



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

**ESTUDIO DE LA INTENSIDAD REGISTRADA EN LA
ESTACIÓN SANTIAGO - MAIPÚ, DURANTE EL
TERREMOTO DEL MAULE DEL 2010**

Memoria de Título presentada por

Millaray Gabriela Josefina Curilem Calfuman

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Pablo Heresi Venegas

Mayo de 2023

ESTUDIO DE LA INTENSIDAD REGISTRADA EN LA ESTACIÓN SANTIAGO - MAIPÚ, DURANTE EL TERREMOTO DEL MAULE DEL 2010

Millaray Curilem Calfuman, Pablo Heresi Venegas

Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

Durante el terremoto del Maule del 2010 se observaron diferentes intensidades y daños en estructuras a lo largo del país. En la Región Metropolitana en específico, existen registros de aceleraciones de terreno en cinco estaciones sismológicas, que presentan valores similares entre ellas, excepto la estación Santiago – Maipú, la cual registra aceleraciones horizontales máximas cercanas a 0.5 g.

En este estudio se analizan cuatro factores que pueden ser relevantes, en cuanto al comportamiento del suelo y la respuesta de estructuras ante sismos de alta magnitud y que no son considerados en el diseño sísmico actualmente.

Primero, se estudia la geología del lugar afectado, debido a que, si se encuentran suelos blandos, se puede generar una amplificación por efectos de sitio. En el caso de estudio se identifican suelos blandos con mala respuesta sísmica rodeados de formaciones rocosas.

También, se estudia la polaridad del movimiento sísmico que puede generar intensidades mayores en direcciones diferentes a las de medición de los acelerómetros. De los registros de la estación Santiago - Maipú se destacan periodos con movimientos polarizados.

Además, se estudian posibles pulsos de velocidad que se pueden inducir grandes cantidades de energía en poco tiempo, y generar daños sobre estructuras. A partir de los registros utilizados en esta investigación, no se detectan pulsos de velocidad.

Finalmente, se estudia el comportamiento de las ondas de Rayleigh que son registradas por la estación, para determinar si estas pueden haber inducido altas intensidades y afectar directamente a las estructuras. Para este caso si se detectan ondas de Rayleigh fuertes, las cuales se generaron debido a efectos de borde de la cuenca.

Los resultados muestran que estos factores, por si solos, si son relevantes en el caso de estudio, y, además, se pueden relacionar entre ellos, y pueden ser una respuesta a la investigación realizada.

Palabras claves: terremoto, polaridad, Ondas de Rayleigh, geología, pulsos de velocidad.

Tabla de Contenidos

1	INTRODUCCIÓN Y CONTEXTUALIZACIÓN.....	4
2	OBJETIVOS	5
2.1	Objetivo general.....	5
2.2	Objetivos específicos	5
3	METODOLOGÍA	6
3.1	Geología	8
3.2	Polaridad del movimiento sísmico.....	10
3.3	Pulsos de Velocidad.....	12
3.4	Comportamiento de Ondas de Rayleigh	14
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
4.1	Geología	15
4.2	Polaridad del movimiento sísmico.....	17
4.3	Pulsos de Velocidad.....	20
4.4	Comportamiento de Ondas de Rayleigh	21
5	CONCLUSIONES	25
6	REFERENCIAS	27

1 Introducción y Contextualización

El terremoto del 27 de Febrero del 2010 de magnitud Mw 8.8 tuvo su epicentro localizado en la región del Maule, a 43 km al sur oeste de la localidad de Cobquecura y afectó localidades desde la quinta a la novena región (Boroschek et al., 2010).

Al momento del evento, en la Región Metropolitana se contaba con 5 estaciones sismológicas para medir aceleraciones del terreno, ubicadas en las comunas de Maipú, Santiago Centro, Peñalolén, La Florida y Puente Alto (Boroschek et al., 2010). Cada una de estas registró las intensidades en dos direcciones horizontales y una vertical. Con respecto a las aceleraciones obtenidas, se observó que todas las estaciones presentaban valores similares que rondan entre $0.15\ g - 0.3\ g$, excepto la estación Santiago - Maipú, la cual registró valores máximos de $0.478\ g$ dirección Este - Oeste, $0.561\ g$ dirección Norte - Sur y $0.240\ g$ dirección Vertical (Boroschek et al., 2010). Estos valores son significativamente altos para la lejanía del epicentro, considerando los modelos de movimiento fuerte más actualizados.

La alta intensidad en la estación Santiago - Maipú generó graves daños evidentes en la comuna. En particular se observó en el colapso de dos edificios habitacionales, edificio Don Tristán y edificio Don Luis, ambos conformados de muros y losas de hormigón armado, que colapsaron durante el movimiento telúrico por fallas en machones y columnas, resultando en estructuras inhabitables que posteriormente fueron demolidas. También, un edificio municipal y otro edificio habitacional presentaron fallas luego del terremoto, por lo que posteriormente también fueron demolidos (Vergara & Verdugo, 2015). Todos estos se encuentran en un sector relativamente cercano entre sí, y además cercanos a la estación sismológica ubicada en la comuna.

Transcurridos 12 años desde el gran terremoto, aún no se tiene una explicación a la alta intensidad en Maipú, la cual puede tener implicancia en consideraciones para futuras construcciones en la zona, o en zonas con características similares. En este contexto, este trabajo busca explorar qué factores afectaron el comportamiento del suelo en la estación Santiago – Maipú.

En este trabajo se estudian parámetros que no son considerados directamente en el diseño sísmico de edificaciones. En específico, se estudian las características geológicas del lugar, la polaridad del movimiento sísmico, posibles pulsos de velocidad y el comportamiento de ondas del Rayleigh registradas por la estación.

Primero se estudia la geología del sector analizando posibles amplificaciones por efectos de sitio. También, se aborda la polaridad del movimiento sísmico para verificar si existe un movimiento polarizado con intensidades máximas en alguna dirección específica, diferente a las de medición del dispositivo. Junto a esto, se espera comprobar si existen pulsos fuertes de velocidad en alguna de estas direcciones o en otras diferentes a las de las mediciones. Finalmente, se estudia el comportamiento de las ondas de Rayleigh combinando las mediciones en direcciones horizontales y vertical, filtrando las señales a partir de algoritmos disponibles en la literatura, para estudiar la intensidad y dirección de las de las ondas de Rayleigh detectadas por la estación estudiada.

El objetivo de esta investigación es explorar si estos cuatro factores ya mencionados tienen alguna implicancia en la alta intensidad medida en Maipú y pueden corresponder a una razón del comportamiento del suelo desde una perspectiva de la amenaza sísmica y la ingeniería, recopilando antecedentes e información, basándose en trabajos realizados del tema. Sin embargo, en esta investigación no se abarca el comportamiento de las estructuras que fueron afectadas en este suceso, ni la razón por la que colapsaron, si no, cómo se vio afectado el comportamiento del suelo por las condiciones del lugar.

Este estudio se considera relevante para la ingeniería civil debido a que situaciones como la ocurrida en el año 2010 pueden repetirse en un país con una alta sismicidad como Chile, y los daños asociados a esto son graves, afectando directamente a las personas y al país.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Esta investigación tiene como objetivo general estudiar posibles razones que generaron altos valores de intensidad registrados en la estación Santiago - Maipú, para el terremoto del Maule 2010, las cuales exceden el resto de los valores en la Región Metropolitana.

2.2 Objetivos específicos

1. Estudiar la geología del sector, en cuanto a tipos de suelo de la zona de estudio y basamento rocoso para determinar si existe alguna influencia sobre ondas superficiales presentes en el sismo.
2. Determinar si existe polarización en el movimiento sísmico, a partir de las aceleraciones medidas por la estación Santiago – Maipú.
3. Determinar si el movimiento registrado en la estación posee fuertes pulsos de velocidad, a partir de los registros de la estación estudiada.
4. Determinar el comportamiento de las ondas superficiales de Rayleigh, a partir de los registros sísmicos de la estación Santiago – Maipú.

3 Metodología

Para este estudio se comienza realizando un análisis de los registros de las diferentes estaciones con las que se contaba para el terremoto del 2010.

A partir del Informe RENADIC (Boroschek et al., 2010), se extraen los registros de intensidades y se comparan los valores de máxima aceleración del suelo (PGA) de las estaciones de la Región Metropolitana.

Se calcula el PGA estimado según el procedimiento presentado por Montalva et al., (2017) en base a la distancia de ruptura R_{rup} y la velocidad de propagación de ondas de corte V_{s30} .

Tabla 1: comparación PGA registrado y PGA esperado según distancia de ruptura y velocidad de propagación de ondas de corte

ESTACIÓN	PGA_{max} [g]	R_{rup} [km]	V_{s30} [m/s]*	PGA_{est} [g]	σ	ε
Santiago - Centro	0,309	108,3	343	0,155	0,838	0,83
Santiago - La Florida	0,236	109,3	598	0,136	0,838	0,66
Santiago - Maipú	0,561	98,0	386	0,169	0,838	1,43
Santiago - Peñalolen	0,295	111,8	379	0,147	0,838	0,83
Santiago - Puente Alto	0,265	108,3	496	0,144	0,838	0,73

* Obtenido de la base de datos Siberrisk (<https://siberrisk.ing.puc.cl/StrongMotionDatabase>)

Como se muestra en la Tabla 1, la intensidad registrada en todas las estaciones de la Región Metropolitana excede lo esperado según la distancia a la ruptura. Además, se destaca que la estación Santiago – Maipú presenta valores un 80% mayores al resto de las estaciones. En particular, en esta estación se midió un PGA 1.43 desviaciones estándar mayor al valor esperado (i.e., percentil 92).

Este fenómeno se evidenció en daños estructurales graves en edificios ubicados en la comuna, por tanto, es relevante analizarlo desde una perspectiva observacional, con antecedentes del comportamiento del suelo y los registros existentes, y verificar cómo pueden afectar a las estructuras construidas.

Se estudia la estación Santiago - Maipú, utilizando los registros de desplazamiento, velocidad o aceleración del terreno, por lo que es necesario recopilar y procesar estos datos para obtener y analizar resultados. Los registros de la estación son obtenidos de la base de datos de RENADIC de los terremotos registrados desde 1994 al 2010, y en específico, archivos del Terremoto del Maule 2010.

Para esta investigación se analizan cuatro factores relevantes en el estudio de sismos, que corresponden a la geología del sector estudiado, la polaridad del movimiento sísmico, los pulsos de velocidad que se pueden presentar en el registro y el comportamiento de las ondas de Rayleigh. Cada uno de ellos es abordado de manera independiente para verificar si tienen implicancia en el estudio.

Se comienza con una revisión de literatura e investigaciones realizadas previamente de cada tema de interés. Se crean algoritmos y se utilizan otros preexistentes para poder evaluar cada factor. Los resultados son analizados y posteriormente se concluye de manera independiente, y si es posible, se relacionan entre sí, para encontrar una posible respuesta. De esta forma, se espera determinar si estos factores influyeron en las altas intensidades en la estación Santiago – Maipú durante el terremoto del Maule 2010.

Se muestra en la Tabla 2 la metodología de trabajo adoptada para desarrollar esta investigación. Cada etapa está asociada a cada objetivo específico, con sus respectivas actividades y métodos.

Tabla 2: Metodología de investigación utilizada, asociada a los objetivos específicos.

ETAPA	ACTIVIDAD	MÉTODO
Geología	Revisión de literatura de influencia de geología en sismos	Lectura de artículos relacionados
	Estudiar la geología y definir tipos de suelos en el sector	Extraer información del suelo con mapas geológicos
		Extraer información del suelo con estudios realizados en el sector
	Determinar influencia del suelo en movimiento sísmico para el sector estudiado	Análisis de resultados
Polaridad del Movimiento sísmico	Revisión de literatura de polaridad	Lectura de artículos relacionados
	Determinar características del movimiento sísmico en base a registros de aceleraciones	Extraer registros de aceleraciones de estación de base de datos
		Crear programa de MATLAB y obtener gráficas asociadas
	Determinar si existe un movimiento polarizado y periodos en que ocurre	Análisis de resultados y comparación con los obtenidos previamente
Pulsos de velocidad	Revisión de literatura de pulsos de movimiento en sismos	Lectura de artículos relacionados
		Estudiar métodos para extraer pulsos de velocidad
	Determinar características del movimiento sísmico en base a registros de velocidad	Usar programa de MATLAB para procesar registros
		Identificar pulsos de velocidad
	Determinar si existen pulsos de velocidad en el movimiento	Análisis de resultados y comparación con los obtenidos previamente
Comportamiento de Ondas de Rayleigh	Revisión de literatura de ondas de Rayleigh	Lectura de artículos relacionados
	Determinar características del movimiento sísmico en base a registros de aceleraciones	Estudiar métodos para extraer ondas de Rayleigh
		Utilizar programa de MATLAB para extracción de ondas de Rayleigh en el registro
	Identificar ondas de Rayleigh en el movimiento y periodos en que ocurre	Análisis de resultados y comparación con los obtenidos previamente

3.1 Geología

Se ha observado que las condiciones geológicas del sector afectan de manera directa las aceleraciones medidas por las estaciones sismológicas. Dependiendo del tipo de suelo, por ejemplo, un suelo blando, puede generar una respuesta mayor que sobre un suelo más rígido, esto debido a una amplificación generada por efectos de sitio.

Un caso particular es el del terremoto de Puebla - Morelos, México en 2017, en el cual las estaciones con mayores aceleraciones se encontraban sobre suelos de sedimentos blandos ubicados en una zona donde antiguamente existía un lago, rodeados por sectores de montaña (Heresi et al., 2020). Esto resultó en que, durante el terremoto, se generara un atrapamiento de las ondas superficiales entre los sectores de roca. Además, se demostró que las estaciones que estaban situadas sobre zonas rocosas no mostraron registros tan altos (Heresi et al., 2020).

En la Región Metropolitana se ha demostrado que posee una variada geología, y el sector de estudio de Maipú está localizado sobre suelos de gravas y depósitos de ceniza. Un ejemplo del comportamiento del suelo es el del terremoto de Valparaíso del 1985, donde se demostró que se presentaron intensidades elevadas en Maipú, en comparación a otros sectores de la región (Leyton et al., 2011).

Vergara & Verdugo (2015) estudian diferentes factores para determinar su relación con la distribución de daños del terremoto del Maule del 2010. En su estudio realizan un catastro de las estructuras con daños severos, y se destacan cuatro en la comuna Maipú, todas ellas con orden de demolición posterior al terremoto. Estas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Catastro edificios dañados en Maipú. (Fuente Tabla 1 Vergara & Verdugo (2015))

IDENTIFICACIÓN	DIRECCIÓN	OBSERVACIONES
SMAPA Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado	Alberto Llona 1806, Maipú	Daños estructurales en edificio, se decretó su demolición
Don Luis Gandarillas 360	Luis Gandarillas 360, Maipú	2 torres de 4 pisos. Colapso de machones en subterráneo lo que provocó el colapso del lado norte del edificio.
Condominio Don Tristán Valdés	Tristán Valdés 216, Maipú	2 torres de 4 pisos. Inclinação pronunciada y torsión del edificio debido al desplomo de las columnas del poniente.
Condominio calle Hermanos Carrera	Hermanos Carrera 2727, Maipú	Torres de 5 pisos. Block poniente con fisuras diagonales en muros. Block oriente con deformación de losas y grietas en elementos estructurales.

En la Figura 1 se muestra una imagen satelital del sector de estudio, con la ubicación de la estación Santiago – Maipú y de los edificios dañados de la comuna, mencionados en la tabla anterior.

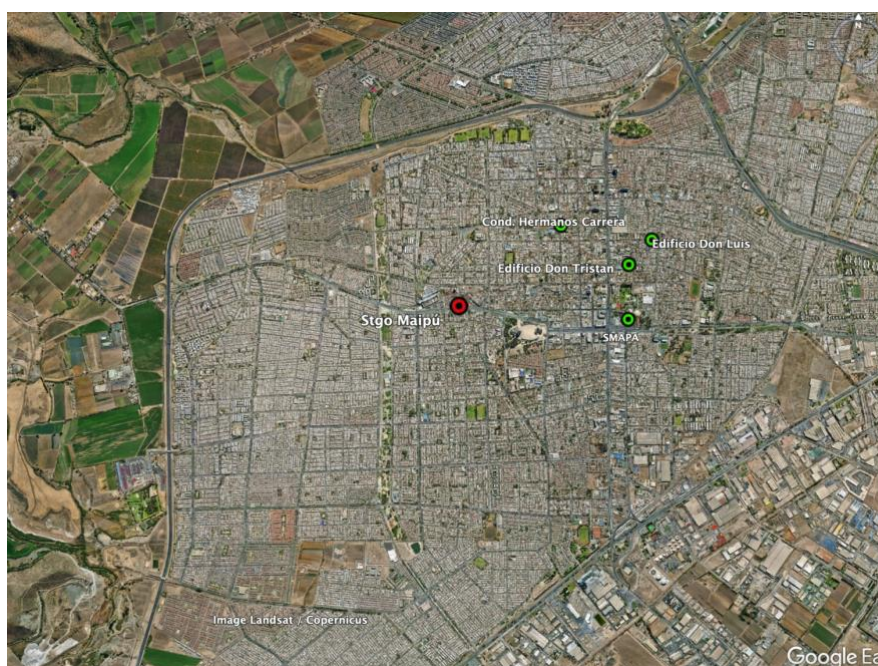


Figura 1: Ubicación Estación Santiago – Maipú y edificios dañados en Maipú.

Adicionalmente, en la Figura 2 se muestra la ubicación de dos de los edificios mencionados en la Tabla 3, donde se puede observar la cercanía entre ambos y su orientación.

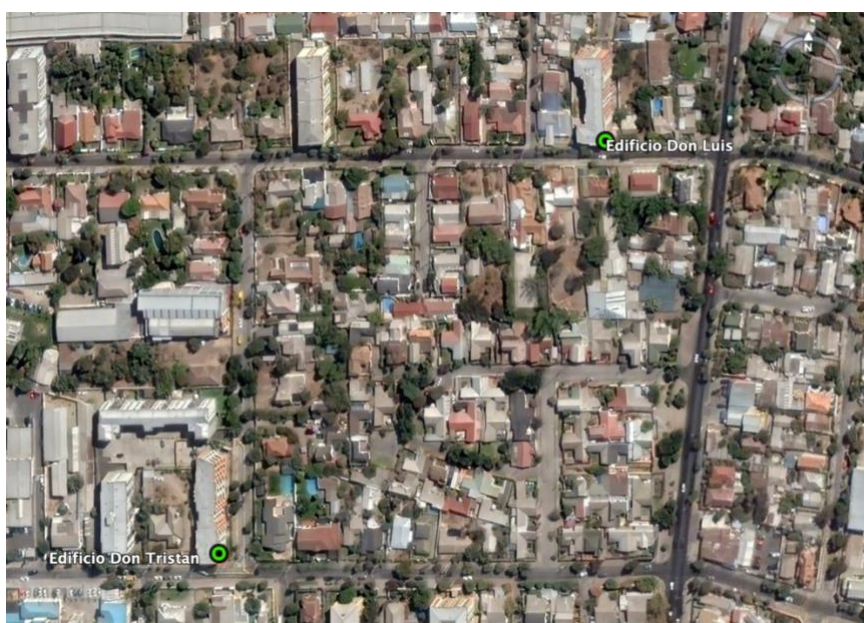


Figura 2: Detalle de ubicación y orientación edificios Don Tristán y Don Luis.

Para este punto, se estudia el suelo de la zona analizada, a partir de mapas de SERNAGEOMIN. En cada uno de ellos se posiciona la ubicación de la estación Santiago - Maipú y los edificios dañados para identificar el tipo de suelo en el sector.

3.2 Polaridad del movimiento sísmico

Los registros de aceleraciones, velocidad y desplazamiento de movimiento sísmico, en general, son medidos en tres direcciones, Longitudinal (L), Transversal (T), y Vertical (V). Cada una de estas es utilizada de manera independiente en los análisis estructurales, usando valores máximos, mínimos o promedios.

Se ha observado sismos con una polaridad en el movimiento del suelo, en los cuales se ha demostrado que los dispositivos de medición y las direcciones en que se registran las intensidades están orientados de manera arbitraria respecto a los ejes principales del movimiento del suelo, donde se pueden registrar intensidades mayores (Hong & Goda, 2007).

Además, Poulos & Miranda (2022) proponen una nueva medida de intensidad del movimiento horizontal, que es más relevante para el diseño sismo - resistente, donde es de mayor relevancia la probabilidad de excedencia de la intensidad de diseño en alguna de los ejes principales de las estructuras.

En base a esto, se analiza el movimiento del suelo en diferentes direcciones para verificar si existe una polarización del movimiento en una dirección diferente a las de medición del dispositivo. De esta forma, si el movimiento sísmico es polarizado en una dirección específica con grandes valores de intensidad, durante un tiempo acotado, se pueden generar daños mayores en esa dirección. Además, esto se puede relacionar directamente con las direcciones principales de los edificios que presentaron daños estructurales del caso de estudio.

Para analizar los efectos de la polaridad, se utiliza la historia de aceleraciones horizontales del suelo registradas por la estación Santiago – Maipú de la base de datos de RENADIC para el terremoto del Maule del 2010, mostrados en la Figura 3.

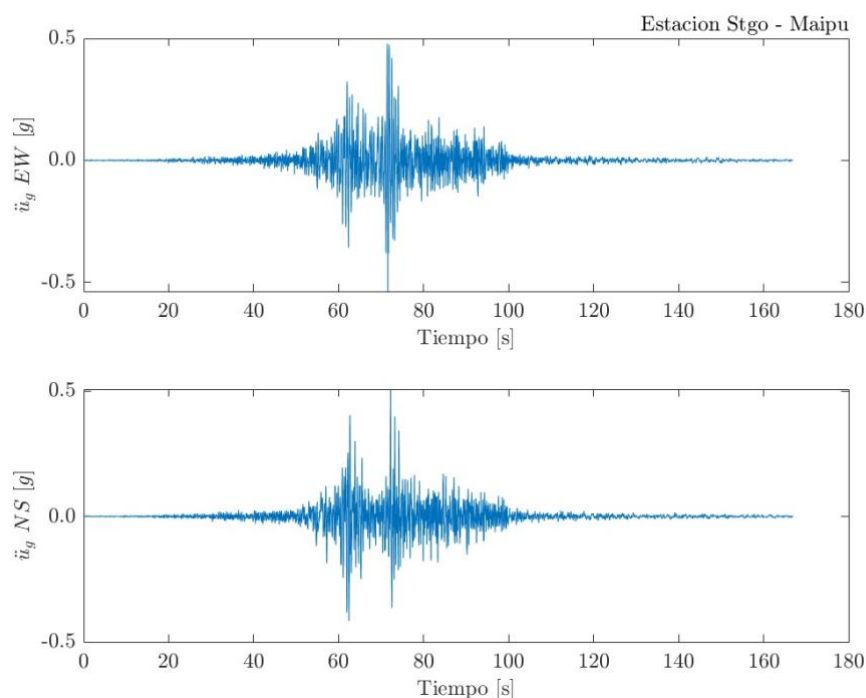


Figura 3: Registros de aceleración del suelo Estación Santiago Maipú.

Usando el registro en ambas direcciones, en este caso Norte-Sur (NS) y Este-Oeste (EW), con trigonometría, se define una componente radial asociada a un ángulo azimutal θ , como se muestra en la Figura 4.

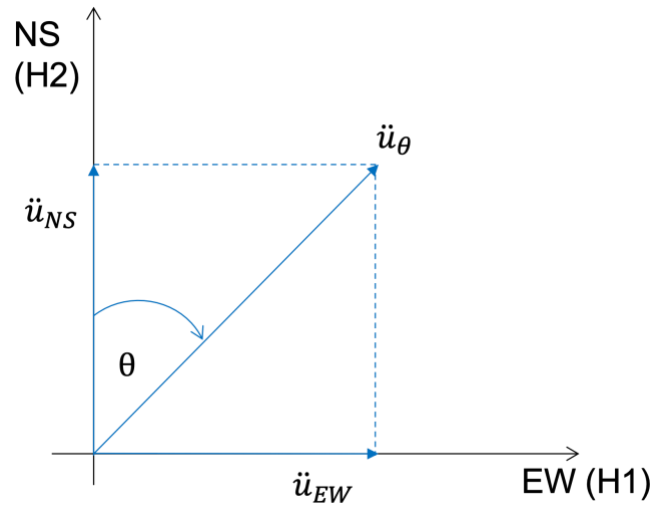


Figura 4: Direcciones del registro de la estación y las componentes definidas para el estudio.

Se define la componente radial en función de las componentes horizontales NS y EW:

$$\ddot{u}_\theta = \ddot{u}_{NS} \cos \theta + \ddot{u}_{EW} \sin \theta \quad (1)$$

A partir del registro de aceleraciones, se calcula el espectro de pseudo aceleraciones para cada para azimut θ , con $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$. Se utiliza el método de recurrencia para cada componente radial $\ddot{u}_\theta$, considerando un sistema de 1 GDL con una razón de amortiguamiento de 5%.

Se obtienen las siguientes medidas para los registros rotados, definidas por Boore (2010) que son calculadas para todas las orientaciones posibles no redundantes.

- ROTD100: máximo PSa para un determinado periodo, a partir de PSa calculado en todas las direcciones.
- ROTD50: mediana de PSa para un determinado periodo, a partir de PSa calculado en todas las direcciones.
- ROTD00: mínimo PSa para un determinado periodo, a partir de PSa calculado en todas las direcciones.

Se grafica cada medida, y, además, se compara con el espectro de pseudo aceleraciones (PSa) para cada dirección EW y NS. A partir de estos resultados se escogen periodos específicos para analizar el movimiento del suelo en ambas direcciones y verificar su polarización.

3.3 Pulsos de Velocidad

Otro factor relevante para investigar son los pulsos de velocidad para caracterizar los registros del movimiento sísmico. Esto corresponde a valores *peak* de velocidad que aparecen como pulsos y liberan gran energía en poco tiempo y son esperados en regiones cercanas a fallas (Shahi & Baker, 2014). Esto ocasiona movimientos más rápidos en poco tiempo, lo que implica un daño mayor sobre estructuras.

El análisis de pulsos de velocidad se realiza en base a los registros de velocidad, en las direcciones de medición de los dispositivos. Sin embargo, como se estudia si existe una polarización del movimiento sísmico, si se obtiene que existe un movimiento polarizado en una dirección diferente a las de medición, se espera determinar si existen pulsos de velocidad en estas direcciones.

Shahi & Baker (2014) proponen un algoritmo que puede identificar pulsos en orientaciones arbitrarias para movimientos del suelo con diferentes direcciones. Se utiliza la Transformada Wavelet continua de dos componentes ortogonales del movimiento del suelo para identificar las orientaciones más probables de contener un pulso. Esto permite clasificar los registros como *pulse-like*, si contienen pulsos grandes de velocidad, que pueden imponer grandes demandas en estructuras. Si no se presentan grandes pulsos de velocidad, el registro se considera como *non-pulse-like*.

Se presenta en el siguiente gráfico los registros de sismos clasificados como *pulse-like*, de la base de datos recopilada por Shahi & Baker (2014). Cada uno es asociado a la distancia a la falla en kilómetros.

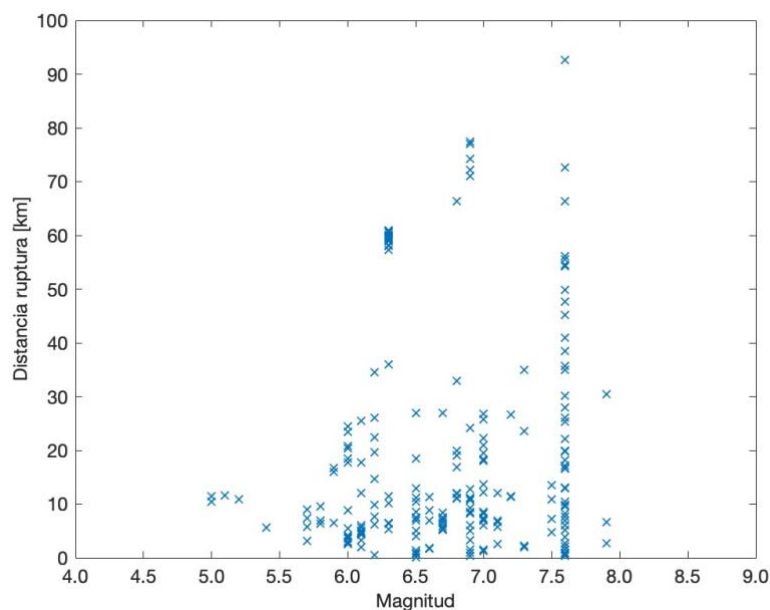


Figura 5: Registros de sismos clasificados como *pulse-like*, con su distancia a la ruptura.

De la Figura 5 se puede observar como en la mayoría de los casos, los sismos de baja y alta magnitud tienen una distancia a la ruptura baja. Sin embargo, se observa un caso en los cuales se sobrepasan los 90 [km] de distancia a la ruptura. Esto indica que pueden existir casos donde se observen pulsos de velocidad relevantes, aunque no sea un lugar cercano a la falla.

Como otro antecedente relevante, se analizan estudios realizados luego de ocurrido el reciente terremoto de Turquía en Febrero 2023. En la siguiente figura se observa un análisis de pulsos de velocidad extraídos de diferentes registros.

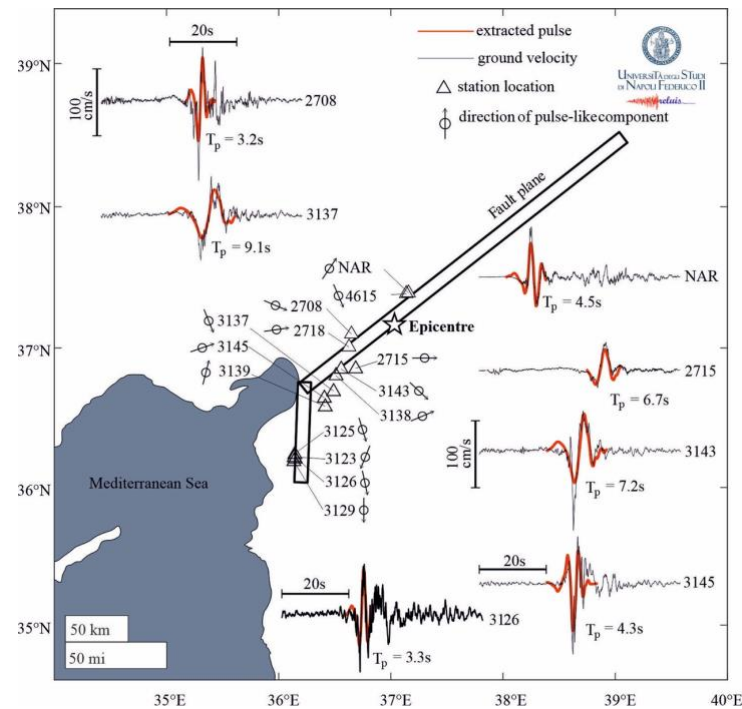


Figura 6: pulsos de velocidad extraídos de estaciones que registraron el terremoto de Turquía (Fuente: Iunio Iervolino, 2023)

De la Figura 6, se observan las diferentes estaciones con sus respectivos registros de velocidad, con la dirección del pulso extraído, y su ubicación respecto al plano de falla. Esto muestra un comportamiento esperado por la cercanía a la falla, donde se pudieron extraer pulsos de velocidad que pueden afectar directamente a estructuras.

Para el caso de estudio de la estación Santiago – Maipú, se utilizan los registros de velocidad en las dos direcciones horizontales para determinar si el registro puede ser o no considerado como *pulse-like*.

3.4 Comportamiento de Ondas de Rayleigh

Las ondas superficiales de Rayleigh corresponden a las ondas que se forman en la superficie de la tierra producto de las ondas internas. Su comportamiento depende del medio sobre el cual se propaguen, y pueden generar valores elevados de intensidad.

Desde el punto de vista de la Ingeniería Civil y de este trabajo, es importante el estudio del comportamiento de las ondas de Rayleigh ya que tienen un efecto directo sobre las estructuras construidas sobre la superficie e implican daños mayores sobre ellas si las ondas se ven amplificadas o tienen mayor amplitud en ciertos sectores.

Para el terremoto en Ciudad de México del 2017, se demostró que efectos de borde de la cuenca generaron ondas de Rayleigh fuertes cerca de estaciones que registraron aceleraciones mayores. En este caso, debido a las características del suelo del lugar, sectores donde se registraron mayores aceleraciones presentaban ondas de Rayleigh fuertes, que se desplazaban en la cuenca debido a estar rodeado de zonas de montaña. De la misma forma, en estos puntos existía una gran polarización del movimiento, por lo que se espera haya ondas de Rayleigh fuertes en movimientos polarizados (Heresi et al., 2020).

Se utiliza el método descrito por Meza-Fajardo et al., (2015) para identificar y extraer ondas superficiales desde sismogramas de tres componentes. En este algoritmo las ondas de Rayleigh y Love pueden ser identificadas basándose en el valor de producto interno normalizado (NIP) entre la transformada de Stockwell de la componente horizontal y vertical de desplazamiento. Se utiliza este método ya que permite filtrar desde señales de desplazamiento ondas superficiales, trabajando en el dominio de la frecuencia y el tiempo, y, además, permite reconocer el movimiento de la onda de Rayleigh. Este método extrae ondas en dos direcciones, con sus correspondientes azimuts.

Se utilizan los registros aceleraciones integrados dos veces para estimar los desplazamientos de la Estación Santiago – Maipú. A partir del método presentado, se busca determinar las ondas de Rayleigh que son registradas por la estación y su correspondiente orientación. Se utilizan los registros de aceleraciones de la estación en dirección Norte - Sur, Este - Oeste y Vertical, de manera combinada.

4 Resultados y Discusión

4.1 Geología

Para el análisis de la geología, se utiliza el Mapa Geológico de un área de la Región Metropolitana. En la Figura 7 se muestra un extracto de la Carta Geológica del área Talagante – San Francisco de Mostazal (Sellés M. & Gana F., 2001) y un extracto del mapa del Área Til Til – Santiago (Wall Z. et al., 1999). En esta imagen se ubica la estación Santiago Maipú y se muestra la ubicación de los edificios afectados en el terremoto.

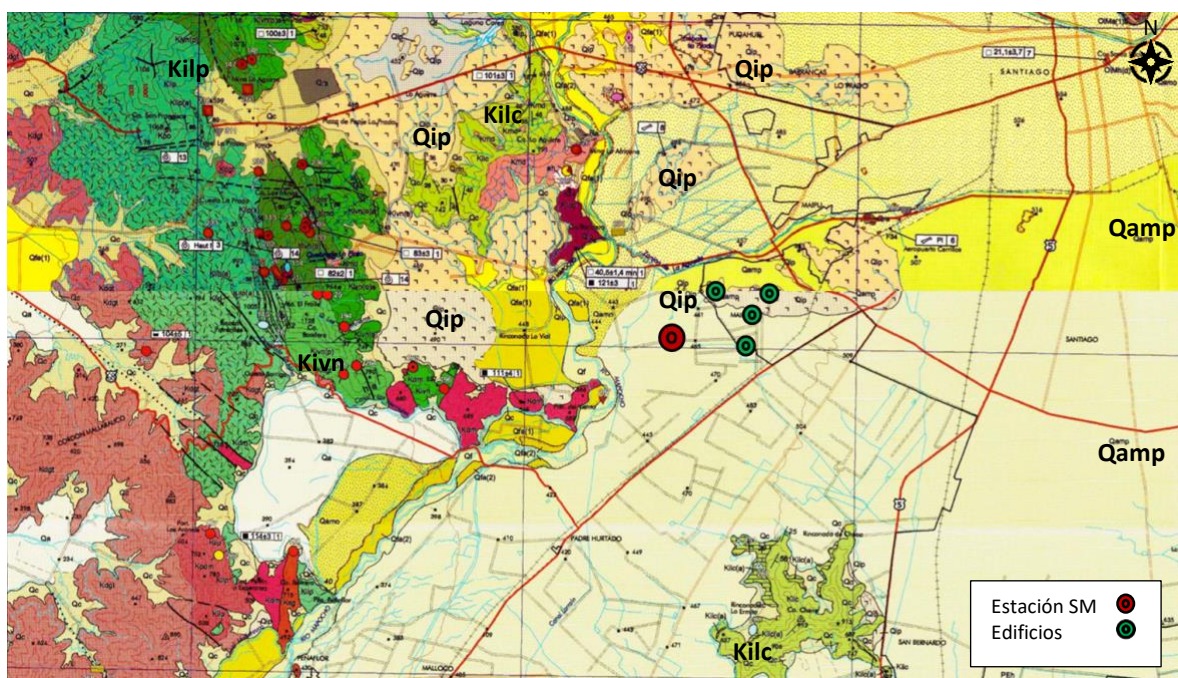


Figura 7: Mapa Geológico Área Til-Til Santiago y Talagante-San Francisco de Mostazal.

A partir del mapa geológico mostrado se pueden detectar ciertos depósitos y formaciones relevantes como las siguientes:

- Qamp: Depósitos aluviales del río Maipo. Barras fluviales de gravas en zonas proximales de abanicos aluviales; arenas, limos y arcillas en zonas distales.
- Qip: Flujo piroclástico de ceniza y lapilli pumíceo, de composición riolítica, macizo, no soldado.
- Kilc: Formación Las Chilcas. Lavas andesíticas a dacíticas y rocas piro a epiclásticas. Domos y tobas riolíticas. Estratos calcáreos fosilíferos marinos.
- Kilp: Formación Lo Prado. Secuencia volcánica con intercalaciones sedimentarias marinas. Tobas de lapilli y cineríticas con interacciones de lavas dacíticas y andesíticas.
- Kivn: Formación Veta Negra. Secuencia lávica, subvolcánica y piroclástica de composición intermedia a ácida, con escasas intercalaciones sedimentarias.

De esta forma, se tiene que la zona estudiada está compuesta de un suelo de arenas, limos, y cenizas volcánicas, es decir, un suelo blando que está rodeado por zonas de rocas, cerros y montañas.

Además, se destacan las siguientes formaciones rocosas:

- Al sureste de la estación se encuentra la Formación las Chilcas correspondiente al sector de Rinconada de Chena.
- Al noroeste de la estación también se observa esta misma formación, correspondiente al sector de Lo Aguirre.
- Al oeste de la estación se observa la formación de Veta Negra en el sector de la Quebrada de la Plata.

Todas estas formaciones nombradas corresponden a cerros y montañas que rodean al lugar estudiado, que como ya se mencionó, corresponde a un suelo blando.

En la Figura 8 se muestra un extracto del mapa de respuesta sísmica de la cuenca de Santiago, creado en base al comportamiento del suelo para el terremoto de Valparaíso de 1985. En este se subdivide en áreas la cuenca de Santiago, de acuerdo a su respuesta ante el terremoto ya mencionado (von Igel G. et al., 2004). Se ubica en el mapa la estación Santiago – Maipú y los edificios afectados.

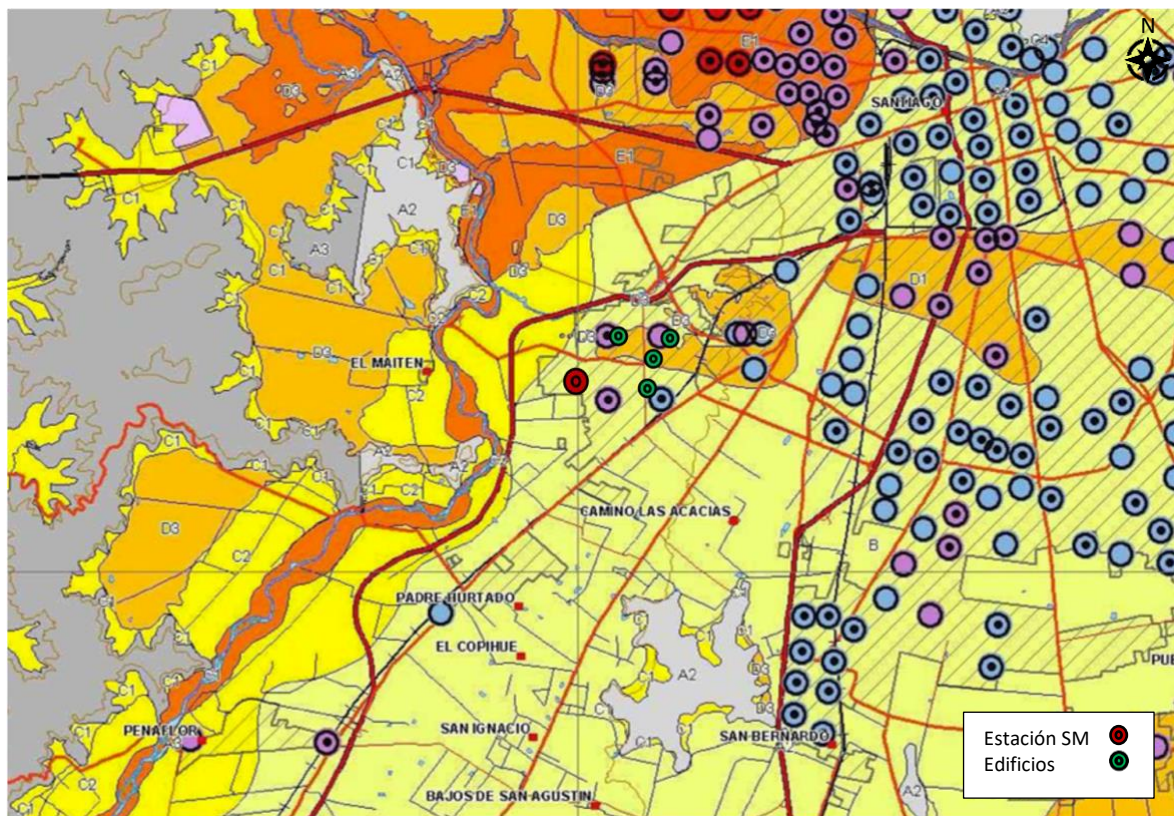


Figura 8: Mapa de respuesta sísmica de la Región Metropolitana.

Del mapa presentado se extrae la siguiente información:

- En amarillo se muestran las unidades con regular respuesta sísmica.
- En naranja se muestran las unidades con mala respuesta sísmica.
- En gris se muestran las zonas de rocas, con muy buena a regular respuesta sísmica.

En este mapa se puede observar que en la ubicación de la Estación Santiago – Maipú y los edificios mencionados se encuentran en una zona de regular y mala respuesta sísmica, la cual se ve rodeada por zonas de rocas con buena respuesta sísmica.

4.2 Polaridad del movimiento sísmico

Se muestra el espectro de pseudo aceleraciones calculado a partir de los registros de aceleraciones de la estación, para las direcciones horizontales en las direcciones de medición del dispositivo EW y NS. Además, se grafican los valores máximos, medios y mínimos RotD100, RotD50 y RotD00, respectivamente. Estos corresponden al registro en una dirección dada por un azimut θ y una componente $\ddot{u}_\theta$, definido por la ecuación (1).

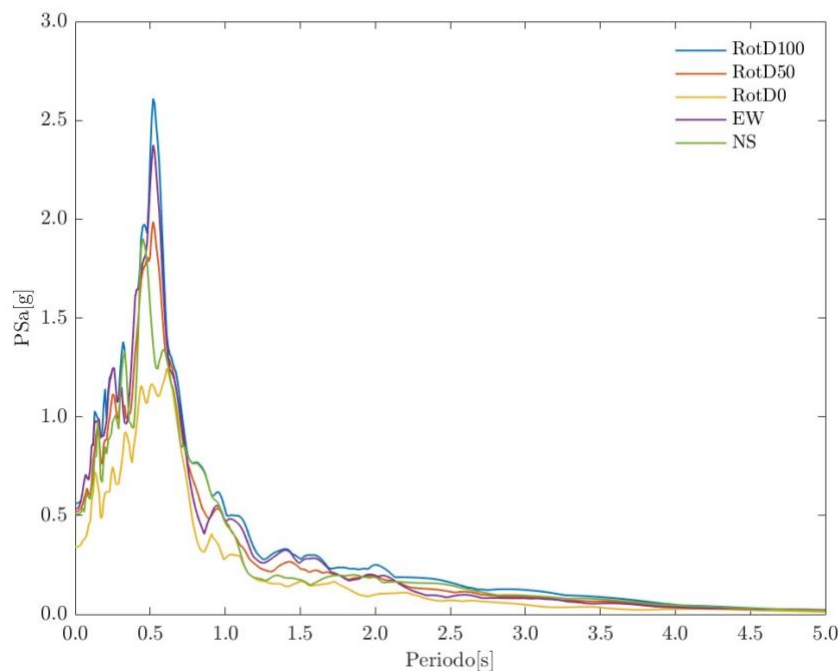


Figura 9: Espectro de Pseudo aceleraciones del registro del terremoto del Maule 2010, Estación Santiago – Maipú.

Se observa en la Figura 9 que la ordenada espectral de la medida de RotD100 es mayor que las componentes horizontales EW y NS, para periodos bajos y altos. Esto indica que hay periodos en que se tienen intensidades mayores para direcciones diferentes a las de medición del dispositivo.

Para esta investigación se escogen dos periodos para estudiar el movimiento del suelo y determinar si existe un movimiento polarizado en alguna dirección.

Se destaca un claro *peak* para el periodo de $T = 0.5$ [s], donde la componente EW se acerca a la medida RotD100. Cabe destacar que un periodo de 0.5 segundos es cercano al periodo fundamental de un edificio de mediana altura. Se escoge este periodo para analizar la polaridad del movimiento sísmico.

Del espectro de pseudo aceleraciones mostrado también se observa que en periodos mayores a 0.5 [s], todas las medidas tienden a tener valores similares, por lo que se debe hacer un análisis de polaridad.

Se grafica en la Figura 10 la razón $RotD100/RotD50$ que representa qué tan grande es la máxima componente con respecto a la mediana, en todas las direcciones de θ , para cada periodo. Esta razón representa si un movimiento es polarizado o no, tal que un movimiento perfectamente polarizado tiene un valor máximo de $\sqrt{2}$ (Boore, 2010).

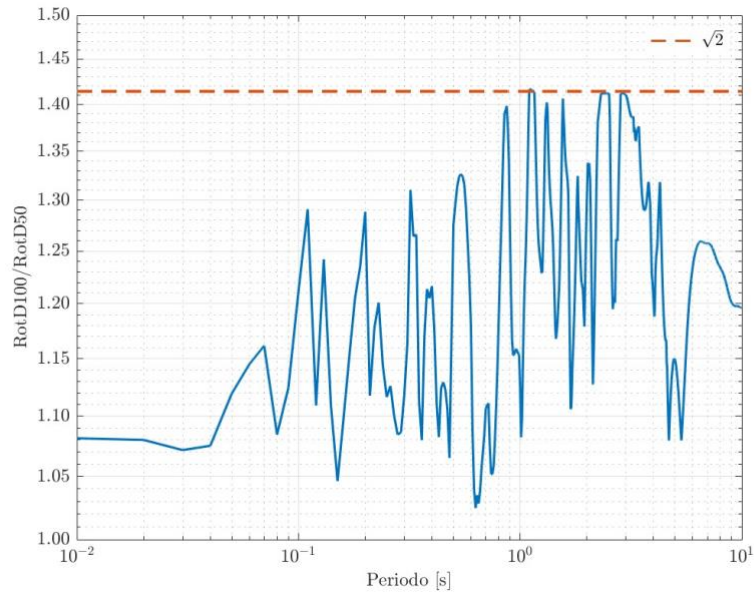


Figura 10: Comparación máximo de registro rotado en mediana, RotD100/RotD50.

De la Figura 10, se observa que hay tres periodos en los que la razón es cercana a su valor máximo teórico de $\sqrt{2}$. Esto implica que para estos puntos se tiene un movimiento casi perfectamente polarizado. Para este trabajo, se escoge el periodo de $T = 2.4$ [s].

Con los dos periodos elegidos, se grafica el movimiento de partícula en el tiempo considerando un sistema de 1 GDL. En el eje de las abscisas el movimiento en dirección Este – Oeste, y en las ordenadas la dirección Norte – Sur. Esto con su correspondiente envolvente, que equivale a los máximos desplazamientos del sistema, para cada azimuth. Para este análisis se trabaja a partir de los registros de aceleraciones del suelo de la estación.

Para el primer periodo estudiado, se obtiene el gráfico mostrado en la Figura 11.

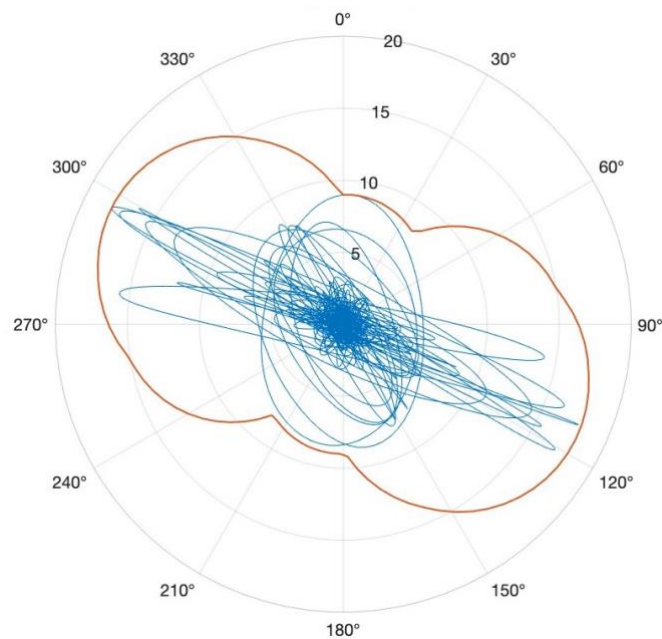


Figura 11: Desplazamientos en centímetros para $T = 0.5$ [s].

Para este periodo se observa una tendencia al movimiento para un azimut de 120° aproximadamente, en toda la duración del sismo. Este se caracteriza por ser un movimiento repetitivo en esta dirección, con amplitudes cercanas a 15 [cm] .

Para el segundo periodo estudiado, se obtiene el gráfico mostrado en la Figura 12.

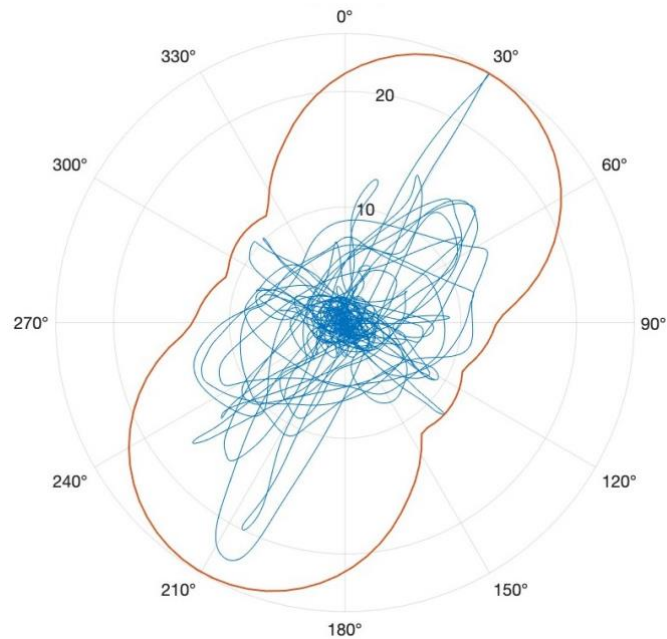


Figura 12: Desplazamientos en centímetros para $T = 2.4 \text{ [s]}$.

En este caso, se muestra una tendencia al movimiento para un azimut de 30° aproximadamente. Este se caracteriza por ser un movimiento tipo pulso en esta dirección, con una duración acotada y que no se repite durante toda la duración del sismo. Para este periodo se obtienen amplitudes mayores a 20 [cm] .

De acuerdo con lo analizado en la Geología, se destaca que según los mapas geológicos mostrados en la Figura 7 y Figura 8, el movimiento polarizado encontrado para el periodo $T = 0.5 \text{ [s]}$ con un azimut de 120° aproximadamente, tiene una dirección que coincide con la ubicación de las formaciones rocosas mencionadas, al noroeste en el sector de Lo Aguirre y al sureste el cerro Chena. Además, para el movimiento polarizado del periodo $T = 2.4 \text{ [s]}$, este tiene una dirección de 30° aproximadamente, coincidente con la ubicación de uno de los edificios con respecto a la estación Santiago – Maipú.

4.3 Pulsos de Velocidad

Para extraer posibles pulsos de velocidad, se utilizan los registros de velocidad horizontales de la estación Santiago – Maipú, mostrados en la Figura 13.

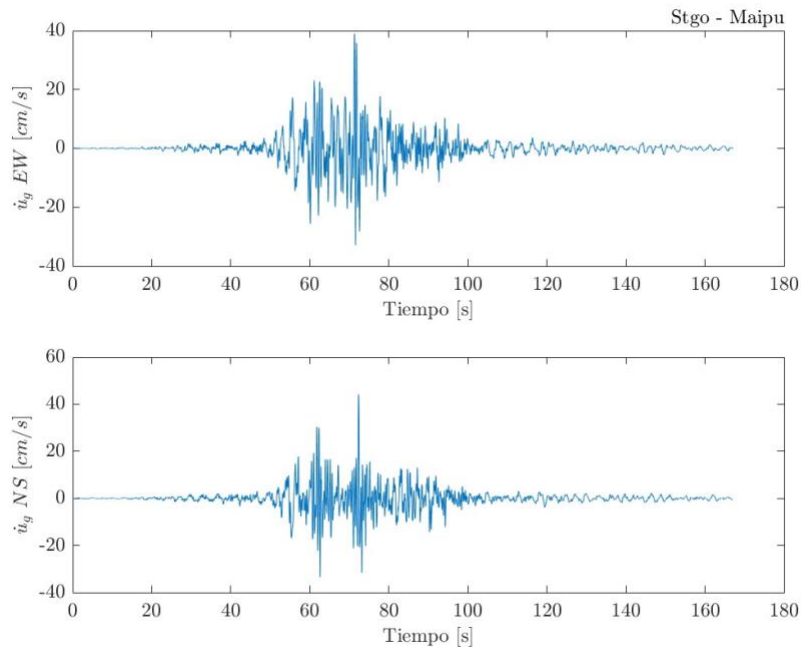


Figura 13: Registro de velocidad del suelo de la estación Santiago – Maipú.

Utilizando el método descrito anteriormente, se obtiene como resultado que, a partir de los registros de velocidad del suelo, el registro es considerado como *non-pulse-like*, por lo que el algoritmo utilizado no entrega información al respecto.

Esto es un resultado esperado ya que no se esperan sismos con propiedades *pulse-like* en zonas lejanas a fallas.

4.4 Comportamiento de Ondas de Rayleigh

Para los registros de la estación Santiago – Maipú, utilizando el algoritmo de Meza-Fajardo et al. (2015), se tienen los siguientes resultados.

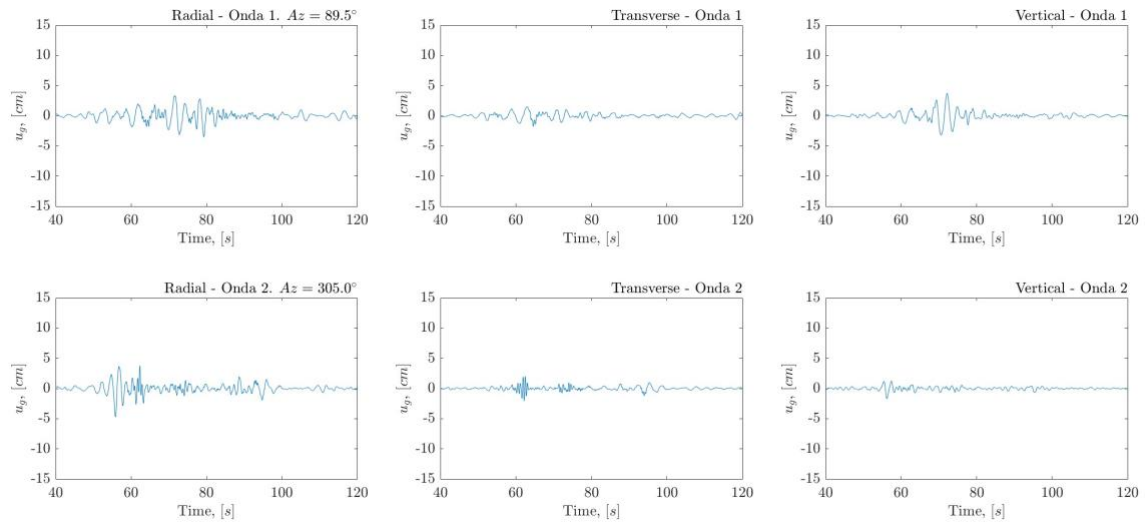


Figura 14: Ondas de Rayleigh detectadas a partir del registro de la estación.

De acuerdo con lo mostrado en la Figura 14, se detecta la Onda 1 con un azimuth de 89.5° para 60 s. Además, se detecta una Onda 2 con un azimuth de 305° a los 50 s, y otra a los 100 s, aproximadamente.

En la Figura 15 se muestran las frecuencias de la Onda 1, obtenidas de la Transformada de Stockwell de la historia de desplazamientos, en la dirección radial.

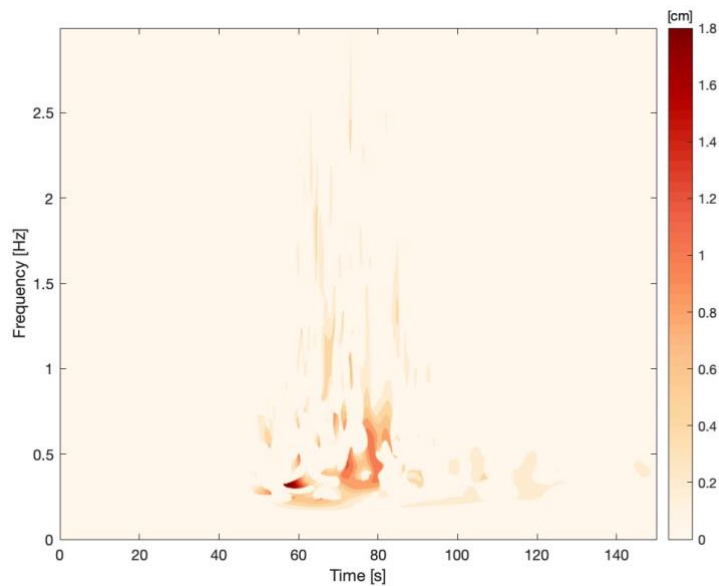


Figura 15 : Frecuencias Ondas de Rayleigh 1.

De los resultados mostrados, se observa una gran cantidad de energía para los 60 [s] a 80 [s], con una frecuencia de la onda de 0.4 – 0.5 Hz, aproximadamente.

En la Figura 16 se muestran las frecuencias de la Onda 2, obtenidas de la Transformada de Stockwell de la historia de desplazamientos, en la dirección radial.

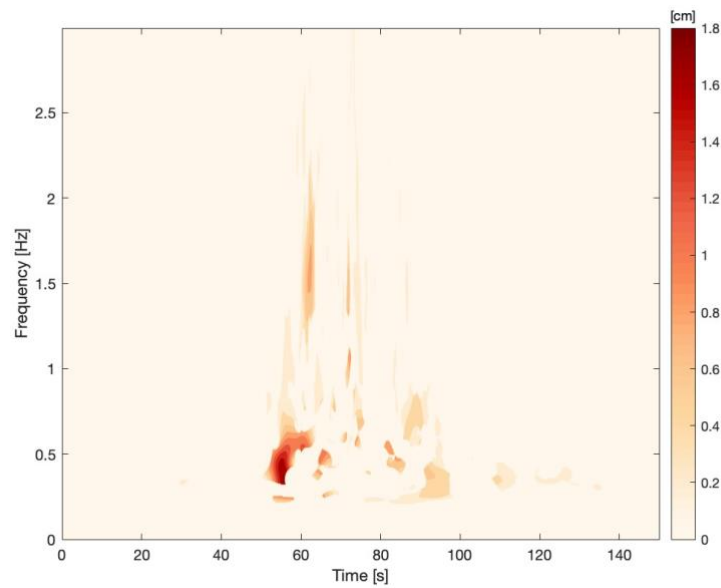


Figura 16 : Frecuencias Ondas de Rayleigh 2.

De los resultados mostrados, se observa que la frecuencia de la onda tiene un valor de 0.5 Hz para $50 \text{ [s]} - 60 \text{ [s]}$, aproximadamente. También se observa para 60 [s] una gran cantidad de energía con una frecuencia de $1.5 - 2 \text{ [Hz]}$

A partir de lo expuesto en las secciones anteriores, se retoman los resultados mostrados anteriormente, para la Geología y Polaridad del movimiento sísmico.

Se posiciona en el mapa mostrado en la Figura 7 las direcciones de las ondas de Rayleigh extraídas del registro, en la estación Santiago - Maipú.

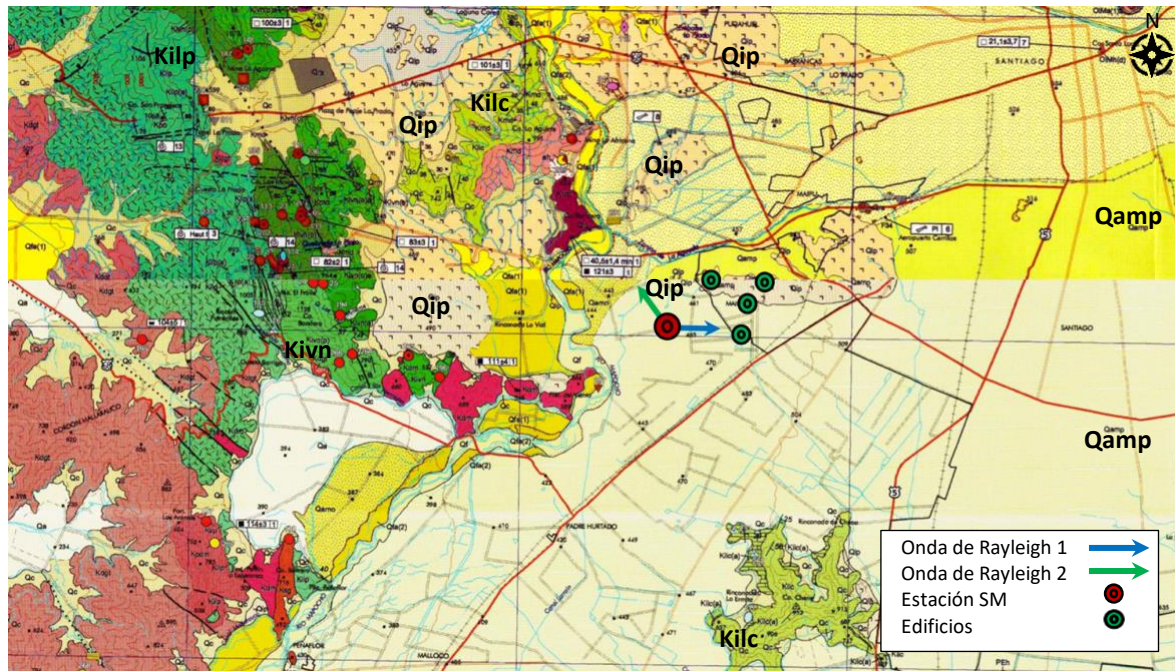


Figura 17: Mapa Geológico Área Til-Til Santiago y Talagante-San Francisco de Mostazal con ubicación de estaciones, edificios y orientación ondas de Rayleigh detectadas

En la Figura 17 se muestra que la dirección de la onda de Rayleigh 2, asociada a un ángulo de 305° , coincide con la ubicación de las formaciones rocosas ubicadas al noroeste y sureste de la estación. Esto, además, se relaciona con los resultados obtenidos para la Polaridad del Movimiento sísmico, donde la dirección de polarización para un periodo $T = 0.5$ [s] tiene azimut de 120° .

Adicionalmente, el azimut de las ondas de Rayleigh 1 de 89.5° coincide con la dirección en que se encuentra un sector de suelos blandos, rodeados por formaciones rocosas ya mencionadas, ubicado al oeste de la estación.

Haciendo el mismo análisis con el Mapa de Respuesta sísmica de la Figura 8, se analiza el mapa mostrado en la Figura 18.

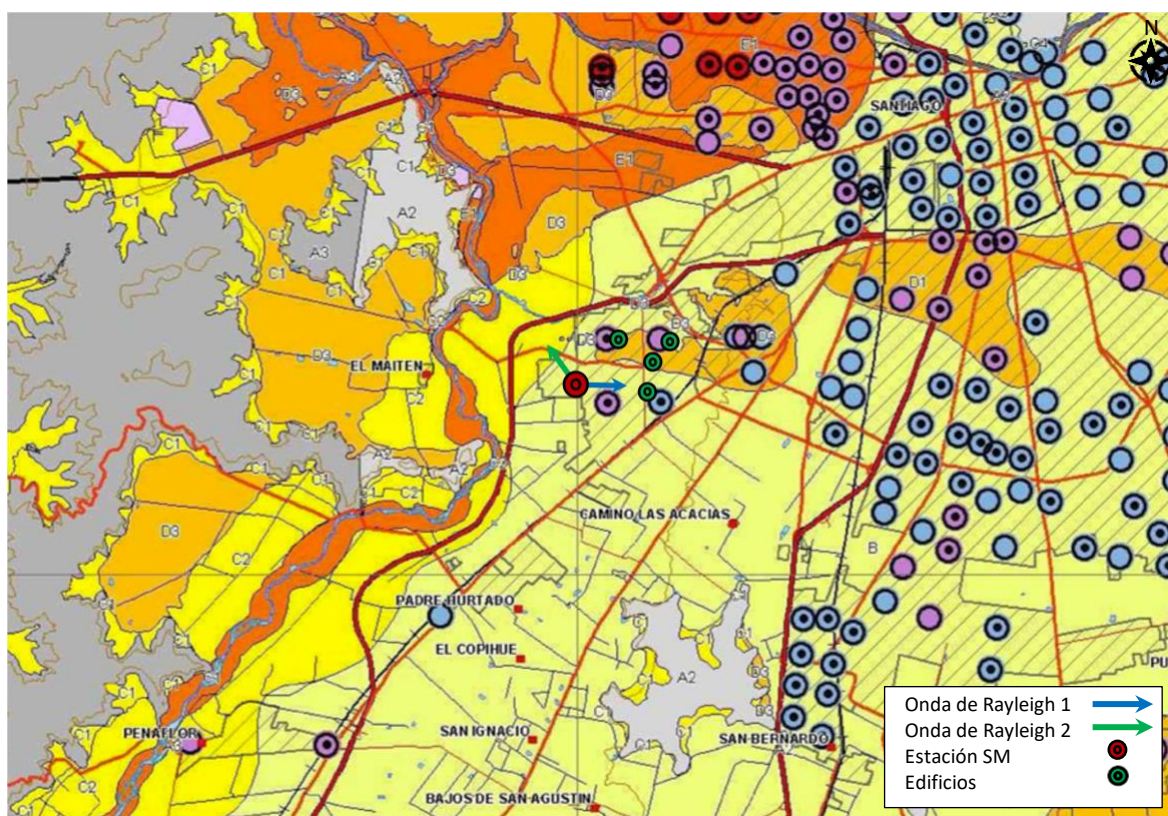


Figura 18: Mapa de respuesta sísmica de la Región Metropolitana

Se observa, al igual que en el mapa anterior, cómo coinciden las orientaciones de la polaridad del movimiento sísmico para el primer periodo analizado, y la dirección de las ondas de Rayleigh, con la ubicación de las formaciones rocosas.

Se evidencia además, con más claridad la zona de El Maitén, la cual está conformada de suelos de regular y mala respuesta sísmica rodeados por zonas de rocas. Esto indicaría una posible generación de las ondas de Rayleigh por efectos de borde de la cuenca, que fueron detectadas por la estación con un azimut de 89.5° .

5 Conclusiones

De lo expuesto en el documento se demostró cómo cada factor estudiado puede tener influencia en los registros de intensidades de la estación. En general, se comprobó que todos tienen un efecto sobre el caso de estudio, excepto los pulsos de velocidad, ya que el registro no puede ser considerado tipo *pulse-like*.

En el estudio de la geología del sector, donde se ubica la estación y los edificios ya mencionados, se observa que existen depósitos de rocas, correspondientes a la Formación Las Chilcas, Veta Negra y Lo Prado, con buena respuesta sísmica en base a su comportamiento para el Terremoto de Valparaíso de 1985, que rodean sectores de sedimentos, como depósitos aluviales del Río Maipo y flujos piroclásticos, con media a mala respuesta sísmica.

Luego, en cuanto a la polaridad del movimiento sísmico, se analizaron dos periodos de interés, uno donde se presenta el *peak* de aceleraciones espectrales, y otro donde se tiene una polaridad muy alta, tal que la razón $RotD100/RotD50$ tiene un valor cercano al máximo teórico de $\sqrt{2}$.

Para el primer periodo de $T = 0.5$ [s], se determina que el movimiento tiene una gran amplitud de desplazamiento cercano a los 17 [cm] con una dirección de 120° . Para el periodo de $T = 2.4$ [s], el movimiento también presenta una gran amplitud de desplazamiento mayor a los 20 [cm] y una inclinación de 30° . Se destaca una diferencia entre los dos periodos analizados, ya que el periodo $T = 0.5$ [s] se caracteriza por ser repetitivo en la duración del sismo. Contrario al caso del periodo $T = 2.4$ [s] que presenta movimiento con un comportamiento tipo pulso en una duración acotada, que no se repite en el tiempo y disminuye su magnitud.

Estos resultados indican que el movimiento si se puede considerar polarizado para ciertos periodos específicos, y muestra intensidades mayores a las de las direcciones de medición del dispositivo, lo que se observa en el Espectro de pseudo aceleraciones de la Figura 9, en que la ordenada espectral máxima del registro rotado excede, en general, a las ordenadas del registro en direcciones horizontales Este - Oeste y Norte - Sur.

En este punto se identifica que la dirección del movimiento polarizado para el periodo $T = 0.5$ [s] coincide con la dirección en que se encuentran las formaciones rocosas detectadas, en dirección noroeste y sureste de la estación. Además, se observa la relación entre la dirección del movimiento para el periodo $T = 2.4$ [s] y la orientación de los edificios mencionados respecto a la estación estudiada, mostrados en la Figura 1.

En base a la orientación y ubicación de los edificios Don Tristán y Don Luis mostrada en la Figura 2 y los resultados obtenidos para ambos periodos, se destaca la relación entre su ubicación respecto a la estación estudiada y la ubicación de los ejes principales de la estructura, con el movimiento polarizado. Ambos edificios tuvieron una falla en dirección Este – Oeste, lo cual es cercano a las dirección del periodo $T = 0.5$ [s], en que se presentaron aceleraciones máximas.

En la identificación de pulsos de velocidad en el registro, se obtuvo que el registro no se puede clasificar como *pulse-like* según el método y algoritmo utilizado, por lo que se concluye no existen fuertes pulsos de velocidad en el registro que generen aumentos de intensidad, en alguna dirección arbitraria, y no se considera un factor relevante dentro del estudio.

Para el comportamiento de las ondas de Rayleigh, se detectaron en el registro dos ondas, cada una con una dirección dada por un ángulo azimutal. Para la Onda 1, se detectó una señal con un azimut de 89.5° y una frecuencia predominante de 0.5 Hz. Para la Onda 2, se detectó una señal con un azimut de 305° y frecuencia predominante de 0.4 – 0.5 Hz y 1.5 – 2 Hz.

Si se consideran los resultados del estudio de la Geología del sector mostrados en la Figura 17, la Onda 2 se puede relacionar con la ubicación de las formaciones rocosas Lo Aguirre y Cerro Chena. Además, según lo expuesto anteriormente, se relaciona el ángulo de polarización de 120° para el periodo de $T = 0.5$ [s].

Adicionalmente, como se observó en el mapa de respuesta sísmica de la Figura 18, el sector de El Maitén está rodeado por formaciones rocosas, y coincide su orientación respecto a la estación estudiada con la de las Onda 1 detectada, en una dirección que además coincide con la Este – Oeste de medición del dispositivo.

Esto demuestra la presencia de ondas de Rayleigh fuertes en movimientos polarizados, y que afectan a las intensidades registradas en la Estación Santiago – Maipú debido a efectos de sitio y a reflexión de ondas superficiales. Según el estudio del suelo, se puede hipotetizar que las ondas superficiales de Rayleigh se generaron en las zonas de formaciones rocosas, por efectos de borde de la cuenca y se vieron amplificadas dentro de las zonas de suelos más blandos resultando altas intensidades que fueron registradas por la estación de estudio. Estas altas intensidades de onda pueden tener implicancia directa con los daños en estructuras en la comuna, destacando además las frecuencias de $0.5 - 2$ Hz, asociadas a una gran cantidad de energía.

De los antecedentes mostrados, se puede concluir que estos factores, exceptuando los pulsos de velocidad, si muestran una influencia sobre las intensidades registradas para el terremoto del Maule del 2010 en la Estación Santiago – Maipú. Se demostró que cada uno por sí solo afecta a la zona de estudio y las intensidades registradas, y además, se pudieron relacionar entre ellos, según lo esperado por la teoría.

Como recomendaciones para extender el estudio, se puede realizar el análisis de otros periodos para estudiar la polaridad y verificar si es coincidente con otras direcciones relevantes, ya que, como se mostró en la Figura 10, existen otros periodos en que la polaridad del movimiento se acerca a su valor teórico.

Además, se puede realizar un análisis en profundidad de la Región Metropolitana, incluyendo datos de las demás estaciones de la región, de la misma manera que fue estudiada esta, y corroborar si existen resultados similares o que se puedan relacionar entre sí. Al ser la región una zona con una variada geología y respuesta variable ante sismos, se pueden obtener resultados relevantes en otros puntos de análisis.

A modo de conclusión se observa cómo el sector estudiado presenta un comportamiento diferente debido, principalmente, a la variada geología y a la combinación de otros factores relevantes. Cabe destacar que la investigación mostrada y los resultados obtenidos no necesariamente corresponden a una única respuesta a lo ocurrido en la comuna de Maipú para el terremoto del Maule del 2010, ni tampoco es una explicación suficiente para las fallas de los edificios mencionados. Sin embargo, si representan un comportamiento esperado según los antecedentes mostrados.

6 Referencias

- Boore, D. M. (2010, agosto 1). Orientation-independent, nongeometric-mean measures of seismic intensity from two horizontal components of motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(4), 1830–1835. <https://doi.org/10.1785/0120090400>
- Boroschek, R., Soto, P., & Leon, R. (2010). *Registros del terremoto del Maule Mw = 8.8 27 de Febrero de 2010*. www.renadic.cl
- Heresi, P., Ruiz-García, J., Payán-Serrano, O., & Miranda, E. (2020). Observations of Rayleigh waves in Mexico City Valley during the 19 September 2017 Puebla–Morelos, Mexico earthquake. *Earthquake Spectra*, 36(S2), 62–82. <https://doi.org/10.1177/8755293020942547>
- Hong, H. P., & Goda, K. (2007). Orientation-dependent ground-motion measure for seismic-hazard assessment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5), 1525–1538. <https://doi.org/10.1785/0120060194>
- Leyton, F., Sepulveda, S. A., Astroza, M., Rebolledo, S., Acevedo, P., Ruiz, S., Gonzalez, L., & Fonca, C. (2011). *Seismic Zonation of the Santiago Basin, Chile*. 5th Internacional Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago, Chile.
- Meza-Fajardo, K. C., Papageorgiou, A. S., & Semblat, J. F. (2015). Identification and extraction of surface waves from three-component seismograms based on the normalized inner product. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1), 210–229. <https://doi.org/10.1785/0120140012>
- Montalva, G. A., Bastías, N., & Rodríguez-Marek, A. (2017). Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2), 901–911. <https://doi.org/10.1785/0120160221>
- Poulos, A., & Miranda, E. (2022). Proposal of orientation-independent measure of intensity for earthquake-resistant design. *Earthquake Spectra*, 38(1), 235–253. <https://doi.org/10.1177/87552930211038240>
- Sellés M., D., & Gana F., P. (2001). Geología del Área Talagante - San Francisco de Mostazal. En *Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica, No. 74. 1 mapa escala 1:100.000, 1 anexo*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Shahi, S. K., & Baker, J. W. (2014). An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5), 2456–2466. <https://doi.org/10.1785/0120130191>
- Vergara, L., & Verdugo, R. (2015). *Condiciones geológicas-geotécnicas de la cuenca de Santiago y su relación con la distribución de daños del terremoto del 27F*. Obras y Proyectos 17, 52–59.
- von Igel G., B., Naranjo S., J. A., & Wall Z., R. (2004). Respuesta sísmica de la Región Metropolitana de Santiago. En *Informe registrado IR-04-25. 1 mapa escala 1:250.000*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Wall Z., R., Sellés M., D., & Gana F., P. (1999). Área TilTil - Santiago. En *Mapas geológicos, No. 11. 1 mapa escala 1:100.000, 1 anexo*. Servicio Nacional de Geología y Minería.