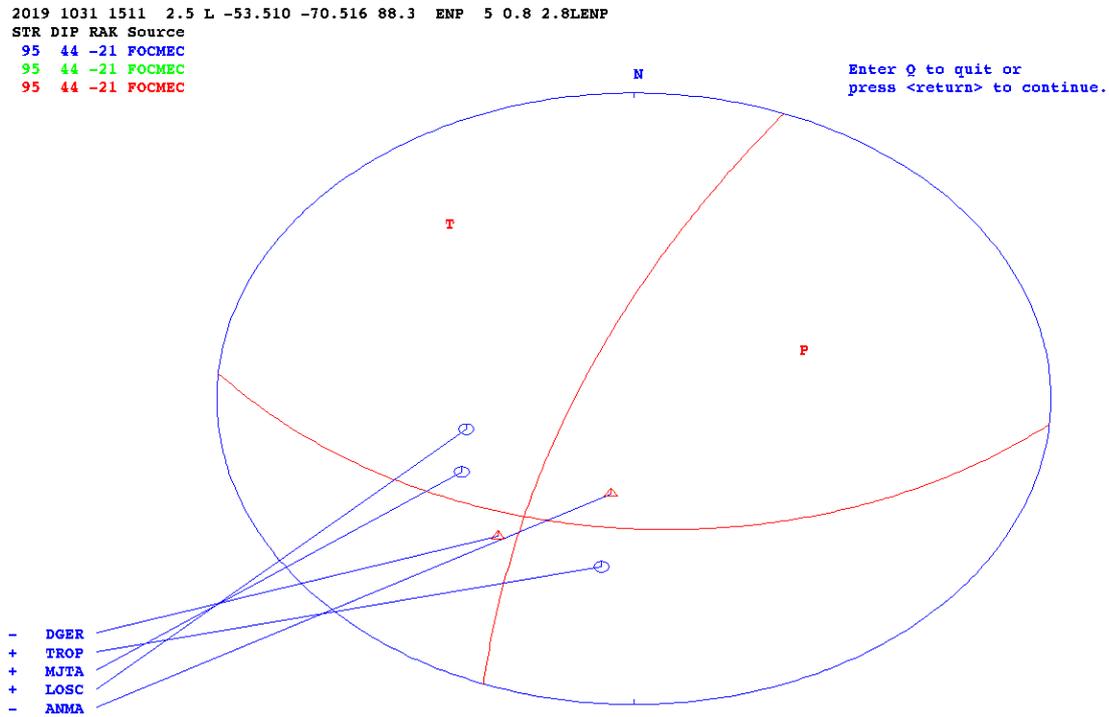


Figura 5.8.2: Solución de mecanismo focal generado por Focmec.

Capítulo 6

Resultados y Análisis

6.1. Resultados Hipocentrales

Para el período de datos de este estudio se identificaron 168 sismos mediante el picking manual en Seisan. Magnitudes inferiores a 4.6 M_L fueron estimadas. La figura 6.1.1 muestra toda la sismicidad registrada durante los años 2019-2020 por las 8 estaciones de la red ENAP. Se adjunta el catálogo en el Apéndice A1.

Los valores de profundidad varían desde sismos superficiales de 1.2 km a sismos más profundos de hasta 93.4 km. No obstante, la mayor cantidad de eventos se observa a profundidades de 20 y 40 km.

Una gran cantidad de eventos se concentran en zonas determinadas como el noroeste de la región de Magallanes y la provincia de Santa Cruz (Argentina). En los alrededores de Villa Tehuelches, ubicado entre Punta Arenas y Puerto Natales. Además, se observa un particular lineamiento de sismicidad cerca de Laguna Blanca.

En comparación con Punta Arenas, Puerto Natales es una zona de baja sismicidad.

Al menos 20 sismos del catálogo obtenido se pueden atribuir a la actividad de la falla Magallanes-Fagnano que siguen la orientación oblicua de esta con magnitudes entre 2 y 4 M_L .

Poca sismicidad es encontrada en Tierra del Fuego, en su mayoría eventos de baja magnitud que vienen acompañados de ruido.

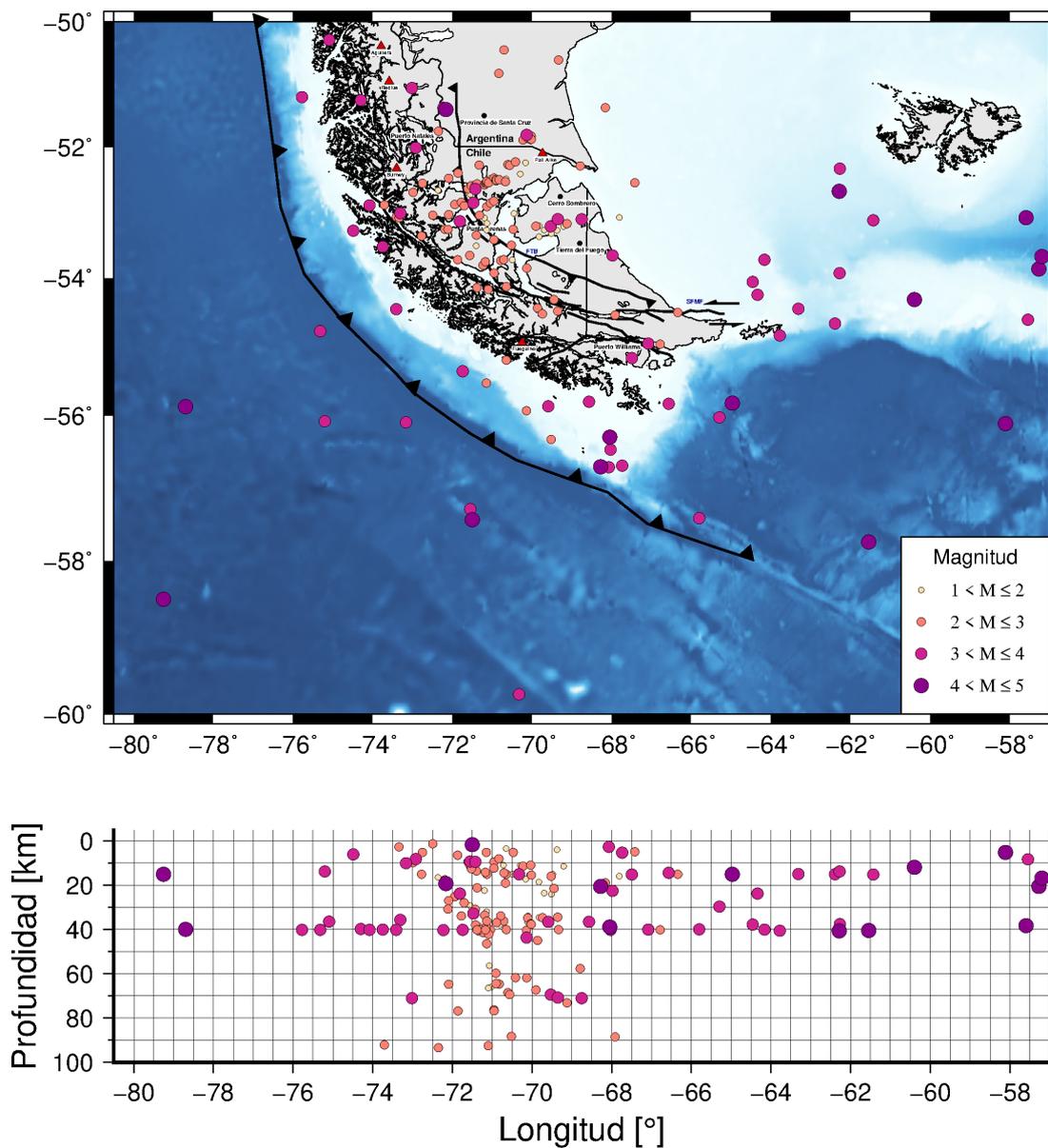


Figura 6.1.1: Distribución de la sismicidad según catálogo ENAP (2019-2020) según magnitud (escala de círculos de colores, según se indica). Sismicidad total localizada mediante picking manual en Seisan.

6.2. Errores de localización

Los valores RMS (raíz cuadrática media de la diferencia entre los tiempos de llegada observados y los calculados por el programa) que resultan de la localización y relocalización para cada sismo llegan a tener un valor de hasta 0.8 s, a excepción de un evento que se escapa del rango (Figura 6.2.1).

Es importante mencionar que para disminuir los valores RMS altos en la localización de los eventos con Hypocenter fue necesario eliminar los picados de ondas P y S de las estaciones BQON y RGND.

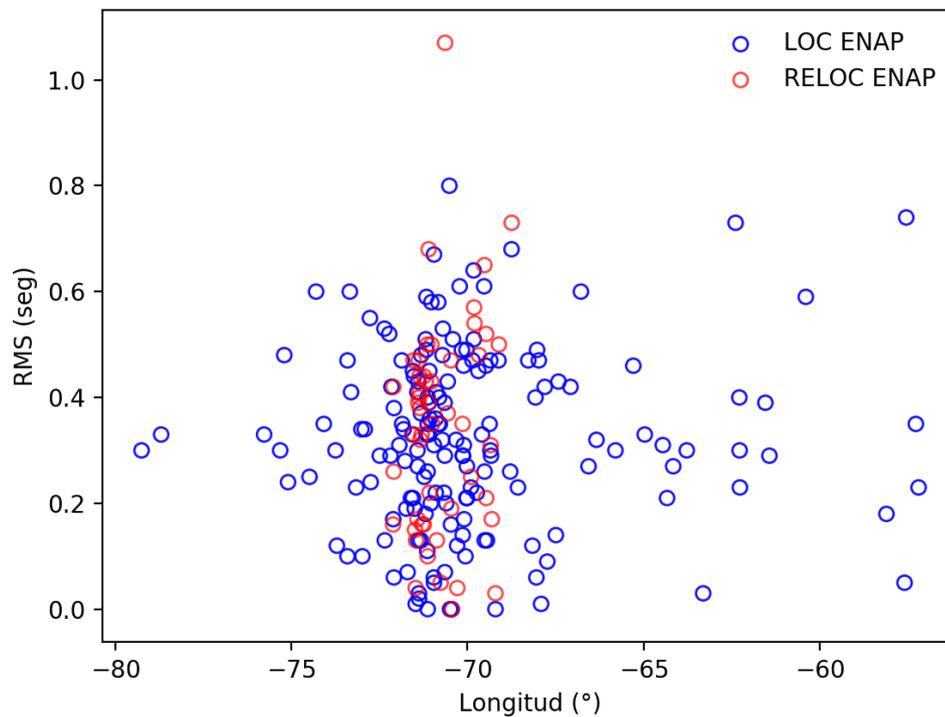


Figura 6.2.1: Distribución del Root Mean Square (RMS) según su distribución en longitud oeste.

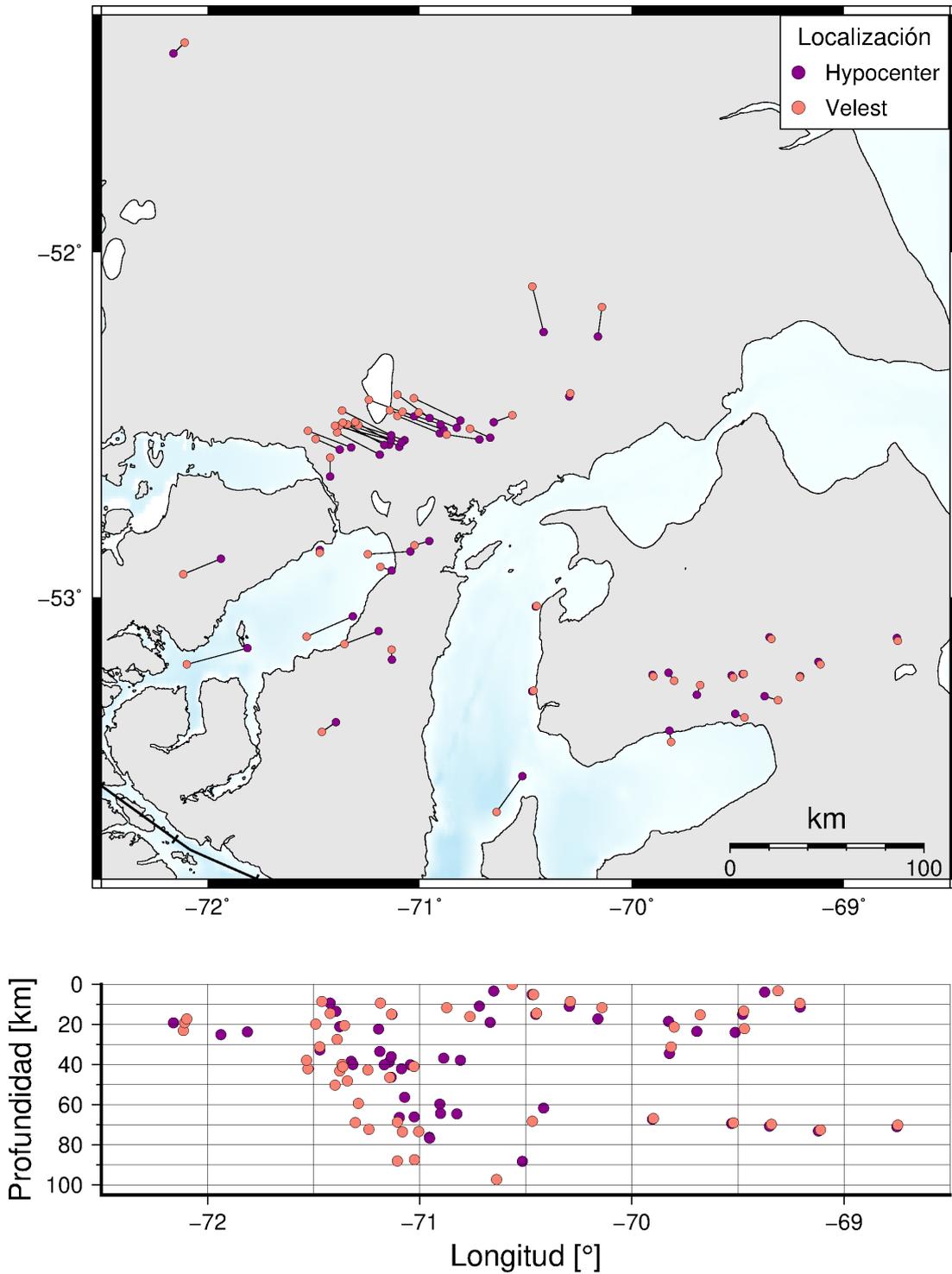


Figura 6.2.2: Cambios observados en los hipocentros de los 50 eventos que ingresaron a Velest para ser relocalizados. Los círculos morados representan la localización original realizada en Hypocenter mientras que los círculos en color naranja representan los eventos relocalizados en Velest.

De la figura 6.2.2 se puede apreciar que la tendencia de los eventos relocalizados en Velest de un grupo (sector izquierdo de la figura) es moverse hacia el noroeste y de otro grupo hacia el sureste (sector derecho de la figura).

6.3. Soluciones de Mecanismos focales para la zona de estudio

Luego de identificar las polaridades del primer impulso de la onda P en todas las estaciones que fuera posible, se procede a calcular los mecanismos focales. Para iniciar el proceso de caracterización sismotectónica con los datos disponibles, se obtuvieron preliminarmente soluciones de mecanismos focales de 20 eventos sísmicos que tuvieron entrada a Velest, pero debido a la cantidad limitada de estaciones para este estudio, algunas soluciones fueron eliminadas al no llegar a converger. De manera independiente a estos eventos que entraron a Velest, se realizó el cálculo de mecanismos focales para tres sismos localizados en lugares de interés de este estudio, específicamente en los alrededores del SFMF y en las cercanías de Puerto Natales, resultando finalmente un total de 16 soluciones de mecanismos focales. Los mecanismos focales del total de eventos a analizar se presentan en la figura 6.3.1 y los parámetros de estos son mostradas en la tabla 6.3.1. Las soluciones se clasificaron en 5 grupos diferentes, según su ubicación geográfica, los que son:

- **Grupo 1: sector Puerto Natales**
- **Grupo 2: sector Punta Arenas**
- **Grupo 3: sector Falla Magallanes-Fagnano**
- **Grupo 4: sector Sur de Punta Arenas**
- **Grupo 5: sector Tierra del Fuego**

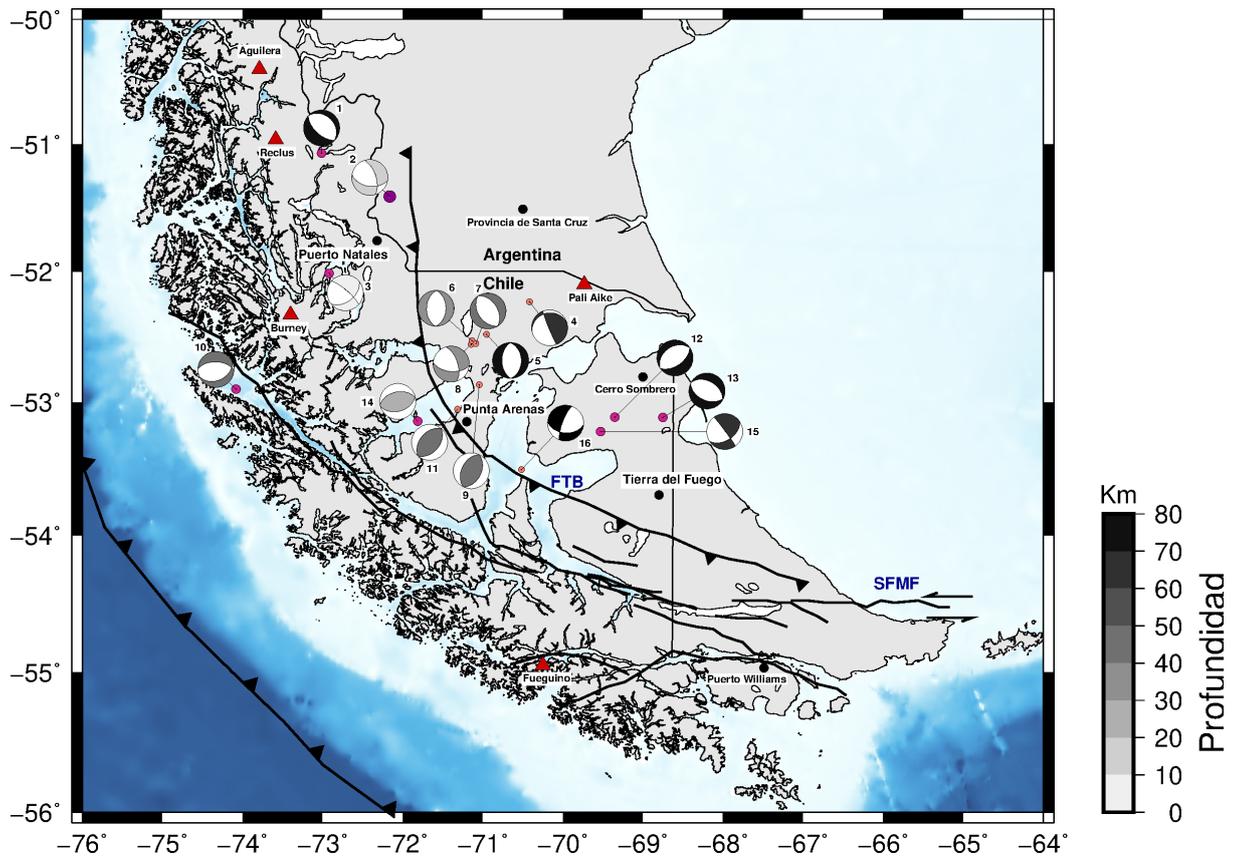


Figura 6.3.1: Se observan las soluciones de mecanismos focales obtenidas para 16 eventos. Las líneas color negro en el mapa representan estructuras geológicas activas. Los triángulos rojos corresponden los volcanes que forman parte de la Zona Volcánica Austral de los Andes.

#	Fecha (UTC)	Latitud (°)	Longitud (°)	Prof. (km)	Mag. (M_L)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)
1	2019-04-26	-51.072	-73.013	71.0	3.7	314	30	-89
2	2019-04-02	-51.414	-72.161	19.2	4.6	342	62	-48
3	2019-04-03	-52.014	-72.918	8.1	3.4	311	78	-42
4	2019-06-08	-52.234	-70.416	61.7	2.1	259	18	12
5	2019-05-16	-52.484	-70.953	76.7	2.3	180	50	-89
6	2019-08-24	-52.534	-71.134	36.1	2.5	182	46	-89
7	2019-08-20	-52.555	-71.086	42.1	2.1	328	46	-89
8	2019-04-30	-52.561	-71.144	38.7	2.4	342	61	-41
9	2019-03-16	-52.869	-71.044	40.1	2.9	26	44	90
10	2019-08-22	-52.903	-74.081	40.1	3.1	272	55	-74
11	2019-09-19	-53.055	-71.315	40.0	2.6	40	44	90
12	2019-05-27	-53.115	-69.351	70.7	3.5	236	36	-89
13	2019-04-05	-53.117	-68.751	71.0	3.7	300	44	-86
14	2019-07-25	-53.146	-71.812	23.7	3.1	74	44	87
15	2019-04-22	-53.224	-69.530	69.4	3.7	324	87	-41
16	2019-10-31	-53.510	-70.516	88.3	2.8	95	44	-21

Tabla 6.3.1: Parámetros de los mecanismos focales desplegados en la figura 6.3.1.

6.3.1. Mecanismos focales grupo 1 (sector Puerto Natales)

A este grupo pertenecen las SMF 1, 2 y 3 (Figura 6.3.2). De los cuales el mecanismo 1 corresponde a un evento normal y los otros (2 y 3) corresponden a mecanismos focales oblicuos con componente normal. Todos estos tienen una misma orientación (azimut) NW-SE y varían en profundidad desde 8.1 a 71 km.

El evento 1 ocurre en las cercanías de estancia Pudeto, ubicada en Torres del Paine y tiene una magnitud M_L de 3.7.

El evento 2 ocurre en San Juan (Argentina), cerca del límite con Puerto Natales y tiene una magnitud M_L de 4.6.

El evento 3 ocurre en el Golfo Almirante Montt (cercano a la Isla Diego) y tiene una magnitud M_L de 3.4.

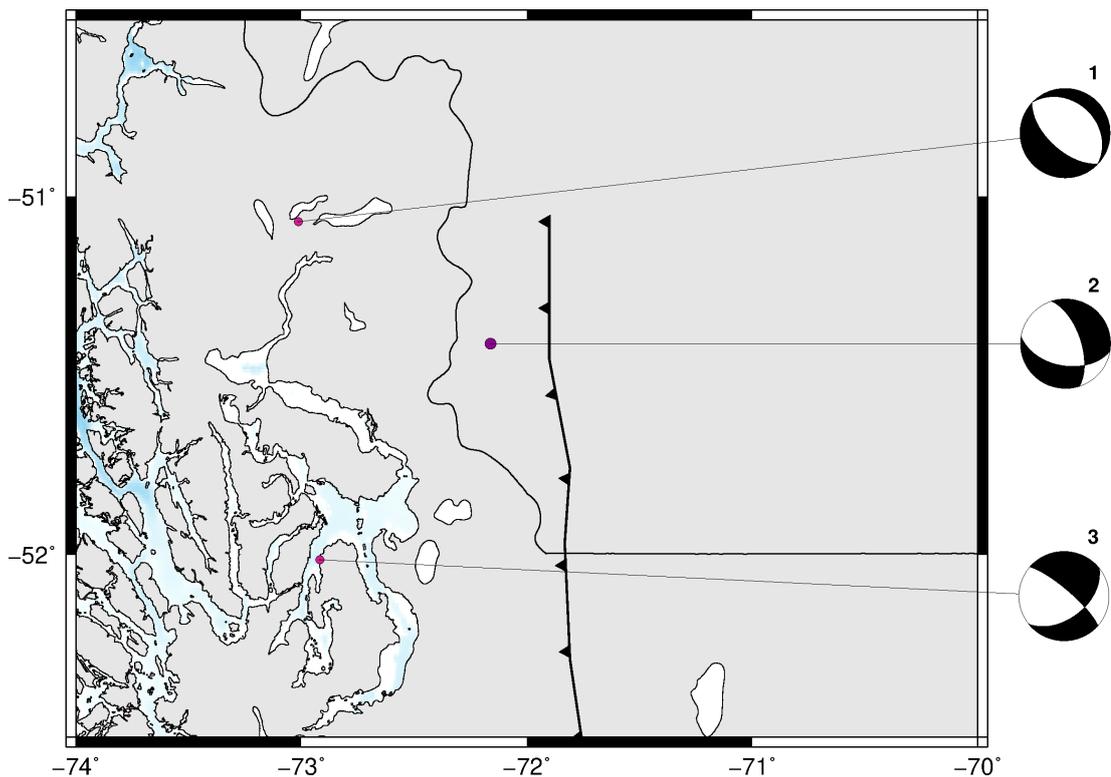


Figura 6.3.2: Soluciones de mecanismos focales obtenidas para el grupo 1: sector Puerto Natales.

6.3.2. Mecanismos focales grupo 2 (sector Punta Arenas)

En este grupo se incluyen las SMF 4-5-6-7-8 (Figura 6.3.5). De los cuales los mecanismos 5-6-7 corresponden a eventos normales y las soluciones 4-8 son mecanismos focales oblicuos con componente normal. Todo este grupo a excepción del evento 4 tiene orientación N-S. Los eventos 5-6-7-8 tienen epicentro en los alrededores de Laguna Blanca y tienen magnitudes M_L de un rango de 2.1 a 2.5 y van desde los 36.1 a 76.7 km de profundidad. El evento 4 ocurre en San Gregorio, tiene magnitud M_L 2.1 y una orientación W-E.

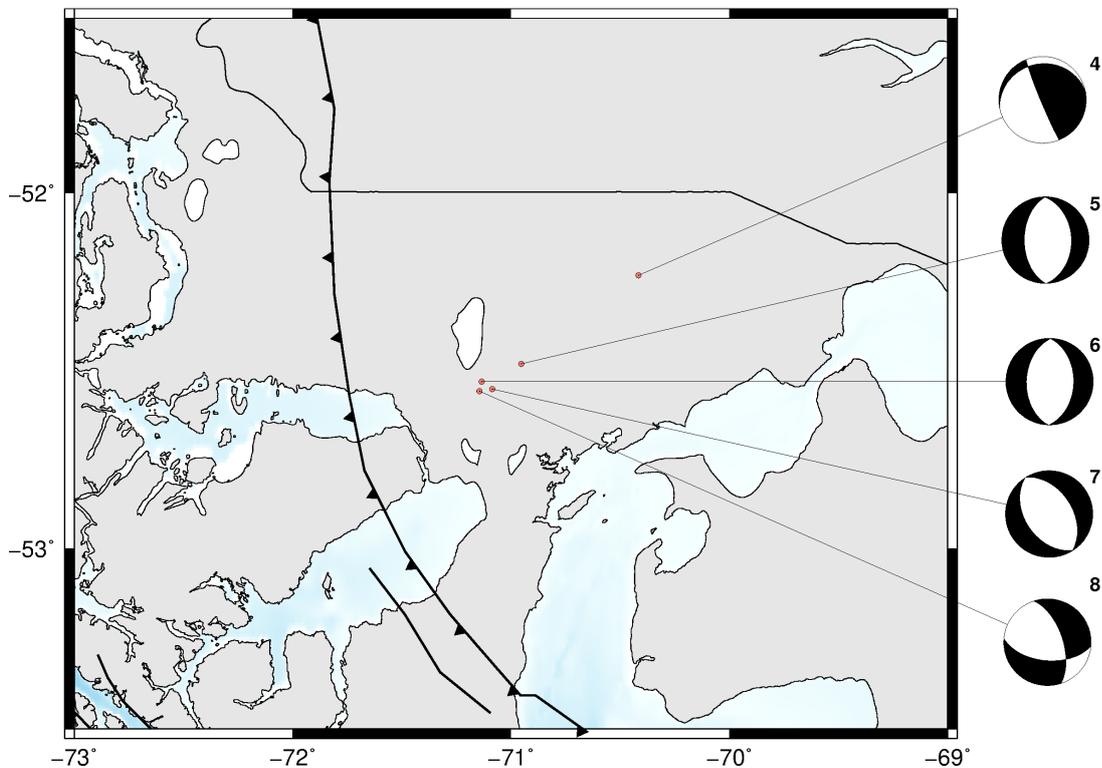


Figura 6.3.3: Soluciones de mecanismos focales obtenidas para el grupo 2: sector Punta Arenas.

6.3.3. Mecanismos focales grupo 3 (sector falla Magallanes-Fagnano)

Este grupo corresponde solo al evento 10 (Figura 6.3.4) y tiene una SMF normal con orientación E-W. Este sismo tiene una profundidad de 40.1 km y una magnitud de 3.1 M_L .

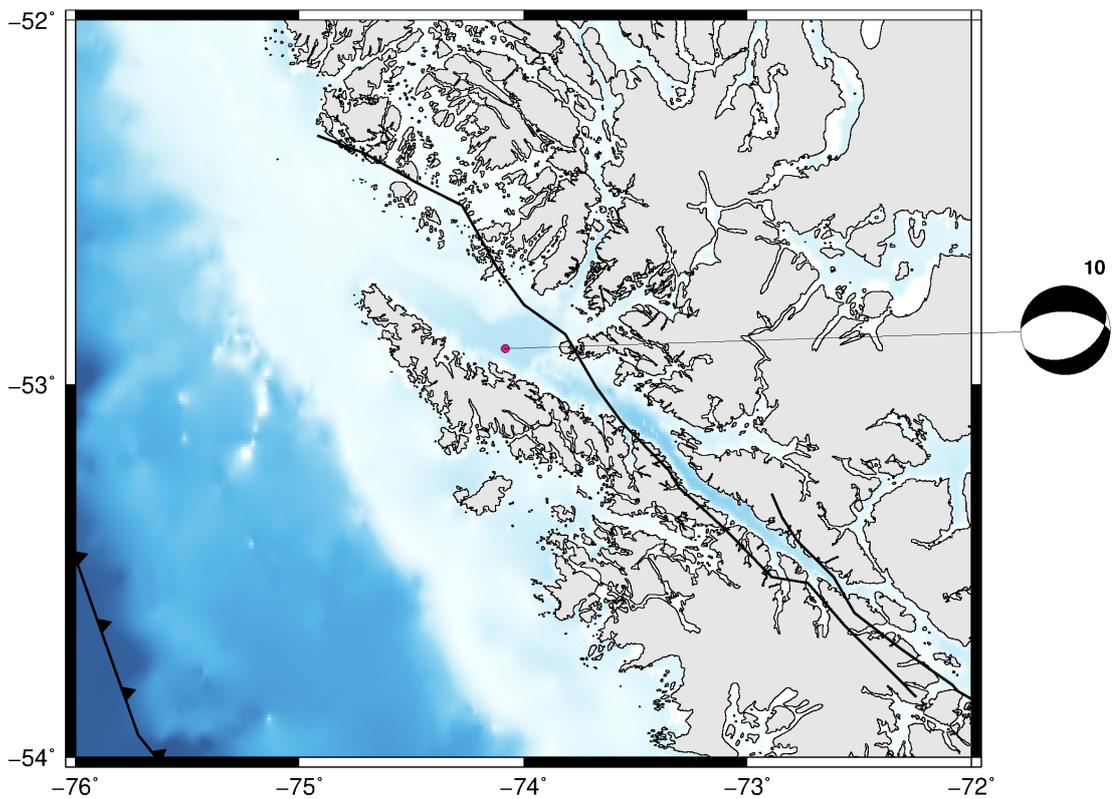


Figura 6.3.4: Solución del mecanismo focal obtenida para el grupo 3: sector falla Magallanes-Fagnano.

6.3.4. Mecanismos focales grupo 4 (sector sur de Punta Arenas)

A este grupo corresponden las SMF 9-11-14 (Figura 6.3.5) y se ubican en el sur de Punta Arenas, alrededor de la Faja Corrida y Plegada de Magallanes. Los eventos de esta zona tienen orientación NE-SW, los que varían en profundidad desde 23.7 a 40.1 km. Estas tres soluciones tienen un mecanismo focal inverso con magnitudes entre 2.6 a 3.1 M_L .

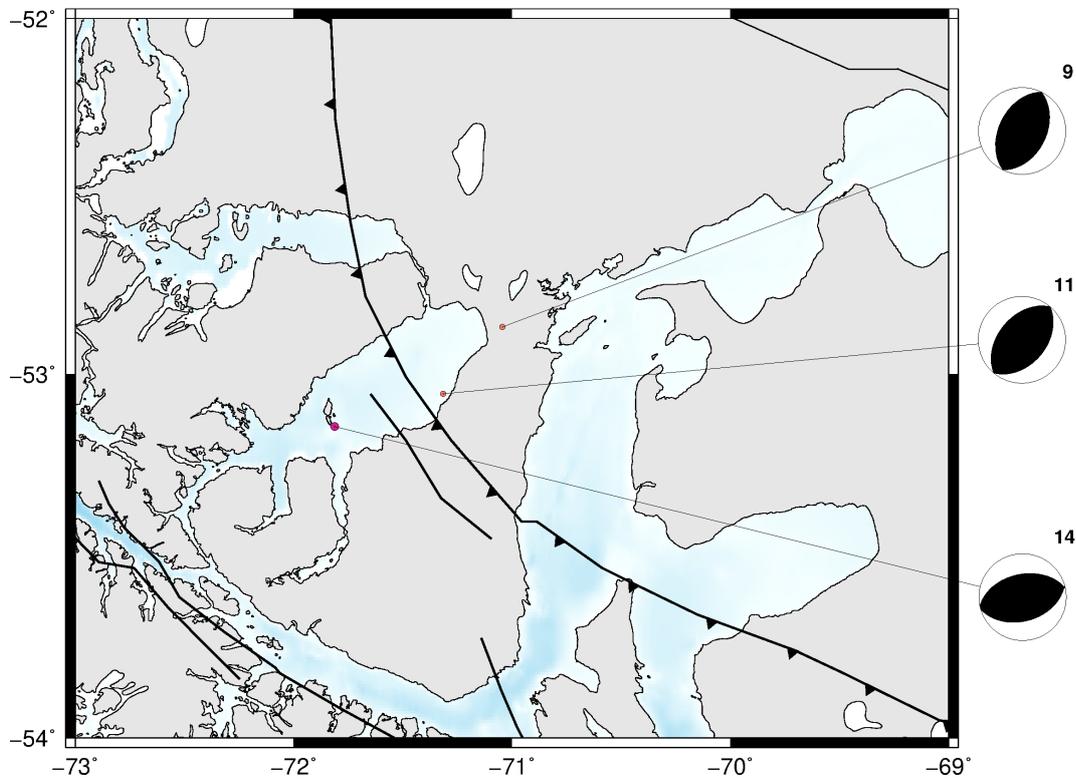


Figura 6.3.5: Soluciones de mecanismos focales obtenidas para el grupo 4: sur de Punta Arenas.

6.3.5. Mecanismos focales grupo 5 (sector Tierra del Fuego)

Este grupo lo conforman las 4 SMF 12-13-15-16 (Figura 6.3.6) ubicadas en isla de Tierra del Fuego (TdF). Los mecanismos 12 y 13 tienen soluciones de falla normal y los eventos 15 y 16 tienen también fallamiento normal pero con componente oblicua. Los eventos 12-13-15 están ubicados en la zona de Porvenir y el evento 16 se sitúa en el Estrecho de Magallanes, frente a la isla de TdF. Estos tienen una magnitud en un rango de 2.8 a 3.7 M_L y varían en profundidad desde 69.4 a 88.3 km. El evento 12 tiene orientación NE-SW. Los eventos 13 y 15 tienen orientación NW-SE. El evento 16 tiene una orientación E-W.

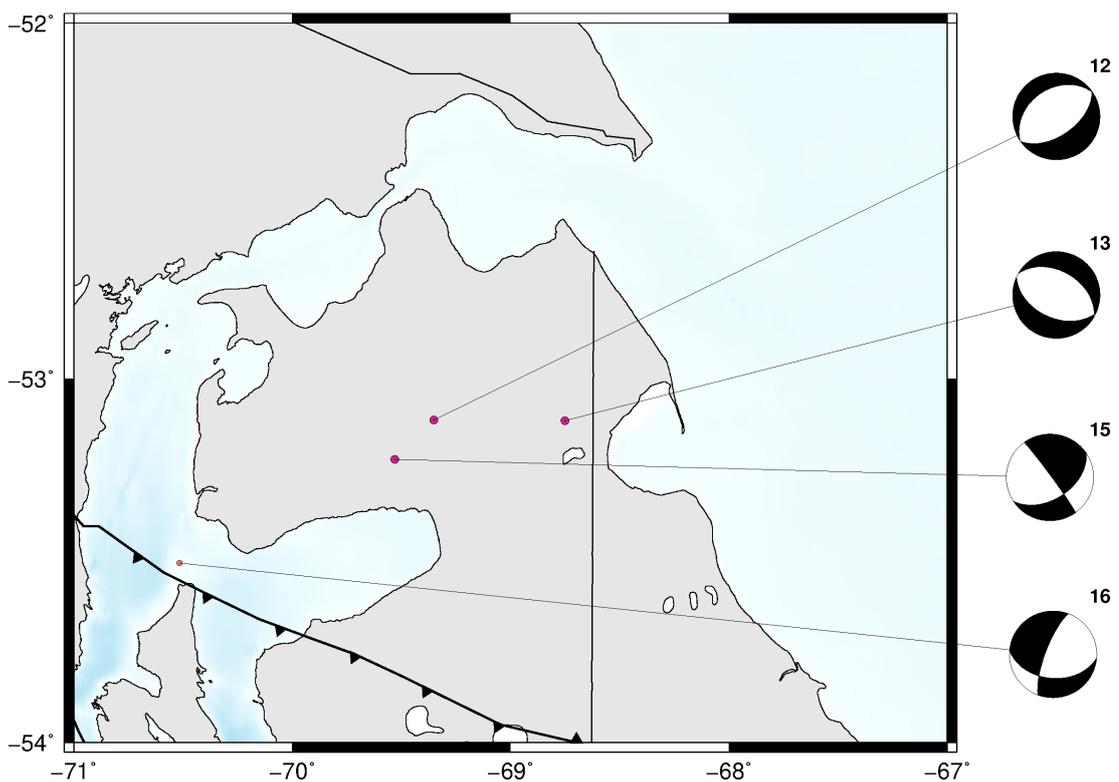


Figura 6.3.6: Soluciones de mecanismos focales obtenidas para el grupo 5: sector Tierra del Fuego.

Capítulo 7

Discusión

7.1. Localizaciones Hipocentrales

Para el período de registro de sismicidad a través de la red de ENAP se localizaron 168 sismos. Gran parte de la distribución epicentral se concentra en los alrededores de Punta Arenas, en la falla Magallanes-Fagnano y en la zona de la Faja Plegada y Corrida.

Con respecto a la zona de la falla Magallanes-Fagnano se observa un grupo de eventos alineados a lo largo de esta, correspondientes a sismos de baja magnitud, demostrando así, su aún activa deformación.

Se evidencia una sismicidad activa en la zona de la Faja Plegada y Corrida entre los 52-54° S y 70-72° W (Punta Arenas) con eventos de baja magnitud (2-3 M_L). Hacia el sureste de su lineamiento no se observa sismicidad.

En los pocos sismos captados en Tierra del Fuego, se observó que las formas de onda de todos estos poseen características similares. Al visualizar uno de los espectrogramas de estos sismos (Figura 7.1.1, componente Z), detectado por la estación LAVG, es posible distinguir 2 señales, una correspondiente al evento tectónico y la otra al ruido, que se asume que es generado por el viento. Debido a las magnitudes de los eventos encontrados (2-3 M_L) y a las frecuencias observadas en los espectrogramas, se descarta que estos puedan tener relación con la sismicidad inducida asociada a la exploración de hidrocarburos que se realiza en la isla.

Los sismos localizados al oeste del Estrecho de Magallanes indicarían actividad sísmica asociada a la subducción que se da entre la placa Antártica y la placa de Scotia. Además, a través de esta red local, se han detectado eventos lejanos, algunos incluso entre el mar Antártico y el Paso Drake.

No se encontró sismicidad asociada a actividad volcánica como en los trabajos anteriores de Adaros (2003) y Guzmán Marín (2020), donde una concentración de eventos superficiales fue asociado al volcán Reclus.

En cuanto a los eventos relocalizados en Velest, estos mostraron dos tendencias para reubicarse, moviéndose en un rango de 0.3 a 20 km. Al ser desplazamientos menores a 20 km estos no influyen en la interpretación de estos resultados. Un grupo (sector izquierdo, figura 6.2.1) se desplazó con dirección NW, mientras otro (sector derecho, figura 6.2.1) se trasladó en sentido SE, siendo el primer grupo el que mostró mayores desplazamientos hipocentrales. Los RMS de los eventos luego de ingresar a Velest disminuyeron para la mayoría de los sismos, con excepción de uno.

Con relación a los valores de profundidad, estos se encuentran en un rango de 1.2 a 93.4 km. Es posible notar al menos tres grupos de eventos con profundidades similares. Un grupo con sismos corticales someros de hasta 20 km, que se asocia a la sismicidad del sistema de fallamiento del FTB. Es importante destacar que los sismos a lo largo del SFMF también pertenecen a este grupo de sismicidad superficial. Un segundo grupo de eventos se concentra hasta los 40 km. Luego de esta profundidad, se observa un “vacío sísmico” hasta los 60 km, distancia desde la que encontramos un último grupo de sismos de menor cantidad, que se pueden asociar a la subducción de la placa Antártica, los que corresponden a eventos intraplaca.

Es importante mencionar que las estaciones del Centro Sismológico Nacional (CSN) lograron registrar solo 14 sismos en el período de este estudio, aunque 2 de estos no fueron registrados por la red de ENAP. La figura 7.1.2 muestra este catálogo que es adjuntado en el Apéndice A2.

Al comparar la figura 7.1.3 con la figura 7.1.2 es posible inferir que la red de ENAP ha capturado una gran cantidad de eventos que no son vistos por la red del CSN, cubriendo una extensa zona donde no se tenían datos.

Por otra parte, 3 eventos captados por la red ENAP son también detectados por

la red mundial IRIS, pero con una gran diferencia entre ambas localizaciones. Esto podría deberse a la lejanía de estos eventos a la red y/o a que la distribución de estas estaciones sismológicas es local. Se adjunta el catálogo de IRIS para el período de estudio en el Apéndice A3.

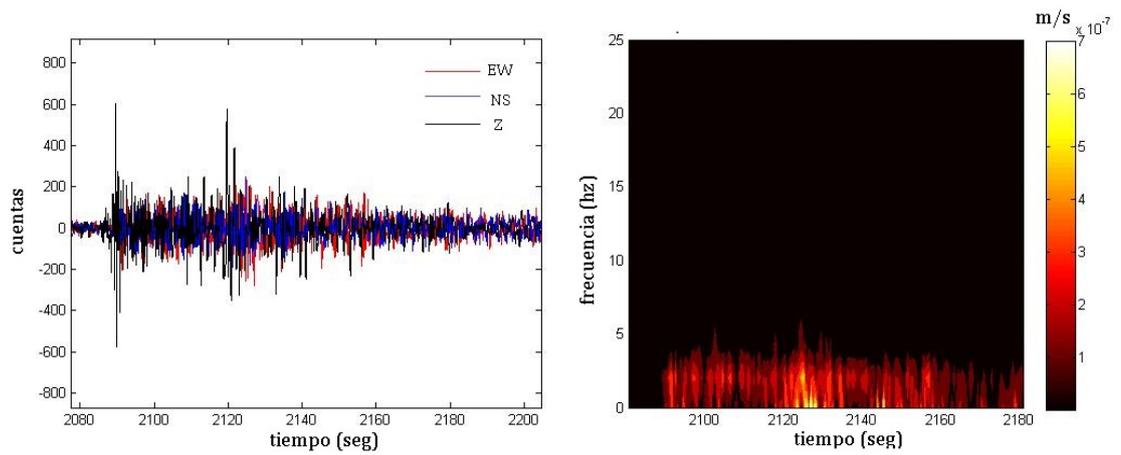
En las figuras 7.1.4 y 7.1.5 se observa la distribución de la sismicidad según la profundidad de los eventos localizados con la red ENAP (2019-2020) vs los eventos localizados por el CSN en los últimos 40 años.

En la red ENAP se destacan dos clusters de eventos, uno a los 20 km y otro a los 40 km de profundidad. Por otra parte, en la red del CSN estos clusters son observables a los 8 km y a los 19 km aproximadamente.

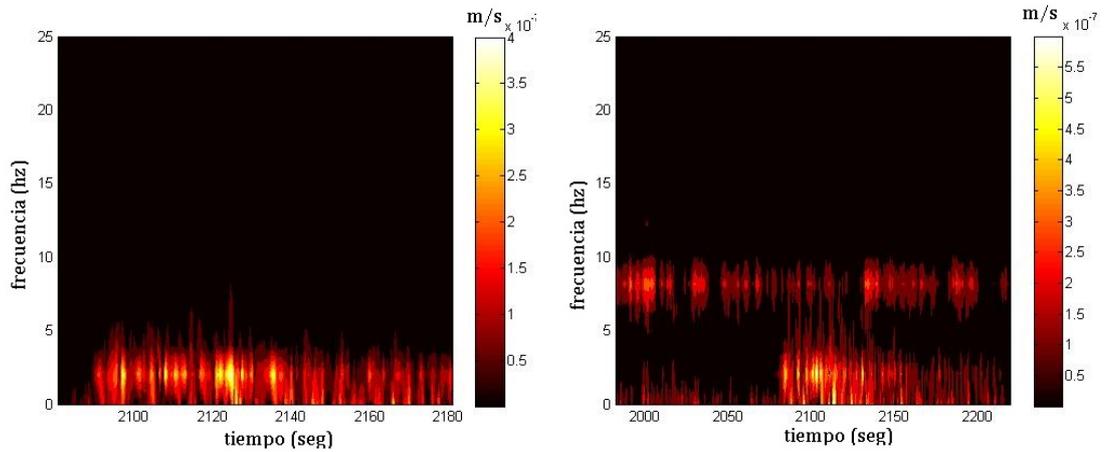
Con la red de ENAP es posible detectar sismicidad a una mayor profundidad si se compara con el CSN, especialmente desde los 40 km.

El primer cluster de sismicidad (20 km) se asocia a la corteza y se puede relacionar con las estructuras superficiales que infiere [Diraison et al. \(1997\)](#) mostradas en la figura 7.2.1. Mientras que el segundo cluster (40 km) se encontraría con una sismicidad localizada a la profundidad de la discontinuidad manto-corteza (Moho). Alrededor de los 50 km se observa un vacío sísmico detectado por ambas redes. A partir de los 60 km, una baja cantidad de eventos se relacionaría con la subducción de la corteza oceánica de la placa Antártica bajo la placa de Scotia.

En la figura 7.1.6 se observa la distribución de la magnitud según profundidad. La magnitud se incrementa hacia la derecha del gráfico. Entre los 15 y 20 km se puede observar que se encuentran la máxima variación de magnitud en ambas redes lo que podría indicarnos una mayor liberación de energía a esta profundidad.



(a) Sismograma de la estación LAVG. (b) Espectrograma de la componente E-W.



(c) Espectrograma de la componente N-S. (d) Espectrograma de la componente Z.

Figura 7.1.1: Sismograma y espectrogramas de evento registrado el 25-5-2019 que fue localizado en Tierra del Fuego por la estación LAVG.

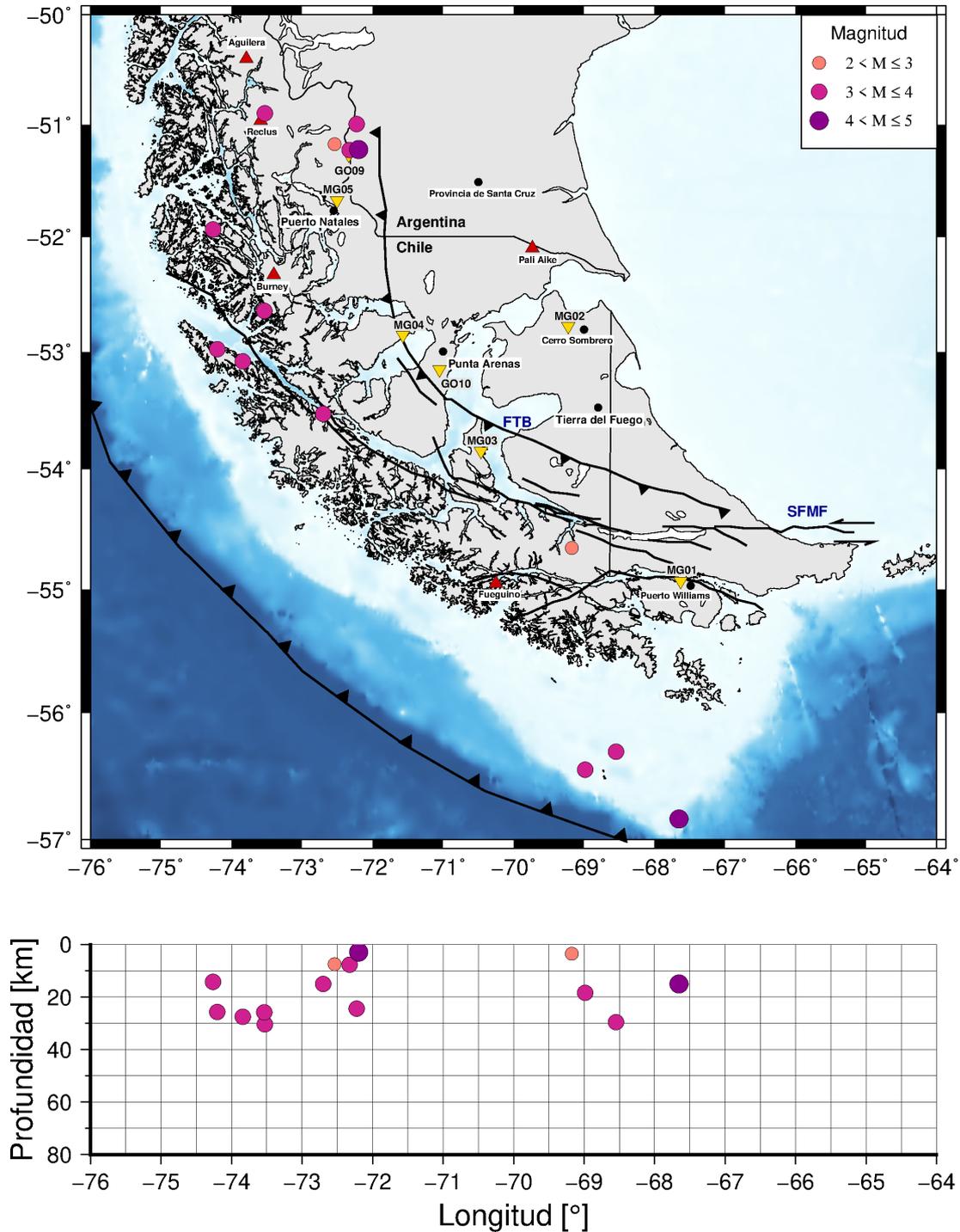


Figura 7.1.2: Distribución de la sismicidad según catálogo del CSN (2019-2020) (escala de círculos de colores según magnitud).

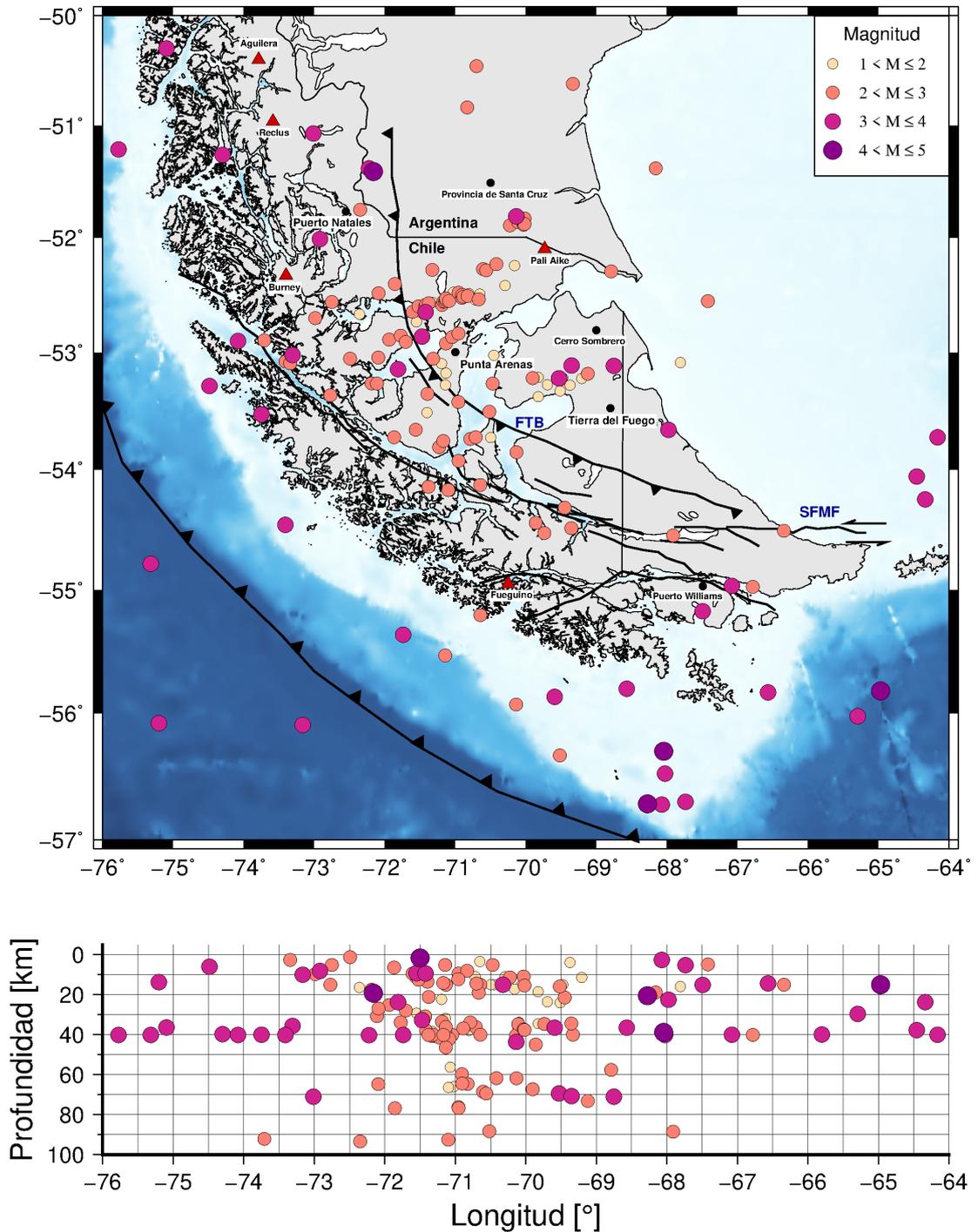


Figura 7.1.3: Distribución de la sismicidad según catálogo de ENAP (2019-2020) (escala de círculos de colores según magnitud).

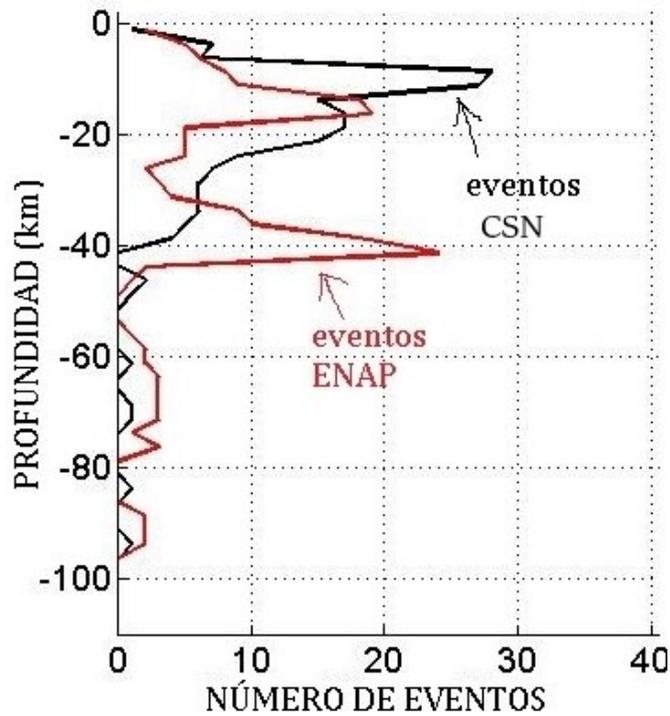


Figura 7.1.4: Distribución de la sismicidad con la profundidad para los catálogos del CSN (color negro) y ENAP (color rojo).

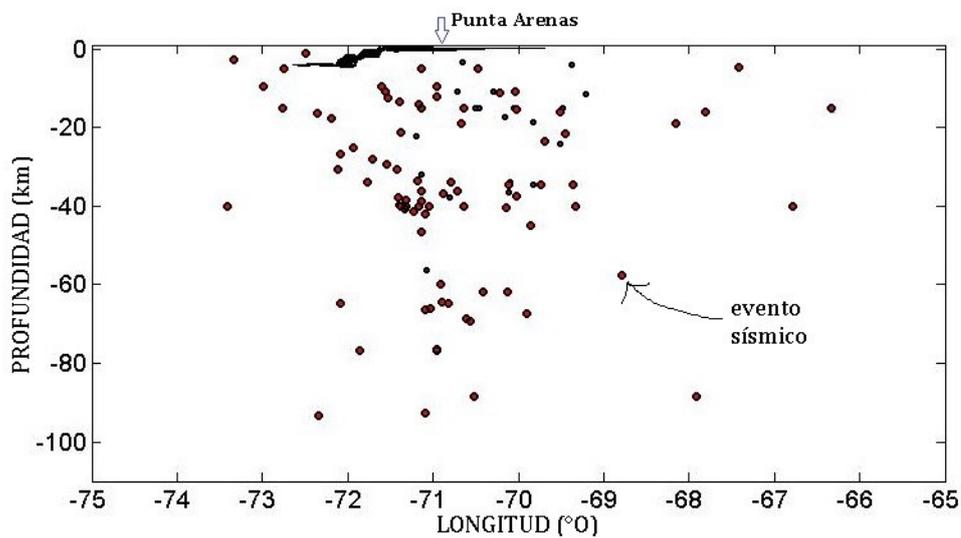


Figura 7.1.5: Distribución de la sismicidad en profundidad respecto a la latitud para los eventos localizados con la red ENAP.

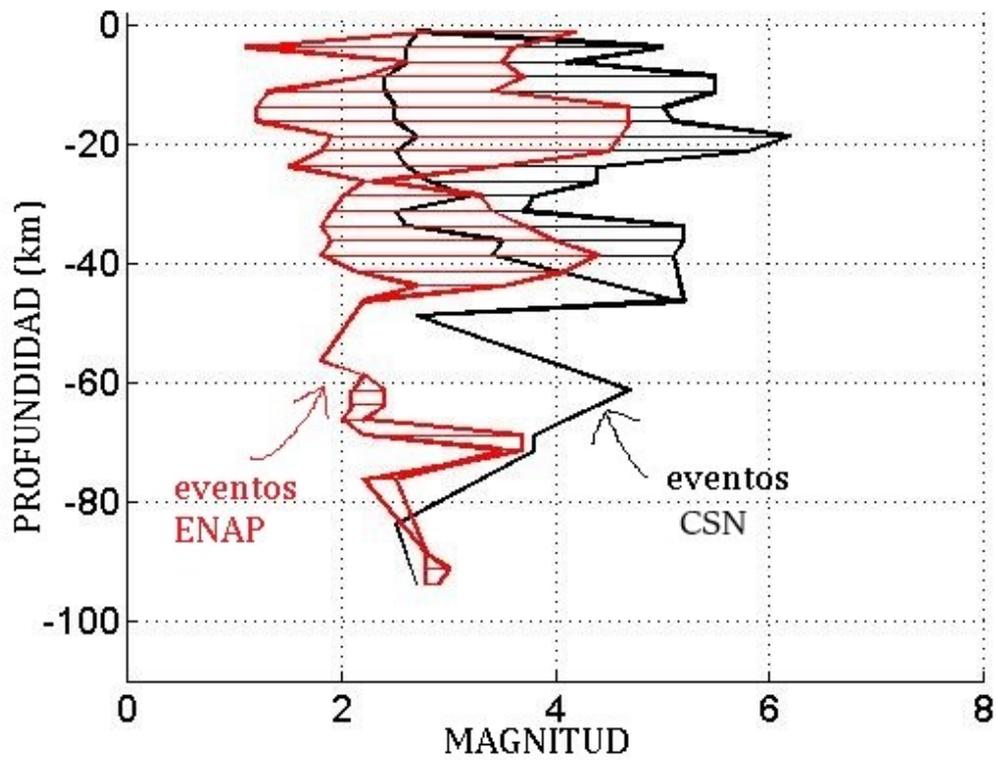


Figura 7.1.6: Distribución de la magnitud en profundidad para los catálogos del CSN (color negro) y ENAP (color rojo). La línea de la derecha indica la magnitud máxima y la línea de la izquierda la magnitud mínima.

7.2. Mecanismos Focales

Se obtuvieron soluciones de mecanismos focales para dieciséis eventos sísmicos, los cuales fueron analizados por zona geográfica en cinco grupos diferentes. Trece de los eventos son normales, teniendo seis de estos una componente oblicua y los tres restantes corresponden a fallas inversas.

El mecanismo que se calculó para la zona noroeste de la falla Magallanes-Fagnano (10), ubicado frente al faro de la Bahía Félix, muestra una orientación E-W. Según Lodolo (2003), el camino exacto seguido por el SFMF hacia el oeste a través de la dorsal Norte de Scotia aún no es claro. Por lo que este mecanismo podría aportar información para esclarecer los límites de la falla en este sector.

Las SMF 9-11-14 se encuentran ubicadas en los alrededores del FTB (Punta Arenas). Estas tres soluciones muestran una orientación NE-SW. Al ser mecanismos focales inversos, estos pueden atribuirse al proceso de “acomodo” del FTB.

Los cuatro mecanismos ubicados en la isla de Tierra del Fuego son normales, dos de estos con componente oblicua. Según [Diraison et al. \(1997\)](#), quien obtuvo datos de deslizamiento de fallas de 74 localidades en Magallanes realizando un análisis cinemático, el movimiento de las fallas del Neógeno que se ubican en esta zona (cuenca de Magallanes) es consistente con un patrón de acortamiento regional en dirección NE-SW (hacia el norte) y de extensión en dirección NW-SE (hacia el sur) como muestra la figura 7.2.1. Todo este grupo de SMF (12, 13, 15, 16) debido a su profundidad podría estar asociado a una continuidad de la subducción de la placa Antártica bajo la placa de Scotia.

Más al norte, en el sector de Punta Arenas, se localizan cuatro mecanismos focales en los alrededores de laguna Blanca, todos estos con una orientación azimut N-S. [Diraison et al. \(1997\)](#) infiere una falla que rodea esta laguna, que podría estar relacionada a los mecanismos encontrados.

En el sector de Puerto Natales las tres SMF tienen la misma orientación NW-SE aunque sus profundidades varían en más de 60 km de profundidad unas con otras. Dentro de este grupo, se destaca el mecanismo calculado para un evento localizado en Santa Cruz, Argentina cuya magnitud fue de 4.6 M_L .

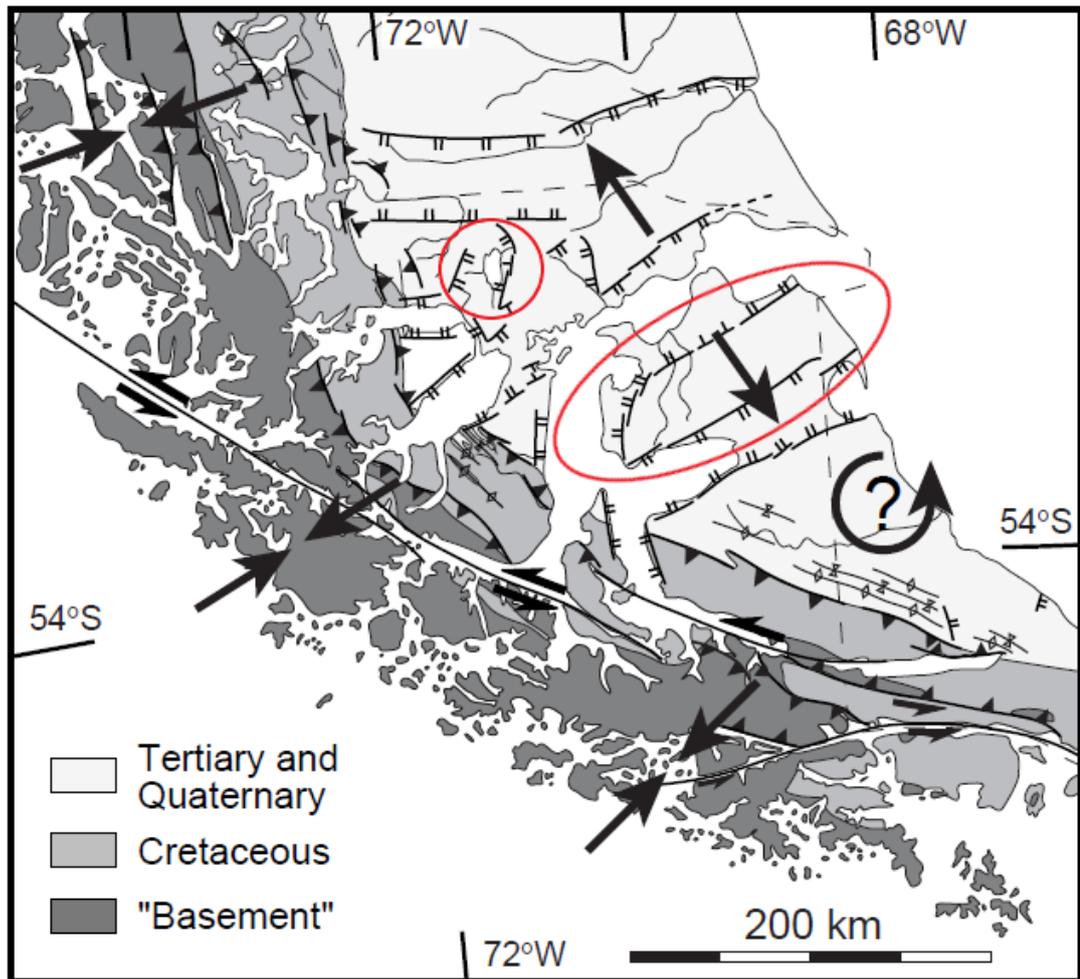


Figura 7.2.1: Principales estructuras del Cenozoico en el sur de Sudamérica. Las flechas negras indican la dirección de acortamiento o expansión regional dentro de la cuenca de Magallanes. La elipse grande (color rojo) destaca la flecha con dirección SE que indicaría una zona de expansión regional. La elipse pequeña (color rojo) corresponde al sector de Laguna Blanca donde se encontraron 4 SMF. Modificado de [Diraison et al. \(1997\)](#).

Capítulo 8

Conclusión

La instalación de la red de estaciones de ENAP ha permitido llegar a lugares donde no se tenían antecedentes de sismicidad, cubriendo con datos una gran zona de la región de Magallanes.

Se ha elaborado un catálogo para el período 2019-2020 de 168 sismos, lo que deja en evidencia la existencia de una sismicidad continua en la región y afirma la hipótesis planteada en este estudio.

Evidente sismicidad localizada en este trabajo se le atribuye a la falla Magallanes-Fagnano, se observa una alineación de eventos en las cercanías de sus límites. En cambio, en la zona de Tierra del Fuego, escasa actividad sísmica fue registrada si la comparamos a la obtenida en toda el área de Punta Arenas.

Al ser una red local es posible que los sismos lejanos registrados no hayan sido bien captados por lo que hay que revisar la metodología detalladamente para eventos con este caso.

Se obtuvo el modelo de velocidad utilizando el programa Velest. Luego de los respectivos cálculos resultó en un modelo de 12 capas con un valor V_p/V_s de 1.74 que describe a un medio con propiedades relativamente homogéneas. Luego, con este modelo se relocalizaron 50 eventos dentro del entorno de la red que mostraron tendencias de desplazamiento noroeste y sureste.

Los mecanismos focales generados arrojaron un total de dieciséis soluciones en eventos locales de baja magnitud. De estos eventos, siete corresponden a fallas normales, seis a fallas normales con componente oblicua y tres a fallas inversas. Estas últimas todas localizadas al sur de Punta Arenas y con orientación NE-SW.

Los valores de profundidad varían entre 1.2 y 93.4 km. La mayor concentración de eventos (entre 1.2 y 40 km) corresponde a sismicidad cortical somera y se asocia al sistema de fallamiento de la Faja Plegada y Corrida y al Sistema de fallas Magallanes-Fagnano. Se observa un “vacío sísmico” entre los 40 y 60 km. Una menor cantidad de sismos intraplaca se localiza desde los 60 km de profundidad en adelante y estos se asocian a la subducción de la placa Antártica. Se asume una correlación de las SMF con algunas fallas pertenecientes al sistema de rift del Neógeno, documentadas por [Diraison et al. \(1997\)](#).

Estos mecanismos han proporcionado la información necesaria para caracterizar la microsismicidad de la región. Cabe mencionar que ninguna red mundial de estaciones sismológicas posee el cálculo de mecanismos focales para los eventos del período de este estudio.

Esta red llega a complementar una zona que estaba carente de datos, ya que en el período de este estudio el CSN solo localizó 12 de 168 eventos.

Para estudiar con mayor precisión el comportamiento de los mecanismos focales es necesario contar con una red más robusta, la cual proporcionaría mayor información de la sismicidad en la región.

Bibliografía

- Adaros, R. (2003). Sismicidad y tectónica del extremo sur de Chile. *Memoria de Magister, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Univ. de Chile*.
- Agurto, C. (2013). Inversión sísmica de amplitud para la caracterización de reservorios, bloque arenal, isla tierra del fuego - región de Magallanes, Chile. *Habilitación Profesional, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Univ. de Concepción*.
- Ammirati, J.-B., Flores, M. C., and Ruiz, S. (2020). Seismicity along the Magallanes-Fagnano fault system. *Journal of South American Earth Sciences*, 103:102799.
- Betka, P., Klepeis, K., and Mosher, S. (2016). Fault kinematics of the Magallanes-Fagnano fault system, southern Chile; an example of diffuse strain and sinistral transtension along a continental transform margin. *Journal of Structural Geology*, 85:130–153.
- Beyreuther, M., Barsch, R., Krischer, L., Megies, T., Behr, Y., and Wassermann, J. (2010). Obspy: A python toolbox for seismology. *Seismological Research Letters*, 81(3):530–533.
- Biddle, K., Uliana, M., Mitchum Jr, R., Fitzgerald, M., and Wright, R. (1986). The stratigraphic and structural evolution of the central and eastern Magallanes basin, southern South America. *Foreland basins*, pages 41–61.
- Bruce, R. M., Nelson, E. P., Weaver, S. G., and Lux, D. R. (1991). Temporal and spatial variations in the southern Patagonian batholith; constraints on magmatic arc development. *Geological Society of America Special Papers*, 265:1–12.
- Buffoni, C., Sabbione, N. C., Connon, G., and Ormaechea, J. L. (2009). Localización de hipocentros y determinación de su magnitud en tierra del fuego y zonas aledañas. *Geoacta*, 34(2):75–86.
- Calderón, M., Fildani, A., Herve, F., Fanning, C., Weislogel, A., and Cordani, U. (2007). Late Jurassic bimodal magmatism in the northern sea-floor remnant of the Rocas Verdes basin, southern Patagonian Andes. *Journal of the Geological Society*, 164(5):1011–1022.
- Calderón, M., Hervé, F., Fuentes, F., Fosdick, J. C., Sepúlveda, F., and Galaz, G. (2016). Tectonic evolution of Paleozoic and Mesozoic Andean metamorphic

- complexes and the rocas verdes ophiolites in southern patagonia. In *Geodynamic Evolution of the Southernmost Andes*, pages 7–36. Springer.
- Cisternas, A. and Vera, E. (2008). Sismos históricos y recientes en magallanes. *Magallania (Punta Arenas)*, 36(1):43–51.
- Coloma Bozzo, F. E. (2010). Mineralogía y propiedades magnéticas del complejo ofiolítico tortuga, tierra del fuego, chile.
- Costa, C. H., Smalley, R., Schwartz, J. D., Stenner, H. D., Ellis, M., Ahumada, E., and Velasco, M. (2006). Paleoseismic observations of an onshore transform boundary: the magallanes-fagnano fault, tierra del fuego argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61(4):647–657.
- Dalziel, I. W., de Wit, M. J., and Palmer, K. F. (1974). Fossil marginal basin in the southern andes. *Nature*, 250(5464):291–294.
- Diraison, M., Cobbold, P. R., Gapais, D., and Rossello, E. A. (1997). Magellan strait: part of a neogene rift system. *Geology*, 25(8):703–706.
- Dziewonski, A., Chou, T.-A., and Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4):2825–2852.
- Ekström, G., Nettles, M., and Dziewoński, A. (2012). The global cmt project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200:1–9.
- Febrer, J., Plasencia, M., and Sabbione, N. (2000). Local and regional seismicity from ushuaia broadband station observations (tierra del fuego). *Terra Antartica*, 8(2):35–40.
- Forsyth, D. W. (1975). Fault plane solutions and tectonics of the south atlantic and scotia sea. *Journal of Geophysical Research*, 80(11):1429–1443.
- Fosdick, J. C., Romans, B. W., Fildani, A., Bernhardt, A., Calderón, M., and Graham, S. A. (2011). Kinematic evolution of the patagonian retroarc fold-and-thrust belt and magallanes foreland basin, chile and argentina, 51 30' s. *Bulletin*, 123(9-10):1679–1698.
- Franklin, J. N. (1970). Well-posed stochastic extensions of ill-posed linear problems. *Journal of mathematical analysis and applications*, 31(3):682–716.
- Geller, R. J. and Kanamori, H. (1977). Magnitudes of great shallow earthquakes from 1904 to 1952. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67(3):587–598.
- Ghiglione, M. C., Ramos, V. A., and Cristallini, E. O. (2002). Estructura y estratos de crecimiento en la faja plegada y corrida de los andes fueguinos. *Revista geológica de Chile*, 29(1):17–41.

- Ghiglione, M. C., Ramos, V. A., Cuitiño, J., and Barberón, V. (2016). Growth of the southern patagonian andes (46–53 s) and their relation to subduction processes. In *Growth of the Southern Andes*, pages 201–240. Springer.
- Guillot, M. G. (2016). Magmatic evolution of the southernmost andes and its relation with subduction processes. In *Geodynamic Evolution of the Southernmost Andes*, pages 37–74. Springer.
- Guzmán Marín, P. (2020). Seismicity of the austral andes, southernmost patagonia. Master’s thesis.
- Herve, F., Pankhurst, R. J., Fanning, C., Calderón, M., and Yaxley, G. (2007). The south patagonian batholith: 150 my of granite magmatism on a plate margin. *Lithos*, 97(3-4):373–394.
- Hervé, M., Suárez, M., and Puig, A. (1984). The patagonian batholith s of tierra del fuego, chile: timing and tectonic implications. *Journal of the Geological Society*, 141(5):909–917.
- Hoerl, A. E. and Kennard, R. W. (1970). Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems. *Technometrics*, 12(1):55–67.
- ISC (2020). International seismological centre – search the isc bulletin.
- Jackson, D. D. (1972). Interpretation of inaccurate, insufficient and inconsistent data. *Geophysical Journal International*, 28(2):97–109.
- Kissling, E., Kradolfer, U., and Maurer, H. (1995). Program velest user’s guide-short introduction. *Institute of Geophysics, ETH Zurich*.
- Klepeis, K., Betka, P., Clarke, G., Fanning, M., Hervé, F., Rojas, L., Mpodozis, C., and Thomson, S. (2010). Continental underthrusting and obduction during the cretaceous closure of the rocas verdes rift basin, cordillera darwin, patagonian andes. *Tectonics*, 29(3).
- Klepeis, K. A. (1994). The magallanes and deseado fault zones: Major segments of the south american-scotia transform plate boundary in southernmost south america, tierra del fuego. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B11):22001–22014.
- Lanczos, C. (1996). *Linear differential operators*. SIAM.
- Lawrence, J. F. and Wiens, D. A. (2004). Combined receiver-function and surface wave phase-velocity inversion using a niching genetic algorithm: application to patagonia. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(3):977–987.
- Lee, W. H. K. and Lahr, J. C. (1972). *HYPO71: A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes*. US Department of the Interior, Geological Survey, National Center for . . .
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, 2(2):164–168.

- Lienert, B. (1991). Report on modifications made to hypocenter. *Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen*.
- Lienert, B. R., Berg, E., and Frazer, L. N. (1986). Hypocenter: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively damped least squares. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 76(3):771–783.
- Lienert, B. R. and Havskov, J. (1995). A computer program for locating earthquakes both locally and globally. *Seismological Research Letters*, 66(5):26–36.
- Lodolo, E., Menichetti, M., Bartole, R., Ben-Avraham, Z., Tassone, A., and Lippai, H. (2003). Magallanes-fagnano continental transform fault (tierra del fuego, southernmost south america). *Tectonics*, 22(6).
- Lomnitz, C. (1970). Major earthquakes and tsunamis in chile during the period 1535 to 1955. *Geologische Rundschau*, 59(3):938–960.
- Malumián, N., Hromic, T., and Nández, C. (2013). El paleógeno de la cuenca de magallanes: bioestratigrafía y discontinuidades. In *Anales del Instituto de la Patagonia*, volume 41, pages 29–52. Universidad de Magallanes.
- Marquardt, D. W. (1970). Generalized inverses, ridge regression, biased linear estimation, and nonlinear estimation. *Technometrics*, 12(3):591–612.
- Mella, P. (2001). Control tectónico en la evolución de la cuenca de antepaís de magallanes, xii región, chile. *Memoria para optar al título de geólogo, Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas*, page 143.
- Menichetti, M., Lodolo, E., and Tassone, A. (2008). Structural geology of the fuegian andes and magallanes fold-and-thrust belt-tierra del fuego island. *Geologica Acta*, 6(1):19–42.
- Pelayo, A. M. and Wiens, D. A. (1989). Seismotectonics and relative plate motions in the scotia sea region. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B6):7293–7320.
- Ramos, V. A. (1989). Andean foothills structures in northern magallanes basin, argentina. *AAPG bulletin*, 73(7):887–903.
- Roy, S., Vassallo, R., Martinod, J., Ghiglione, M. C., Sue, C., and Allemand, P. (2020). Co-seismic deformation and post-glacial slip rate along the magallanes-fagnano fault, tierra del fuego, argentina. *Terra Nova*, 32(1):1–10.
- Sandoval, F. B. and De Pascale, G. P. (2020). Slip rates along the narrow magallanes fault system, tierra del fuego region, patagonia. *Scientific reports*, 10(1):1–13.
- Sebastián Galeazzi, J. (1998). Structural and stratigraphic evolution of the western malvinas basin, argentina. *AAPG bulletin*, 82(4):596–636.
- Shearer, P. M. (2019). *Introduction to seismology*. Cambridge university press.

- Smalley Jr, R., Kendrick, E., Bevis, M., Dalziel, I., Taylor, F., Lauría, E., Barriga, R., Casassa, G., Olivero, E., and Piana, E. (2003). Geodetic determination of relative plate motion and crustal deformation across the scotia-south america plate boundary in eastern tierra del fuego. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(9).
- Smith, E. (1976). Scaling the equations of condition to improve conditioning. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(6):2075–2076.
- Smith, H. and Draper, N. R. (1981). *Applied regression analysis*. Number 519.536 D7A6 1981.
- Snoke, J. A. (2003). Focmec: Focal mechanism determinations. *International handbook of earthquake and engineering seismology*, 85:1629–1630.
- Stein, S. and Wysession, M. (2009). *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. John Wiley & Sons.
- Stern, C. and Stroup, J. (1982). Antarctic geoscience.
- Suárez, M. (1979). A late mesozoic island arc in the southern andes, chile. *Geological magazine*, 116(3):181–190.
- Sue, C. and Ghiglione, M. C. (2016). Wrenching tectonism in the southernmost andes and the scotia sea constrained from fault kinematic and seismotectonic overviews. In *Geodynamic Evolution of the Southernmost Andes*, pages 137–171. Springer.
- Vuan, A., Cazzaro, R., Costa, G., Russi, M., and Panza, G. (1999). S-wave velocity models in the scotia sea region, antarctica, from nonlinear inversion of rayleigh waves dispersion. *Pure and Applied Geophysics*, 154(1):121–139.
- Wichern, D. W. and Churchill, G. A. (1978). A comparison of ridge estimators. *Technometrics*, 20(3):301–311.
- Wiggins, R. A. (1972). The general linear inverse problem: Implication of surface waves and free oscillations for earth structure. *Reviews of Geophysics*, 10(1):251–285.

Apéndice A

Catálogos

A1. Catálogo sismicidad ENAP

año	mes	día	hora	min	s	latitud °	longitud °	prof.	n.º est	rms	M_l	clasificación
2019	3	4	17	1	56.8	-53.370	-72.771	15.0	4	0.55	2.7	2
2019	3	13	9	30	17.5	-53.726	-70.711	36.1	5	0.48	2.2	1
2019	3	14	4	29	55.4	-53.357	-71.395	13.5	4	0.13	2.2	1
2019	3	14	17	58	15.6	-52.857	-71.774	33.8	5	0.28	2.4	2
2019	3	16	18	57	59.2	-52.869	-71.044	40.1	6	0.20	2.9	2
2019	3	21	17	58	2.9	-52.911	-71.703	27.9	6	0.07	2.2	2
2019	3	23	8	47	4.0	-52.671	-72.359	16.4	5	0.53	2.0	3
2019	3	23	17	56	32.8	-53.097	-71.194	22.3	3	0.18	1.8	2
2019	3	28	21	41	41.7	-53.381	-69.823	34.5	5	0.51	1.8	2
2019	3	31	19	58	58.4	-52.865	-71.471	32.7	5	0.01	3.7	2
2019	4	1	17	58	31.1	-52.890	-71.937	25.1	4	0.31	2.2	2
2019	4	2	13	17	39.8	-51.414	-72.161	19.2	7	0.42	4.6	1
2019	4	3	1	49	9.3	-52.014	-72.918	8.1	6	0.34	3.4	1
2019	4	5	16	19	13.1	-53.117	-68.751	71.0	7	0.68	3.7	2
2019	4	8	8	11	4.1	-56.725	-68.072	2.6	5	0.40	3.6	1
2019	4	9	11	41	57.8	-53.268	-72.187	17.5	5	0.29	2.8	3
2019	4	9	11	50	26.2	-53.269	-72.110	30.7	5	0.17	2.9	3
2019	4	9	17	58	56.0	-53.664	-67.977	22.5	5	0.47	3.4	2
2019	4	9	20	7	5.4	-52.839	-70.955	76.3	5	0.31	2.2	4
2019	4	12	4	30	0.4	-51.216	-75.775	40.1	3	0.33	3.4	4
2019	4	14	16	27	9.0	-57.449	-71.500	1.6	3	0.19	4.2	1
2019	4	22	7	55	52.0	-52.557	-67.418	4.8	3	0.43	2.4	3
2019	4	22	14	54	3.9	-53.224	-69.530	69.4	8	0.61	3.7	2
2019	4	26	22	13	22.6	-51.072	-73.013	71.0	8	0.34	3.7	2
2019	4	29	8	9	59.4	-53.024	-73.307	35.6	6	0.41	3.2	1
2019	4	30	15	46	48.8	-52.561	-71.144	38.7	5	0.33	2.4	1

2019	5	3	9	29	43.2	-55.833	-66.566	14.3	3	0.27	3.3	1
2019	5	6	17	13	32.9	-52.298	-68.789	57.6	3	0.26	2.2	1
2019	5	9	8	26	44.1	-54.457	-63.311	14.9	4	0.03	3.7	1
2019	5	16	1	55	54.3	-57.302	-71.551	9.2	3	0.21	3.7	1
2019	5	16	7	51	30.9	-55.176	-67.493	15.1	3	0.14	3.2	2
2019	5	16	22	24	58.1	-58.516	-79.254	15.0	3	0.30	4.7	1
2019	5	16	23	5	53.4	-52.484	-70.953	76.7	5	0.67	2.3	1
2019	5	24	6	18	31.7	-52.284	-71.327	40.7	4	0.13	2.6	2
2019	5	25	14	7	7.1	-54.967	-67.078	40.0	3	0.42	3.2	1
2019	5	26	7	23	28.5	-54.462	-73.409	40.1	5	0.10	3.1	2
2019	5	26	7	49	17.9	-52.653	-71.422	9.4	4	0.30	3.6	4
2019	5	27	23	34	26.2	-53.115	-69.351	70.7	8	0.30	3.5	2
2019	5	28	12	0	37.6	-55.869	-69.591	36.5	5	0.33	3.2	2
2019	5	30	5	3	42.5	-53.080	-73.407	40.1	5	0.47	2.7	1
2019	5	31	19	41	21.1	-56.481	-68.026	40.1	5	0.49	3.4	1
2019	6	2	4	55	39.4	-53.926	-70.953	9.4	3	0.05	2.6	1
2019	6	2	11	13	15.0	-53.810	-71.230	41.3	5	0.25	2.5	1
2019	6	2	14	2	51.7	-53.741	-70.786	33.8	4	0.35	2.1	2
2019	6	5	2	36	18.3	-54.320	-69.449	21.4	5	0.13	2.2	3
2019	6	6	18	31	24.0	-54.674	-62.391	15.0	4	0.73	3.9	1
2019	6	7	10	0	46.6	-56.080	-75.203	13.7	3	0.48	3.7	1
2019	6	8	6	45	9.1	-52.234	-70.416	61.7	5	0.51	2.1	1
2019	6	9	21	30	8.1	-54.129	-70.646	15.0	3	0.29	2.5	1
2019	6	12	0	58	20.3	-54.172	-71.099	92.5	5	0.33	2.8	1
2019	6	13	21	38	54.1	-53.027	-70.453	15.0	3	0.00	1.6	2
2019	6	15	8	47	35.2	-55.804	-68.569	36.5	4	0.23	3.2	1
2019	6	21	10	4	53.3	-52.488	-72.089	26.9	4	0.38	2.3	1
2019	6	26	16	41	51.0	-50.301	-75.095	36.4	5	0.24	3.8	2
2019	6	28	1	16	7.4	-51.754	-72.349	93.4	5	0.13	2.9	1
2019	6	28	7	26	58.4	-51.265	-74.299	39.7	3	0.60	3.4	3
2019	6	29	19	54	57.5	-52.528	-70.905	59.7	4	0.36	2.2	2
2019	7	2	1	49	45.6	-52.277	-70.606	68.5	5	0.20	2.2	1
2019	7	2	14	5	3.2	-53.663	-71.562	10.9	4	0.33	2.5	3
2019	7	4	14	25	55.1	-54.975	-66.782	40.1	4	0.60	2.9	1
2019	7	7	21	43	58.1	-56.337	-69.518	15.9	3	0.26	2.9	1
2019	7	9	6	59	54.6	-53.865	-57.274	20.5	5	0.35	4.5	1
2019	7	12	15	0	53.3	-55.931	-70.138	40.3	5	0.14	2.9	2
2019	7	12	22	15	53.9	-50.838	-70.831	8.0	5	0.58	3.0	2
2019	7	17	6	7	0.9	-53.290	-74.486	6.0	5	0.25	3.3	1
2019	7	24	15	46	21.8	-54.550	-67.912	88.5	4	0.01	2.8	2
2019	7	25	8	37	39.8	-53.146	-71.812	23.7	5	0.34	3.1	3
2019	7	28	22	15	0.2	-52.565	-72.750	5.1	3	0.24	2.8	3
2019	7	29	8	5	48.9	-52.408	-71.857	76.8	5	0.35	2.5	1
2019	8	1	0	25	6.6	-52.897	-73.708	92.1	4	0.12	3.0	4
2019	8	1	8	54	44.5	-57.427	-65.802	39.9	6	0.30	3.6	1
2019	8	10	14	26	58.2	-51.893	-70.224	11.3	4	0.61	2.2	3

2019	8	11	10	33	20.9	-52.602	-71.522	12.5	4	0.44	2.1	3
2019	8	11	10	48	18.6	-51.865	-70.107	34.7	5	0.31	2.5	1
2019	8	11	13	18	45.5	-51.867	-70.030	37.3	4	0.49	2.1	1
2019	8	11	16	35	36.7	-53.280	-71.139	31.8	3	0.33	1.9	3
2019	8	11	19	18	10.5	-52.288	-70.562	69.4	4	0.43	2.3	3
2019	8	12	19	45	52.2	-52.569	-71.323	38.4	5	0.37	2.0	1
2019	8	13	3	8	38.7	-51.887	-70.031	10.9	3	0.21	2.1	3
2019	8	13	5	16	48.8	-52.650	-71.606	9.4	5	0.21	2.2	1
2019	8	13	5	54	31.7	-52.421	-70.295	11.0	3	0.12	1.9	2
2019	8	13	7	24	35.2	-52.479	-71.026	66.1	5	0.58	2.0	1
2019	8	13	12	35	4.5	-52.590	-71.188	33.5	5	0.51	2.4	1
2019	8	15	4	23	13.9	-52.605	-71.426	30.8	5	0.41	2.3	1
2019	8	17	1	40	3.9	-53.333	-69.513	24.0	4	0.13	1.5	2
2019	8	17	7	57	33.6	-56.094	-73.163	10.0	3	0.23	3.4	1
2019	8	17	13	50	31.9	-51.831	-70.059	15.2	3	0.10	1.8	1
2019	8	18	1	50	0.3	-53.679	-57.196	16.7	5	0.23	4.4	1
2019	8	18	2	41	37.9	-52.548	-71.071	56.3	4	0.36	1.8	1
2019	8	19	9	27	57.4	-52.567	-71.096	66.4	5	0.39	2.0	1
2019	8	20	0	23	39.1	-52.555	-71.086	42.1	5	0.45	2.1	1
2019	8	20	2	20	19.1	-51.858	-70.114	36.5	5	0.46	1.9	1
2019	8	20	6	32	25.4	-52.546	-70.719	10.9	4	0.32	1.6	2
2019	8	20	11	6	47.1	-52.496	-70.651	3.4	4	0.39	1.8	4
2019	8	20	12	42	47.5	-52.491	-70.808	37.9	5	0.40	1.9	3
2019	8	21	11	23	31.0	-52.541	-70.668	19.0	4	0.22	2.1	1
2019	8	21	23	39	11.6	-52.547	-71.135	46.4	5	0.40	2.2	1
2019	8	22	22	17	0.5	-52.903	-74.081	40.1	6	0.35	3.1	3
2019	8	24	4	43	40.7	-52.534	-71.134	36.1	5	0.26	2.5	1
2019	8	26	1	26	45.4	-52.247	-70.160	17.2	4	0.49	1.7	1
2019	8	26	12	16	43.9	-51.881	-70.018	15.4	4	0.21	2.5	1
2019	8	28	0	0	24.7	-53.185	-69.121	73.1	7	0.47	3.0	2
2019	8	29	6	23	19.8	-55.822	-64.970	15.0	4	0.33	4.3	1
2019	9	1	1	37	4.6	-52.737	-71.550	29.2	5	0.45	2.0	1
2019	9	3	23	27	35.2	-53.928	-62.277	13.7	3	0.30	3.8	1
2019	9	4	5	41	24.1	-52.689	-62.285	40.6	3	0.40	4.1	1
2019	9	5	16	6	20.5	-56.719	-68.276	20.5	6	0.47	4.5	1
2019	9	5	20	40	5.4	-53.729	-70.497	15.0	3	0.00	1.8	2
2019	9	5	21	40	13.1	-53.179	-71.131	15.0	3	0.00	2.0	2
2019	9	6	22	3	11.9	-53.517	-71.401	39.7	5	0.43	1.8	1
2019	9	11	3	38	13.6	-52.340	-62.269	37.5	3	0.23	4.0	3
2019	9	13	1	57	50.4	-52.587	-71.415	37.9	5	0.27	2.2	1
2019	9	14	1	9	26.5	-50.624	-69.332	40.0	3	0.29	2.8	3
2019	9	14	4	28	57.1	-53.093	-57.595	38.2	3	0.05	4.8	1
2019	9	17	22	51	47.8	-54.490	-69.355	34.4	4	0.47	2.4	1
2019	9	18	18	31	57.5	-53.055	-72.491	1.2	3	0.29	2.8	4
2019	9	19	1	46	25.4	-53.055	-71.315	40.0	5	0.48	2.6	1
2019	9	20	15	34	20.6	-52.512	-70.825	64.6	3	0.35	2.4	2

2019	9	26	16	38	48.0	-51.812	-70.135	43.6	6	0.29	3.5	2
2019	10	1	7	47	32.5	-53.132	-61.431	15.1	4	0.29	4.0	1
2019	10	5	16	14	22.7	-54.144	-71.381	40.1	3	0.03	2.3	2
2019	10	11	5	42	31.7	-52.562	-71.167	40.1	5	0.59	2.4	1
2019	10	11	6	17	9.7	-51.831	-70.019	37.6	4	0.27	2.3	1
2019	10	11	7	10	27.1	-52.924	-71.132	15.0	3	0.35	2.5	4
2019	10	11	8	16	44.1	-52.518	-70.887	36.8	5	0.41	2.6	1
2019	10	12	10	51	33.6	-52.575	-71.377	21.1	3	0.02	2.4	1
2019	10	13	21	17	8.1	-53.283	-69.374	3.9	3	0.35	1.1	2
2019	10	15	6	24	29.2	-53.727	-64.162	40.0	3	0.27	3.3	2
2019	10	16	16	46	47.0	-56.703	-67.736	5.2	4	0.09	3.5	2
2019	10	24	17	44	28.9	-51.864	-70.097	33.8	4	0.17	1.8	1
2019	10	26	4	40	55.5	-53.220	-69.478	15.0	4	0.46	1.2	2
2019	10	26	4	41	56.5	-53.226	-69.207	11.4	4	0.00	1.3	2
2019	10	29	13	24	5.3	-54.511	-66.340	15.0	4	0.32	2.8	1
2019	10	31	11	48	47.8	-52.502	-70.902	64.4	3	0.22	2.1	1
2019	10	31	15	11	2.5	-53.510	-70.516	88.3	5	0.80	2.8	1
2019	11	10	16	21	3.4	-53.046	-72.091	64.7	4	0.06	2.2	3
2019	11	19	5	11	59.6	-55.536	-71.144	5.1	3	0.11	2.6	1
2019	11	25	23	52	24.4	-54.531	-69.737	34.6	5	0.22	2.7	1
2019	11	26	21	56	12.4	-55.207	-70.644	40.0	3	0.07	2.8	3
2019	11	28	0	29	23.6	-53.216	-69.827	18.5	4	0.64	1.9	4
2019	11	28	11	33	25.1	-54.446	-69.860	44.9	4	0.47	2.7	3
2019	12	1	3	22	25.5	-54.058	-64.458	37.7	3	0.31	3.5	1
2019	12	1	14	22	8.5	-53.095	-73.341	2.6	3	0.60	2.2	3
2019	12	1	20	54	29.6	-54.250	-64.336	23.7	3	0.21	3.2	4
2019	12	5	1	43	14.7	-54.848	-63.777	40.5	4	0.30	3.8	1
2019	12	11	6	56	35.1	-53.279	-69.694	23.5	4	0.45	2.0	2
2019	12	13	6	25	18.1	-50.462	-70.700	14.4	4	0.53	3.0	1
2019	12	19	21	14	34.2	-53.727	-71.868	6.4	3	0.47	3.0	4
2019	12	21	20	35	1.6	-56.304	-68.045	38.8	5	0.06	4.4	1
2019	12	23	20	7	28.0	-53.853	-70.132	61.8	3	0.29	2.4	1
2020	1	3	3	20	55.3	-53.089	-67.808	15.9	3	0.42	2.0	3
2020	1	3	3	48	15.0	-53.427	-70.957	12.2	3	0.06	2.2	3
2020	1	8	21	3	41.4	-53.532	-73.747	40.0	3	0.30	3.2	2
2020	1	20	6	56	33.3	-53.269	-70.470	5.1	4	0.16	2.9	2
2020	1	24	23	8	44.4	-55.873	-78.697	39.9	3	0.33	4.2	4
2020	1	29	5	22	9.0	-56.114	-58.109	5.1	3	0.18	4.4	1
2020	2	3	12	26	0.4	-55.367	-71.739	40.1	3	0.19	3.5	3
2020	2	7	18	53	13.5	-57.750	-61.546	40.4	6	0.39	4.3	1
2020	2	8	4	46	2.7	-59.752	-70.325	15.0	3	0.32	3.8	2
2020	2	8	17	2	17.9	-54.785	-75.318	40.1	4	0.30	3.2	3
2020	2	23	3	38	50.2	-54.618	-57.547	8.2	3	0.74	3.6	1
2020	2	25	8	53	55.9	-51.386	-72.224	40.2	4	0.52	3.9	1
2020	3	3	10	19	24.6	-53.758	-71.171	14.1	4	0.49	2.4	2
2020	3	4	16	52	58.2	-53.222	-69.903	67.3	6	0.23	2.2	2

2020	3	10	3	56	46.4	-56.025	-65.294	29.6	5	0.46	3.3	1
2020	3	10	4	44	34.6	-51.385	-68.158	18.8	3	0.12	2.5	1
2020	3	11	6	1	4.6	-52.705	-72.985	9.7	4	0.10	2.6	1
2020	3	12	9	54	12.9	-54.321	-60.398	11.8	4	0.59	4.1	1

A2. Catálogo sismicidad CSN

año	mes	día	hora	min	s	latitud °	longitud °	prof.	agencia	M_l	M_w
2019	4	2	13	17	38.5	-51.224	-72.196	2.9	CSN	4.6	5.0
2019	4	3	1	49	9.6	-51.228	-72.325	7.7	CSN	3.5	
2019	4	9	11	41	55.6	-53.534	-72.700	15.0	CSN	3.0	
2019	4	26	22	13	18.8	-50.898	-73.526	30.4	CSN	3.7	
2019	4	29	8	9	53.1	-53.084	-73.840	27.5	CSN	3.8	
2019	5	28	12	0	30.4	-56.310	-68.546	29.6	CSN	3.2	
2019	6	15	8	47	29.1	-56.453	-68.985	18.4	CSN	3.2	
2019	6	28	1	16	0.1	-51.176	-72.538	7.5	CSN	2.9	
2019	8	22	22	16	59.3	-52.980	-74.202	25.7	CSN	3.3	
2019	12	21	20	34	52.2	-56.840	-67.654	15.0	CSN	5.0	5.0
2020	2	25	8	53	52.0	-50.995	-72.225	24.4	CSN	3.9	
2020	3	11	6	1	2.6	-52.648	-73.534	25.8	CSN	3.2	

A3. Catálogo sismicidad IRIS

año	mes	día	hora	min	s	latitud °	longitud °	prof.	Agencia	M_l	M_w
2019	9	5	16	6	4	-57.5866	-66.2696	10.0	NEIC		5.1
2019	12	21	20	34	40	-56.9703	-67.3383	10.0	NEIC		5.2
2020	2	7	18	52	50	-59.3923	-60.2112	10.0	NEIC		5.2

Apéndice B

Sismicidad CSN-ENAP

A continuación, se presentan tres figuras que comparan los catálogos del Centro Sismológico Nacional (CSN) y ENAP de la zona de estudio. En la primera figura A0.1 se puede observar la distribución de sismicidad según la magnitud de los catálogos del CSN que incluye datos del período 1980-2021, del catálogo ENAP Hypocenter (eventos localizados en Seisan) y del catálogo ENAP Velest (eventos relocalizados en Velest) durante el período 2019-2020. En la segunda figura A0.2 se aprecia la distribución temporal del período 2019-2020 de los catálogos del CSN, ENAP Hypocenter y ENAP Velest. En la tercera figura A0.3 se muestra la relación de las magnitudes de los 12 eventos en común entre el CSN y ENAP.

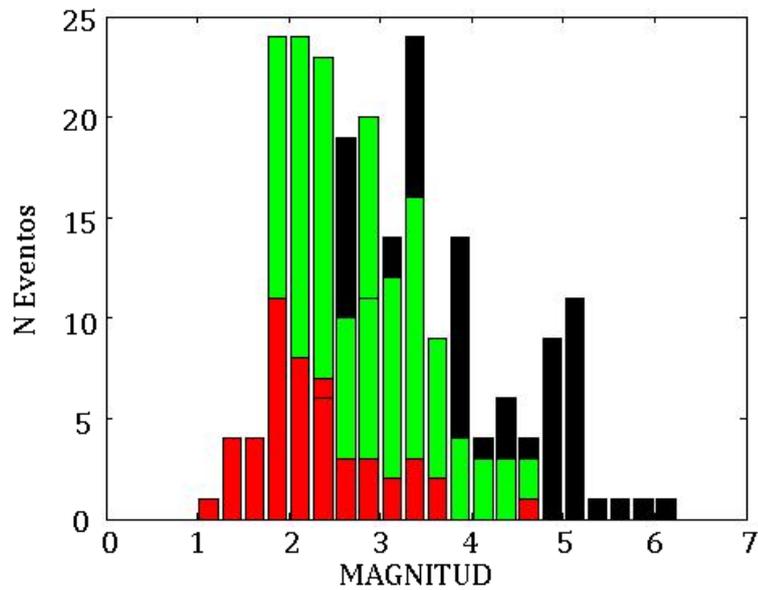


Figura A0.1: Distribución de la sismicidad con la magnitud para catálogos del CSN (color negro), ENAP Hypocenter (color verde) y ENAP Velest (color rojo).

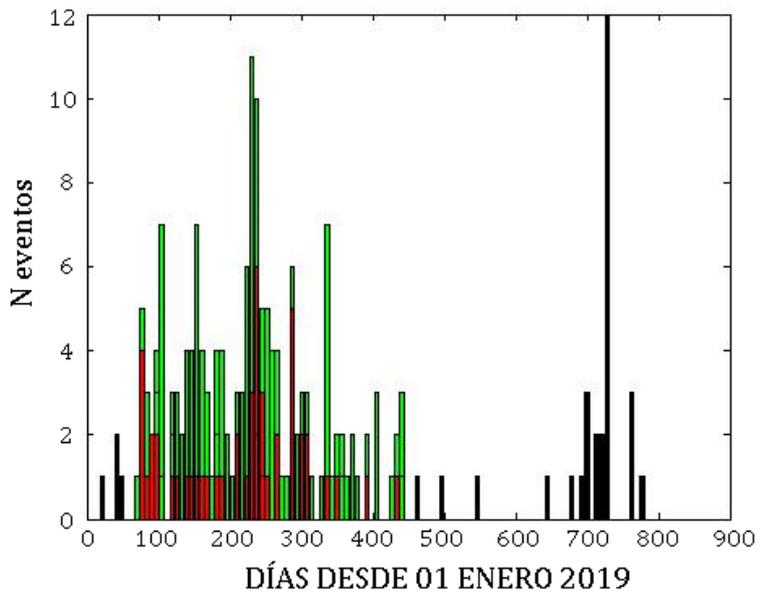


Figura A0.2: Distribución temporal de la sismicidad (en días desde el 01 de enero de 2019) para catálogos del CSN (color negro), ENAP Hypocenter (color verde) y ENAP Velest (color rojo).

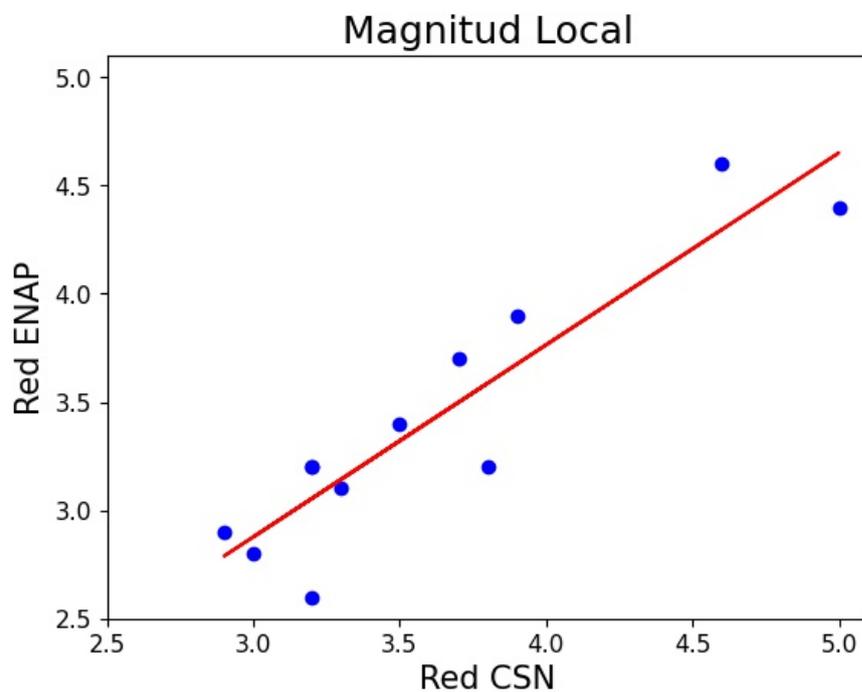


Figura A0.3: Relación entre la M_L de los 12 eventos en común registrados por la red ENAP y la red del CSN durante el período de estudio 2019-2020. Dos de estos eventos registraron una magnitud 3.2 M_L . La línea recta representa el ajuste lineal.

Apéndice C

Archivo STATION0.HYP

El archivo STATION0.HYP controla los parámetros de entrada que utiliza el programa Seisan como las coordenadas de las estaciones, el modelo de velocidad, los coeficientes para calcular la magnitud, etc.

```
RESET TEST(02)=500.0
RESET TEST(07)=-3.0
RESET TEST(08)=2.6
RESET TEST(09)=0.001
RESET TEST(11)=99.0
RESET TEST(13)=5.0
RESET TEST(34)=1.5
RESET TEST(35)=2.5
RESET TEST(36)=0.0
RESET TEST(40)=1.0
RESET TEST(41)=20000.0
RESET TEST(43)=5.0
RESET TEST(50)=1.0
RESET TEST(51)=3.6
RESET TEST(56)= 1.0
RESET TEST(58)= 99990.0
RESET TEST(60)=0.0
RESET TEST(71)=1.0
```

RESET TEST(75)=1.0
RESET TEST(76)=1.11
RESET TEST(77)=0.00189
RESET TEST(78)=-2.09
RESET TEST(79)=1.0
RESET TEST(80)=3.0
RESET TEST(81)=1.0
RESET TEST(82)=1.0
RESET TEST(83)=1.0
RESET TEST(85)=0.1
RESET TEST(88)=1.0
RESET TEST(91)=0.1

ANMA53 2.76S 7023.01W -1
BQON5326.92S 7014.60W 262
DGER5242.94S 6934.74W 26
LAVG5221.40S 7029.44W 131
LOSC5320.99S 6927.21W 23
MJTA53 7.19S 6923.63W 55
TROP5232.88S 7017.13W 217
RGND5251.10S 6952.22W 28
G0095116.23S 7120.28W 372
G01053 9.27S 71 2.98W 652
MG015455.93S 6737.79W 57
MG025246.84S 6913.45W 82
MG035350.87S 7027.76W 83
MG045251.43S 7134.19W 82
MG055140.70S 7230.29W 99

3.47 -5.00 1.65
5.43 0.00 2.02
5.60 3.00 2.85
5.85 6.00 3.54
5.89 15.00 3.54
6.61 20.00 3.74

6.62	25.00	3.83
6.65	30.00	3.83
7.48	35.00	4.13
7.91	40.00	4.13
7.92	50.00	4.13
7.92	60.00	4.13

15.0 1100.2200. 1.74

ENP

Apéndice D

Archivo de control velest.cmn

El archivo velest.cmn controla los parámetros y la ejecución de los archivos adicionales que utiliza el programa Velest.

```
***** CONTROL-FILE FOR PROGRAM V E L E S T *****
***
*** ( all lines starting with * are ignored! )
*** ( where no filename is specified,
***   leave the line BLANK. Do NOT delete!)
***
*** next line contains a title (printed on output):

***   starting model 1 based on
***   olat      olon   icoordsystem      zshift   itrial ztrial   ised
***   -52.812   70.640   0                0.000    0     0.00    0
***
***   neqs   nshot   rotate
***        51     0     0.0
***
***   isingle   iresolcalc
***           0         0
***
***   dmax   itopo   zmin   veladj   zadj   lowveloclay
```

```
      500      0      0.00      0.20      5.00      0
***
*** nsp      swtfac      vpv      nmod
      2      0.50      1.740      1
***
*** othet      xythet      zthet      vthet      stathet
      0.01      0.01      0.01      1.0      0.01
***
*** nsinv      nshcor      nshfix      iuseelev      iusestacorr
      1      0      0      1      1
***
*** iturbo      icnvout      istaout      ismpout
      1      1      1      0
***
*** irayout      idrvout      ialeout      idspout      irflout      irfrou      iresout
      1      1      1      1      1      1      1
***
*** delmin      ittmax      inverratio
      0.010      5      2
***
*** Modelfile:
input.mod
***
*** Stationfile:
station.sta
***
*** Seismofile:

***
*** File with region names:

***
*** File with region coordinates:

***
```

*** File #1 with topo data:

*** File #2 with topo data:

*** DATA INPUT files:

*** File with Earthquake data:

data.cnv

*** File with Shot data:

*** OUTPUT files:

*** Main print output file:

invers.out

*** File with single event locations:

*** File with final hypocenters in *.cnv format:

fin_hyp.cnv

*** File with new station corrections:

sta_cor.out

*** File with summary cards (e.g. for plotting):

*** File with raypoints:

*** File with derivatives:

*** File with ALEs:

*** File with Dirichlet spreads:

CALDIRSP.DIS

*** File with reflection points:

*** File with refraction points:

*** File with residuals:

***** END OF THE CONTROL-FILE FOR PROGRAM V E L E S T *****