



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE ESTRUCTURAS ALTAS EN
SECTOR NORPONIENTE DE SANTIAGO EMPLEANDO MÉTODOS DE
IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

IGNACIO VALENTÍN HORTA MUÑOZ

PROFESOR GUÍA:

FRANCISCO HERNÁNDEZ PRADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CÉSAR PASTÉN PUCHI

FELIPE OCHOA CORNEJO

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: IGNACIO VALENTÍN HORTA MUÑOZ
FECHA: MAYO 2019
PROF. GUÍA: FRANCISCO HERNÁNDEZ PRADO

ESTUDIO DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE ESTRUCTURAS ALTAS EN
SECTOR NORPONIENTE DE SANTIAGO EMPLEANDO MÉTODOS DE
IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS

En esta memoria se realiza una campaña de exploración geotécnica y de identificación de propiedades dinámicas de edificios en tres sectores de la ciudad de Santiago: El Cortijo, Santa Marta de Huechuraba e Hipódromo Chile. La ocurrencia de terremotos y la amplificación de la respuesta de depósitos blandos pueden someter a importantes sollicitaciones a estructuras emplazadas en este tipo de suelo. Es por esto que identificar las propiedades dinámicas de suelo y estructuras permite tener un primer acercamiento para cuantificar una posible vulnerabilidad ante un evento sísmico. En particular en esta memoria, se analizan los resultados que tienen que ver con fenómenos de doble resonancia, tanto en suelo como en estructuras. De la exploración geotécnica se encuentra que los tipos de suelo, según el V_{s30} calculado, en las áreas de estudio corresponde a tipo D, D y B, respectivamente. En términos de frecuencias fundamentales, se encuentra que los dos primeros sitios presentan una componente de amplificación de la respuesta del suelo considerable, mientras que el sector de Hipódromo Chile no presenta características que pueda asociarse a una amplificación sísmica significativa. Con el foco en que los sectores de El Cortijo y Santa Marta de Huechuraba, se encuentran edificios relativamente altos emplazados en los sectores cuyas frecuencias podrían estar cercanas a las del suelo, encontrando que si bien, todas las estructuras aledañas al sector de estudio se encuentran dentro de un rango de frecuencias en el cual se puede desarrollar el fenómeno de resonancia, sólo se encontró una estructura en cada sitio en cual uno de sus modos fundamentales es susceptible a amplificar en la frecuencia predominante del depósito. De estos resultados se concluye que existe una alta vulnerabilidad en estas estructuras, debido a la coincidencia entre la frecuencia predominante del suelo y una de las primeras tres formas modales del edificio. Con esto se propone realizar un trabajo futuro para la obtención de permisos e instrumentación permanente de estos edificios vulnerables a acciones sísmicas, junto con realizar un estudio más acabado considerando las implicancias de la interacción suelo-estructura que podrían tener un rol relevante en la respuesta sísmica de este tipo de edificios.

ASNF

A Son Never Forgets

A mis padres y familia, por las incontables muestras de amor y cariño.

Agradecimientos

Cómo evitar llegar a estas instancias y no mirar el camino recorrido a lo largo de estos años de formación profesional. Sin duda disfruté más el viaje que el valioso premio obtenido al final de esta hermosa carrera. A pesar de los altos y bajos emocionales que se viven, lo único que queda es el recuerdo de las personas con las que compartí, personas que marcaron mi vida y que siempre estarán en el corazón.

Agradezco, primeramente a Dios, mis padres, mi hermana y mi familia por darme el privilegio y las condiciones necesarias para estudiar y obtener este preciado título profesional. Sin Su gracia y favor, no hubiera sido capaz de lograr llegar a donde estoy. Gracias a mi madre, Pamela, que es el pilar más importante en mi vida, por su gran esfuerzo para proveernos lo necesario a mi hermana y a mí, por sus consejos, por sus palabras de ánimo y su infinito amor. Gracias a mi padre, Eugenio, por enseñarme desde niño a hacer las cosas con excelencia y a superarme cada día más, por sus muestras de afecto y por sus mensajes de ánimo. A pesar de su enfermedad catastrófica, siempre ha estado ahí apoyándome. Gracias a mi hermana, Vannessa, por su compañía incondicional, por sus muestras de amor, por ser mi pequeña gigante, por alegrarme los días difíciles y por aguantar a este mono que tiene por hermano. Gracias a mi Mama Chela, Tata Lelo, Tío Toño, Tío David y familias representadas, por siempre confiar en mí, por creer que puedo ser mejor que ayer, por amarme incondicionalmente y por sus muestras de cariño.

Quiero agradecer especialmente a mi profesor guía Francisco Hernández por su dedicación y ayuda en este trabajo. Sin duda, quedarán en mis recuerdos todos sus consejos y su manera tan apasionada de trabajar. Gracias profe por la confianza y por su tiempo, valioso tiempo que sirvió para conocerlo y compartir más allá de lo académico. También a los profesores de la comisión, César Pastén y Felipe Ochoa, que me guiaron en el proceso de aprendizaje y me recomendaron mejoras en este trabajo.

También agradecer a todas las personas involucradas en este trabajo. Miguel Sáez por su tremenda ayuda y paciencia para enseñarme la metodología necesaria para proceder, al profesor Pedro Soto por su ayuda en la etapa de identificación de estructuras y sus puntos de vista que me orientaron aún más en las metodologías. También, gracias a los estudiantes que me acompañaron a realizar las mediciones: Nacho, Nico, Rafa, Ivania y Sami.

Agradezco a mis amigos del Instituto Nacional, Fabo, Gordo y Jordan, que compartimos la experiencia de entrar a Bachi y forjamos una linda amistad que perdurará

por toda la vida. Gracias por los viajes, anécdotas y risas, sé que no serán las últimas, nos quedan muchas más.

Agradezco a mis amigos y amigas de Civil, Lucho, Ferri, Betula, Edutop, Mai, Pelao, Manu Javierao, Caralaina, Willy, Pame, Malondra, Daslav, Conie, Paul Lakes, Pato, LuchoPai, Pep, Trejo y Baldo, por hacer de mis últimos años en la facultad los mejores de todo el proceso, por las risas, por las historias, por el apoyo, gracias totales.

Agradezco también a mis amigos y amigas Bachi-Civiles, Isa, Rodri, Alvaro, Javi, Cata, Fabi, Sol y Nati por su buena onda en los primeros años de esta carrera y por los buenos momentos que vivimos.

Agradezco a TokoRiko, lo más grande que haya existido en Civil y la FCFM. Gracias cabros por el aguante y los buenos momentos vividos

Amigos y amigas de CCI por siempre estar pendientes de mi proceso, por animarme en los tiempos difíciles y por apoyarme con sus palabras. Gracias totales: KT, César, Aland, Conejo, Naty, David, Feli B., Heraldito, Mati, Isma, Pablo R., Paletita, Poly y Cristi.

Tabla de Contenido

Capítulo 1 : Introducción	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivo General	3
1.3 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Estructura de Memoria	4
Capítulo 2 : Antecedentes	5
2.1 Colapso de Edificios en Terremoto Puebla 2017.....	5
2.2 Caracterización Sismo-Geológica de Chile	6
2.3 Características Geomorfológicas de la Cuenca de Santiago	7
2.4 Estudios Previos en la Cuenca de Santiago	9
2.5 Áreas de Interés y Propuesta de Estudio.....	15
2.6 Descripción de Lugares y Edificios.....	17
Capítulo 3 : Marco Teórico	30
3.1 Marco Teórico Geotécnico.....	30
3.2 Métodos de Identificación de Estructuras	37
3.3 Interacción Dinámica Suelo-Estructura.....	42
Capítulo 4 : Resultados de Estudios de Suelos	46
4.1 Elección de Curvas de Dispersión	47
4.2 Perfiles de Velocidad de Onda de Corte en Profundidad.....	49
4.3 Razones Espectrales H/V.....	57
4.4 Resumen de Resultados.....	64
Capítulo 5 : Resultados de Identificación de Estructuras	65
5.1 Identificación SSI y PSD.....	65
5.2 Formas Modales	68
5.3 Resumen de Resultados.....	73
Capítulo 6 : Análisis de Resultados y Discusión	74
6.1 El Cortijo	74
6.2 Hipódromo Chile	76
6.3 Santa Marta de Huechuraba	77
6.4 Discusiones Generales.....	78
Capítulo 7 : Conclusiones y Recomendaciones	80
7.1 Conclusiones.....	80
7.2 Recomendaciones.....	82
Bibliografía	85
Anexos	94

Índice de Tablas

Tabla 2-1 Características edificio El Cortijo Oriente.	19
Tabla 2-2 Características edificio El Cortijo Poniente.	21
Tabla 2-3 Características edificio Hipódromo Poniente.	24
Tabla 2-4 Características edificio Hipódromo Oriente.	25
Tabla 2-5 Características edificio Huechuraba Poniente.	27
Tabla 2-6 Características edificio Huechuraba Oriente.	29
Tabla 4-1 Resumen de valores perfil de velocidad de onda de corte para arreglo lineal en El Cortijo.	50
Tabla 4-2 Resumen de valores perfil de velocidad de onda de corte para arreglo triangular en El Cortijo.	51
Tabla 4-3 Resumen de valores perfil de velocidad de onda de corte para arreglo triangular en Hipódromo Chile.	52
Tabla 4-4 Resumen de valores perfil de velocidad de onda de corte para arreglo lineal en Hipódromo Chile.	53
Tabla 4-5 Resumen de valores perfil de velocidad de onda de corte para arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba.	54
Tabla 4-6 Resumen de valores perfil de velocidad de onda de corte para arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba.	55
Tabla 4-7 Resumen de valores perfil de velocidad de onda de corte para arreglo triangular en Santa Marta de Huechuraba.	56
Tabla 4-8 Resumen de HVSR para arreglo lineal en El Cortijo.	57
Tabla 4-9 Resumen de HVSR para arreglo triangular en El Cortijo.	58
Tabla 4-10 Resumen de HVSR para medición particular en El Cortijo.	58
Tabla 4-11 Resumen de HVSR para arreglo triangular en Hipódromo Chile.	59
Tabla 4-12 Resumen de HVSR para arreglo lineal en Hipódromo Chile.	60
Tabla 4-13 Resumen de HVSR para arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba.	61
Tabla 4-14 Resumen de HVSR para arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba.	62
Tabla 4-15 Resumen de HVSR para arreglo triangular en Santa Marta de Huechuraba.	62
Tabla 4-16 Resumen de HVSR para medición particular en Santa Marta de Huechuraba.	63
Tabla 4-17 Resumen de resultados obtenidos de estudio de suelos.	64
Tabla 5-1 Frecuencias identificadas para edificio El Cortijo Oriente con método SSI y PSD.	66
Tabla 5-2 Frecuencias identificadas para edificio El Cortijo Poniente con método SSI y PSD.	66
Tabla 5-3 Frecuencias identificadas para edificio Hipódromo Oriente con método SSI y PSD.	67
Tabla 5-4 Frecuencias identificadas para edificio Hipódromo Poniente con método SSI y PSD.	67
Tabla 5-5 Frecuencias identificadas para edificio Huechuraba Oriente con método SSI y PSD.	68
Tabla 5-6 Frecuencias identificadas para edificio Huechuraba Poniente con método SSI y PSD.	68
Tabla 5-7 Tabla resumen de resultados de identificación de estructuras.	73

Índice de Figuras

Figura 2-1 Mapa de la geología superficial de la Cuenca de Santiago (Salomón, 2017) (Mod. Leyton et al., 2011).....	8
Figura 2-2 Intensidades sísmicas en la ciudad de Santiago. Comparación entre terremoto de 1985 (izquierda) y terremoto de 2010 (derecha) (Molina, 2011).....	9
Figura 2-3 Comparación de aceleraciones entre estaciones R07M (El Cortijo) y R02M (Santiago Centro).....	11
Figura 2-4 Comparación de aceleraciones entre estaciones R16M (Hipódromo Chile) y R02M (Santiago Centro).....	12
Figura 2-5 Comparación de aceleraciones entre estaciones P (Pedro Fontova - Renadic) y R02M (Santiago Centro).....	13
Figura 2-6 Interpolación de frecuencias fundamentales de las razones espectrales (Pasten, 2007).....	14
Figura 2-7 Áreas de estudio a analizar (encerradas en círculos magenta).....	15
Figura 2-8 Vista general de la ciudad de Santiago. Las zonas de interés de este estudio son: El Cortijo (azul), Santa Marta de Huechuraba (rojo) e Hipódromo Chile (verde). (Fuente: Google Earth Pro).....	17
Figura 2-9 Vista particular del sector de El Cortijo. El marcador en amarillo indica el lugar de medición en suelo. Los marcadores rojos (A y B) indican la ubicación de los edificios medidos. El marcador blanco indica la ubicación de la estación sismológica (R07M). (Fuente: Google Earth Pro).....	18
Figura 2-10 Imagen satelital del lugar de medición en suelo en El Cortijo. A la izquierda se muestra la primera configuración, a la derecha la segunda. (Fuente: Google Earth Pro).....	19
Figura 2-11 Fotografías de edificio El Cortijo Oriente.....	20
Figura 2-12 Boceto de planta de edificio El Cortijo Oriente.....	20
Figura 2-13 Fotografías de edificio El Cortijo Poniente.....	21
Figura 2-14 Boceto de planta de edificio El Cortijo Poniente.....	21
Figura 2-15 Vista particular del sector de Hipódromo Chile. El marcador en amarillo indica el lugar de medición en suelo. Los marcadores rojos (A y B) indican la ubicación de los edificios medidos. El marcador blanco indica la ubicación de la estación sismológica (R16M). (Fuente: Google Earth Pro).....	22
Figura 2-16 Imagen satelital del lugar de medición en suelo en Hipódromo Chile. A la izquierda se muestra la primera configuración, a la derecha la segunda. (Fuente: Google Earth Pro).....	23
Figura 2-17 Fotografías edificio Hipódromo Poniente.....	24
Figura 2-18 Boceto de planta de edificio Hipódromo Oriente.....	24
Figura 2-19 Fotografías edificio Hipódromo Oriente.....	25
Figura 2-20 Boceto de planta de edificio Hipódromo Oriente.....	25
Figura 2-21 Vista particular del sector de Santa Marta de Huechuraba. Los marcadores en amarillo indican los lugares de medición en suelo. Los marcadores rojos (A y B) indican la ubicación de los edificios medidos. El marcador blanco indica la ubicación de la estación sismológica (P). (Fuente: Google Earth Pro).....	26
Figura 2-22 Imagen satelital de los lugares de medición de suelo en Santa Marta de Huechuraba. Se muestran las tres configuraciones utilizadas de códigos 003, 004 y 005, de izquierda a derecha respectivamente. (Fuente: Google Earth Pro).....	27
Figura 2-23 Fotografías edificio Huechuraba Poniente.....	28
Figura 2-24 Boceto de planta de edificio Huechuraba Poniente.....	28
Figura 2-25 Fotografías edificio Huechuraba Oriente.....	29
Figura 2-26 Boceto de planta de edificio Huechuraba Oriente.....	29
Figura 3-1 Desplazamientos ocurridos debido al paso de ondas P (imagen superior) y S (imagen inferior) a través de un medio (Mod. Shearer, 2009).....	31

Figura 3-2 Desplazamientos ocurridos debido al paso de ondas Love (imagen superior) y ondas Rayleigh (imagen inferior) (Mod. Shearer, 2009).....	32
Figura 4-1 Resultados de curvas de dispersión para las mediciones en El Cortijo e instrumentos utilizados.	47
Figura 4-2 Resultados de curvas de dispersión para las mediciones en Hipódromo Chile e instrumentos utilizados.....	48
Figura 4-3 Resultados de curvas de dispersión para las mediciones en Santa Marta de Huechuraba e instrumentos utilizados.....	48
Figura 4-4 (a) Perfil de velocidad de onda de corte en profundidad y (b) curva de dispersión del modelo para un arreglo lineal en El Cortijo.....	50
Figura 4-5 (a) Perfil de velocidad de onda de corte en profundidad y (b) curva de dispersión del modelo para un arreglo triangular en El Cortijo.	51
Figura 4-6 (a) Perfil de velocidad de onda de corte en profundidad y (b) curva de dispersión del modelo para un arreglo triangular en Hipódromo Chile.	52
Figura 4-7 (a) Perfil de velocidad de onda de corte en profundidad y (b) curva de dispersión del modelo para un arreglo lineal en Hipódromo Chile.....	53
Figura 4-8 (a) Perfil de velocidad de onda de corte en profundidad y (b) curva de dispersión del modelo para un arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba.....	54
Figura 4-9 (a) Perfil de velocidad de onda de corte en profundidad y (b) curva de dispersión del modelo para un arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba.....	55
Figura 4-10 (a) Perfil de velocidad de onda de corte en profundidad y (b) curva de dispersión del modelo para un arreglo triangular en Santa Marta de Huechuraba.	56
Figura 4-11 Razones espectrales H/V para arreglo lineal en El Cortijo. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).....	57
Figura 4-12 Razones espectrales H/V para arreglo triangular en El Cortijo. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).....	58
Figura 4-13 Razones espectrales H/V para la medición particular en El Cortijo. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).....	58
Figura 4-14 Razones espectrales H/V para arreglo triangular en Hipódromo Chile. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).....	59
Figura 4-15 Razones espectrales H/V para arreglo lineal en Hipódromo Chile. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).....	60
Figura 4-16 Razones espectrales H/V para arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).....	61
Figura 4-17 Razones espectrales H/V para arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).....	61
Figura 4-18 Razones espectrales H/V para arreglo triangular en Santa Marta de Huechuraba. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).....	62
Figura 4-19 Razones espectrales H/V para la medición particular en Santa Marta de Huechuraba. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).	63
Figura 5-1 Formas modales de edificio El Cortijo Oriente a partir de metodología SSI.....	69
Figura 5-2 Formas modales de edificio El Cortijo Poniente a partir de metodología SSI.....	70
Figura 5-3 Formas modales de edificio Hipódromo Oriente a partir de metodología SSI.....	71
Figura 5-4 Formas modales de edificio Hipódromo Poniente a partir de metodología SSI.....	72

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

A nueve años de la ocurrencia del 27F Mw=8.8, uno de los terremotos más grandes registrados en el mundo (Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile, 2012), es posible apreciar que han ocurrido avances en la ingeniería estructural y geotécnica en el país a raíz de este evento, tanto en estudios realizados como en actualización de la normativa vigente. Esta última, se debe principalmente a la observación del comportamiento de las estructuras mayormente afectadas por el sismo y por los daños sufridos por la gran liberación de energía del fenómeno.

Considerando los estudios en la cuenca de Santiago, se tiene como foco de estudio los daños que sufrieron las edificaciones de la comuna de Huechuraba, donde al menos cuatro edificios sufrieron daños importantes en el sector de Ciudad Empresarial y otros tres en el sector de Pedro Fontova (Molina, 2011). Estos daños provocaron que se decretaran como inhabitable, severamente dañado o con riesgo evidente de desplome (Molina, 2011). También, se tiene que Huechuraba es una de las comunas con mayor

porcentaje de edificaciones dañadas que quedaron habitables pero a la espera de reparaciones y/o inhabitables, en conjunto con la comuna de Cerro Navia (Vergara, 2015).

Con estos acontecimientos, se plantea la pregunta sobre si el origen de los daños observados es por el tipo de suelo que se emplazan las estructuras, por problemas en el cálculo estructural o problemas constructivos. Los estudios y la evidencia suelen indicar que el problema puede tener relación con el tipo de suelo donde se construye.

Existen diferentes estudios que indican que el sector norponiente de Santiago posee suelos blandos, considerados comúnmente de baja calidad, los cuales poseen frecuencias menores a 2.0 [Hz], incluso algunos sectores poseen un rango de frecuencias fundamentales entre 0.15 y 0.5 [Hz] (Pasten, 2007).

En desmedro de la comuna de Cerro Navia, la plusvalía del sector norponiente de Santiago (Huechuraba, Conchalí e Independencia) ha ido en aumento en los últimos 10 años. Esto es debido a los nuevos accesos construidos y obras de vialidad, entre ellos el Túnel San Cristóbal, la autopista Vespucio Norte Express, la Línea 3 de Metro de Santiago y accesos secundarios al sector de Pedro Fontova en Huechuraba. Esto ha ido potenciando el sector dado que los tiempos de viaje a los núcleos de la ciudad han disminuido considerablemente, fomentando la construcción de infraestructura habitacional en el sector. Con estas ventajas, no es descabellado pensar que el negocio inmobiliario irá en aumento cada año y, como los terrenos para vivienda tienden a agotarse, la opción será la construcción de edificaciones en altura.

Recientemente se ha reactivado el interés de estudio poniendo foco en el sector norponiente de la capital. Esto es debido al terremoto ocurrido el 19 de septiembre de 2017 en la zona centro-sur de México. En este evento se contabilizaron 3400 estructuras dañadas y 44 de estas son edificios que colapsaron por incumplimientos de la norma vigente, pero también por características propias del suelo donde se encontraban emplazadas. Los efectos post-terremoto fueron estudiadas por un grupo de docentes del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Una de las principales conclusiones del estudio fue que las condiciones que propiciaron el desastre ocurrido en Ciudad de México son parcialmente extrapolables a la zona norponiente de Santiago, específicamente comunas como Huechuraba, Lampa y Pudahuel (Comunicaciones FCFM - U. de Chile, 2017).

En el mismo contexto de entrega de conclusiones luego de la visita de los académicos, el profesor Francisco Hernández señala que: “El significativo efecto de amplificación de suelos en frecuencias bajas no se observó anteriormente, fundamentalmente porque la zona de Huechuraba no ha tenido estructuras muy altas, y

el suelo blando con estructuras bajas genera una especie de aislación, por hoy en día se están construyendo estructuras del orden de 15 pisos que podrían ser bastante susceptibles a este movimiento de suelo.” (Comunicaciones FCFM - U. de Chile, 2017).

1.2 Objetivo General

Realizar un estudio de vulnerabilidad sísmica de estructuras altas, superior a 13 pisos en el sector norponiente de Santiago mediante el uso de instrumentos de identificación de estructuras y de prospecciones geofísicas del suelo circundante.

1.3 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de esta memoria son los siguientes:

- Realizar una revisión general de la zona en que se encuentra el suelo fino de la zona norponiente de Santiago, para analizar si existen edificios altos que pudiesen ser altamente afectado por la amplificación de suelo.
- Determinar las propiedades del suelo colindante y/o cercano a la estructura de interés, mediante instrumentación y toma de datos de microvibraciones ambientales.
- Realizar estudio de propiedades dinámicas de estructuras altas de interés ya construida, mediante instrumentación y mediciones de microvibraciones ambientales.
- Realizar mediciones de campo de microvibraciones de suelo y emplear técnicas SPAC para determinar propiedades del subsuelo, curvas de dispersión y perfiles de velocidades del subsuelo de manera de complementar los estudios en la cercanía de estructuras altas en la zona a estudiar.
- Identificar estructuras altas existentes que sean proclives a ser altamente demandadas debido al tipo de suelo en el cual se fundan. De manera de llevar a cabo estudios más detallados en investigaciones posteriores.

1.4 Estructura de Memoria

La memoria contiene siete capítulos incluyendo el de introducción. En el capítulo 2 se entregan los antecedentes que sustentan el estudio realizado. Junto con esto se analizarán los lugares de estudio, teniendo presente las condiciones de terreno y de edificaciones existentes en el sector.

En el capítulo 3 se presentará el marco teórico de la memoria. En los tópicos de geotecnia, se explicarán los fundamentos de la propagación de ondas superficiales y su relación con las ondas de Rayleigh, descripción del método de Nakamura y la obtención de curvas HVSR, el concepto de correlación cruzada de ruido sísmico y la velocidad de onda de corte del suelo, descripción de los cálculos involucrados para obtener curvas de dispersión de velocidad de fase y la generación de perfiles de velocidades del subsuelo. Luego se describirá todo lo relacionado con identificación de estructuras. Aquí se describen las metodologías utilizadas para la obtención de las propiedades dinámicas de las estructuras estudiadas, principalmente las consideraciones teóricas de los métodos SSI y PSD. Por último, se describirá la interacción dinámica suelo-estructura, cuáles son los parámetros para analizar y que pueden generar problemas en caso de la existencia de un evento sísmico. Específicamente se describe acerca del efecto de resonancia y las condiciones que se deben dar para tener problemas en estructuras edificadas sobre un suelo que puede amplificar.

En el capítulo 4 se muestran los resultados encontrados en suelos con las mediciones realizadas en estos y las propiedades que se pueden entregar utilizando las metodologías mostradas en el capítulo 3. Al final de cada medición realizada se entrega una tabla resumen con los principales resultados obtenidos.

En el capítulo 5 se muestran los resultados encontrados en las estructuras de interés analizadas luego de haber realizado las campañas de mediciones, junto con las propiedades dinámicas encontradas usando los métodos de identificación señalados en el capítulo 3.

Por último, en el capítulo 6 y 7 se analizan los resultados obtenidos y se proporcionan los comentarios y recomendaciones correspondientes al estudio realizado. Se abarcan los temas considerados en el capítulo 3 y si es que existen o no estructuras que sean propensas efectos de amplificación sísmica. También se proponen consideraciones para futuros estudios de este tipo, que consideren tanto suelo como estructuras existentes.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1 Colapso de Edificios en Terremoto Puebla 2017

El día 19 de septiembre de 2017 tuvo la ocurrencia el terremoto de Puebla-Morelos de una magnitud $M_w=7.1$, a una profundidad de 57 [km] y de tipo intraplaca. En este suceso se contabilizaron 8405 edificaciones con algún nivel de daño y, lo más alarmante, 44 de estos sufrieron colapso (F. Hernández et al., 2019).

La ciudad de México es conocida mundialmente por el suelo en el cual se fundan las estructuras de ingeniería civil. La característica principal es que estos depósitos están compuestos por material de suelo blando, que poseen velocidades de onda de corte entre 50 y 100 [m/s] y con periodos fundamentales que van desde los 0.5 a 3.5 [s]. Estas características se relacionan al hecho de que estructuras de un periodo cercano al suelo en que se emplazan (resonancia) pueden ser bastante susceptibles dado que estos suelos amplifican notoriamente el movimiento sísmico en las frecuencias fundamentales de las estructuras.

Particularmente en el terremoto de Puebla-Morelos se observó el colapso de estructuras fundadas en suelo blando de 4 a 10 pisos. Estas estaban emplazadas sobre suelos con periodos predominantes entre 0.7 a 2.2 [s] (F. Hernández et al., 2019). Aquí es posible ver la correspondencia entre periodos de estructuras y suelo que pueden generar el problema de resonancia en estructuras.

Por otra parte, los registros de las aceleraciones utilizados para la obtención de los espectros elásticos de respuesta arrojaron información con respecto al contenido de frecuencias del terremoto ocurrido. En este se puede apreciar que el sismo contenía una cantidad considerablemente alta de energía para periodos bajos, pero no así para periodos mayores a 1.7 [s] (F. Hernández et al., 2019).

Como conclusión del trabajo de Hernández et al. (2019) se desprende que el colapso de los edificios se produjo, principalmente, al aumento de la respuesta estructural debido a que estos se encontraban fundados en suelo blando susceptible al efecto de amplificación dinámica y la estructuración no permitió un correcto desempeño estructural.

2.2 Caracterización Sismo-Geológica de Chile

Los depósitos de suelos superficiales constituyen el material donde se fundan la gran mayoría de las obras de ingeniería del país. Por esta razón es necesario conocer cuáles son sus características, especialmente ante la ocurrencia de terremotos, tan habituales en el país debido a la alta actividad entre las placas tectónicas Sudamericana y de Nazca que generan terremotos recurrentes a lo largo y ancho del país.

La microzonificación sísmica representa una estimación del comportamiento de depósitos ante una excitación sísmica. A su vez, esta es cuantificada generalmente a través de estimaciones de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas de corte de un estrato superficial de 30 [m] de espesor (Rauld et al., 2015), también conocida como V_{s30} .

Este dato permite evaluar en términos muy generales la amplificación y periodos característicos que tendrían los suelos donde se emplaza una estructura. Es por esto por lo que estudios de este tipo permiten definir lugares propensos a sufrir daños considerables ante excitaciones sísmicas. Estos se generan principalmente por la baja calidad del suelo, que se ve reflejado en bajas velocidades de onda de corte a lo largo de 30 metros de profundidad.

Actualmente la normativa vigente clasifica los tipos de suelos existentes en el territorio según la velocidad de onda de corte a 30 metros de profundidad, como se aprecia en el NCh433 Of.1996 Modificada (INN-Chile, 2009). Luego de la ocurrencia del 27F, se sumaron nuevos tipos de suelos a la clasificación, suceso reflejado en el Decreto Supremo N°61(República de Chile, 2011).

Según el criterio anteriormente explicado, el estudio de Rauld et al. (2015) realiza un mapa de microzonificación a nivel del territorio nacional e insular a partir de información geológica y topográfica. De este estudio se correlacionan ubicaciones en las cuales existirían suelos de baja calidad, E y D según NCh433 Of.1996 (Modificada 2009) y DS N°61 (2011), en donde se encontrarían V_{s30} inferiores a 400 [m/s].

Las principales ciudades que presentan suelos de baja calidad a nivel nacional, que se desprenden del estudio anterior, son: Calama, Mejillones, Viña del Mar, Norte de Santiago, Concepción, Villarrica, Valdivia, Osorno, Puerto Montt, Castro y Porvenir.

2.3 Características Geomorfológicas de la Cuenca de Santiago

El presente estudio se realiza en la depresión central de la ciudad de Santiago, también conocida por la comunidad científica como la Cuenca de Santiago. Esta ha sido altamente estudiada obteniendo un mapa de geología superficial que se presenta en la Figura 2-1. Leyton et al. (2011) propuso ocho unidades geológicas, donde 2 de ellas presentan variante (a) y (b), proponiendo un total de diez.

Los lugares de estudio se encuentran en la unidad geológica VII denominada como Finos del Noroeste (Leyton et al., 2011). Esta se encuentra constituida por depósitos de limos y arcillas con intercalaciones de gravas, arenas y cenizas. Más aún, las arcillas de este depósito se caracterizan por su alta plasticidad. Por otro lado, el nivel freático del sector se encuentra, en general, a poca profundidad. En efecto, se puede decir que estos tipos de suelos poseen muy malas condiciones para resistir fundaciones y, aunque no se tiene evidencia clara, su comportamiento dinámico es deficiente ante una sollicitación sísmica (Pasten, 2007).

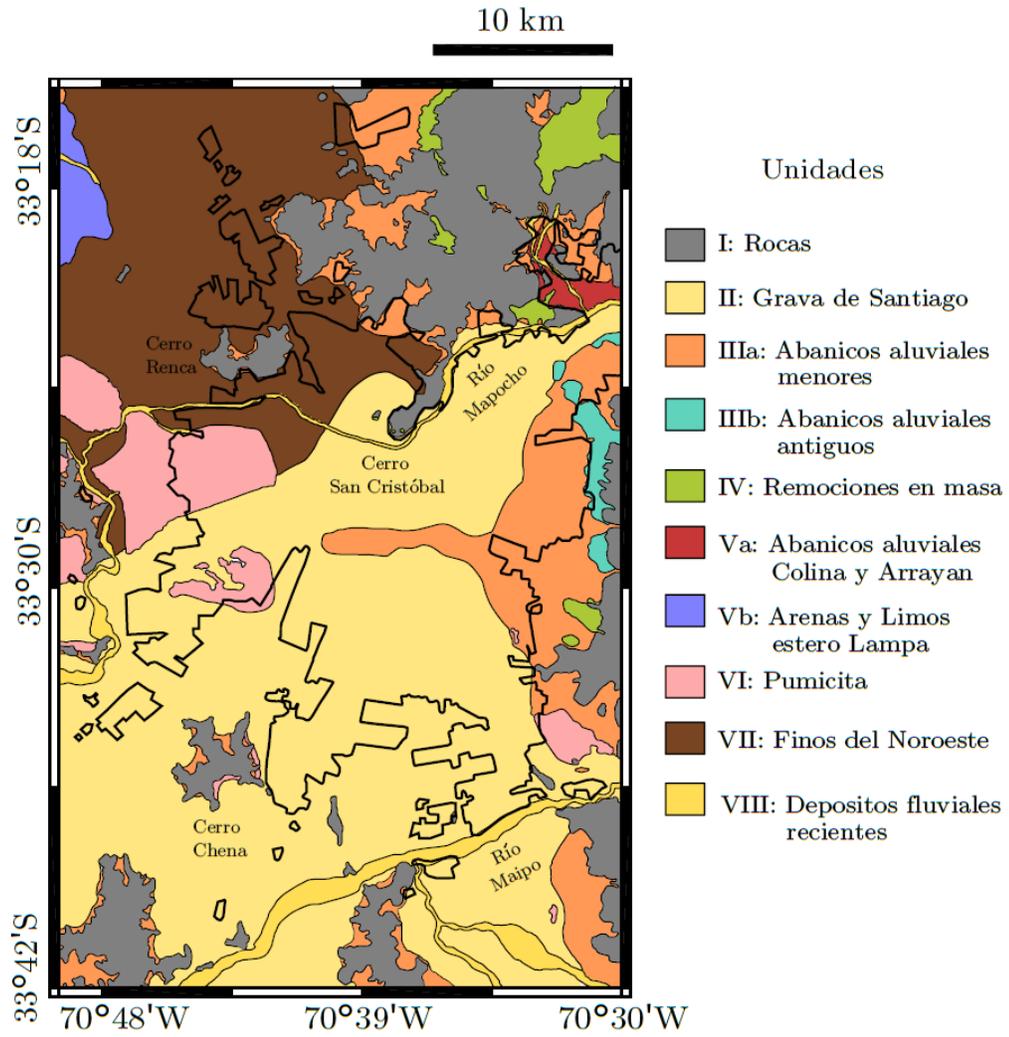


Figura 2-1 Mapa de la geología superficial de la Cuenca de Santiago (Salomón, 2017) (Mod. Leyton et al., 2011).

2.4 Estudios Previos en la Cuenca de Santiago

2.4.1 Intensidades sísmicas en 27F y terremoto de Algarrobo de 1985

Se conoce como intensidad sísmica a la medida no instrumental de los efectos que produce el movimiento del suelo en las personas, los objetos, las construcciones o la naturaleza. A partir de encuestas de daños en estructuras (principalmente viviendas), es posible generar un catastro de ellos y agruparlos según distribución geográfica. Esto fue realizado por Molina (2011) quien logró comparar las intensidades sísmicas MKS-64 de los terremotos de 1985 ($M_w=7.8$) y 2010 ($M_w=8.8$), las cuales se aprecian en la Figura 2-2.

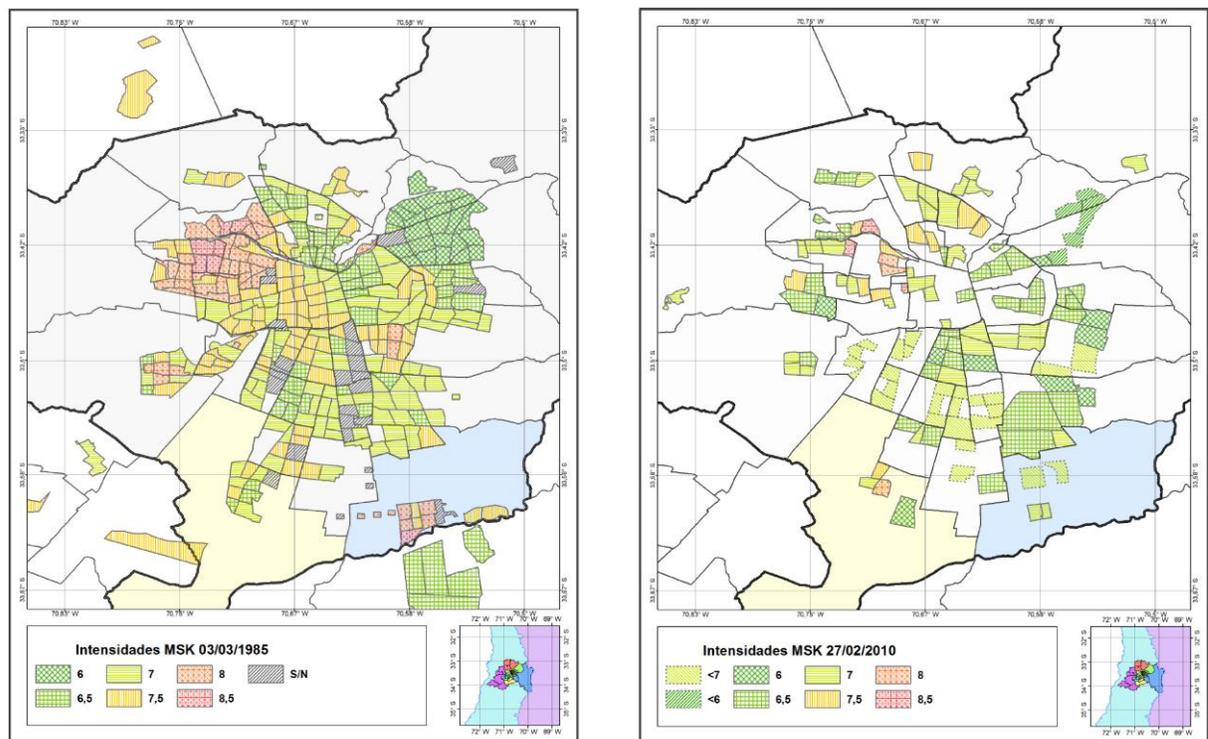


Figura 2-2 Intensidades sísmicas en la ciudad de Santiago. Comparación entre terremoto de 1985 (izquierda) y terremoto de 2010 (derecha) (Molina, 2011).

De este estudio se concluye que para ambos terremotos las intensidades más altas se obtienen en sectores ubicados en el norponiente de Santiago (Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile, 2012), sobre depósitos de arcilla y limo (Leyton et al., 2011).

2.4.2 Colapso de Puentes durante el terremoto del 27F

Luego del 27F, exclusivamente en el sector norponiente de Santiago, se observaron diversos daños en puentes y pasos peatonales emplazados en los suelos denominados Finos del Noroeste. Los puentes afectados forman parte de la autopista concesionada Vespucio Norte, donde 3 de los 11 de la autopista resultaron dañados. Dos de estos sufrieron el desmonte y colapso de la superestructura debido a una mesa insuficiente de apoyo.

Un antecedente particular es que en puentes de la autopista Vespucio Sur (emplazados en la Grava de Santiago) se utilizó la misma estructuración. Sin embargo, no se registraron daños en estos, lo que puede indicar que los daños observados en el sector norte de la capital se asocian a efectos locales producidos por amplificaciones importantes de las ondas sísmicas y mala calidad del suelo (Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile, 2012).

En la intersección de Américo Vespucio con Independencia se emplazan dos puentes que, si bien no colapsaron, resultaron gravemente dañados. El puente norte poseía un tope sísmico transversal de hormigón el cual falló completamente, limitando el colapso de la superestructura. En tanto, el puente sur sufrió considerables desplazamientos, donde los topes-anclajes cedieron, hasta casi producirse el colapso del puente. Por otra parte, otro puente, que no forma parte de la autopista Vespucio Norte, es el que se encuentra sobre Av. Manuel Antonio Matta, el cual sufrió colapso en uno de sus apoyos (Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile, 2012).

Los puentes anteriormente descritos delimitan un área en el sector norponiente de Santiago, en la cual se encuentra el sector de El Cortijo. Este es de alto interés debido a la presencia de estructuras altas y resulta atractivo conocer más acerca del suelo que se encuentra en este sector.

2.4.3 Comparación de Aceleraciones en Estaciones Sismológicas

Actualmente se dispone de una red sismológica en Santiago a cargo del Centro Sismológico Nacional y la Onemi, en la cual se disponen instrumentos que miden en forma continua los diferentes movimientos telúricos que se sienten en la cuenca. Con los registros de los sismos obtenidos es posible graficar las aceleraciones que se miden y comparar mismos registros en diferentes estaciones con tal de analizar qué tanto se amplifica la respuesta según la ubicación del instrumento.

Cercanos a los potenciales sectores de estudio, se tienen tres estaciones sismológicas con las que se comparan sus aceleraciones con las registradas en la estación R02M ubicada en el centro de Santiago, cercana al Parque O'Higgins. Las estaciones utilizadas son: R07M (El Cortijo), R16M (Hipódromo Chile) y P (Pedro Fontova - Renadic). En la Figura 2-3, Figura 2-4 y Figura 2-5, se pueden apreciar las comparaciones de las aceleraciones. También se observan los espectros de potencia (PSD) y los espectros elásticos asociados al evento sísmico según la aceleración del sitio.

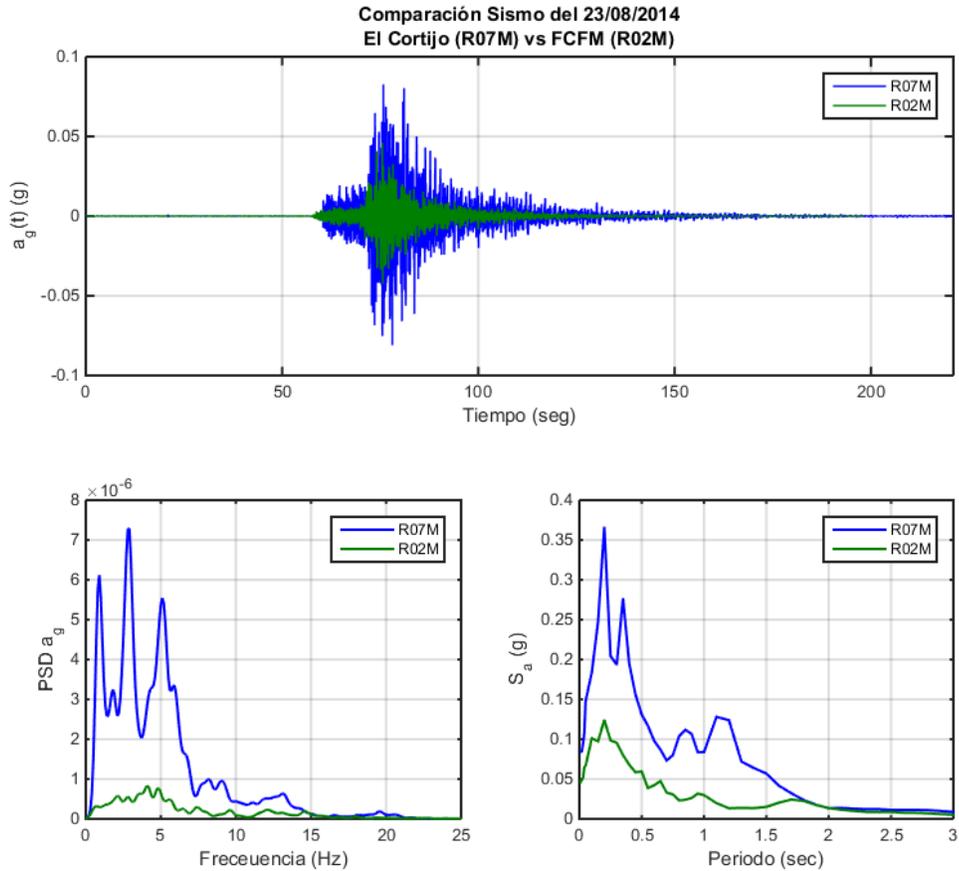


Figura 2-3 Comparación de aceleraciones entre estaciones R07M (El Cortijo) y R02M (Santiago Centro).

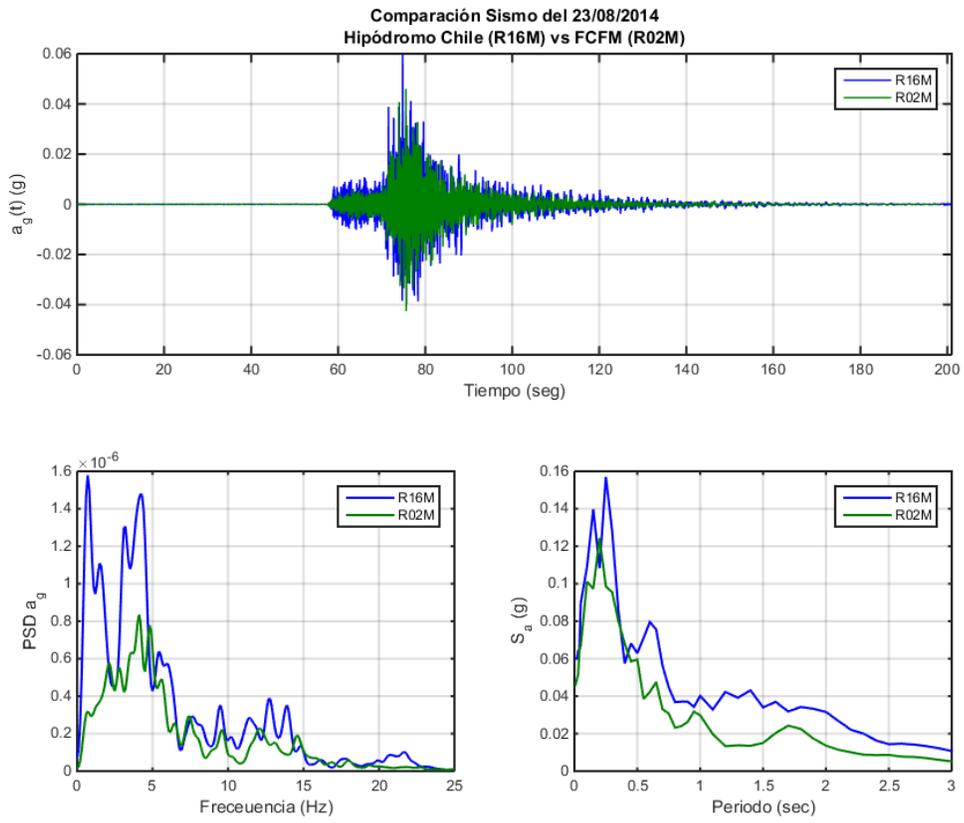


Figura 2-4 Comparación de aceleraciones entre estaciones R16M (Hipódromo Chile) y R02M (Santiago Centro).

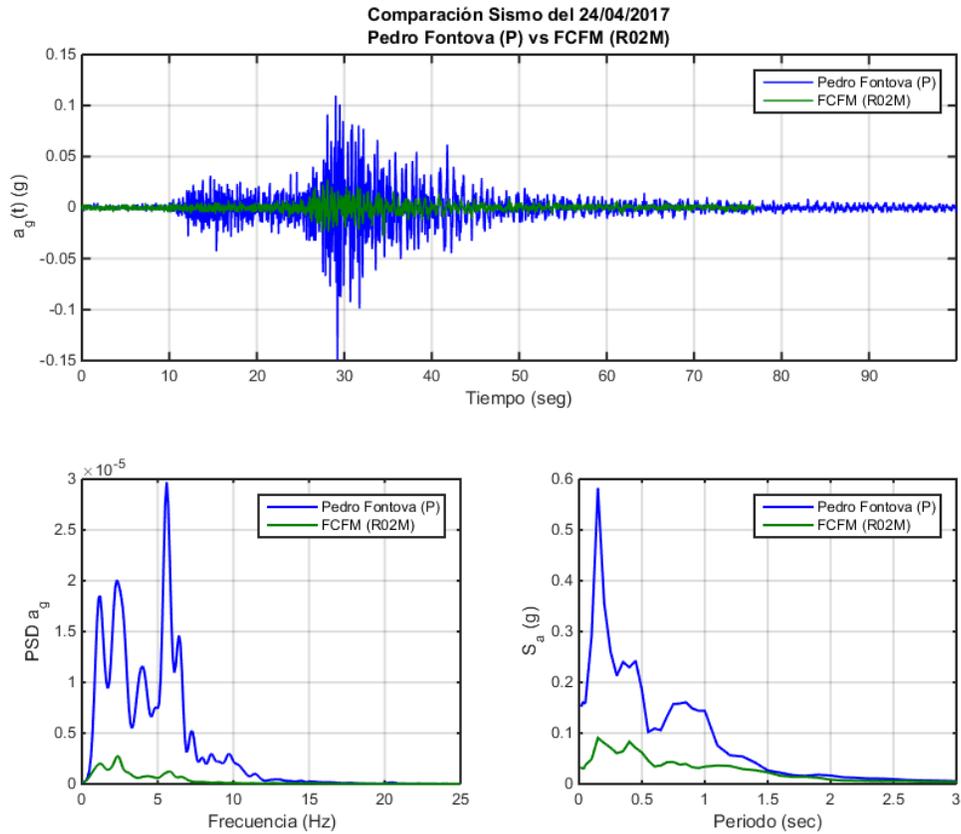


Figura 2-5 Comparación de aceleraciones entre estaciones P (Pedro Fontova - Renadic) y R02M (Santiago Centro).

Se puede observar de las comparaciones que en las tres existe una amplificación de la aceleración, donde es clara en los lugares de El Cortijo y Pedro Fontova. Si bien, existe un grado de amplificación en el Hipódromo Chile, esta es comparativamente menor que en los otros dos sectores. También se aprecia que se acentúa esta amplificación en el contenido de baja frecuencia del registro.

2.4.4 Frecuencias Fundamentales

El estudio de las zonas que son de interés se inicia con el trabajo realizado por el profesor co-guía de esta memoria, César Pastén en el 2007. En su tesis de Magister, el autor obtiene una distribución de frecuencias fundamentales de los depósitos de suelo encontrados en la Cuenca de Santiago. Principalmente se utilizó la interpolación de frecuencias fundamentales de las razones espectrales mostrada en la Figura 2-6.

Luego de una reunión entre los miembros de la comisión y el profesor guía de esta memoria, se tomó la decisión de poner en foco en cuatro áreas en donde la interpolación podría tener aproximaciones que generen problemas para identificar la frecuencia predominante del depósito. Estas cuatro áreas se muestran en la Figura 2-7. Cabe destacar que se utilizó el programa *Google Earth Pro* para realizar la superposición de la vista satelital con el mapa de frecuencias fundamentales.

A continuación, se procederá a describir las áreas de estudio y verificar su potencial para ser estudiado, teniendo en cuenta las estructuras construidas, la cantidad de pisos de estas y si existen terrenos amplios como plazas o canchas que permitan realizar mediciones en el suelo. Un criterio de lejanía para el suelo y las estructuras es considerar una distancia entre ellos de 100 [m] a 300 [m].

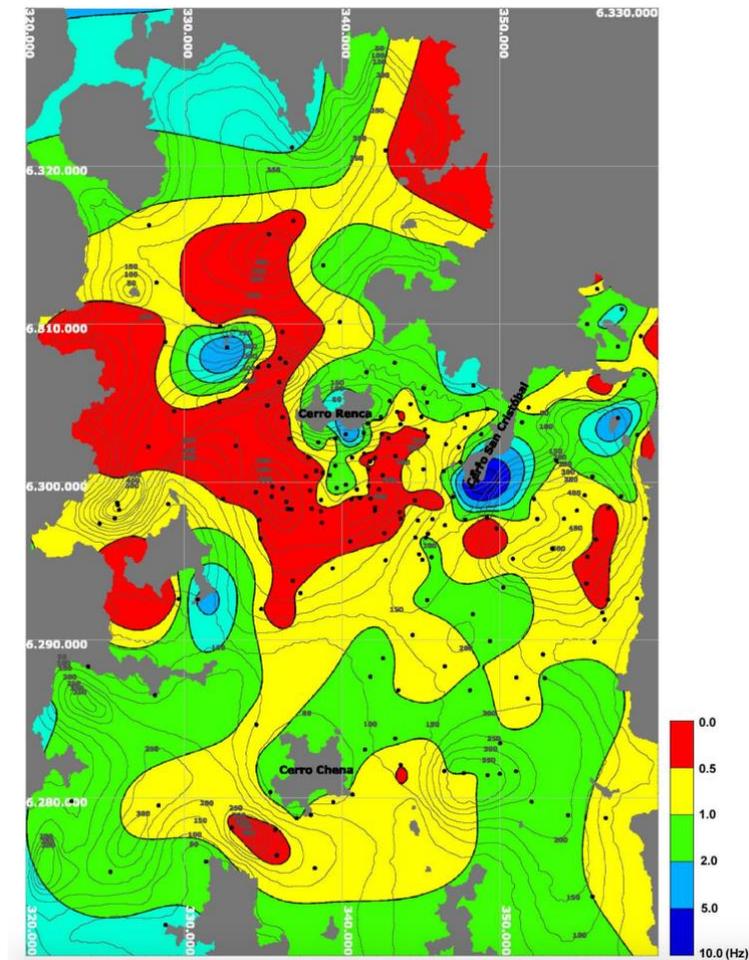


Figura 2-6 Interpolación de frecuencias fundamentales de las razones espectrales (Pasten, 2007).

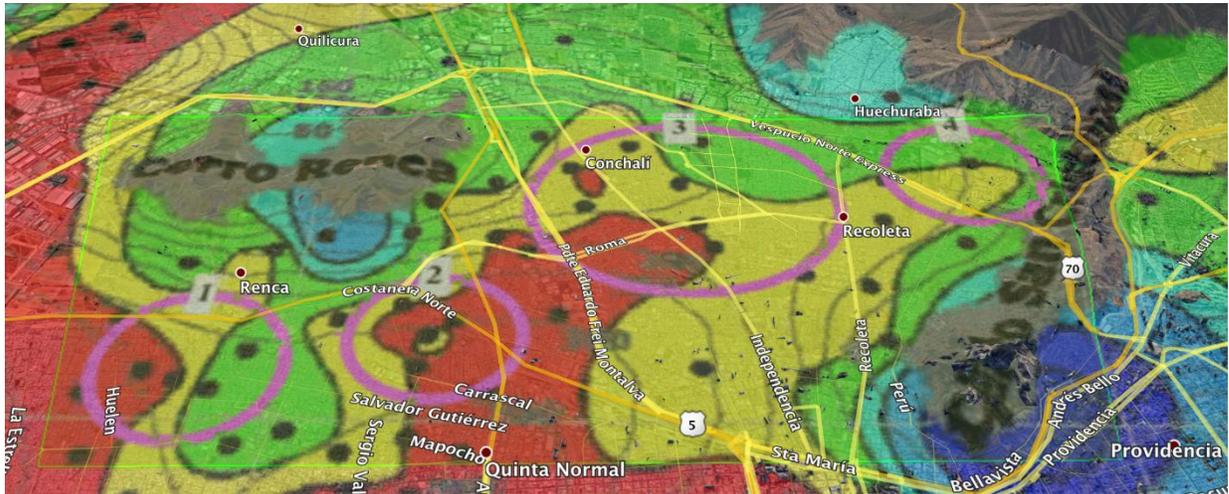


Figura 2-7 Áreas de estudio a analizar (encerradas en círculos magenta).

2.5 Áreas de Interés y Propuesta de Estudio

2.5.1 Área 1

En esta área se encuentra la comuna de Cerro Navia, cercana a la autopista Costanera Norte y el Río Mapocho. Se caracteriza por ser un sector residencial constituido en su mayoría por viviendas livianas, de no más allá de 2 pisos. Las estructuras más altas que se pueden encontrar son blocks de departamentos, de máximo 4 pisos de altura (8 – 10 [m]) y una copa de agua de aproximadamente 20 [m] de altura.

2.5.2 Área 2

Esta área pertenece a la comuna de Quinta Normal, que al igual que el área 1, se encuentra cercana a la autopista Costanera Norte y el Río Mapocho. Es un sector principalmente residencial, donde predominan viviendas livianas de no más de 2 pisos y con edificaciones de a lo más 5 pisos de alto. También se observa ciertas estructuras altas, de tipo industrial, como un laboratorio farmacéutico y un edificio de bodegas, y un edificio habitacional de 11 pisos de altura.

2.5.3 Área 3

Esta corresponde a la más extensa de las 4 propuestas de estudio. Su extensión abarca tres comunas distintas: Conchalí, Independencia y Recoleta, siendo la primera la de mayor extensión. Limita con la autopista Central (Ruta 5) en el sector poniente y con la Av. Recoleta por el oriente. Al igual que las dos áreas anteriormente descritas, existe predominancia del sector residencial.

Sin embargo, se observan dos sectores donde existen edificaciones altas. El primero es el de El Cortijo, colindante a la intersección entre la Ruta 5 y Av. Américo Vespucio, donde se tienen tres edificios de más de 13 pisos de altura. El segundo sector colinda con el Hipódromo Chile, específicamente al sur de este recinto entre Av. Independencia y Av. Vivaceta.

2.5.4 Área 4

Como última propuesta se tiene el sector conocido como Ciudad Empresarial, en el que se tiene principalmente edificaciones entre 6 y 10 pisos de altura. Cabe destacar que se puede apreciar que un 60% del terreno total se encuentra sin construcciones, lo que habla de la potencialidad que posee el sector para la construcción de futuras edificaciones. En este sector existe una única estructura con la cantidad de pisos suficiente para realizar el estudio, esta es el Hotel Radisson Ciudad Empresarial.

2.5.5 Propuesta de Estudio

Considerando los alcances de este trabajo, se dejan fuera las áreas de estudio 1 y 2, debido a la ausencia de estructuras altas.

Por otra parte, el área 3 presenta excelentes características para realizar tanto mediciones en el suelo como en edificios, los cuales están lo suficientemente lejanos para que no influyan en los resultados de las propiedades dinámicas del suelo.

Para realizar las mediciones en los edificios, fue necesario gestionar las autorizaciones para acceder a las azoteas de los edificios. Los sectores donde se solicitó autorización fueron: El Cortijo, Hipódromo Chile, Santa Marta de Huechuraba y Ciudad

Empresarial. Sin embargo, de estos cuatro, solo se pudo obtener las autorizaciones de los tres primeros, quedando fuera el Hotel Radisson de la Ciudad Empresarial.

2.6 Descripción de Lugares y Edificios

Las zonas donde se realizará este estudio son tres, las cuales se pueden apreciar en la Figura 2-8. En esta vista se aprecia una imagen satelital general de la ciudad de Santiago y la ubicación de las zonas de estudio.

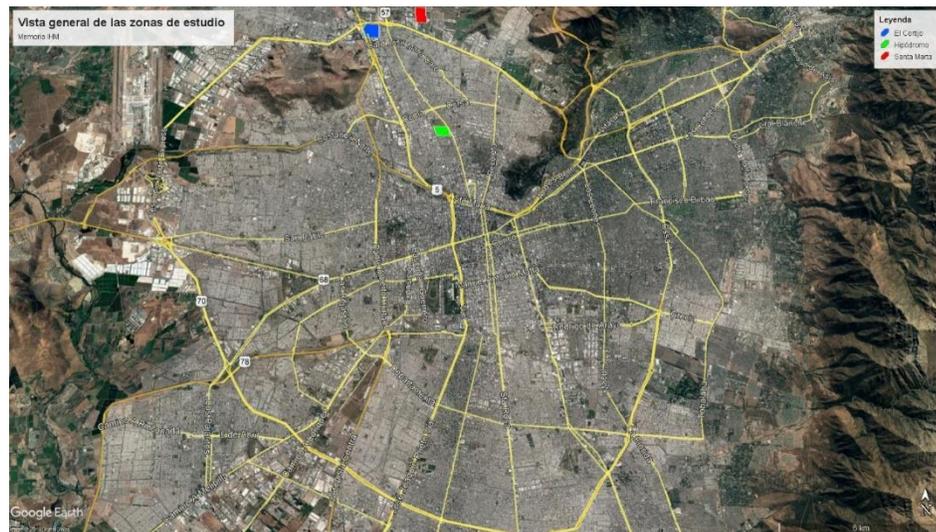


Figura 2-8 Vista general de la ciudad de Santiago. Las zonas de interés de este estudio son: El Cortijo (azul), Santa Marta de Huechuraba (rojo) e Hipódromo Chile (verde). (Fuente: Google Earth Pro)

2.6.1 El Cortijo

Este sector se caracteriza por ser un núcleo empresarial y con oficinas de atención a clientes, principalmente de servicios financieros. Se encuentra a pocos metros de la intersección entre la Av. Américo Vespucio y la Ruta 5. Una vista satelital del sector se puede apreciar en la Figura 2-9.

En cuanto a los posibles terrenos para realizar mediciones en suelo, se tienen disponibles dos sitios eriazos que se utilizan como estacionamientos y una plaza cercana a

las estructuras de interés. De las edificaciones más importantes, se encuentran tres edificios de oficinas, de los cuales se logró obtener la autorización de dos de ellos. Tanto la ubicación de las mediciones en suelo como los edificios instrumentados son descritos a continuación.



Figura 2-9 Vista particular del sector de El Cortijo. El marcador en amarillo indica el lugar de medición en suelo. Los marcadores rojos (A y B) indican la ubicación de los edificios medidos. El marcador blanco indica la ubicación de la estación sismológica (R07M). (Fuente: Google Earth Pro)

2.6.1.1 Lugares de medición de suelos

Para la elección del lugar de medición se consideran los terrenos sin intervención humana para la construcción de viviendas o edificios. En este sector, se consideró prudente elegir una plaza cercana a las estructuras, la cual se encuentra a 170 [m] y a 320 [m] de los edificios A y B, respectivamente. El sector se puede apreciar en la Figura 2-9, con el marcador amarillo con estrella. Las configuraciones usadas se muestran en la Figura 2-10. Cabe mencionar que la distancia entre instrumentos es de 20 [m].



Figura 2-10 Imagen satelital del lugar de medición en suelo en El Cortijo. A la izquierda se muestra la primera configuración, a la derecha la segunda. (Fuente: Google Earth Pro)

2.6.1.2 Edificios medidos

Los dos edificios donde se realizaron mediciones son los que se muestran a continuación:

a) Edificio El Cortijo Oriente

La descripción de este edificio se muestra en la Tabla 2-1. Cabe mencionar que en el lugar de medición se encontraban maquinarias de climatización y agua en funcionamiento. Dos vistas del edificio se pueden observar en la Figura 2-11. Una planta del edificio se puede ver en el boceto de la Figura 2-12.

Tabla 2-1 Características edificio El Cortijo Oriente.

Ocupación	Oficinas Administrativas
Materialización	Hormigón Armado
Estructuración	Muros y Marcos Sismorresistentes
# de Pisos	13 (12 + azotea)
Piso de Medición	13 (Azotea)



Figura 2-11 Fotografías de edificio El Cortijo Oriente.



Figura 2-12 Boceto de planta de edificio El Cortijo Oriente.

b) Edificio El Cortijo Poniente

La descripción de este edificio se muestra en la Tabla 2-2. Cabe mencionar que, al igual que el edificio anterior, en el lugar de medición se encontraban maquinarias de climatización y agua en funcionamiento. Dos vistas del edificio se pueden observar en la Figura 2-13. Una planta del edificio se puede ver en el boceto de la Figura 2-14.

Tabla 2-2 Características edificio El Cortijo Poniente.

Ocupación	Oficinas Administrativas
Materialización	Hormigón Armado
Estructuración	Muros y Marcos Sismorresistentes
# de Pisos	15 (14 + azotea)
Piso de Medición	15 (Azotea)



Figura 2-13 Fotografías de edificio El Cortijo Poniente.



Figura 2-14 Boceto de planta de edificio El Cortijo Poniente.

2.6.2 Hipódromo Chile

En este sector se observan diferentes edificaciones en altura que se encuentran contiguas a la calle Hipódromo Chile, entre las avenidas Independencia y Fermín Vivaceta. La totalidad de estas estructuras altas son carácter habitacional, fomentadas principalmente por la vista hacia el recinto de carreras. Una vista satelital del sector se puede ver en la Figura 2-15.

Con respecto a los lugares medidos, hacia el sur del cordón de edificios de la calle Hipódromo Chile, existe una plaza donde es posible realizar la medición. En cuanto a las edificaciones, se tienen aproximadamente nueve edificios habitacionales, de los cuales se logró obtener autorización para medir dos de estos. A continuación, se describen los lugares y los edificios de interés.



Figura 2-15 Vista particular del sector de Hipódromo Chile. El marcador en amarillo indica el lugar de medición en suelo. Los marcadores rojos (A y B) indican la ubicación de los edificios medidos. . El marcador blanco indica la ubicación de la estación sísmológica (R16M). (Fuente: Google Earth Pro)

2.6.2.1 Lugares de medición de suelos

Para la elección del lugar para la medición, se optó por una plaza al sur del área de estudio a unos 350 [m] de distancia de las estructuras en estudio. La disposición de los instrumentos para las mediciones se muestra en la Figura 2-16. Al igual que las mediciones anteriores, la distancia entre instrumentos es de 20 [m].



Figura 2-16 Imagen satelital del lugar de medición en suelo en Hipódromo Chile. A la izquierda se muestra la primera configuración, a la derecha la segunda. (Fuente: Google Earth Pro)

2.6.2.2 Edificios medidos

Los edificios donde se logró obtener autorización se describen a continuación:

a) Edificio Hipódromo Poniente

La descripción del edificio se muestra en la Tabla 2-3. La medición se realizó en el último piso donde existe una mitad del área con departamentos y la otra con un sector de quinchos. Dos vistas del edificio se pueden apreciar en la Figura 2-17. Una planta del edificio se puede ver en el boceto de la Figura 2-18.

Tabla 2-3 Características edificio Hipódromo Poniente.

Ocupación	Habitacional
Materialización	Hormigón Armado
Estructuración	Muros Sismorresistentes
# de Pisos	23 (22 + azotea con departamentos y quinchos)
Piso de Medición	23 (Azotea con departamentos y quinchos)



Figura 2-17 Fotografías edificio Hipódromo Poniente.



Figura 2-18 Boceto de planta de edificio Hipódromo Oriente.

b) Edificio Hipódromo Oriente

La descripción del edificio se muestra en la Tabla 2-4. La medición se realizó en el último piso, donde existe un sector de piscina. Dos vistas del edificio se pueden apreciar en la Figura 2-19. Una planta del edificio se puede ver en el boceto de la Figura 2-20.

Tabla 2-4 Características edificio Hipódromo Oriente.

Ocupación	Habitacional
Materialización	Hormigón Armado
Estructuración	Muros Sismorresistentes
# de Pisos	19 (18 + azotea con piscina)
Piso de Medición	19 (Azotea con piscina)



Figura 2-19 Fotografías edificio Hipódromo Oriente.

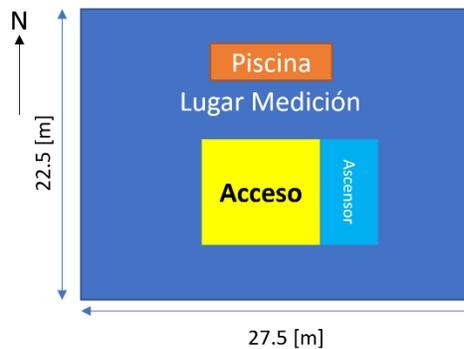


Figura 2-20 Boceto de planta de edificio Hipódromo Oriente.

2.6.3 Santa Marta de Huechuraba

Este sector se caracteriza por ser ampliamente residencial, donde existe un único condominio con dos estructuras altas. El sector está limitado por la Av. Américo Vespucio al sur y por la calle Pedro Fontova al oriente. Una vista satelital del sector de estudio se puede apreciar en la Figura 2-21.

En cuanto a los lugares para realizar las mediciones en suelos, se tiene un complejo deportivo con canchas, sitios eriazos que se utilizan preferentemente como estacionamientos y un sitio privado abandonado, de libre acceso.



Figura 2-21 Vista particular del sector de Santa Marta de Huechuraba. Los marcadores en amarillo indican los lugares de medición en suelo. Los marcadores rojos (A y B) indican la ubicación de los edificios medidos. El marcador blanco indica la ubicación de la estación sísmológica (P). (Fuente: Google Earth Pro)

2.6.3.1 Lugares de medición de suelos

Los lugares elegidos corresponden a dos sectores con terrenos sin alteraciones considerables. El primero corresponde al sector de una cancha de futbol, el cual se encuentra a unos 150 [m] de distancia de las estructuras de interés. Por otra parte, el segundo lugar corresponde a un sitio particular abandonado, con una distancia de 350 [m] aproximadamente. Las disposiciones utilizadas se muestran en la Figura 2-22. Al igual que las mediciones anteriores, los instrumentos se encuentran separados a 20 [m] entre ellos.



Figura 2-22 Imagen satelital de los lugares de medición de suelo en Santa Marta de Huechuraba. Se muestran las tres configuraciones utilizadas de códigos 003, 004 y 005, de izquierda a derecha respectivamente. (Fuente: Google Earth Pro)

2.6.3.2 Edificios medidos

Los edificios de interés para este estudio se describen a continuación:

a) Edificio Huechuraba Poniente

La descripción de este edificio se muestra en la Tabla 2-5. La medición se realizó en el último nivel de la caja de escaleras. Dos vistas del edificio se pueden apreciar en la Figura 2-23. Una planta del edificio se puede ver en el boceto de la Figura 2-24.

Tabla 2-5 Características edificio Huechuraba Poniente.

Ocupación	Habitacional
Materialización	Hormigón Armado
Estructuración	Muros Sismorresistentes
# de Pisos	21 (20 + azotea con sala de máquinas)
Piso de Medición	21 (Caja de escaleras)



Figura 2-23 Fotografías edificio Huechuraba Poniente.

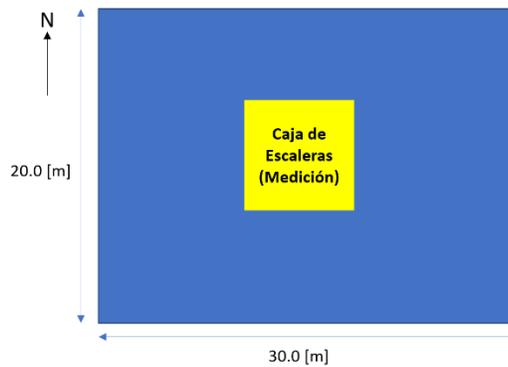


Figura 2-24 Boceto de planta de edificio Huechuraba Poniente.

b) Edificio Huechuraba Oriente

La descripción del edificio se muestra en la Tabla 2-6. La medición, al igual que el edificio anterior, se realizó en el último nivel de la caja de escaleras. Dos vistas del edificio se pueden apreciar en la Figura 2-25. Una planta del edificio se puede ver en el boceto de la Figura 2-26.

Tabla 2-6 Características edificio Huechuraba Oriente

Ocupación	Habitacional
Materialización	Hormigón Armado
Estructuración	Muros Sismorresistentes
# de Pisos	16 (15 + azotea con sala de máquinas)
Piso de Medición	16 (Caja de escaleras)

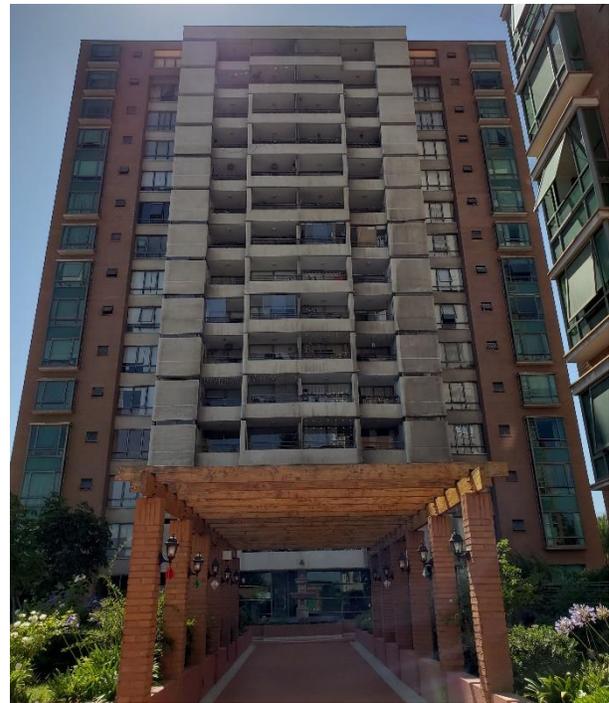


Figura 2-25 Fotografías edificio Huechuraba Oriente.

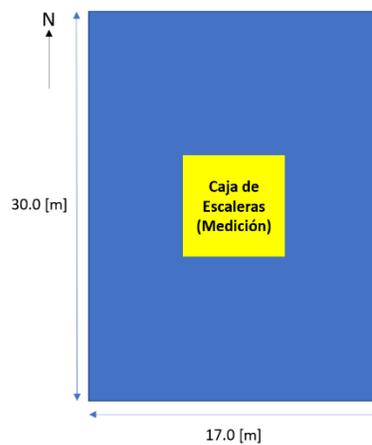


Figura 2-26 Boceto de planta de edificio Huechuraba Oriente.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1 Marco Teórico Geotécnico

3.1.1 Propagación de Ondas Sísmicas y Efecto de Sitio

3.1.1.1 Tipos de Ondas

Cuando ocurre una perturbación de cualquier índole, el suelo responde a esta produciéndose un movimiento que se pueden describir por teoría de ondas de cuerpo y ondas superficiales. Las perturbaciones también son llamadas microsismos y son el resultado de la acción del viento, ruido antrópico de alta frecuencia, ondas oceánicas y atmosféricas (Shearer, 2009).

Las ondas internas o de cuerpo se clasifican en 2 tipos: ondas compresionales (P) y ondas de corte (S). Las ondas P o primarias corresponden a perturbaciones que se transmiten en la dirección de la onda, por lo que comprimen y dilatan el medio por el cual

viajan. Por otra parte, las ondas S o secundarias se transmiten en un plano perpendicular a la dirección de propagación.(Shearer, 2009). La forma en que estas generan deformaciones en el espacio se puede apreciar en la Figura 3-1.

Por otro lado, están las ondas superficiales que suelen viajar a través de los estratos más cercanos a la superficie y se generan por la interacción entre ondas de cuerpo y la superficie libre (i.e., producidas por las condiciones de borde de la superficie libre). Existen dos tipos: Love y Rayleigh. Las primeras corresponden a la interferencia de múltiples reflexiones de la componente horizontal (perpendicular al plano de propagación) de la onda de corte, como se muestra en la Figura 3-2 (imagen superior).

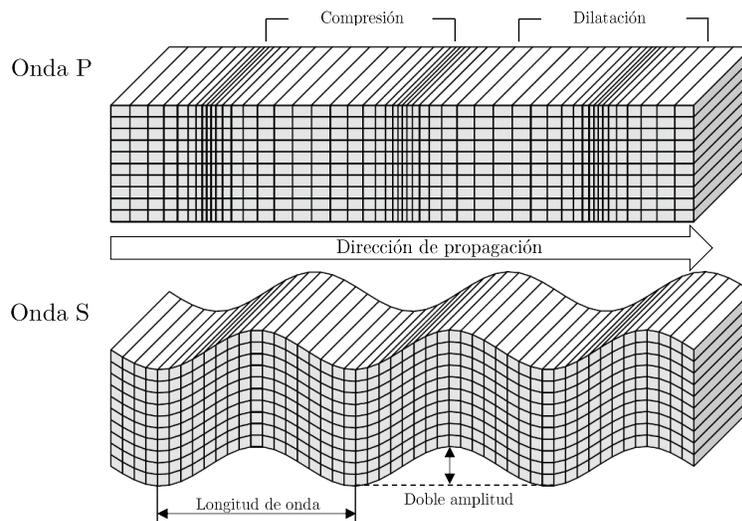


Figura 3-1 Desplazamientos ocurridos debido al paso de ondas P (imagen superior) y S (imagen inferior) a través de un medio (Mod. Shearer, 2009).

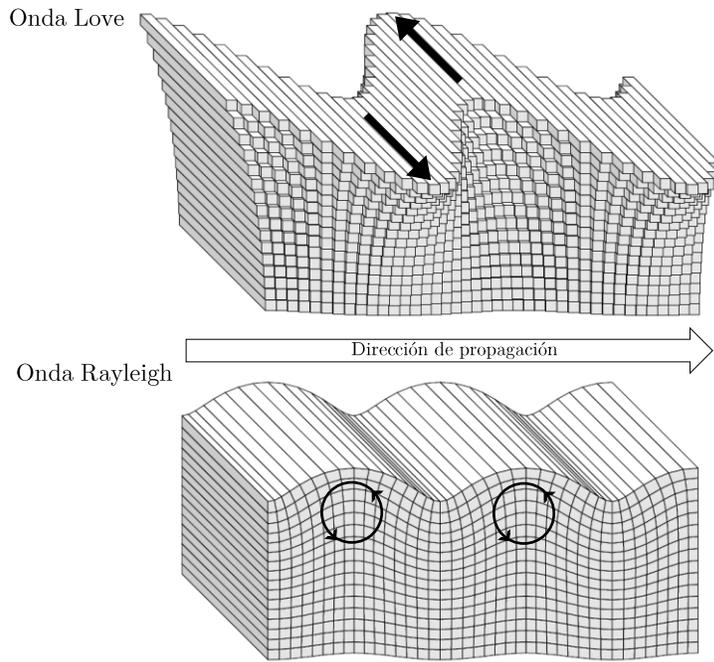


Figura 3-2 Desplazamientos ocurridos debido al paso de ondas Love (imagen superior) y ondas Rayleigh (imagen inferior) (Mod. Shearer, 2009).

3.1.1.2 Ondas Rayleigh

Para el caso de las ondas Rayleigh, estas se generan por la interacción entre las ondas P y la componente vertical de las ondas S (SV) planas, como se muestra en la Figura 3-2 (imagen inferior). Según Shearer (2009) esta interacción es más complicada que la interacción de las ondas Love, debido a que las reflexiones con la superficie envuelven tanto P como SV.

Estas ondas son de particular importancia para la exploración geofísica y la ingeniería geotécnica (Nazarian & Desai, 1993; Park et al., 1998). Las mediciones de vibraciones ambientales de esta memoria se basan en la capacidad de los instrumentos utilizados para medir los cambios en el tiempo de las ondas Rayleigh.

Debido a lo extenso de este tema, se recomienda revisar el anexo A de este documento, donde se abordan los temas de propagación de ondas Rayleigh en varios estratos, aplicados a la obtención de curvas de dispersión. También, mayor desarrollo matemático de la formulación de esta teoría es posible encontrarla en la tesis de magister de (Ochoa, 2007).

3.1.1.3 Efecto de Sitio

Tras la ocurrencia de un movimiento sísmico, se ha comprobado empíricamente que, a mayor distancia desde la fuente de este, las ondas sísmicas tienden a atenuarse y, por lo tanto, disminuye la aceleración del movimiento en especial para altas frecuencias. Este fenómeno se conoce como atenuación y depende directamente del coeficiente de amortiguamiento y por múltiples fuentes de disipación que posea el suelo a través del cual se transmiten las ondas sísmicas. La atenuación permite conocer la aceleración y la amplificación espectral según la distancia desde el hipocentro luego de la ocurrencia de un evento sísmico (Contreras & Boroschek, 2015; Ruiz & Saragoni, 2005).

Sin embargo, existen otros efectos que condicionan el desempeño del suelo durante un sismo. Es por esto que el daño ocasionado muestra una gran variabilidad, según las condiciones topográficas y el tipo de suelo por donde se transmite el sismo (Lermo & Chávez-García, 1993). Estos cambios corresponden principalmente a amplificaciones de la señal o aceleración del movimiento y cambio en el contenido de frecuencias de esta.

Un ejemplo de gran connotación es lo ocurrido en el terremoto de Michoacán en 1985, en México. Es sabido que los daños observados en depósitos blandos son, generalmente, mayores que en los depósitos rígidos, como lo son afloramientos rocosos o gravas. Esta condicionante se apreció notablemente en la Ciudad de México, donde en el sector noroeste se apreciaron grandes intensidades de movimiento en comparación con el sector suroeste que fueron considerablemente menor. En términos de daños, los mayores se concentraron en el sector noroeste, sector que se caracteriza por poseer un suelo de arcillas blandas y velocidades de onda de corte inferiores a 100 [m/s] (Seed et al., 1988). Otra particularidad de este suceso es que el contenido de frecuencia del terremoto en sí y de las posteriores replicas se mantuvo inalterado. Esto indica que la respuesta superficial es controlada por las condiciones locales y no la fuente sísmica.

Otros estudios demuestran que las condiciones topográficas influyen en el daño observado luego de un terremoto. Según la topografía superficial, se tendrá un efecto tanto en la amplitud del movimiento, como en el contenido de frecuencias registrados en superficie (Ashford et al., 1997; Bouckovalas & Papadimitriou, 2005; Faccioli, 1991).

3.1.2 Curvas de Dispersión a partir de Correlación Cruzada de Ruido Sísmico

El tema de la correlación cruzada de ruido sísmico, su teoría y la metodología utilizada para encontrar las curvas de dispersión a partir de las mediciones realizadas se puede apreciar en el Anexo A de esta memoria.

En esta memoria se elegirán las curvas de dispersión que ajusten mejor y que su energía decaiga según la función de Bessel. Cuando existen más de 2 curvas que ajusten de manera correcta, se tomará el promedio de estas dos para ingresarlas al proceso de inversión.

3.1.3 Inversión de Curvas de Dispersión

El proceso de inversión busca generar y obtener un modelo de estratos horizontales de suelo con propiedades elásticas compatibles con las observaciones realizadas en terreno y que tienen que ver principalmente con las curvas de dispersión encontradas. Según diversos autores (Gabriels et al., 1987; Nolet, 1981), las curvas de dispersión dependen principalmente de la velocidad de onda de corte (velocidad de fase de la curva de dispersión) y son insensibles a variaciones en profundidad de la densidad y la velocidad de ondas de compresión. A pesar de lo anterior, el proceso de inversión no es trivial ya que existen muchos modelos de suelo que se pueden ajustar a las observaciones en terreno (Foti, 2000).

En la literatura existen dos grandes grupos de métodos que permiten obtener un perfil en profundidad de velocidades. Estos son los métodos iterativos o de búsqueda local y los métodos de búsqueda global. Si bien, no hay un tipo de método mejor que otro, todo dependerá de la capacidad computacional que se tenga al momento de realizar este proceso.

Entre los primeros, los más utilizados son el algoritmo de Newton-Raphson, criterio de mínimos cuadrados y métodos basados en gradientes (Wathelet, 2005). Estos se basan en la linealización del problema de inversión, por lo que básicamente, se da un estado inicial y lo compara con los datos de terreno, repitiéndose iterativamente.

Por otra parte, los métodos de búsqueda global permiten una exploración del espacio de los parámetros del modelo que se ajusta. En este caso, este tipo de método resultan ser más eficaces, debido al tratamiento que le otorgan al problema con no-

linealidad. También, son más estables en la convergencia a un modelo que satisfaga realmente el problema. A pesar de lo anterior, se debe considerar que este tipo de métodos poseen un alto número de incógnitas, por lo que el proceso de inversión puede resultar lento en términos de recursos computacionales (Francisco Humire, 2013).

3.1.3.1 Método del Vecindario

Este método inicialmente genera modelos de manera aleatoria y luego explora homogéneamente todo el espacio de parámetros, dividiéndolo en pequeñas celdas, llamadas celdas de Voroni (Sambridge, 1999). Para cada una de estas celdas, se calcula el desajuste con las observaciones de terreno y se selecciona la celda que posea el mejor ajuste a estos datos. Luego, al interior de esta celda, se generan nuevos modelos aleatorios, para volver a evaluar el desajuste, dividiendo el espacio de las celdas.

Este proceso se repite hasta alcanzar un modelo que tenga curvas de dispersión teóricas tan cercanas, como las obtenidas en terreno (desajuste mínimo). En términos prácticos, lo que se realiza para terminar el análisis es limitar el número de iteraciones o nuevas subdivisiones del espacio.

Wathelet (2008) propone una modificación al algoritmo del vecindario, lo que permite parametrizar aún mejor el modelo a buscar. Las condiciones más recurrentes son (Wathelet, 2008):

- Establecer relaciones entre V_s y V_p de cada capa, compatibles con el módulo de Poisson establecido.
- Imponer que las velocidades (V_s y V_p) sean monótonamente crecientes en profundidad.
- Establecer que los espesores de capa sean mayores a la inmediatamente superior.

3.1.3.2 Metodología para la Inversión

La metodología utilizada para la inversión de las curvas de dispersión a partir de correlaciones cruzadas se ciñe a lo realizado por Sáez (2016). También, una explicación útil de la metodología se puede encontrar en la memoria de Fernández (2017).

Las condiciones iniciales para encontrar los perfiles de velocidad de onda de corte se toman de las velocidades encontradas en las curvas de dispersión. En base a estos límites de velocidad se realiza la búsqueda de 3 a 5 estratos o cambios de velocidad de onda de corte. Con respecto a la velocidad de onda P, se deja que el modelo encuentre libremente 2 velocidades de onda compresional. Ambas se dejan con la condición de que sean monótonamente crecientes en profundidad. Tanto el módulo de Poisson y la densidad se dejan uniformes entre [0.3 ; 0.5] y 2000 [kg/m³] fijo, respectivamente.

Cabe señalar que la generación de perfiles en profundidad requiere asumir que los estratos son perfectamente horizontales y que no se consideran efectos 3D del sitio. Por lo que el perfil es una estimación práctica pero no necesariamente precisa (J. Fernández, 2017).

Por último, el rango de profundidad válido para el perfil del modelo encontrado vendrá dado por $\lambda/3$ de la máxima longitud de onda considerada con la curva de dispersión, según sugiere Castellaro (2016).

3.1.4 Evaluación de Respuesta en Superficie

Para evaluar la respuesta de un depósito de suelo en superficie existen dos tipos de metodologías que permiten estimar los efectos de sitio, ya sea por efecto de los depósitos como tales o por efecto de la topografía (Pasten, 2007). Estas corresponden a la utilización de métodos numéricos y métodos experimentales. Estos métodos y específicamente el método de Nakamura se explican en el Anexo B de esta memoria.

3.1.4.1 Procesamiento de señales de vibraciones ambientales

La metodología para el procesamiento de señales de vibraciones ambientales utilizada en este trabajo corresponde a la misma ocupada en el trabajo de Pasten (2007). Para mayor detalle de esta, se recomienda revisar la tesis de magister mencionada.

3.2 Métodos de Identificación de Estructuras

Las estructuras de ingeniería civil se encuentran constantemente vibrando y excitadas por diferentes fuentes de ruido ambiental, como es el viento, mareas, vibraciones antrópicas, equipos, entre otras. A través del análisis de estas vibraciones, es posible determinar las propiedades dinámicas de la estructura en estudio. Para lograr medir estos movimientos bajo condiciones ambientales, es necesario posicionar un sensor que sea lo suficientemente sensible para detectar las microvibraciones de la estructura. Debido a que no existen fuerzas externas, es posible desarrollar un estudio experimental del sistema de manera rápida y a muy bajo costo (Boroschek et al., 2011). En general, ante este tipo de estudios la integridad de la estructura no se ve afectada y no existe un riesgo potencial al realizar un estudio de microvibraciones.

3.2.1 Método Sub-espacio Estocástico (SSI)

El método Sub-espacio Estocástico o SSI (por sus siglas en inglés, *Stochastic Subspace Identification*) corresponde a una técnica paramétrica de espacio-estado, considerando un tiempo discreto. Inicialmente desarrollado por Van Overschee & De Moor (1996), a lo largo del tiempo ha tenido diversas variaciones en cuanto al procesamiento de datos. Este permite la obtención de propiedades dinámicas de una estructura a partir de la medición de una respuesta (salida u *output*) asumiendo un comportamiento lineal en el tiempo (LTI) del sistema.

Este método se basa en el estudio de un sistema de dos ecuaciones donde la primera corresponde al equilibrio dinámico de la estructura y la segunda está asociada con los datos obtenidos de las mediciones, dadas por el arreglo de instrumentos utilizado. El sistema de ecuaciones a resolver se muestra en las ecuaciones (3.1) y (3.2) (Van Overschee & De Moor, 1996).

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (3.1)$$

Donde $\mathbf{q}(t)$, $\dot{\mathbf{q}}(t)$ y $\ddot{\mathbf{q}}(t)$ representan los vectores desplazamientos, velocidad y aceleración, respectivamente, asociados a los grados de libertad del sistema. Por otra parte, \mathbf{M} , \mathbf{C} y $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, corresponden a las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez del modelo estático y viscoso de n grados de libertad. Por último, $\mathbf{f}(t) \in \mathbb{R}^n$ corresponde a la función excitación a la cual se somete la estructura.

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}_a \ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{H}_v \dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{H}_d \mathbf{q}(t) \quad (3.2)$$

Donde $\mathbf{y}(t)$ corresponde a los datos de la respuesta observada. Por otra parte, \mathbf{H}_a , \mathbf{H}_v y \mathbf{H}_d representan matrices de localización de la información de salida de la aceleración, velocidad y desplazamiento, respectivamente. Estas últimas, corresponden a matrices compuestas solo por unos y ceros.

La ecuación (3.1) se puede reescribir como una ecuación de primer orden, como se muestra en la ecuación (3.3).

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A_c \mathbf{x}(t) + f_c(t) \quad (3.3)$$

Donde las variables A_c , f_c y $\dot{\mathbf{x}}(t)$ se definen como se muestra en la ecuación (3.4).

$$A_c = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix}, \quad f_c = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}f(t) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x}(t) = \begin{pmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

La ecuación (3.3) representa la ecuación de estado en el sistema espacio-estado y el subíndice c representa tiempo continuo.

Para el caso de este estudio, las vibraciones ambientales no son conocidas. Por lo tanto, para los casos en que solo se tienen mediciones de *output* del sistema, el sistema espacio-estado, en su versión adaptada para información digital discreta, queda expresado como se muestra en la ecuación (3.5) (Peeters, 2000).

$$\mathbf{x}_{k+1} = A \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k, \quad \mathbf{y}_k = H \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (3.5)$$

Donde \mathbf{w}_k es el ruido producido debido a que el modelo es perturbante y con incertidumbres, \mathbf{v}_k es el ruido medido asociado con la incerteza del instrumento al paso del tiempo k . \mathbf{x}_k e \mathbf{y}_k corresponden a $\mathbf{x}(t)$ e $\mathbf{y}(t)$ al tiempo $t = k\Delta t$. Por otro lado, las variables A y H , se definen como se muestra en la ecuación (3.6).

$$A = e^{A_c \Delta t}, \quad H = [H_d - H_a M^{-1} K H_v - H_a M^{-1} C] \quad (3.6)$$

Un factor a considerar es que la señal de *input* se encuentra implícita en términos del ruido (Boroschek et al., 2011).

Con la ayuda del programa *Matlab* es posible utilizar la rutina N4SID, incluida en el *System Identification Toolbox* del programa. Esta es implementada para el caso

estocástico-determinístico (con *inputs*), siendo el caso estocástico (SSI) un caso particular de este algoritmo (F. Hernández, 2009).

Un problema básico de identificación con este procedimiento es estimar el número de parámetros modales que realmente participan en la respuesta y cómo diferenciarlos de los que se generan con la señal de ruido. Para este propósito, es inminente la descomposición y el análisis de la matriz de valores propios (Boroschek et al., 2011).

El algoritmo genera la matriz de valores propios de manera secuencial, considerando para caso un incremento en los números de grados de libertad. Las propiedades modales o dinámicas reconocidas (frecuencia, amortiguamiento y forma modal) en cada identificación es comparada con un caso inicial. Se considerará que ellos son estables sin la comparación no varía más de cierta cifra porcentual (Boroschek et al., 2011).

Para el caso particular de este estudio, se considerarán los criterios mostrados en las ecuaciones (3.7), (3.8) y (3.9).

$$\frac{|f(ngdl) - f(ngdl + 1)|}{f(ngdl)} < 0.03 \quad (3.7)$$

$$\frac{|\beta(ngdl) - \beta(ngdl + 1)|}{\beta(ngdl)} < 0.05 \quad (3.8)$$

$$\frac{|MAC(ngdl) - MAC(ngdl + 1)|}{MAC(ngdl)} < 0.03 \quad (3.9)$$

Donde f corresponde a la frecuencia identificada, β a la razón crítica de amortiguamiento y MAC al Criterio de Confianza Modal del modelo en estudio (Allemang & Brown, 1982; Heylen & Lammens SY, 1997). Por último, $ngdl$ corresponde al número de grados de libertad considerados en la matriz .

La función del MAC (Modal Assurance Criterion) es proporcionar una medida de consistencia entre las estimaciones de dos vectores modales. Los resultados del método entregan valores entre 0 y 1. Cuando dos formas modales de ordenes consecutivos presentan una semejanza considerable establecida por el usuario, el MAC entrega un valor igual a 1.

Para mayor información acerca de la deducción y el desarrollo de los algoritmos utilizados en el proceso de identificación se recomienda revisar las tesis de magister de Hernández (2009), Núñez (2009) y la memoria de título de Aguilar (2012).

3.2.2 Método Espectro de Densidad de Potencia (PSD)

El método Espectro de Densidad de Potencia (PSD por sus siglas en inglés, *Power Spectrum Density*) es un método de identificación de parámetros dinámicos en el dominio de la frecuencia. Este método es no paramétrico, es decir, no es necesario generar un modelo de la estructura para obtener las propiedades dinámicas. En este caso, la respuesta en el tiempo de la estructura se trabaja en el dominio de la frecuencia, por lo que se obtienen las propiedades del sistema de manera directa (Núñez, 2009).

A partir de una medición de vibración ambiental, este método analiza la energía asociada a cada frecuencia de la señal registrada y la cuantifica en función de la cantidad de esta. Las frecuencias con mayor energía serán los peaks preponderantes del gráfico que se relacionan con las componentes modales de la estructura. La representación gráfica de estos resultados puede ser en Amplitud vs Frecuencia o Decibeles (Db) vs Frecuencia, siendo esta última beneficiosa para identificar frecuencias de modos superiores que no poseen la suficiente energía para alcanzar un peak, como sucede con los primeros modos de vibrar (Díaz, 2017).

De manera concisa, el espectro de densidad de potencia de una estructura se define como el valor cuadrático de la transformada de Fourier de una pequeña ventana de tiempo del registro y, matemáticamente, se define como se muestra en la ecuación (3.10) (Welch, 1967).

$$P_{SP}(t, \omega) = |S_t(\omega)|^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ventanas}} \left| \frac{\int s(\tau) \cdot h(\tau - t) \cdot e^{-i\omega\tau} d\tau}{\sqrt{2\pi}} \right|^2}{N_{ventanas}} \quad (3.10)$$

Donde $s(t)$ corresponde a la señal en el tiempo y $h(t)$ la ventana de tiempo utilizada.

El método implementado por Welch (1967) utiliza ventanas de Hanning para seleccionar segmentos del registro y promedia el espectro de potencia de varias ventanas en el tiempo reduciendo la incertidumbre del espectro asociado a una señal estacionaria.

3.2.2.1 Función de Transferencia

Habiendo calculado el espectro de potencia de la estructura en estudio, es posible obtener la función de transferencia de los canales utilizados. Esta considera la relación espectral de los registros, pudiendo identificar la coherencia entre cada una de las mediciones independientes.

Se define la función de transferencia entre dos canales como se muestra en la ecuación (3.11).

$$H_{\ddot{u}_1-\ddot{u}_2}(j\omega) = \frac{S_{\ddot{u}_1\ddot{u}_2}(j\omega)}{S_{\ddot{u}_1}(\omega)} \quad (3.11)$$

Donde $S_{\ddot{u}_1\ddot{u}_2}(j\omega)$ corresponde al espectro de potencia cruzado y $S_{\ddot{u}_1}(\omega)$ es el espectro de potencia del canal 1.

Para mayor información acerca de la deducción y el desarrollo de los algoritmos utilizados en el proceso de identificación se recomienda revisar las tesis de magister de Hernández (2009) y Núñez (2009).

3.2.3 Formas Modales

Luego del análisis modal, es posible suponer la respuesta del i -ésimo grado de libertad puede suponerse como la suma de los n grados de libertad, ponderados por el factor $\{\phi\}_j$ y puede expresarse como se muestra en las ecuaciones

$$x_j(t) = \{\phi\}_j \cdot \{y^m(t)\} \quad (3.12)$$

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^n \phi_{ji} \cdot y_i^m(t) \quad (3.13)$$

Donde $x_j(t)$ corresponde al vector respuesta del sistema, ϕ_j corresponde a la matriz forma modal compuesta por los valores propios de $M^{-1}K$ y $y^m(t)$ corresponde a la información de la respuesta observada.

Teóricamente las expresiones que resultan de este análisis deberían ser reales. Pero como las señales contienen ruido o falta de coherencia entre sí, estos valores resultan ser

complejos. Por lo tanto, lo más conveniente es eliminar la componente imaginaria (error numérico), tomando solo el valor real (Núñez, 2009). Finalmente, la relación modal entregará la información del modo, en términos de amplitud y signo (fase).

Para más información de la obtención e implicancias de las ecuaciones señaladas se recomienda revisar el trabajo de Núñez (2009).

3.3 Interacción Dinámica Suelo-Estructura

Las características del sector de estudio indican la presencia de un depósito de suelo blando que sobreyace a un estrato de suelo firme. En particular, este tipo de suelo puede generar un fenómeno de amplificación de ondas sísmicas, teniendo un efecto negativo en las estructuras apoyadas sobre el depósito debido a la amplificación de las aceleraciones para periodos largos (Hernández, 2013). Adicionalmente, es necesario entender y considerar los posibles efectos que puede generar la interacción dinámica suelo-estructura ante un movimiento sísmico, la cual puede modificar sustancialmente las propiedades dinámicas de la estructura. En este capítulo se explican los conceptos básicos de esta interacción y el fenómeno de resonancia entre suelo y estructura.

3.3.1 Conceptos Básicos

La interacción dinámica suelo-estructura consiste en un conjunto de efectos cinemáticos e inerciales producidos en la estructura y el suelo como resultado de la deformabilidad de este ante la excitación sísmica (Avilés & Pérez, 2004). Esta modifica las propiedades dinámicas relevantes que tendría la estructura supuesta con base indeformable como por ejemplo el periodo predominante, así como las características del movimiento del suelo en la vecindad de la fundación (Botero & Jaramillo, 2004).

Los efectos cinemáticos se asocian a los movimientos que ocurren en la porción del edificio que se encuentra empotrado en el suelo. Debido a esta profundidad de empotramiento, se generarán movimientos en las paredes laterales de esta porción enterrada y variarán conforme aumenta la profundidad bajo la superficie del terreno. Las aceleraciones producidas en la base y la respuesta de la estructura serán menor a medida que la profundidad de empotramiento aumenta (Hernández, 2013).

Por otra parte, los efectos inerciales corresponden a la resistencia inercial de la estructura a medida que se transmiten los movimientos a la base de esta y que persiste durante el tiempo de la excitación sísmica (Hernández, 2013). Esto produce un alargamiento del periodo predominante de la estructura y la modificación del amortiguamiento (Mejia, 2017).

En el trabajo de Avilés y Pérez (2004) se puede apreciar que el tema de la interacción dinámica es un tópico con considerables implicancias y que tiene un gran potencial para ser desarrollado. En este sentido, se tienen análisis complejos de todas las variables que afectan al estudio de la interacción y que, al igual que en la norma mexicana y española, debe ser un tema a analizar por la normativa vigente de cada país. Un aspecto importante de este estudio es lo que se menciona con respecto a los efectos de la interacción, donde estos se traducen en incrementos o reducciones de las resistencias requeridas dependiendo de los valores de los parámetros del sistema, específicamente la relación entre periodos de la estructura y el sitio (Avilés et al., 2004). También, es claro apreciar en este estudio que los efectos se intensifican cuando aumenta la altura de la estructura y cuando disminuyen el enterramiento de la cimentación y la profundidad del estrato del depósito estudiado.

En cuanto a la importancia de considerar esta interacción, varios investigadores han comprobado que considerarla es beneficioso para un sistema estructural afectado por cargas sísmicas (Khalil et al., 2007), ya que influye en el comportamiento dinámico modificando el periodo predominante y el amortiguamiento del sistema (García, 2006) y ,junto con esto, disminuyen los esfuerzos sobre la estructura (Saez, 2009), lo cual generaría un proyecto con consideraciones conservadoras y más costosas (Christie, 2017). Sin embargo, otros estudios comprueban que en algunas circunstancias se debe tener en cuenta esta interacción ya que puede ser perjudicial para la estructura y generar mayores solicitaciones. Entre estos efectos está el aumento de la separación entre edificios contiguos para evitar que colisionen (Soriano, 1989) y el problema de estructuras emplazadas sobre depósitos de suelo blando (Khalil et al., 2007).

Un antecedente a considerar es la alta deformabilidad que poseen las arcillas, como por ejemplo, las que se encuentran en Ciudad de México. Los efectos de sitio u de interacción suelo-estructura que se presentan durante sismos intensos alcanzan niveles muy superiores a los usuales en otras ciudades emplazadas sobre depósitos de suelo blando (Avilés et al., 2004). Esta condicionante puede ser comparada con lo que existe en el sector norponiente de Santiago.

Particularmente para este estudio, se abordará el fenómeno de resonancia o doble resonancia según algunos autores que se describen a continuación.

3.3.2 Fenómeno de Resonancia

El fenómeno de resonancia es altamente conocido por la comunidad ingenieril debido a los efectos desfavorables que tiene sobre las estructuras. Una frecuencia resonante se define como la frecuencia de excitación en la que se presenta la amplitud más grande de la respuesta (Chopra, 2014). En este sentido, será necesario conocer las implicancias que se generan con este fenómeno, en particular al estudio de la interacción entre suelo y estructura.

Como se explicó anteriormente, el suelo posee una frecuencia o periodo predominante en el cual se obtiene la máxima respuesta y se genera el efecto de amplificación si es que la excitación que lo afecta posee un contenido de frecuencias cercano a esta. Por otra parte, en los edificios se encuentran las frecuencias de los principales modos de vibrar, que equivalen a las frecuencias en las cuales estas estructuras tenderán a vibrar ante una excitación. La unión de estos dos conceptos genera lo que se conoce como doble resonancia entre suelo y estructura.

Este fenómeno ha sido estudiado evaluando los daños observados luego de sismos de considerable intensidad y realizando mediciones de vibraciones ambientales para obtener características del suelo. En particular, en el terremoto de Bovec 1998 en Eslovenia se encontraron correlaciones entre las funciones de amplificación observadas, la geología local, la evaluación de daños y mediciones al interior de edificaciones típicas del sector que señalan que el daño observado debe al fenómeno de doble resonancia (Mucciarelli & Monachesi, 1999).

En otro estudio se trata de entender por qué existen altos daños en ciertas estructuras, siendo que existe una baja intensidad del sismo. Aquí se proponen dos tipos de causas para estos comportamientos particulares: amplificación del movimiento del suelo debido a características geomorfológicas del efecto sitio o variabilidad localizada de la vulnerabilidad de estructuras (Mucciarelli & Monachesi, 1998). Con esto, se propone trabajar con ingenieros estructurales para analizar la vulnerabilidad de las estructuras emplazadas, ya que es posible que el efecto de doble resonancia haya generado esos daños. También se da a conocer el problema de que existe un ancho de banda de amplificación

del suelo, en el cual las estructuras con frecuencias dentro de este pueden entrar en el efecto de doble resonancia.

Por otra parte, existen estudios que modelan estructuras y suelo de manera conjunta, considerando la frecuencia predominante del suelo y sus características dinámicas, junto con determinadas excitaciones sísmicas. Específicamente, se tiene que cuando se consideran estos parámetros (suelo y estructura) existe un alargamiento en el periodo de la estructura y que pueden ser favorables o desfavorables según la posición del peak resonante del espectro de respuesta del suelo, que en suelo blando, suele coincidir con el periodo predominante del depósito (L. Fernández, 2007).

En el estudio de Fernández (2007) se concluye que las cortantes basales de los modelos estudiados alcanzan valores mayores cuando el sistema suelo-estructura entra en resonancia. También se encuentra que incluso en sectores fuera del ancho de banda de resonancia, considerar el efecto de interacción suelo estructura es beneficioso ante cierto tipo de excitación sísmica.

Por último es necesario tener en cuenta que existen parámetros que al momento de diseñar una estructura no se consideran y que en la construcción terminan afectando el comportamiento dinámico de esta. Entre estos se encuentran los valores de sobrecarga de la estructura, plastificación de elementos estructurales (durante la ocurrencia de un sismo de alta intensidad) y la rigidización debido a tabiques. Estos generan cambios en las frecuencias fundamentales de la estructura y pueden generar que se igualen con la frecuencia del depósito del suelo sobre la cual se emplaza, provocando el fenómeno de resonancia (Calvo, 2012).

Capítulo 4

Resultados de Estudios de Suelos

En el presente capítulo se muestran los resultados del estudio de suelos mediante el procesamiento de las mediciones de vibraciones ambientales realizadas. El orden será exponer primeramente las curvas de dispersión escogidas, luego los perfiles de velocidad de onda de corte en profundidad, una tabla resumen de los principales valores obtenidos junto con la curva de dispersión asociada al modelo encontrado. Luego se mostrarán las razones espectrales H/V de cada una de estas mediciones junto con un resumen de los principales resultados. En cada una de las secciones anteriormente descritas, se ordenan los resultados considerando el lugar de medición.

Cabe destacar que la primera parte de estos resultados fueron obtenidos con el método implementado y desarrollado en la tesis de magister de Sáez (2016). Con respecto a las curvas HVSR, se utilizó la metodología y criterios utilizados en la tesis de magister de Pastén (2007).

4.1 Elección de Curvas de Dispersión

En la siguiente sección se muestran las curvas de dispersión utilizadas para el proceso de inversión. Se debe señalar que estas fueron elegidas del global de las curvas obtenidas (ver Anexo C). El principal criterio fue escoger las que se consideran representativas de toda la familia de curvas y eliminar los valores que se escapan del comportamiento de esta familia. También quedan fuera del análisis los instrumentos con los que no se obtuvieron curvas de dispersión con sentido físico.

4.1.1 El Cortijo

En la Figura 4-1 se muestran los instrumentos y los resultados obtenidos de la realización de las correlaciones cruzadas para obtener las curvas de dispersión.

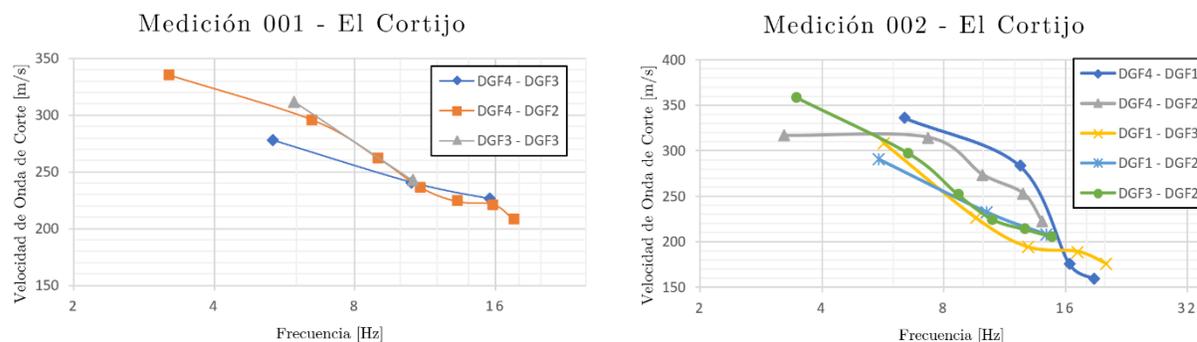


Figura 4-1 Resultados de curvas de dispersión para las mediciones en El Cortijo e instrumentos utilizados.

4.1.2 Hipódromo Chile

En la Figura 4-2 se muestran los instrumentos y los resultados obtenidos de la realización de las correlaciones cruzadas para obtener las curvas de dispersión.

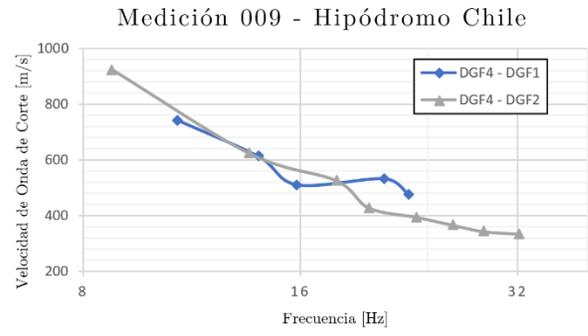
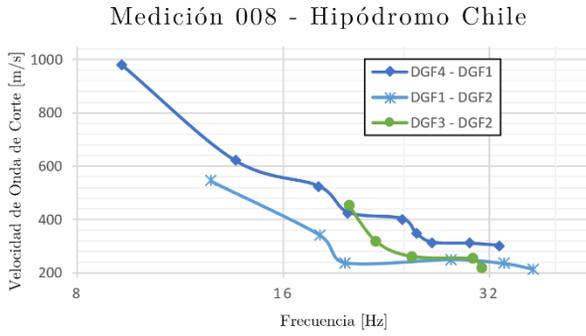


Figura 4-2 Resultados de curvas de dispersión para las mediciones en Hipódromo Chile e instrumentos utilizados.

4.1.3 Santa Marta de Huechuraba

En la se Figura 4-3 muestran los instrumentos y los resultados obtenidos de la realización de las correlaciones cruzadas para obtener las curvas de dispersión.

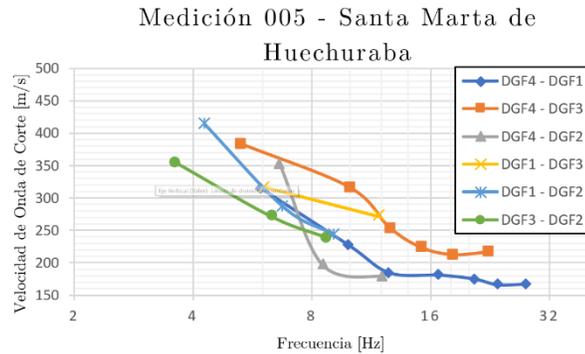
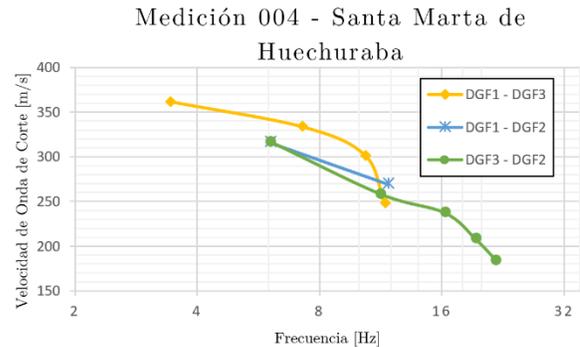
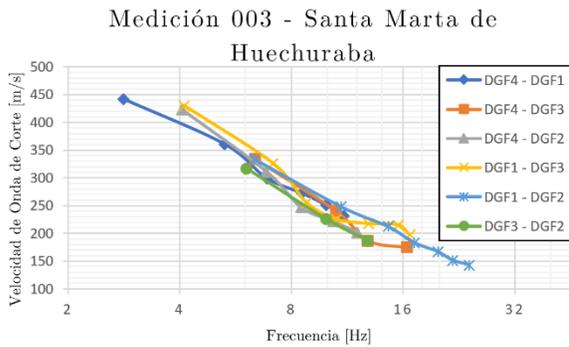


Figura 4-3 Resultados de curvas de dispersión para las mediciones en Santa Marta de Huechuraba e instrumentos utilizados.

4.2 Perfiles de Velocidad de Onda de Corte en Profundidad

A continuación se expondrán los resultados de los perfiles en profundidad y la curva de dispersión del modelo encontrado en el orden en que se mostró en la sección de descripción de lugares y edificios. Los coeficientes de autocorrelación de la metodología SPAC se muestran en Anexo E de esta memoria. Cabe destacar que los valores de V_{s30} se calculan según la NCh433 Of.1996 Modificada en 2011. Por último la profundidad máxima del perfil vendrá dada por el criterio de Castellaro (2016). En particular en esta memoria se utilizará $z_{max} = \lambda_{max}/3$, si el valor máximo viene dado por SPAC y $z_{max} = \lambda_{max}/2$ si el valor máximo de longitud de onda viene dado por curva de dispersión.

En los perfiles de velocidad, la curva negra señala el modelo con el menor error de ajuste. Por último en la curva de dispersión, se muestran en negro los valores de SPAC (cuadrados) y de curva de dispersión (círculos) utilizados para encontrar el modelo con mejor ajuste.

4.2.1 El Cortijo

En la Figura 4-4 y Figura 4-5 se muestran los perfiles en profundidad de la velocidad de onda de corte y la curva de dispersión del modelo utilizado. Se obtiene un error de ajuste mínimo de 0.202 y 0.172, con profundidades máximas de 80 y 91 metros, según SPAC, respectivamente. Por último, en la Tabla 4-1 y Tabla 4-2 se muestra el cálculo del parámetro V_{s30} .

4.2.1.1 Medición 001: Arreglo Lineal

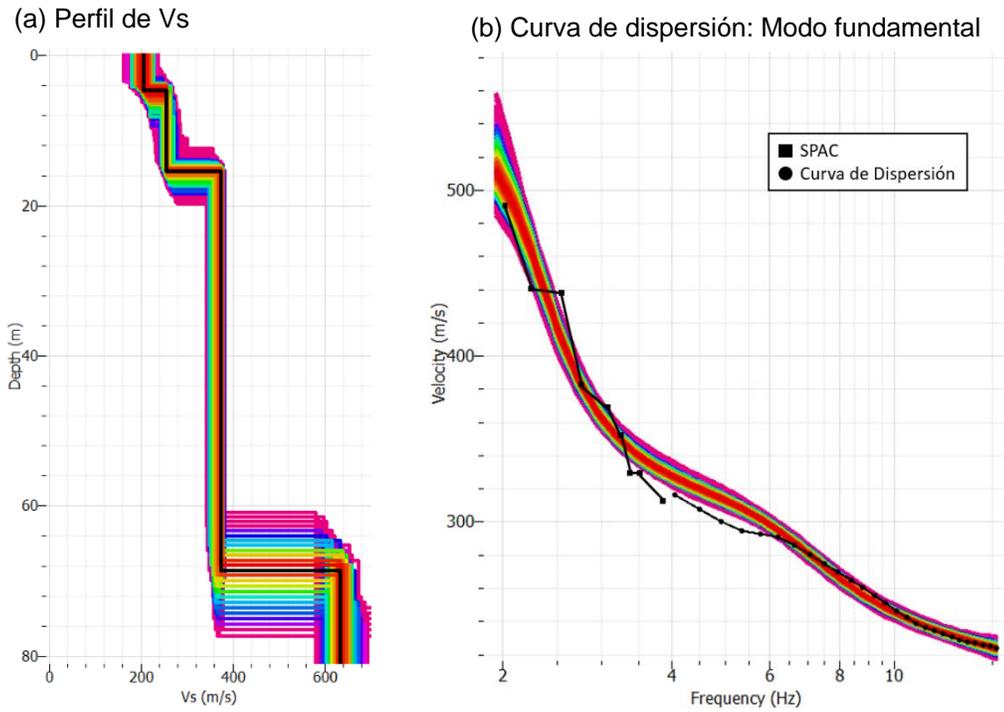


Figura 4-4 (a) Perfil de velocidad de onda de corte en profundidad y (b) curva de dispersión del modelo para un arreglo lineal en El Cortijo.

Tabla 4-1 Resumen de valores perfil de velocidad de onda de corte para arreglo lineal en El Cortijo

Estratos	<i>Espesor</i> [m]	$V_{onda\ de\ corte}$ $\left[\frac{m}{s}\right]$	V_{s30} $\left[\frac{m}{s}\right]$
1	4.7	205	
2	10.7	258	290
3	14.6	375	

4.2.1.2 Medición 002: Arreglo triangular

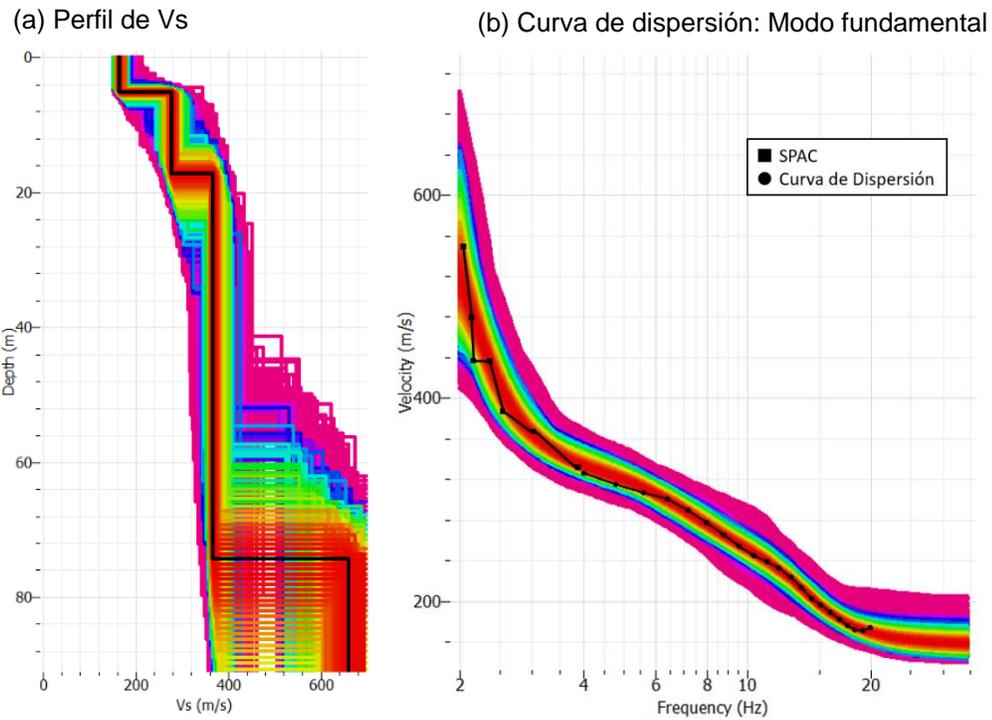


Figura 4-5 (a) Perfil de velocidad de onda de corte en profundidad y (b) curva de dispersión del modelo para un arreglo triangular en El Cortijo.

Tabla 4-2 Resumen de valores perfil de velocidad de onda de corte para arreglo triangular en El Cortijo

Estratos	<i>Espesor</i> [m]	$V_{onda\ de\ corte}$ $\left[\frac{m}{s}\right]$	V_{s30} $\left[\frac{m}{s}\right]$
1	5.1	164	
2	12.1	279	274
3	12.8	367	

4.2.2 Hipódromo Chile

En la Figura 4-6 y Figura 4-7 se muestran los perfiles en profundidad de la velocidad de onda de corte y la curva de dispersión del modelo utilizado. Se obtiene un error de ajuste mínimo de 0.280 y 0.231, con profundidades máximas de 38 y 41 metros, según curva de dispersión, respectivamente. Por último, en la Tabla 4-3 y Tabla 4-4 se muestra el cálculo del parámetro V_{s30} .

4.2.2.1 Medición 008: Arreglo Triangular

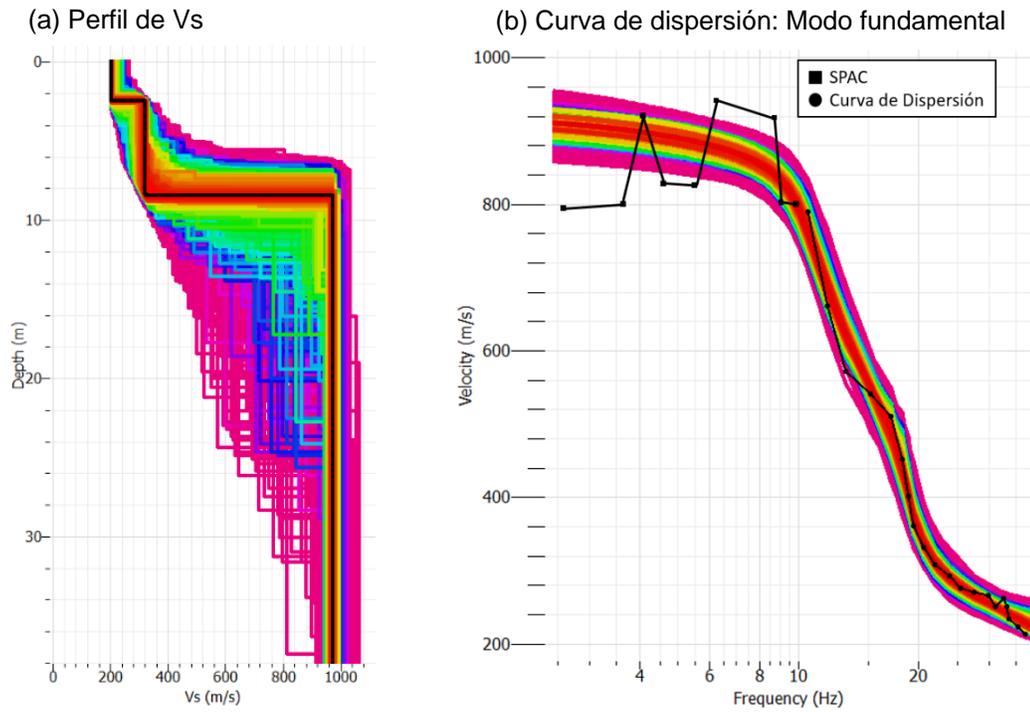


Figura 4-6 (a) Perfil de velocidad de onda de corte en profundidad y (b) curva de dispersión del modelo para un arreglo triangular en Hipódromo Chile.

Tabla 4-3 Resumen de valores perfil de velocidad de onda de corte para arreglo triangular en Hipódromo Chile

Estratos	<i>Espesor</i> [m]	$V_{onda\ de\ corte}$ $\left[\frac{m}{s}\right]$	V_{s30} $\left[\frac{m}{s}\right]$
1	2.4	202	
2	6.0	318	565
3	21.6	974	

4.2.2.2 Medición 009: Arreglo Lineal

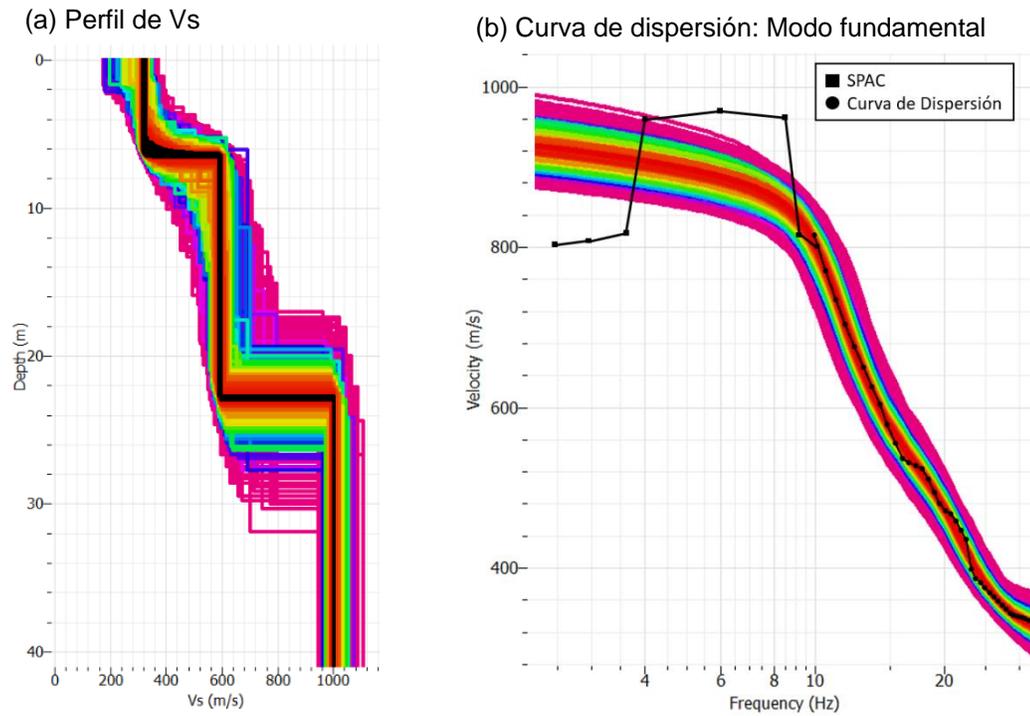


Figura 4-7 (a) Perfil de velocidad de onda de corte en profundidad y (b) curva de dispersión del modelo para un arreglo lineal en Hipódromo Chile.

Tabla 4-4 Resumen de valores perfil de velocidad de onda de corte para arreglo lineal en Hipódromo Chile

Estratos	h [m]	$V_{onda\ de\ corte}$ $\left[\frac{m}{s}\right]$	V_{s30} $\left[\frac{m}{s}\right]$
1	3.7	323	
2	16.5	592	551
3	7.3	999	

4.2.3 Santa Marta de Huechuraba

En la Figura 4-8, Figura 4-9 y Figura 4-10 se muestran los perfiles en profundidad de la velocidad de onda de corte y la curva de dispersión del modelo utilizado. Se obtiene un error de ajuste mínimo de 0.100, 0.110 y 0.193, con profundidades máximas de 116, 83 y 109 metros, según SPAC, respectivamente. Por último, en la Tabla 4-5, Tabla 4-6 y Tabla 4-7 se muestra el cálculo del parámetro V_{s30} .

4.2.3.1 Medición 003: Arreglo Lineal

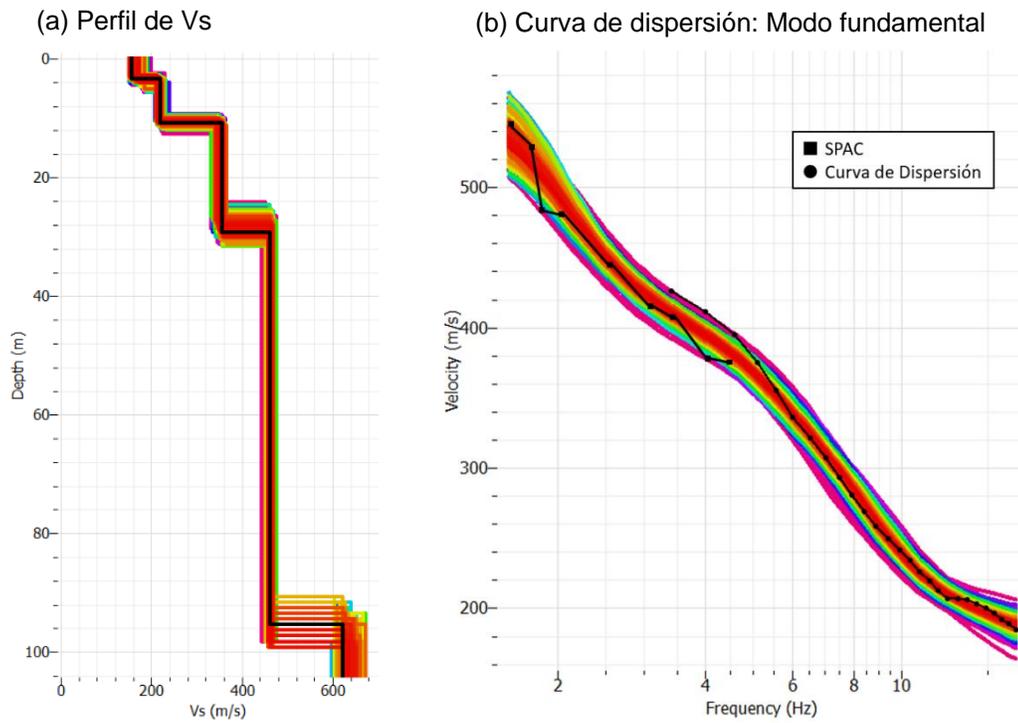


Figura 4-8 (a) Perfil de velocidad de onda de corte en profundidad y (b) curva de dispersión del modelo para un arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba.

Tabla 4-5 Resumen de valores perfil de velocidad de onda de corte para arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba

Estratos	<i>Espesor</i> [m]	$V_{onda\ de\ corte}$ $\left[\frac{m}{s}\right]$	V_{s30} $\left[\frac{m}{s}\right]$
1	3.3	158	
2	7.5	218	
3	18.4	356	276
4	0.8	462	

4.2.3.2 Medición 004: Arreglo Lineal

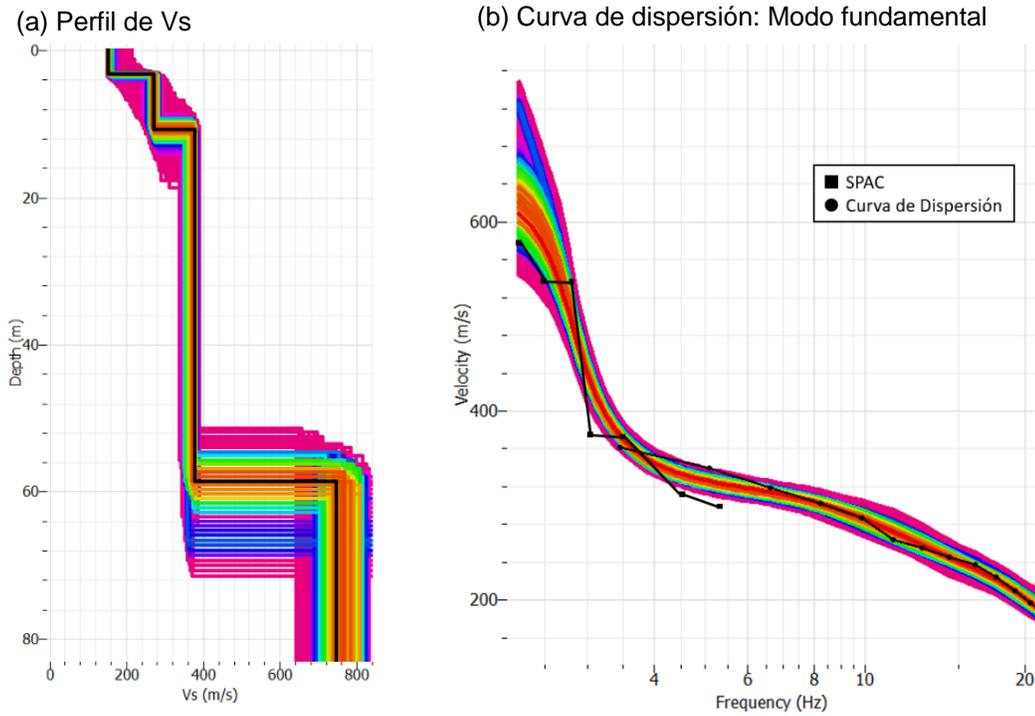


Figura 4-9 (a) Perfil de velocidad de onda de corte en profundidad y (b) curva de dispersión del modelo para un arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba.

Tabla 4-6 Resumen de valores perfil de velocidad de onda de corte para arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba

Estratos	<i>Espesor</i> [m]	$V_{onda\ de\ corte}$ $\left[\frac{m}{s}\right]$	V_{s30} $\left[\frac{m}{s}\right]$
1	8.2	152	
2	7.6	271	300
3	19.2	378	

4.2.3.3 Medición 005: Arreglo Triangular

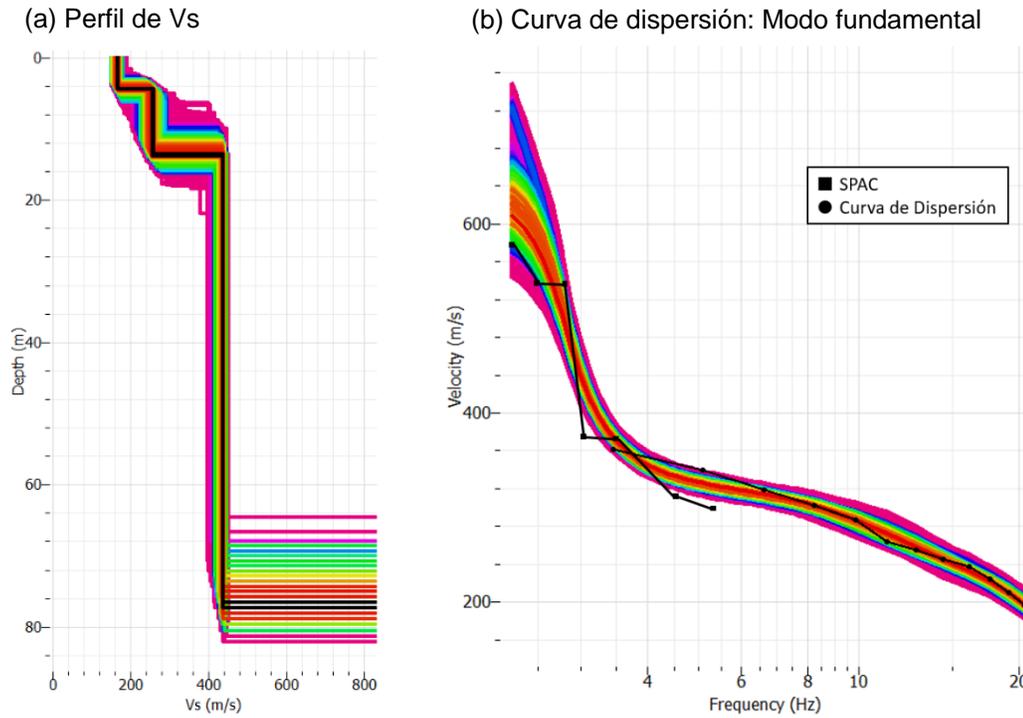


Figura 4-10 (a) Perfil de velocidad de onda de corte en profundidad y (b) curva de dispersión del modelo para un arreglo triangular en Santa Marta de Huechuraba.

Tabla 4-7 Resumen de valores perfil de velocidad de onda de corte para arreglo triangular en Santa Marta de Huechuraba

Estratos	<i>Espesor</i> [m]	$V_{onda\ de\ corte}$ $\left[\frac{m}{s}\right]$	V_{s30} $\left[\frac{m}{s}\right]$
1	4.4	168	
2	9.3	259	302
3	16.3	438	

4.3 Razones Espectrales H/V

A continuación se muestran los resultados de las razones espectrales H/V de las mediciones ambientales realizadas en los terrenos de estudio. Se mostrarán cada una de las curvas de los instrumentos, el promedio y una tabla resumen de los principales resultados.

4.3.1 El Cortijo

Las siguientes curvas HVSR corresponden a las mismas mediciones utilizadas para encontrar las correlaciones cruzadas en la sección anterior. Con esto, se mantienen los mismos arreglos correspondientes a cada medición. En la Figura 4-11, Figura 4-12 y Figura 4-13 se muestran las razones espectrales H/V. También en la Tabla 4-8, Tabla 4-9 y Tabla 4-10 se muestran los principales de las curvas H/V, respectivamente. Cabe mencionar que la medición de la Figura 4-13 se llevó a cabo a unos pocos metros en un área de terreno vegetal y en la base del edificio en estudio.

4.3.1.1 Medición 001

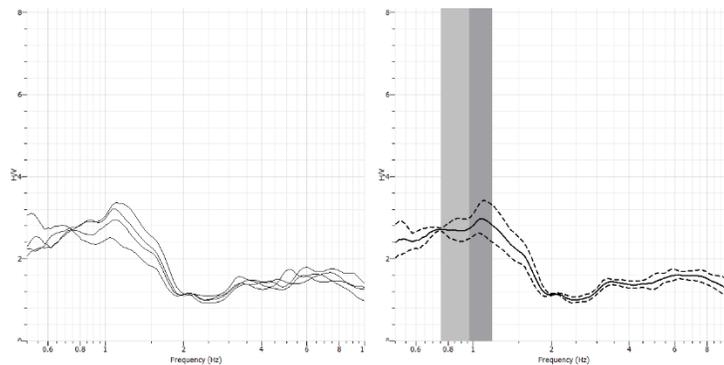


Figura 4-11 Razones espectrales H/V para arreglo lineal en El Cortijo. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).

Tabla 4-8 Resumen de HVSR para arreglo lineal en El Cortijo

# Peaks	f_p [Hz]	A_{peak} [-]
1	1.09	2.90

4.3.1.2 Medición 002

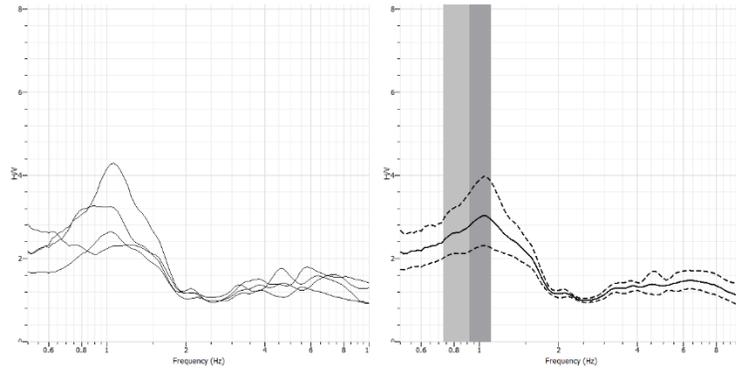


Figura 4-12 Razones espectrales H/V para arreglo triangular en El Cortijo. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).

Tabla 4-9 Resumen de HVSR para arreglo triangular en El Cortijo

# Peaks	f_p [Hz]	A_{peak} [-]
1	1.04	3.01

4.3.1.3 Medición El Cortijo Poniente

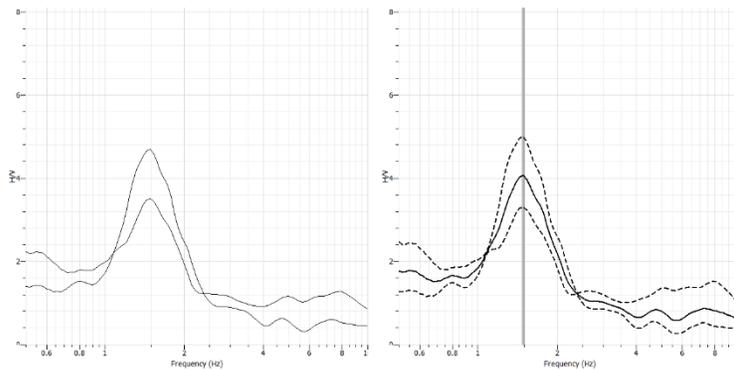


Figura 4-13 Razones espectrales H/V para la medición particular en El Cortijo. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).

Tabla 4-10 Resumen de HVSR para medición particular en El Cortijo

# Peaks	f_p [Hz]	A_{peak} [-]
1	1.49	4.12

4.3.2 Hipódromo Chile

Al igual que en El Cortijo, se utilizan las mismas mediciones para las correlaciones cruzadas. En la Figura 4-14 y Figura 4-15 se muestran las razones espectrales H/V. También, en la Tabla 4-11 y Tabla 4-12 se muestran los principales valores de las curvas, respectivamente.

4.3.2.1 Medición 008

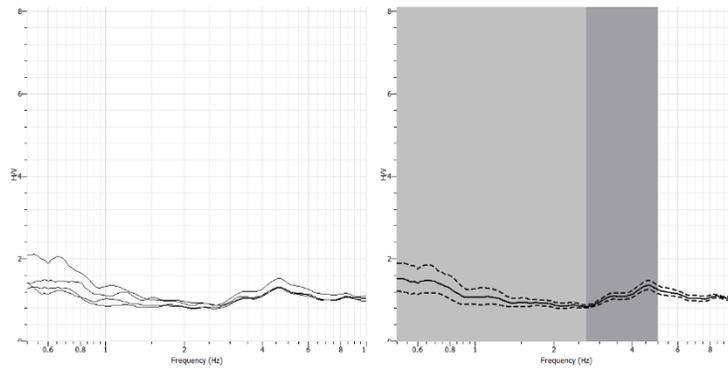


Figura 4-14 Razones espectrales H/V para arreglo triangular en Hipódromo Chile. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).

Tabla 4-11 Resumen de HVSR para arreglo triangular en Hipódromo Chile

# Peaks	f_p [Hz]	A_{peak} [-]
Planos	-	-

4.3.2.2 Medición 009

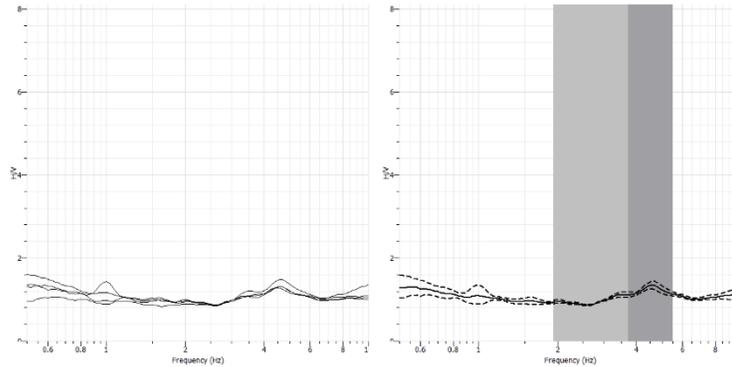


Figura 4-15 Razones espectrales H/V para arreglo lineal en Hipódromo Chile. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).

Tabla 4-12 Resumen de HVSR para arreglo lineal en Hipódromo Chile

# Peaks	f_p [Hz]	A_{peak} [-]
Planos	-	-

4.3.3 Santa Marta de Huechuraba

Al igual que en El Cortijo e Hipódromo Chile, se utilizan las mismas mediciones de las correlaciones cruzadas. En la Figura 4-16, Figura 4-17, Figura 4-18 y Figura 4-19 se muestran las razones espectrales H/V. También en la Tabla 4-13, Tabla 4-14, Tabla 4-15 y Tabla 4-16 se muestran los principales valores de estas curvas, respectivamente. Las curvas de la Figura 4-19 se obtienen de mediciones en terreno vegetal a una distancia de 20 metros de los edificios de interés.

4.3.3.1 Medición 003

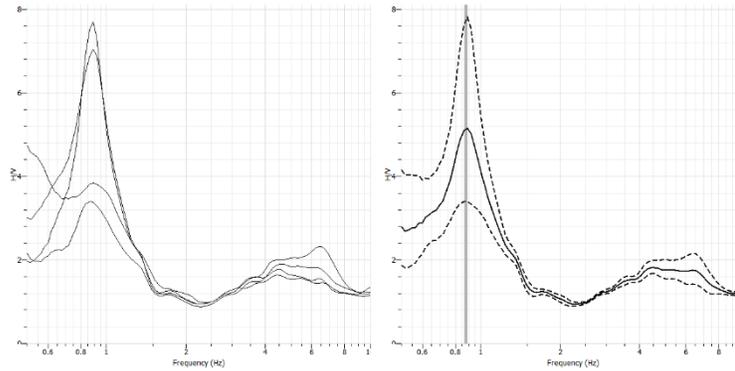


Figura 4-16 Razones espectrales H/V para arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).

Tabla 4-13 Resumen de HVSR para arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba

# Peaks	f_p [Hz]	A_{peak} [-]
Planos	0.89	5.22

4.3.3.2 Medición 004

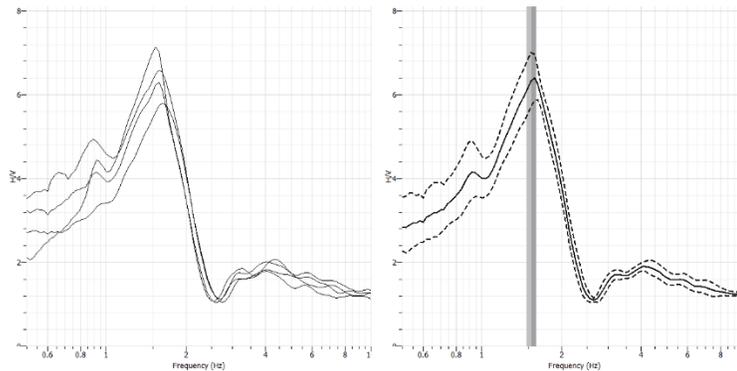


Figura 4-17 Razones espectrales H/V para arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).

Tabla 4-14 Resumen de HVSR para arreglo lineal en Santa Marta de Huechuraba

# Peaks	f_p [Hz]	A_{peak} [-]
Planos	1.59	6.43

4.3.3.3 Medición 005

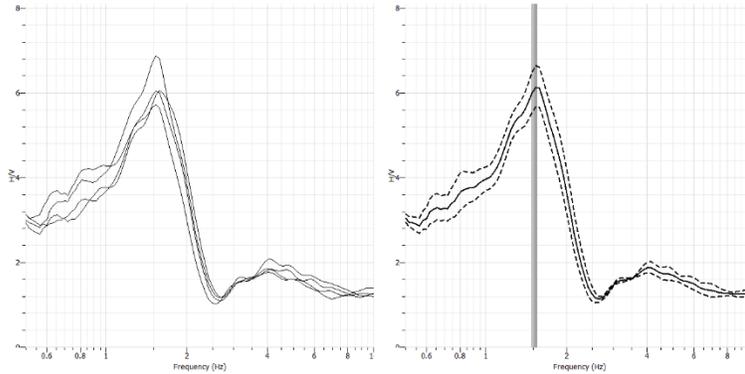


Figura 4-18 Razones espectrales H/V para arreglo triangular en Santa Marta de Huechuraba. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).

Tabla 4-15 Resumen de HVSR para arreglo triangular en Santa Marta de Huechuraba

# Peaks	f_p [Hz]	A_{peak} [-]
Planos	1.54	6.15

4.3.3.4 Medición Interior Condominio Edificios

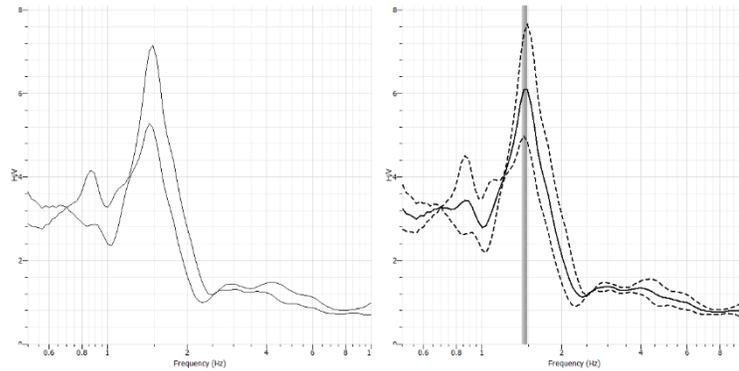


Figura 4-19 Razones espectrales H/V para la medición particular en Santa Marta de Huechuraba. Instrumentos juntos (izquierda) y promedio con desviación estándar (derecha).

Tabla 4-16 Resumen de HVSR para medición particular en Santa Marta de Huechuraba

# Peaks	f_p [Hz]	A_{peak} [-]
1	1.46	6.10

4.4 Resumen de Resultados

Tabla 4-17 Resumen de resultados obtenidos de estudio de suelos

Lugar	Código	Arreglo	V_{s30} [m/s]	f_p [Hz]	A_{peak} [-]	Clasificación (NCh 433)
El Cortijo	001	Lineal	290	1.1	2.9	D
El Cortijo	002	Triangular	274	1.0	3.0	D
El Cortijo	Particular	-	-	1.5	4.1	-
Hipódromo	008	Triangular	565	Plano	-	B
Hipódromo	009	Lineal	551	Plano	-	B
Huechuraba	003	Lineal	276	0.9	5.2	D
Huechuraba	004	Lineal	300	1.6	6.4	D
Huechuraba	005	Triangular	302	1.5	6.1	D
Huechuraba	Particular	-	-	1.5	6.1	-

Capítulo 5

Resultados de Identificación de Estructuras

En el presente capítulo se muestran los resultados encontrados para la identificación de las propiedades dinámicas de los edificios en estudio. El orden en que se muestran es considerando primeramente el método utilizado, en este caso método SSI y luego PSD. Cada una de estas secciones se ordenan a partir de ubicación y luego los edificios en cuestión. Por último se muestran las formas modales de los edificios que se consiguen con los resultados de cada método de identificación, también ordenadas por lugar y luego edificio de interés.

5.1 Identificación SSI y PSD

5.1.1 El Cortijo

En las mediciones de este lugar se utilizaron tres instrumentos Episensor en las azoteas o último piso del edificio en estudio.

5.1.1.1 Edificio El Cortijo Oriente

Tabla 5-1 Frecuencias identificadas para edificio El Cortijo Oriente con método SSI y PSD.

Mod o	f [Hz] (SSI)	f [Hz] (PSD)
1	0.85	0.85
2	1.08	1.08
3	1.45	1.46
4	2.70	2.72
5	3.73	3.74
6	4.56	4.55

5.1.1.2 Edificio El Cortijo Poniente

Tabla 5-2 Frecuencias identificadas para edificio El Cortijo Poniente con método SSI y PSD.

Mod o	f [Hz] (SSI)	f [Hz] (PSD)
1	0.69	0.70
2	0.77	0.77
3	1.13	1.13
4	2.21	2.22
5	2.32	2.27
6	2.38	2.38

5.1.2 Hipódromo Chile

En las mediciones de este lugar se utilizaron tres instrumentos Episensor en las azoteas o último piso del edificio en estudio.

5.1.2.1 Edificio Hipódromo Oriente

Tabla 5-3 Frecuencias identificadas para edificio Hipódromo Oriente con método SSI y PSD.

Mod o	f [Hz] (SSI)	f [Hz] (PSD)
1	0.81	0.84
2	1.17	1.17
3	1.26	1.27
4	2.34	2.37
5	2.89	2.90
6	3.09	3.10

5.1.2.2 Edificio Hipódromo Poniente

Tabla 5-4 Frecuencias identificadas para edificio Hipódromo Poniente con método SSI y PSD.

Mod o	f [Hz] (SSI)	f [Hz] (PSD)
1	0.90	0.90
2	0.93	0.94
3	1.16	1.16
4	3.49	3.50
5	3.82	3.86
6	4.05	4.04

5.1.3 Santa Marta de Huechuraba

En las mediciones de este lugar se utilizó un instrumento Tromino en el último piso de la caja de escaleras de los edificios en estudio.

5.1.3.1 Edificio Huechuraba Oriente

Tabla 5-5 Frecuencias identificadas para edificio Huechuraba Oriente con método SSI y PSD.

Mod o	f [Hz] (SSI)	f [Hz] (PSD)
1	1.06	1.05
2	1.12	1.20
3	1.29	1.29
4	4.14	4.14
5	4.32	4.32
6	4.74	4.75

5.1.3.2 Edificio Huechuraba Poniente

Tabla 5-6 Frecuencias identificadas para edificio Huechuraba Poniente con método SSI y PSD.

Mod o	f [Hz] (SSI)	f [Hz] (PSD)
1	0.77	0.77
2	0.87	0.87
3	1.02	1.02
4	2.99	2.99
5	3.73	3.73
6	6.28	6.28

5.2 Formas Modales

En esta sección se presentan las formas modales obtenidas para cada uno de los edificios. Se presentan los resultados obtenidos a partir de cada una de las metodologías utilizadas, SSI y PSD, con el propósito de comparar los resultados a través de cada una de estas.

5.2.1 El Cortijo

5.2.1.1 Edificio El Cortijo Oriente

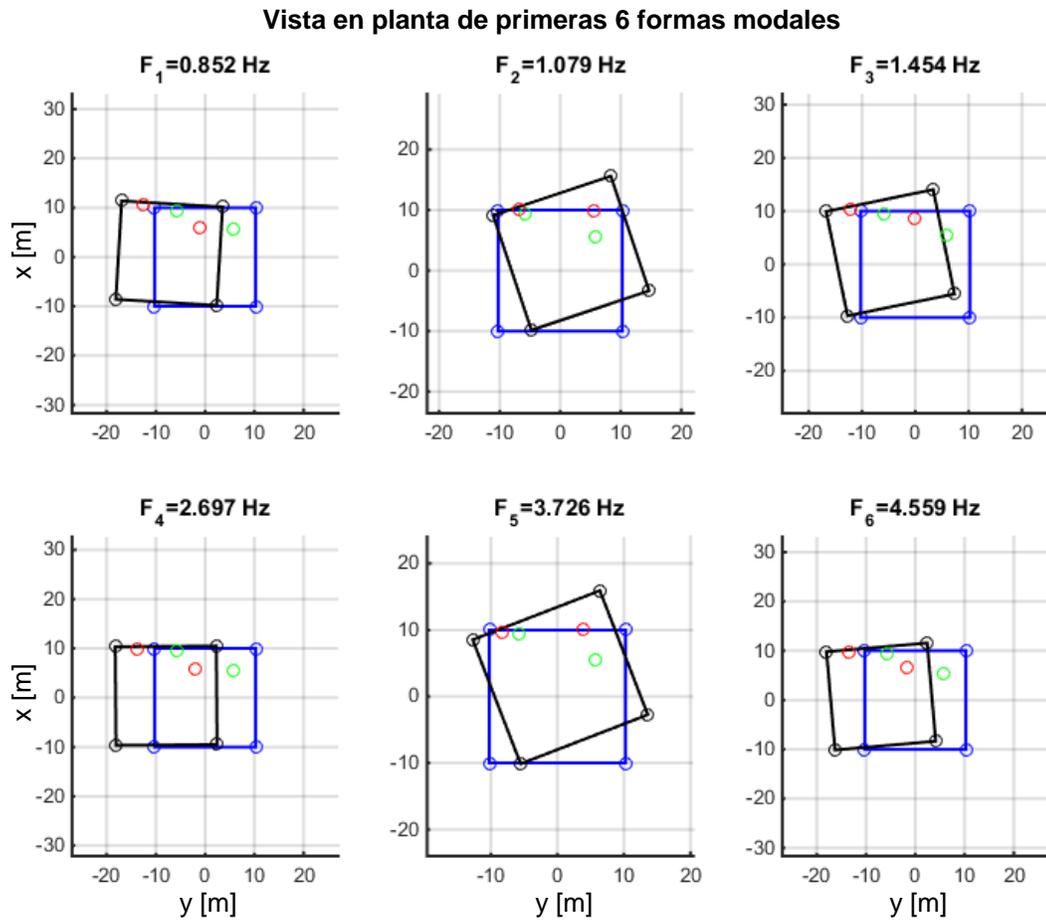


Figura 5-1 Formas modales de edificio El Cortijo Oriente a partir de metodología SSI.

5.2.1.2 Edificio El Cortijo Poniente

Vista en planta de primeras 6 formas modales

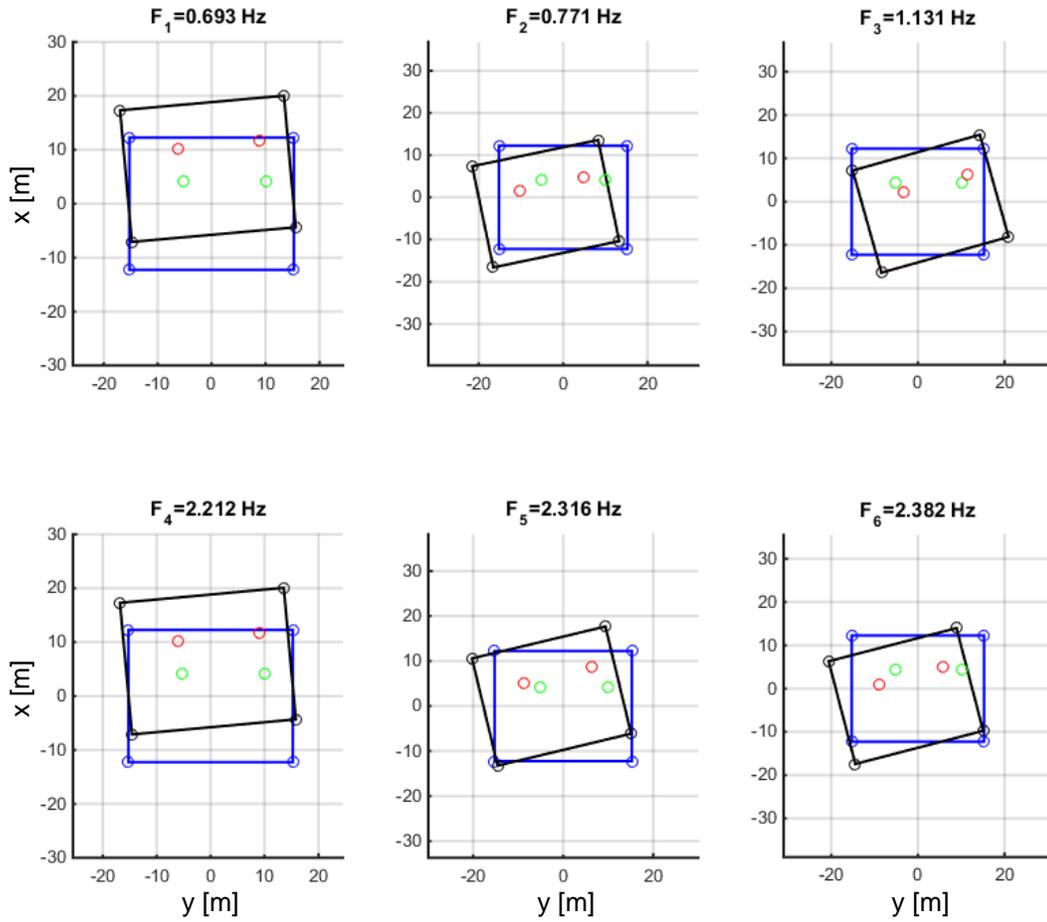


Figura 5-2 Formas modales de edificio El Cortijo Poniente a partir de metodología SSI.

5.2.2 Hipódromo Chile

5.2.2.1 Edificio Hipódromo Oriente

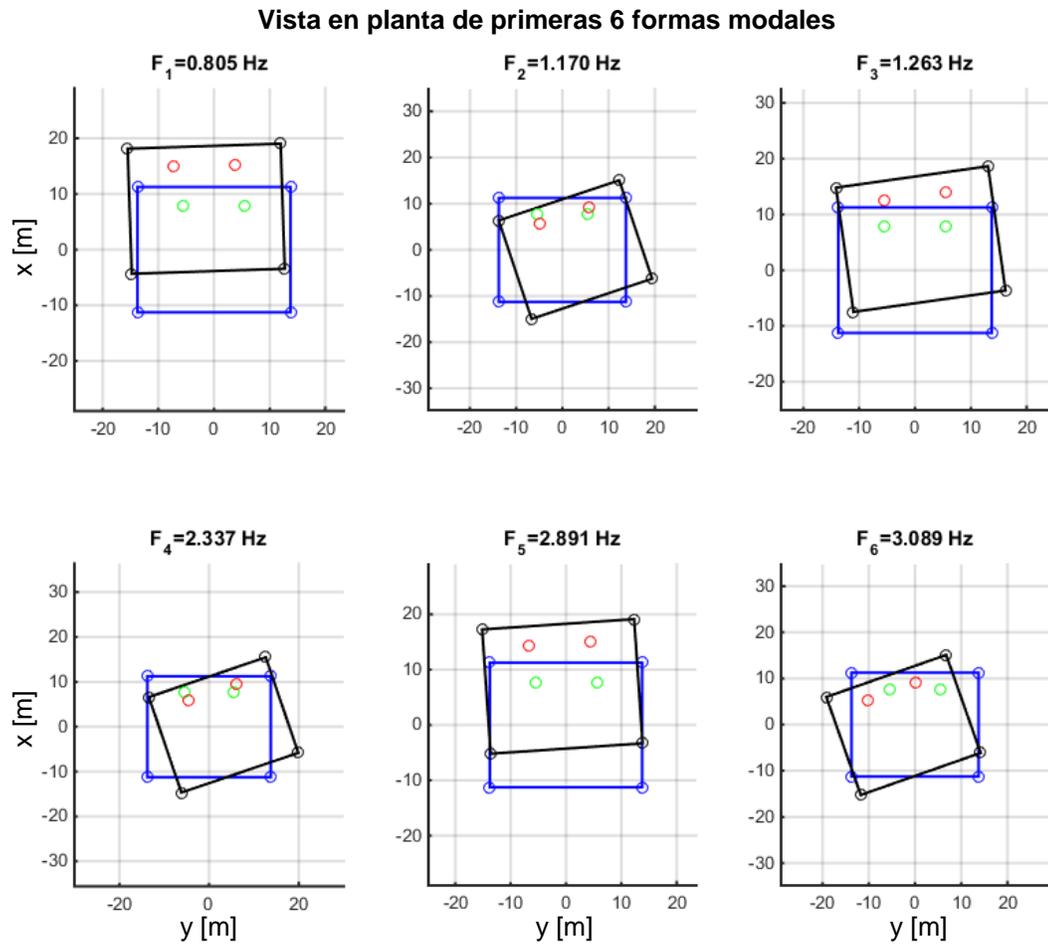


Figura 5-3 Formas modales de edificio Hipódromo Oriente a partir de metodología SSI.

5.2.2.2 Edificio Hipódromo Poniente

Vista en planta de primeras 6 formas modales

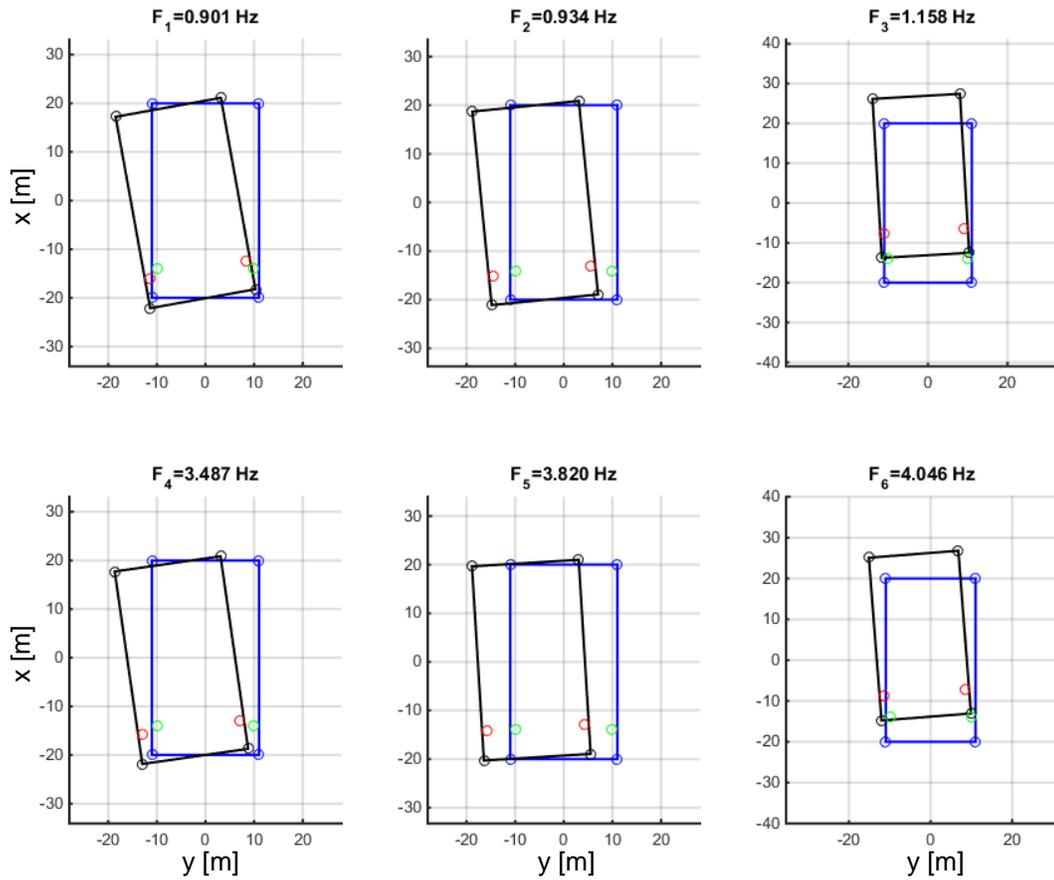


Figura 5-4 Formas modales de edificio Hipódromo Poniente a partir de metodología SSI.

5.2.3 Santa Marta de Huechuraba

Para el caso de estos edificios, la metodología utilizada al momento de la medición no permite generar una representación confiable de las formas modales. Esto se debe principalmente a la imposibilidad de lograr instalar instrumentos en dos puntos distintos de la azotea del edificio.

5.3 Resumen de Resultados

Tabla 5-7 Tabla resumen de resultados de identificación de estructuras

Edificio	F_1 [Hz] (Tipo)	F_2 [Hz] (Tipo)	F_3 [Hz] (Tipo)
El Cortijo Oriente	0.85 (Traslacional)	1.08 (Torsional)	1.45 (Torsional con leve traslación)
El Cortijo Poniente	0.69 (Traslacional con leve torsión)	0.77 (Torsional- Traslacional)	1.13 (Torsional- Traslacional)
Hipódromo Oriente	0.81 (Traslacional)	1.17 (Torsional)	1.26 (Traslacional con leve torsión)
Hipódromo Poniente	0.90 (Torsional)	0.93 (Traslacional con leve torsión)	1.16 (Traslacional con leve torsión)
Huechuraba Oriente	1.06 (-)	1.12 (-)	1.29 (-)
Huechuraba Poniente	0.77 (-)	0.87 (-)	1.02 (-)

Capítulo 6

Análisis de Resultados

En el presente capítulo se lleva a cabo el análisis de los resultados, tomando en consideración el marco teórico explicado en los capítulos anteriores de esta memoria. Estos se abordarán según zona de estudio, de tal forma de generar un análisis a nivel local relacionando las características de amplificación de sitio y los resultados obtenidos de la identificación de estructuras.

6.1 El Cortijo

Según los resultados mostrados en la Figura 4-4 se observa que las curvas de dispersión presentan un error leve de ajuste entre 3.5 y 6.0 [Hz], asociados a un arreglo lineal de sensores. Por el contrario, en la Figura 4-5 se observa un mejor ajuste asociado a un arreglo triangular de sensores. No obstante lo anterior, se obtienen valores muy similares de $V_{s30} \approx 270 - 290 \text{ m/s}$ (con diferencia de 16 [m/s]) mostrados en la Tabla 4-1

y Tabla 4-2, clasificando el suelo como tipo D en ambos casos, según la NCh 433 (INN-Chile, 2009).

En términos de frecuencias predominantes, se observa de la Figura 4-11 y Figura 4-12, que existe un peak predominante del gráfico HVSR con una $f_p = 1.1 [Hz]$ para ambos arreglos (observándose una amplificación significativa entre 0,7 a 1,5 Hz), mediciones que se efectuaron cercanas al edificio El Cortijo Oriente. Esta frecuencia presenta una amplitud HVSR peak promedio de 3. Por otra parte en la Tabla 4-10, realizada con un único instrumento cercano al edificio El Cortijo Poniente, se tiene una frecuencia predominante de $f_p = 1.5 [Hz]$ con una amplificación promedio de 4. Esto indicaría que en tan sólo 300 metros existe un cambio de frecuencias predominantes entre 1.1 a 1.5 Hz. Por otra parte, los resultados obtenidos en espectros elásticos cercanos a la zona evidencian la existencia de dos peaks predominantes, se plantea la hipótesis que en esta zona el suelo presenta dos peaks de un valor de 1.1 y 1.5 Hz. Este cambio tan radical de frecuencias requeriría un estudio más específico en la zona en caso de que se decida estudiar este tipo de estructuras en más detalle. Según Mucciarelli et al. (1999), valores considerables de amplificación HVSR son los que muestran valores mayores o iguales a 4. Por lo que estructuras en esta zona estarían propensas a ser sujetas a altas demandas sísmicas asociadas a la amplificación del suelo en el emplazamiento.

Con respecto a la identificación de las propiedades dinámicas de los edificios en estudio, se puede apreciar que tanto el método SSI como PSD muestran una correspondencia entre las frecuencias naturales identificadas y las formas modales, para ambos edificios. Por lo tanto, se puede optar por elegir los resultados de cualquiera de los dos métodos y se tiene que los resultados son comparables y comprueba la correcta implementación de los métodos utilizados.

Para el caso del edificio El Cortijo Oriente, se tiene que la segunda frecuencia identificada ($F_2 = 1.08 [Hz]$) coincide con la frecuencia HVSR del suelo, por lo que se podría esperar que este modo podría tener una alta demanda sísmica. La forma modal coincidente corresponde a un modo del tipo torsional, según la Figura 5-1. Además de lo anterior, la tercera frecuencia identificada ($F_3 = 1.45 [Hz]$) posee una forma modal de tipo torsional con una leve traslación, coincidiendo con la frecuencia predominante HVSR de la medición realizada cercana al edificio El Cortijo Poniente (el otro edificio) en la Tabla 4-10, realizada en las cercanías de este edificio. Dado que las frecuencias predominantes del suelo coinciden con dos de las primeras tres frecuencias modales del edificio, indica de forma cualitativa que puede existir el fenómeno de doble resonancia.

Para el caso del edificio El Cortijo Poniente, la tercera frecuencia identificada ($F_3 = 1.13[\text{Hz}]$) es cercana con la frecuencia predominante obtenida a en el HVSR de la Tabla 4-8 (1.09 Hz). Sin embargo, la amplificación HVSR es de tan solo de 2.9 lo que no tendría un efecto considerable sobre la estructura, según Mucciarelli et al. (1999).

Finalmente, con respecto al espectro de respuesta mostrado en la Figura 2-3 se aprecia que existen dos periodos predominantes en torno a los 0.8 y 0.9 [s] (1.25 y 1.1 [Hz]) y en torno a los 1.1 y 1.3 [s] (0.9 y 0.8 [Hz]). Esto indica aún más la variabilidad del sector en términos de periodos predominantes, tomando en cuenta que la estación El Cortijo se encuentra a 400 [m] del punto principal de mediciones de suelos. Además, se muestra en esta figura que las aceleraciones en el sector son del orden de 4 a 5 veces más grandes a las ocasionadas por el mismo sismo en el instrumentos ubicado en la FCFM.

6.2 Hipódromo Chile

Según los resultados mostrados en la Figura 4-6 y Figura 4-7 se observa que no existe una correcta correlación con los valores encontrados por SPAC, no considerándolos para el perfil de inversión. Esto genera que el perfil de velocidades sea creíble hasta una profundidad de hasta 38 a 41 metros, a partir de la información de las curvas de dispersión. Con esto se obtienen valores muy similares de V_{s30} (con diferencia de 14 [m/s]) mostrados en la Tabla 4-3 y Tabla 4-4, clasificando el suelo como tipo B en ambas mediciones, según NCh 433 (INN-Chile, 2009).

Según los gráficos HVSR de las 2 mediciones realizadas, se observan curvas prácticamente planas, donde no se observa un peak predominante lo suficientemente fuerte para considerarlo como una frecuencia predominante del depósito.

Con respecto a la identificación de los edificios en estudio, se puede apreciar que tanto en el método SSI como PSD, existe una correspondencia entre las frecuencias naturales identificadas y formas modales, para ambos edificios.

En conformidad a estos resultados, se observa que la zona del hipódromo Chile se ubica justo en el límite donde se empiezan a observar los suelos finos de la zona norponiente de Santiago, sin ser un depósito tan dominante. En este sentido, se concluye que en esta zona no se debiera observar un efecto de amplificación tan notorio como lo que se podría esperar en las zonas de El Cortijo o Santa Marta de Huechuraba. Sin embargo, observando la Figura 2-4, donde se muestra el espectro de respuesta de la zona, se tiene que las

aceleraciones son del orden de 2 veces las registradas en la estación sismológica ubicada en la FCFM.

6.3 Santa Marta de Huechuraba

Según los resultados mostrados en la Figura 4-8 se observa una correcta correlación entre los valores de SPAC y de curvas de dispersión en relación a lo obtenido a partir del modelo de inversión para las mediciones efectuadas en el terreno baldío. Con respecto al valor de $V_{s30} \approx 270 \text{ m/s}$ se encontró un valor acorde a lo esperado en el sector mostrado en la Tabla 4-5. En cambio en las mediciones realizadas en el sector de las canchas de fútbol, en la Figura 4-9 y Figura 4-10 se observa una baja congruencia en los datos de SPAC y el modelo de inversión de menor error de ajuste (rojo). Sin embargo, la parte de la curva asociada al modelo de inversión se ajusta de mejor manera con las curvas de dispersión experimentales y presentan nuevamente una baja correlación con los resultados obtenidos con SPAC. No obstante lo anterior, se obtienen valores similares de $V_{s30} \approx 305 \text{ m/s}$ (con diferencia de 2 [m/s]) para los modelos de mismo sector mostrados en la Tabla 4-6 y Tabla 4-7. Tomando en cuenta los valores de V_{s30} , el suelo clasifica como tipo D en las tres mediciones, según la NCh 433 (INN-Chile, 2009).

Para el caso de las curvas HVSR realizadas en las canchas de futbol, según la Tabla 4-14 y Tabla 4-15, se tienen amplificaciones considerables, donde la frecuencia predominante es de 1.5 [Hz] con un factor de amplificación de 6.3 en promedio. En la Figura 4-17 y Figura 4-18 se observa que entre 1.0 y 2.0 [Hz] existe un factor de amplificación mayor a 4. En el caso del terreno baldío, se tiene de la Tabla 4-13 que existe un frecuencia predominante de 0.9 [Hz] con una amplificación 5.9 y en la Figura 4-19 se observa que entre 0.8 y 1.0 [Hz] con una amplificación mayor a 4. Estos rangos de amplificación se consideran altos según Mucciarelli et al. (1999).

También es posible apreciar la existencia de 2 peaks de frecuencias en los gráficos HVSR de la Figura 4-17 en los valores de 0.9 y 1.5 [Hz]. Esto puede indicar la existencia de 2 frecuencias predominantes. Esto comprueba el valor obtenido al sur de los edificios, donde en el terreno baldío se encuentra una frecuencia predominante de 0.9 [Hz] (ver Figura 4-16).

Con respecto a la identificación de los edificios en estudio, se puede apreciar que tanto con el método SSI como PSD, existe una correspondencia entre las frecuencias

identificadas y formas modales. Por lo tanto, se puede optar por elegir los resultados de cualquiera de los dos métodos.

Para el caso del edificio Huechuraba Oriente, se tiene que sus tres primeras frecuencias modales ($F_1 = 1.06 [Hz]$, $F_2 = 1.12[Hz]$ y $F_3 = 1.29[Hz]$) están dentro del rango de frecuencias que poseen un factor de amplificación mayor a 4 para el caso de las mediciones en las canchas de fútbol y solo el primer modo posee una frecuencia con factor de amplificación mayor a 4 en el terreno baldío.

Por su parte, en el edificio Huechuraba Poniente, se tiene que de las tres primeras frecuencias modales identificadas ($F_1 = 0.77[Hz]$, $F_2 = 0.87[Hz]$ y $F_3 = 1.02[Hz]$) solo la tercera queda dentro de las frecuencias con factor de amplificación mayor a 4, según las curvas HVSR obtenidas en las canchas de futbol. Por otra parte, para las curvas HVSR del terreno baldío, solo la segunda y la tercera frecuencia modal quedan entre las frecuencias con factor de amplificación mayor a 4. En particular, la segunda que coincide casi exactamente con la frecuencia predominante del depósito con un factor de amplificación máximo de 5.9.

En cuanto al espectro de respuesta mostrado en la Figura 2-5, es posible apreciar que las aceleraciones del sector son al menos 3 veces más grandes que las registradas en la estación sismológica de la FCFM. Esto habla de que las estructuras en este sector se verán aún más solicitadas que las del sector centro de Santiago.

6.4 Discusiones Generales

Con respecto a las mediciones efectuadas en el suelo, se evidencia error debido a ruido antrópico que se evidencia fundamentalmente en las componentes de alta frecuencia presente en los registros de vibraciones ambientales, captados a su vez por instrumentos de altas frecuencias como lo son los Trominos que tienen a desamplificar las componentes de baja frecuencia. Se debe tener presente que esta información también es relevante ya que es necesaria para caracterizar los estratos superficiales. No obstante lo anterior, es necesario validar los resultados obtenidos con estudios futuros debido a que este trabajo es de tipo preliminar.

Los principales resultados obtenidos tienen relación con los periodos predominantes de los depósitos y las velocidades de onda de corte, principalmente a 30 [m] de profundidad. Si bien los estudios expuestos en los antecedentes no hacen referencia a mediciones de

corta duración, se concluye que estas metodologías son aplicables a zonas locales, reduciendo la cantidad de tiempo necesario de cada medición, la distancia entre sensores y, a su vez, de procesamiento de datos.

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

El estudio realizado en esta memoria de título logra entregar resultados de exploración geotécnica y de identificación de estructuras en los sectores de El Cortijo, Hipódromo Chile y Santa Marta de Huechuraba. Estos resultados son relevantes en la medida que muestran la relevancia de estudiar edificios altos emplazados en la zona norponiente de Santiago.

Con respecto a la identificación de estructuras, se comprueban que los métodos entregan buenos resultados considerando condiciones de mediciones mínimas, en términos de instrumentos y de tiempo de medición. Esto muestra la versatilidad que entregan los instrumentos para realizar identificación de estructuras, obteniendo sus frecuencias y formas modales.

Ahora bien, enfocando la atención en las zonas y estructuras de estudio. Se observa una amplificación sísmica moderada en las edificaciones cercanas al sector de Hipódromo

Chile. Esto se debe principalmente a las características del suelo, más que las características identificadas en los edificios. Se tiene un suelo competente tipo B según NCh433, con velocidades de onda de corte a 30 [m] de profundidad superiores a 550 [m/s] y sin una frecuencia predominante que pueda generar amplificación del depósito del suelo. Sin embargo, cuando se analizan los registros sísmicos observados en la zona además de los daños observados en el terremoto del 2010 se observó que en esta zona existe amplificación sísmica (en casi todo el rango de frecuencias), pero esta amplificación sería bastante menor a la que se podría observar en zonas como Santa Marta de Huechuraba.

En el sector de El Cortijo el suelo se clasifica como tipo D, según la NCh433, con velocidades de onda de corte del orden de 280 [m/s]. Con respecto a los edificios, ambas estructuras se encuentran proclives a sentir efectos de resonancia debido a la frecuencia predominante del depósito y sus frecuencias modales identificadas. Sin embargo, el foco está en el edificio El Cortijo Oriente que presenta una alta vulnerabilidad ya que tiene dos frecuencias modales ($F_2 = 1.08[Hz]$ y $F_3 = 1.45[Hz]$) que son cercanas a las dos frecuencias fundamentales del depósito de suelo, debido a que se encuentra entre dos zonas con periodos predominantes similares. Con respecto al edificio El Cortijo Poniente, existe una baja vulnerabilidad, ya que si bien coincide su tercera frecuencia modal con la frecuencia predominante del suelo, esta posee un factor de amplificación menor a 3.

Por último, en el sector de Santa Marta de Huechuraba se tiene que el suelo se clasifica como tipo D, según NCh433, con velocidades de onda de corte del orden de 295 [m/s]. En particular, el edificio Huechuraba Oriente posee sus tres principales frecuencias naturales en el rango donde el factor de amplificación HVSR es cercano a 4. Por otra parte, el edificio Huechuraba Poniente posee una vulnerabilidad moderada debido a que posee sólo una frecuencia natural ($F_2 = 0.87[Hz]$) cercana al periodo predominante del suelo en estudio.

Por último se concluye que existen dos edificaciones de este estudio que se encuentran proclives a sufrir significantes efectos de doble resonancia debido a la amplificación de la respuesta del depósito de suelo en las cuales se emplazan y un aumento en la respuesta estructural, como el aumento del corte basal, debido a la no consideración de este efecto en su estructuración. Estos edificios corresponden a: El Cortijo Oriente (13 pisos) y Huechuraba Oriente (16 pisos). Por un lado los niveles de amplificación observados en relaciones HVSR son más altos en Santa Marta de Huechuraba que en el Cortijo, en cambio en el Cortijo se tendrían periodos de suelos más altos. Cabe mencionar que el edificio de Santa Marta de Huechuraba corresponde a un edificio de muros del tipo habitacional, en cambio el edificio de El Cortijo corresponde a un tipo de oficina

caracterizado por un marco sísmico perimetral con un núcleo central de muros de hormigón.

En relación a estos dos edificios, dado que su construcción es anterior al 2010, se debe tener en consideración los efectos percibidos en estos durante el 27F. En conversaciones con los vecinos de los edificios es posible recopilar que la sensación del movimiento fue muy fuerte. En El Cortijo se observaron muchos daños en elementos no estructurales y la mayoría de los muebles y estantes de las oficinas totalmente caídos. Por su parte, en el edificio de Santa Marta de Huechuraba, se reportaron efectos en las fundaciones del edificio, asentamientos de casi 30 [cm] que provocaron problemas en los estacionamientos de estos. Este es un antecedente importante a considerar y que aumenta el interés por estudiar estos dos edificios.

En base a lo realizado, se debe mencionar lo importante que resulta estudiar el fenómeno de doble resonancia en estructuras fundadas sobre un depósito blando de suelo. Este estudio puede promover nuevos estudios más acabados de la interacción suelo-estructura y los efectos que tiene en la respuesta estructural, cabe mencionar que los periodos identificados en los edificios de interés para estudios futuros son más altos que lo encontrado al usar la clásica fórmula $N/20$, donde N es el número de pisos. Esto valida totalmente la teoría del principal efecto de la interacción suelo estructura fundada en suelo blando, que indica que se los periodos naturales se tienden a alargar. Con esto, reproducir en el país lo recomendado para la norma mexicana (Avilés et al., 2004) y lo que existe en la norma española (Calvo, 2012), que tienen presente este problema y lo analizan conforme a las características de cada país.

7.2 Recomendaciones

Con respecto a la obtención de permisos, autorización y realización de mediciones, se recomienda:

- Realizar una etapa de obtención de información de los responsables de la administración de los edificios de interés. Fue comprobado que al interactuar en forma directa con los administradores de edificios, existe una mayor eficacia en la obtención del permiso necesario para acceder sin problemas.
- Reservar con tiempo los equipos necesarios para realizar las mediciones, involucrando a todas las partes interesadas en utilizar los instrumentos. Al estar

trabajando con terceras personas (administradores de edificios) se debe procurar siempre tenerlos como prioridad y evitar tener inoperancia logística.

- Realizar mediciones de pruebas para comprobar el funcionamiento de los equipos a utilizar, poniendo énfasis en los posibles problemas que se encontrarán en terreno. Es necesario contar con una inducción con profesionales instruidos en los equipos a utilizar.
- Se debe contar con una metodología que permita sincronizar los instrumentos, en caso de ser inalámbricos (se recomienda emplear el programa 5 de los Trominos). Esto permitirá corregir posibles errores asociados a la capacidad de los instrumentos a encontrar un tiempo común en terreno y al tanteo realizado para sincronizar de manera manual.
- Realizar mediciones más largas para así generar curvas de dispersión más limpias, con mayor contenido de frecuencias identificadas y que se logre captar no tan solo el contenido de alta frecuencia del depósito, sino también el de baja. Según Humire et al. (2015) lo recomendable es medir al menos 20 minutos, pero se recomienda, dados los resultados obtenidos en este trabajo, que se realicen mediciones de 40 minutos y en condiciones donde el ruido antrópico sea mínimo.

Con respecto a la realización de estudios futuros sobre las edificaciones que poseen una alta vulnerabilidad sísmica se recomienda:

- Gestionar la posibilidad de instalar instrumentos de manera permanente en los edificios de interés (Edificio de Santa Marta de Huechuraba Oriente o el del Cortijo Oriente), con tal de poseer registros que permitan conocer aún mejor el comportamiento de estos durante sismos.
- Analizar nuevos edificios y terreno de la zona de Pudahuel y Maipú, específicamente los sectores cercanos a la Av. Américo Vespucio. En estos sectores es posible apreciar uno o dos edificios que podrían ser propensos a efectos de doble resonancia.
- Implementar una metodología que permita tener información de la salud estructural del edificio. Esto debido a que estos edificios ya fueron solicitados por el terremoto 27F y pudieron sufrir daños que generan nuevas condiciones en las propiedades dinámicas de estos edificios.

- Se recomienda analizar y replicar la metodología de los estudios de interacción suelo-estructura de Avilés et al. (2004) que permiten definir disposiciones reglamentarias, considerando el efecto en conjunto de esta interacción. También, otros estudios que abarcan esta interacción y analiza una estructura fundada sobre un depósito blando es lo realizado por Hernández (2013) y Fernández (2007).

- Replicar el trabajo que realizó Christie (2017) donde se generan modelos computacionales con softwares especializados, como PLAXIS 2D y SAP2000, considerando las múltiples variables que afectan a la interacción dinámica suelo-estructura.

Bibliografía

- Aguilar, A. (2012). Estudio experimental del comportamiento dinámico de un edificio de Viña del Mar dañado durante el terremoto de febrero de 2010. *Memoria Para Optar Al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas Y Matemáticas. Universidad de Chile.*
- Aki, K. (1957). Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors. *Earthquake Research Institute.*
- Aki, K., & Richards, P. (2002). *Quantitative seismology.* (U. S. University Science Book, Ed.).
- Allemang, R., & Brown, D. (1982). A correlation for modal vector analysis. *Proceedings of the First International Modal Analysis Conference, 110–6.*
- Ashford, S. A., Sitar, N., Lysmer, J., & Deng, N. (1997). Topographic effects on the seismic response of steep slopes. *Bulletin of the Seismological Society of America, 87 (3), 701–709.*
- Avilés, J., & Pérez, L. (2004). Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura. *Revista de Ingeniería Sísmica - Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.*
- Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H., Barmin, M. P., Levshin, A. L., Lin, F., Moschetti, M. P., ... Yang, Y. (2007). Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broadband surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International, 169(3), 1239–1260.*
- Boroschek, R. L., Baesler, H., & Vega, C. (2011). Experimental evaluation of the dynamic properties of a wharf structure. *Engineering Structures, 33(2), 344–356.* <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.10.014>
- Boschi, L., Weemstra, C., Verbeke, J., Ekstrom, G., Zunino, A., & Giardini, D. (2012). On measuring surface wave phase velocity from station-station cross-correlation of ambient signal. *Geophysical Journal International, 192 (1), 346–358.*
- Botero, C., & Jaramillo, D. (2004). Evaluación de los efectos inerciales de interacción dinámica suelo-estructura. *Revista Universidad EAFIT, 134, 90–104.*
- Bouckovalas, G. D., & Papadimitriou, A. G. (2005). Numerical evaluation of slope

- topography effects on seismic ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25 (7), 547–558.
- Brenguier, F., Shapiro, N. M., Campillo, M., Nercessian, A., & Ferrazzini, V. (2007). 3-D surface wave tomography of the Piton de la Fournaise volcano using seismic noise correlations. *Geophysical Research Letters*, 34 (2).
- Calvo, R. (2012). Resonancia suelo-estructura y norma de construcción sismorresistente española. *Trabajo Fin de Master. Universidad de Granada. España.*
- Campillo, M., Roux, P., & Shapiro, N. M. (2011). Seismic, ambient noise correlation. *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, 1230–1236.
- Castellaro, S. (2016). The complementarity of H/V and dispersion curves. *Geophysics*, 81(6), T323–T338. <https://doi.org/10.1190/geo2015-0399.1>
- Cho, K. H., Herrmann, R. B., Ammon, C. J., & Lee, K. (2007). Imaging the Upper Crust of the Korean Peninsula by surface-wave tomography. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97 (1B), 198–207.
- Chopra, A. (2014). Dinámica de Estructuras. *4ta Edición Pearson Education.*
- Christie, M. (2017). Estudio del fenómeno de interacción dinámica suelo-estructura y su influencia en la demanda sísmica estructural. *Memoria de Titulación Como Requisito Parcial Para Optar Al Título de Ingeniero Civil. UTFSM. Chile.*
- Comunicaciones FCFM - U. de Chile. (2017). Zonas en Chile son susceptibles a efectos similares a los del terremoto de México. Retrieved from <http://uchile.cl/i138337>
- Contreras, V., & Boroschek, R. (2015). Curvas de atenuación espectrales para sismos chilenos. *XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015.*
- Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. (2012). *Mw=8.8: Terremoto en Chile, 27 de febrero de 2010.*
- Díaz, P. (2017). Análisis de estructuras aisladas con el método de múltiples subestructuras. *Memoria Para Optar Al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas Y Matemáticas. Universidad de Chile2.*
- Dziewonski, A., Bloch, S., & Landisman, M. (1969). A technique for the analysis of transient seismic signals. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 59 (1),

427–444.

- Ekström, G. (2014). Love and Rayleigh phase-velocity maps, 5 - 40 s. of the western and central USA from USArray data. *Earth and Planetary Science Letters*, 402, 42–49.
- Ekström, G., Abers, G. A., & Webb, S. C. (2009). Determination of surface-wave phase velocities across USArray from noise and Aki's spectral formulation. *Geophysical Research Letters*, 36(18), 5–9. <https://doi.org/10.1029/2009GL039131>
- Faccioli, E. (1991). Seismic amplification in the presence of geological and topographic irregularities. *Proceedings of the Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*.
- Fernández, J. (2017). Estudio de efectos de sitio en la región de Coquimbo evidenciados durante el terremoto de Illapel 2015. *Memoria Para Optar Al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas Y Matemáticas. Universidad de Chile*.
- Fernández, L. (2007). Efectos de interacción dinámica suelo-estructura en edificios con primer piso blando. *Tesis Para Optar Al Grado de Maestro En Ingeniería. UNAM. México*.
- Foti, S. (2000). *Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves*.
- Foti, S., Lai, C. G., Rix, G. J., & Strobbia, C. (2014). Surface wave methods for near-surface site characterization. *CRC Press*.
- Gabriels, P., Snieder, R., & Nolet, G. (1987). In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves. *Geophysical Prospecting*, 35, 187–196.
- García, A. (2006). Interacción suelo-estructura en el análisis y diseño sísmico de estructuras de mampostería no reforzada. *Memorias Del XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural de Jalisco. México*.
- González, F. A., Maksymowicz, A., Díaz, D., Villegas, L., Leiva, M., Blanco, B., ... Bonvalot, S. (2018). Characterization of the depocenters and the basement structure, below the central Chile Andean Forearc: A 3D geophysical modelling in Santiago Basin area. *Wiley - Basin Research*, 30(4), 799–815. <https://doi.org/10.1111/bre.12281>

- Gouédard, P., Stehly, L., Brenguier, F., Campillo, M., Colin de Verdiere, Y., Larose, E., & Weaver, R. (2008). Cross-correlation of random fields: Mathematical approach and applications. *Geophysical Prospecting*, 56 (3), 375–393.
- Hannemann, K., Papazachos, C., Ohrnberger, M., Savvaidis, A., Anthymidis, M., & Lontsi, A. M. (2014). Three-dimensional shallow structure from high-frequency ambient noise tomography: New results for the Mygdonia basin-Euroseistest area, northern Greece. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119 (6), 4979–4999.
- Hernández, E. (2013). Análisis de interacción dinámica suelo-estructura de un edificio desplantado en la zona de lago de la ciudad de México. *Tesis Para Optar Al Grado de Maestro En Ingeniería. UNAM. México.*
- Hernández, F. (2009). Análisis de métodos de identificación de variación de propiedades dinámicas. *Tesis Para Optar Al Grado de Magíster En Ciencias de La Ingeniería, Mención Ingeniería Sísmica. Memoria Para Optar Al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.*
- Hernández, F., Astroza, R., Ochoa, F., & Pastén, C. (2019). Razones estructurales del colapso de edificios debido al terremoto de Puebla-Morelos (Mw 7.1). *XII Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica.*
- Heylen, W., & Lammens SY, S. P. (1997). Modal analysis theory and testing. *Katholieke Universiteit Leuven - Belgium.*
- Humire, F., Sáez, E., & Leyton, F. (2015). Manual de aplicación de técnicas geofísicas basadas en ondas de superficie para la determinación del parámetro Vs30. *Instituto de La Construcción.*
- Humire, Francisco. (2013). *Aplicación de métodos geofísicos basados en ondas superficiales para la caracterización sísmica de suelos. Aplicación a la microzonificación sísmica del norte y poniente de Santiago. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile.*
- INN-Chile. Diseño Sísmico de Edificios, Norma Chilena Oficial NCh433.Of1996 (Modificada en 2009) (2009).
- Khalil, L., Sadek, M., & Shahrour, I. (2007). Influence of the soil-structure interaction on the fundamental period of building. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33, 2445–2453.

- Kramer, S. (1996). Geotechnical earthquake engineering. *Pearson Education, India*.
- Lachet, C., & Bard, P.-Y. (1995). Theoretical investigations on the Nakamura's technique. *International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*.
- Lai, C. G., & Rix, G. J. (1998). Simultaneous inversion of Rayleigh phase velocity and attenuation for near-surface site characterization. *School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology*.
- Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83 (5), 1574–1594.
- Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1994). Are microtremors useful in site response evaluation? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (5), 1350–1364.
- Leyton, F., Sepulveda, S. a, Astroza, M., Acevedo, P., Ruiz, S., Gonzalez, L., & Foncea, C. (2011). Seismic Zonation of the Santiago Basin, Chile. *5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*.
- Liu, Q., & Gu, Y. (2012). Seismic imaging: From classical to adjoint tomography. *Tectonophysics*, 566, 31–66.
- Mejia, L. (2017). Interacción dinámica suelo-estructura. *Tesis Para Optar Al Título de Ingeniero Civil. UNAM. México*.
- Molina, J. (2011). *Intensidades sísmicas del terremoto del 27 de febrero del 2010 en las 34 comunas del Gran Santiago. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas Y Matemáticas. Universidad de Chile*.
- Mucciarelli, M., & Monachesi, G. (1998). A quick survey of local amplifications and their correlation with damage observed during the umbro-marchesan (Italy) earthquake of September 26, 1997. *Journal of Earthquake Engineering*, 2(2), 325–337. <https://doi.org/10.1080/13632469809350325>
- Mucciarelli, M., & Monachesi, G. (1999). The bovec (Slovenia) earthquake, april 1998: Preliminary quantitative association among damage, ground motion amplification and building frequencies. *Journal of Earthquake Engineering*, 3(3), 317–327. <https://doi.org/10.1080/13632469909350349>
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamics characteristics estimation of surface using

- microtremor on the ground surface. *Quarterly Reports of the Railway Technical Research Institute*, 30, 25–33.
- Nazarian, S., & Desai, M. R. (1993). Automated surface wave method: field testing. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119 (7), 1094–1111.
- Nolet, G. (1981). Linearized inversion of (teleseismic) data. R. Cassinis (Ed.), *The Solution of the Inverse Problem in Geophysical Interpretation*, 9–37.
- Núñez, T. (2009). Variación debido a cambios de masa y rigidez de las propiedades dinámicas de una estructura en proceso constructivo. *Tesis Para Optar Al Grado de Magíster En Ciencias de La Ingeniería, Mención Ingeniería Sísmica. Memoria Para Optar Al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.*
- Ochoa, F. (2007). Caracterización geotécnica a través del uso de ondas Rayleigh. *Tesis Para Optar Al Grado de Magíster En Ciencias de La Ingeniería, Mención Ingeniería Geotécnica. Memoria Para Optar Al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.*
- Park, C., Miller, R., & Xia, J. (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1998*, (Society of Exporation Geophysicists), 1377–1380.
- Pasten, C. (2007). *Respuesta sísmica de la cuenca de Santiago. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Geotécnica. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.*
- Peeters, B. (2000). System identification and damage detection in civil engineering. *Katholieke Universiteit Leuven - Faculteit Toegepaste Wetenschappen. Belgium.*
- Picozzi, M., Parolai, S., Bindi, D., & Strollo, A. (2009). Characterization of shallow geology by high-frequency seismic noise tomography. *Geophysical Journal International*, 176 (1), 164–174.
- Poli, P., Pedersen, H. A., & Campillo, M. (2012). Emergence of body waves from cross-correlation of short period seismic noise. *Geophysical Journal International*, 188(2), 549–558.
- Rauld, R., Medina, F., Leyton, F., & Ruiz, S. (2015). Mapa de microzonificación sismo-

geológica para Chile. *XIV Congreso Geológico Chileno*.

República de Chile. Decreto Supremo N°61 “Aprueba reglamento que fija el diseño sísmico de edificios y deroga Decreto N°117 de 2010” (2011).

Roux, P., Sabra, K. G., Kuperman, W. A., & Roux, A. (2005). Ambient noise cross correlation in free space: Theoretical approach. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(1), 79.

Ruiz, S., & Saragoni, G. R. (2005). Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos de sismogénesis y los efectos del suelo. *Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica*.

Sabra, K. G. (2005). Extracting time-domain Green’s function estimates from ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 32 (3).

Saez, E. (2009). Dynamic nonlinear soil-structure interaction. *Other. Ecole Centrale Paris*.

Sáez, M. (2016). *Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de Santiago. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Sísmica. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.*

Salomón, J. (2017). *Tomografía de ruido sísmico de la cuenca de Santiago. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Estructural, Sísmica y Geotécnica. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.*

Sambridge, M. (1999). Geophysical inversion with neighborhood algorithm - I. Searching the parameter space. *Geophysical Journal International*, 138, 479–494.

Santamaria, J., & Fratta, D. (2005). Discrete signals and inverse problems: an introduction for engineers and scientists. *John Wiley & Sons*.

Seed, H. B., Romo, M. P., Sun, J. I., Jaime, A., & Lysmer, J. (1988). The Mexico earthquake of september 19, 1985. *Earthquake Spectra, Relationsh*, 687–729.

Shapiro, N. M., & Campillo, M. (2004). Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 31 (7).

- Shapiro, N. M., Campillo, M., Stehly, L., & Ritzwoller, M. H. (2005). High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, *307* (5715), 1615–1618.
- Shearer, P. M. (2009). *Introduction to Seismology*. Cambridge University Press (Second Edi, Vol. 136).
- Sneider, R. (2004). Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase. *Physical Review*, *69*(4).
- Soriano, A. (1989). Interacción suelo-estructura, modificación del movimiento. *Revista Física de La Tierra*, *1*(287–308).
- Strobbia, C. (2003). Surface wave methods: Acquisition, processing and inversion. *Ph. D. Thesis, Politecnico Di Torino*.
- Tokimatsu, K., & Ishihara, K. (1995). Geotechnical site characterization using surface waves. *Earthquake Geotechnical Engineering - International Conference*.
- Udías, A. (2000). Principles of Seismology. Cambridge University Press.
- Van Overschee, P., & De Moor, B. (1996). *Subspace Identification For Linear Systems*. Kluwe Academic Publishers, Belgium.
- Vergara, L. (2015). *Relación entre las propiedades geológicas y geotécnicas de la cuenca de Santiago y los daños observados en el terremoto del 27 de febrero del 2010. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Geotécnica. Memoria para optar al título de Ingeniera Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile*.
- Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder, R., Campman, X., & Verdel, A. (2010). Tutorial on seismic interferometry: Part 1 - Basic principles and applications. *Geophysics*, *75* (5), 75A 195-75A 209.
- Wathelet, M. (2005). *Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion*.
- Wathelet, M. (2008). An improved neighborhood algorithm: Pramaeter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*, *35*, L09301.
- Weaver, R., & Lobkis, O. (2001). On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *110* (6), 3011–3017.

- Welch, P. (1967). The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, AU-15.
- Xia, J., Miller, R. D., & Park, C. B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, 64 (3), 691–700.
- Yao, H., Van Der Hilst, R. D., & De Hoop, M. V. (2006). Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis - I. Phase velocity maps. *Geophysical Journal International*, 166 (2)(732–744).

Anexos

A. Curvas de dispersión a partir de Correlación Cruzada de Ruido Sísmico

En el presente apartado se abordará el tema de la correlación cruzada de ruido sísmico, considerando la teoría que existe detrás de la metodología utilizada para encontrar las curvas de dispersión de las mediciones realizadas.

A.1. Velocidades de Fase y Grupo

Si se considera que el movimiento superficial del suelo se relaciona a ondas del tipo Rayleigh como una perturbación armónica que se propaga horizontalmente por la superficie, es decir, a lo largo de la dirección \mathbf{x} , el desplazamiento puede ser descrito por la solución de la ecuación de onda para un suelo horizontal en un semiespacio infinito, que se muestra en la ecuación (A.1) (Aki & Richards, 2002).

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{Z}e^{i(k\mathbf{x} - \omega t)} \quad (\text{A.1})$$

Donde \mathbf{u} corresponde al vector de desplazamientos en la dirección de propagación de la onda, \mathbf{Z} la función que incluye las propiedades del suelo, k el número de onda en la dirección de propagación y ω la frecuencia angular. En base a esta ecuación es posible definir la velocidad de fase de onda (c) como se muestra en la ecuación (A.2) en la cual la frecuencia angular depende del número de onda.

$$c = \frac{\omega(k)}{k} \quad (\text{A.2})$$

Con esta expresión es posible reescribir la ecuación (A.1) en función del número de onda y la velocidad (A.2), como se muestra en la ecuación (A.3).

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{Z}e^{ik(\mathbf{x} - ct)} \quad (\text{A.3})$$

De la ecuación (A.3) aparece un nuevo término $(x - ct)$ el cual es conocido como la fase de una onda y puede interpretarse como una posición x' en un tiempo t con una velocidad c . En base a esto, resulta intuitivo considerar a c como la rapidez a la que se mueven una serie de puntos en la onda que poseen una misma fase (Foti et al., 2014) o como la velocidad a la cual alguna fase fija (forma de la función) del ciclo se desplaza (Udías, 2000).

Ahora bien, considerando un frente de ondas, compuesto por la superposición de dos ondas armónicas, siguiendo la posición definida en (A.1), trasladándose por un mismo medio (Z_0) a lo largo del eje x se pueden definir sus posiciones u_1 y u_2 como se muestran en la ecuación (A.4).

$$u_1 = Z_0 e^{i(k_1 x - \omega_1 t)} \qquad u_2 = Z_0 e^{i(k_2 x - \omega_2 t)} \qquad (\text{A.4})$$

Cada frecuencia y número de onda es ligeramente diferente entre sí, lo cual puede ser descrito como se muestra en las ecuaciones (A.5).

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega + \delta\omega & k_1 &= k + \delta k \\ \omega_2 &= \omega - \delta\omega & k_2 &= k - \delta k \end{aligned} \qquad (\text{A.5})$$

Ahora sumando las contribuciones de ambos armónicos, el desplazamiento del frente de ondas (u_f) queda definido por la ecuación (A.6).

$$u_f = u_1 + u_2 = 2 Z_0 \cos(\delta k x - \delta \omega t) e^{i(kx - \omega t)} \qquad (\text{A.6})$$

La ecuación (A.6) puede reescribirse como se muestra en la ecuación (A.7), considerando nuevos términos de velocidades.

$$u_f = 2 Z_0 \cos(\delta k [x - Ut]) e^{ik(x-ct)} = Z_0^*(x, t) e^{ik(x-ct)} \qquad (\text{A.7})$$

Con la expresión (A.7) se puede representar a una perturbación que viaja a una velocidad de fase c modulada por una envolvente Z_0^* que se mueve a una velocidad de grupo U . Este valor de velocidad también corresponde a la tasa a la cual se desplaza la energía de un grupo de ondas. Infinitesimalmente, la velocidad de grupo se define como se aprecia en la ecuación (A.8).

$$U = \frac{d\omega}{dk} \qquad (\text{A.8})$$

Según lo anterior, es posible observar que el desplazamiento o propagación de una onda queda determinada por la velocidad de fase c y por la velocidad de grupo U . Ambas se relacionan según la expresión mostrada en la ecuación (A.9).

$$U = c \left(1 - k \frac{dc}{d\omega} \right)^{-1} \quad (A.9)$$

Finalmente, es posible apreciar cómo difieren estas dos velocidades. En la Figura A-1, se puede apreciar que ambas velocidades tienen distinta pendiente, observándose que la velocidad de fase es mayor que la velocidad de grupo.

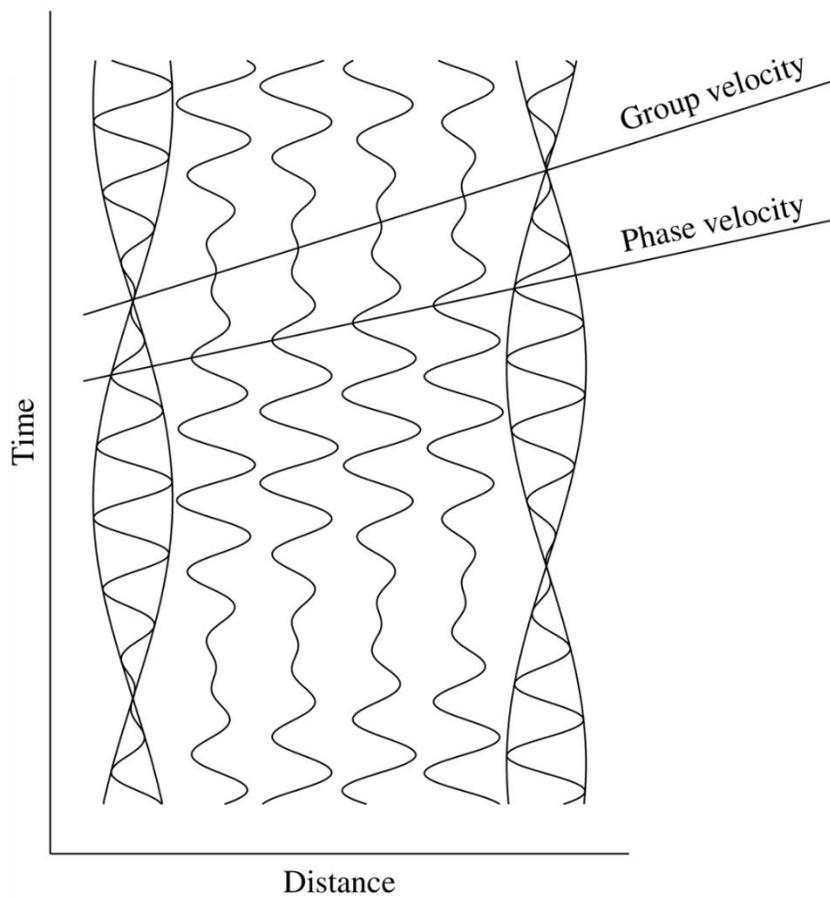


Figura A-1 Suma de dos ondas con ligeros cambios de frecuencia resultando en una onda modulada. La velocidad de grupo corresponde a la del frente de ondas y la velocidad de fase es la velocidad individual de los peaks (Shearer, 2009).

Considerando las ecuaciones (A.2) y (A.8), es intuitivo pensar que tanto la velocidad de fase como la de grupo de un frente de ondas depende de la frecuencia. Esta dependencia se conoce como dispersividad (Tokimatsu & Ishihara, 1995). Se define esta

propiedad de las ondas Rayleigh como el fenómeno por el cual ondas de diferentes frecuencias se propagan a diferentes velocidades (Kramer, 1996). Este fenómeno ocurre específicamente en medios estratificados, donde la onda se propaga hasta una profundidad dependiente de su longitud de onda λ (Strobbia, 2003). En el mismo sentido, otra particularidad de las ondas Rayleigh es que son capaces de excitar capas de suelo hasta una profundidad cercana a una longitud de onda λ (Xia et al., 1999).

Por otra parte, es posible definir la longitud de onda λ como se muestra en la ecuación (A.10).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (A.10)$$

Donde f corresponde a la frecuencia de la onda y c la velocidad de fase. En este sentido, es posible apreciar que las ondas de alta frecuencia (longitud de onda corta) entregarán información acerca de las capas más superficiales del depósito. Por otro lado, las ondas de baja frecuencia (longitud de onda larga) entregarán información de los estratos más profundos (Lai & Rix, 1998).

De aquí se desprende el concepto de curvas de dispersión, donde según la frecuencia de la onda, esta tendrá una determinada velocidad de propagación a través del medio. Con esta información es posible inferir las propiedades del medio en estudio.

Por último, el concepto de dispersividad se puede apreciar claramente en la Figura A-2.

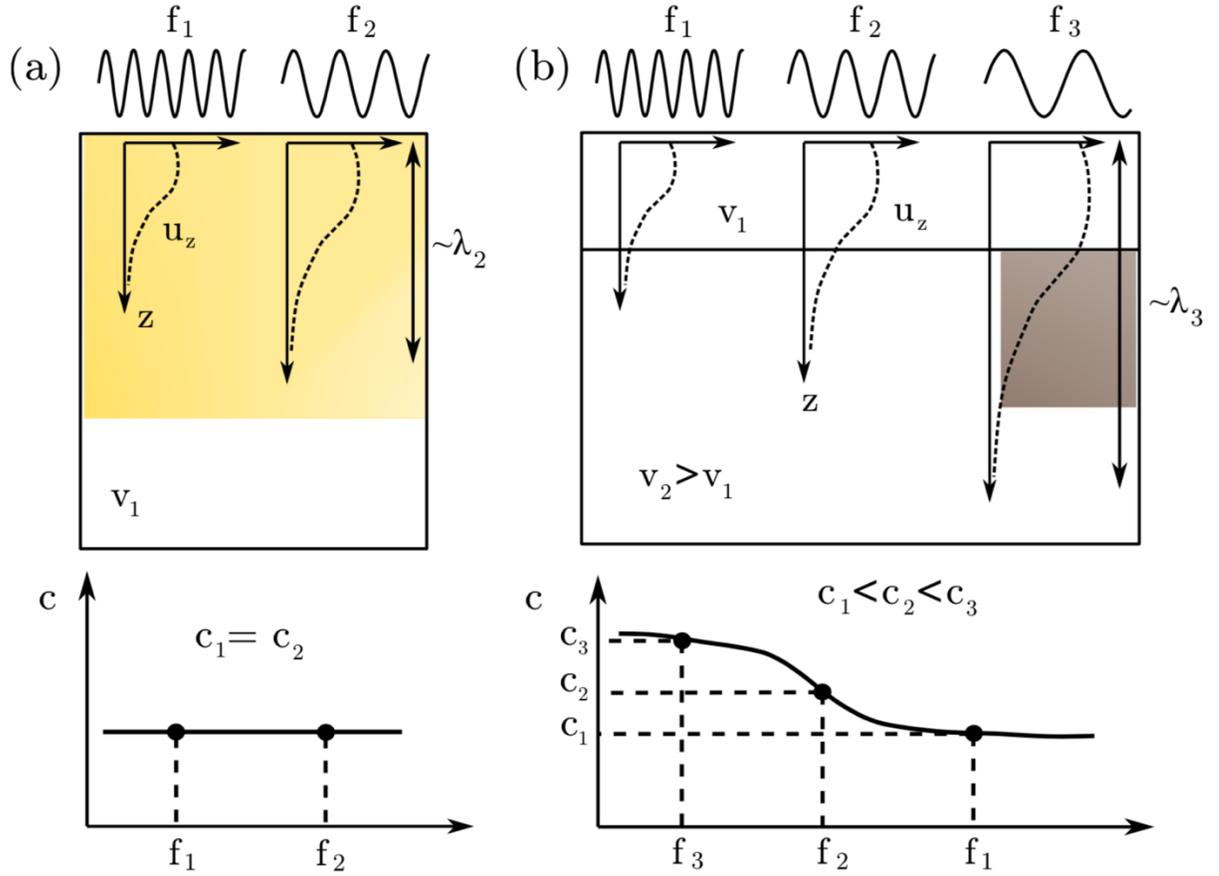


Figura A-2 Curvas de dispersión y profundidad de prospección. (a) Semi-espacio homogéneo. (b) Medio estratificado. (Salomón, 2017) (Mod. Strobbia, 2003)

Para mayor detalle en la explicación de la propagación de ondas Rayleigh se aconseja revisar las tesis de magister de Salomón (2017), Sáez (2016) y Humire (2013).

A.1.1. Correlación Cruzada

La correlación cruzada es un operador matemático que pondera dos funciones (señales) y cuantifica el grado de interdependencia o similitud entre estas (Santamaria & Fratta, 2005). Matemáticamente, si se tienen dos funciones temporales continuas, $f(t)$ y $g(t)$, se define la correlación cruzada $cc^{<f,g>}$ para un desfase temporal τ como se muestra en la ecuación (A.11).

$$cc^{<f,g>}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g(t + \tau) dt \quad (\text{A.11})$$

Ahora bien, si se tienen funciones en forma de señales discretas, es posible definir la correlación cruzada de las señales f_i y g_i para un desfase de k elementos $cc_k^{<f,g>}$ como se muestra en la ecuación (A.12).

$$cc_k^{<f,g>} = \sum_i f_i g_{i+k} \quad (A.12)$$

Una descripción gráfica de cómo trabaja la correlación cruzada se puede observar en la Figura A-3. Al ir multiplicando ambas señales de forma discreta para distintos desfases temporales, llegará un momento donde la correlación toma un valor máximo, este punto determina la mayor similitud entre señales.

Desde un punto de vista de recursos, la correlación cruzada temporal resulta ineficiente, debido al alto costo computacional. Por otro lado, es conveniente realizar una correlación cruzada en el espacio de las frecuencias, debido a que constituye solamente una multiplicación de vectores (Sáez, 2016).

De acuerdo a lo anterior, es necesario definir matemática la correlación cruzada en el espacio de las frecuencias, esto se conoce como el espectro de correlación o densidad cruzada espectral $\rho_u^{<f,g>}$ mostrado en la ecuación (A.13).

$$\rho_u^{<f,g>} = F_u(\omega) G_u^*(\omega) \quad (A.13)$$

Donde $F_u(\omega)$ corresponde a la transformada de Fourier de la señal f_i y $G_u^*(\omega)$ al conjugado de la transformada de Fourier de la señal g_i .

Para más detalles de la metodología de correlación cruzada temporal y espectral, se recomienda revisar las tesis de magister de Sáez (2016) y Salomón (2017).

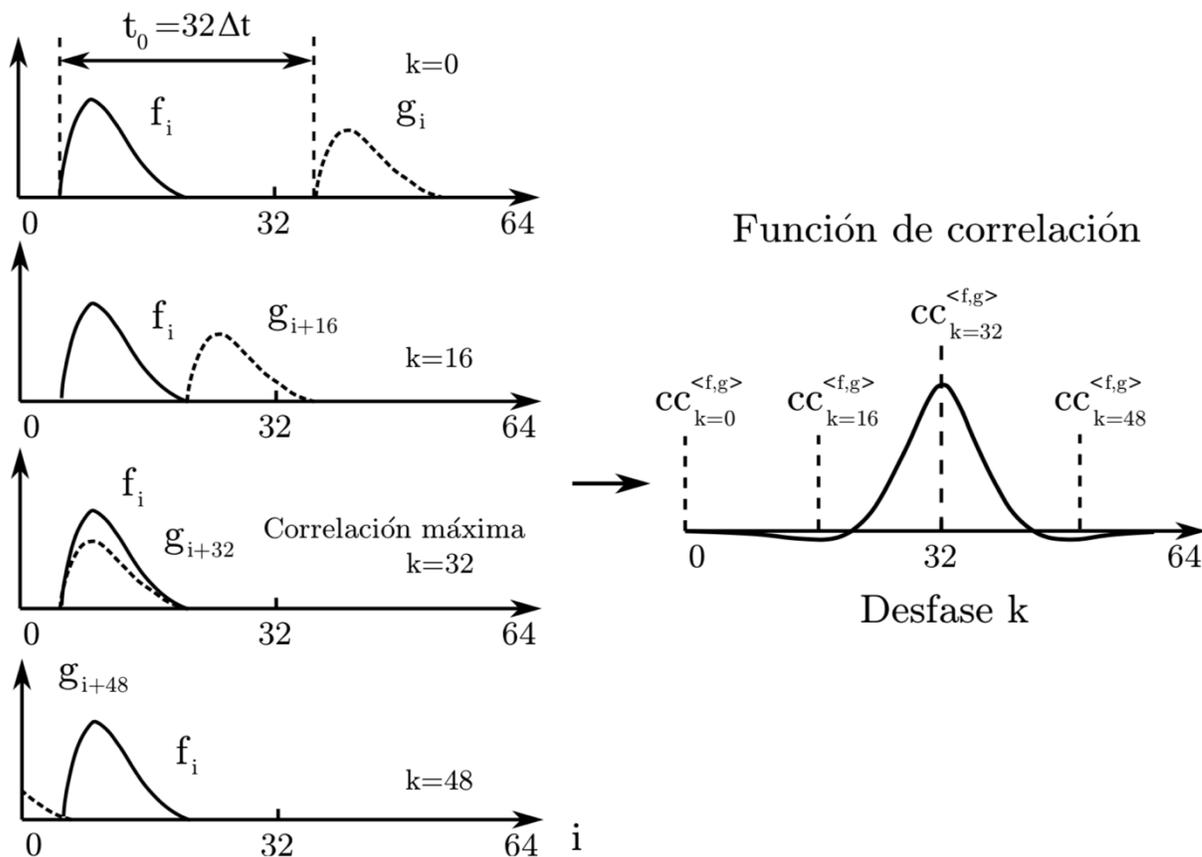


Figura A-3 Descripción gráfica de una correlación cruzada discreta. La señal g_i se desfasa desde derecha a izquierda (Salomón, 2017) (Mod. Santamaria et al., 2005)

A.1.2. Correlación de Ruido Ambiental

El inicio de la utilización de ondas sísmicas para la realización de tomografías de depósitos de suelo fue en la década de los 80' cuando aparece el primer modelo de velocidades. Luego de esto, se generan metodologías más complejas que permiten dilucidar la estructura interna del suelo. Es aquí donde comienza el estudio de tiempos de arribo para ondas provenientes de terremotos con el fin de obtener una estructura de velocidades en profundidad (Liu & Gu, 2012).

Debido a que sólo se utiliza información de terremotos, este método resulta inviable para sectores del planeta donde la actividad sísmica no es usual. Otra desventaja es que, generalmente, las distancia entre instrumentos y la distancia de estos a la fuente son muy

grandes, por lo que se pierde la componente de alta frecuencia debido a la atenuación y dispersión del medio (Shapiro et al., 2005). Esto genera la imposibilidad de obtener información en estratos más superficiales, información fundamental para la predicción de la respuesta sísmica.

Actualmente, la correlación de ruido ambiental permite obtener información de los estratos superficiales sin la necesidad de esperar la ocurrencia de un evento sísmico. Logrando con esto la determinación de las propiedades dispersivas del medio realizando mediciones superficiales de vibraciones ambientales.

A.1.2.1 Función de Green

La función de Green $G(\mathbf{x}, t)$ matemáticamente corresponde a la solución de la ecuación de onda dentro de un volumen determinado. Sin embargo, físicamente corresponde a la respuesta impulsiva generada en un receptor, debido al paso de un frente de ondas desde una fuente puntual arbitraria (Wapenaar et al., 2010).

Con esto en mente, diversos investigadores han demostrado que la función de Green, es decir, la respuesta en un punto específico dado el paso de ondas desde una fuente, puede ser estimada a partir de la correlación cruzada de registros continuos de ruido sísmico (Boschi et al., 2012; Poli et al., 2012; Shapiro & Campillo, 2004). La hipótesis de esta metodología es asumir que en la serie de tiempo generada en la correlación cruzada de ruido sísmico entre dos instrumentos es proporcional a la señal observada en el último instrumento dado un impulso generado en el primero. Equivalentemente, la correlación cruzada entre instrumentos converge a la onda superficial de la función de Green (Gouédard et al., 2008; Weaver & Lobkis, 2001).

La función de Green ha sido utilizada para estudiar la estructura interna de la tierra a diferentes profundidades. En general, las ondas superficiales de alta frecuencia son más sensibles a las componentes superficiales de velocidades menores a las de estratos más profundos (Sáez, 2016). Es por esto que ondas superficiales con frecuencias mayores a 1 [Hz] son utilizadas para extraer información de estructuras superficiales (Breguier et al., 2007; Hannemann et al., 2014; Picozzi et al., 2009).

Para más detalle con la definición de la función de Green, se recomienda leer la tesis de magister de Salomón (2017).

A.1.2.2 Enfoque Temporal

Considerando lo explicado en la subsección anterior, la función de Green resulta importante para el análisis ya que al ser extraída a partir de la correlación cruzada puede ser sujeta a técnicas tales como el análisis Tiempo Frecuencia (Dziewonski et al., 1969) con el fin de estimar la velocidad de fase y obtener información de las propiedades dispersivas o elásticas del medio entre instrumentos (Cho et al., 2007).

Asumir lo anterior supone que la distribución de ruido sísmico cumple el principio de equipartición debido a que constituye un campo difuso de ondas. Por lo tanto, la energía del campo se distribuye homogéneamente entre los distintos modos de propagación (Sabra, 2005).

Investigaciones posteriores, lograron demostrar experimentalmente que la correlación cruzada de ruido sísmico, específicamente de la componente vertical, permite extraer grupos de ondas Rayleigh coherentes que viajan entre un par de sensores (Shapiro et al., 2004).

Gráficamente es posible observar en la Figura A-4 cómo se relaciona la distribución espacial de fuentes de ruido y la correlación cruzada entre dos sensores. En esta figura las fuentes (puntos verdes) aportan a la correlación cruzada para un tiempo de arribo t_e dependiente de la distancia entre ambos instrumentos (r_a y r_b). Las hipérbolas representan el lugar geométrico de todas las fuentes que contribuyen para un mismo tiempo de arribo a la correlación final (Roux et al., 2005). Por otro lado, el tiempo de arribo entre sensores corresponde a t_0 y las áreas sombreadas corresponden a interferencias constructivas, en donde la onda se propaga de un sensor a otro (Sneider, 2004).

En la Figura A-4(a) existe una total recuperación de la función de Green del medio dada la homogeneidad del frente de ondas, teniendo una correlación cruzada simétrica. En la Figura A-4(b) existe una parcial recuperación de la función de Green gracias a la presencia de zonas de interferencia constructiva, teniendo una correlación cruzada asimétrica. Por último, en la Figura A-4(c) la correlación cruzada no es capaz de estimar el tiempo de arribo, por lo que no existe recuperación de la función de Green en el medio debido a la alta heterogeneidad. De lo anterior se desprende que una correcta recuperación del tiempo de arribo de la función de Green depende de la existencia de interferencias constructivas (Campillo et al., 2011).

A pesar que las correlaciones son asimétricas, esto no genera impedimento para obtener las propiedades dispersivas del medio, ya que la información necesaria de la

correlación cruzada en su análisis temporal, está asociada al tiempo donde se alcanza la amplitud máxima (Sáez, 2016). En este sentido, las propiedades dispersivas se relacionan con la velocidad de grupo $U(f_c)$, la cual se calcula para una frecuencia central conciendo el tiempo t_p donde la función de Green alcanza su máxima amplitud. Sea Δ la distancia entre instrumentos, la velocidad de grupo se define en la ecuación (A.14).

$$U(f) = \frac{\Delta}{t_p} \quad (A.14)$$

Sin embargo, para utilizar la ecuación (A.4) se debe cumplir la aproximación de campo lejano, es decir, se debe cumplir la ecuación (A.15) (Bensen et al., 2007; Yao et al., 2006).

$$\Delta \geq 3\lambda \quad (A.15)$$

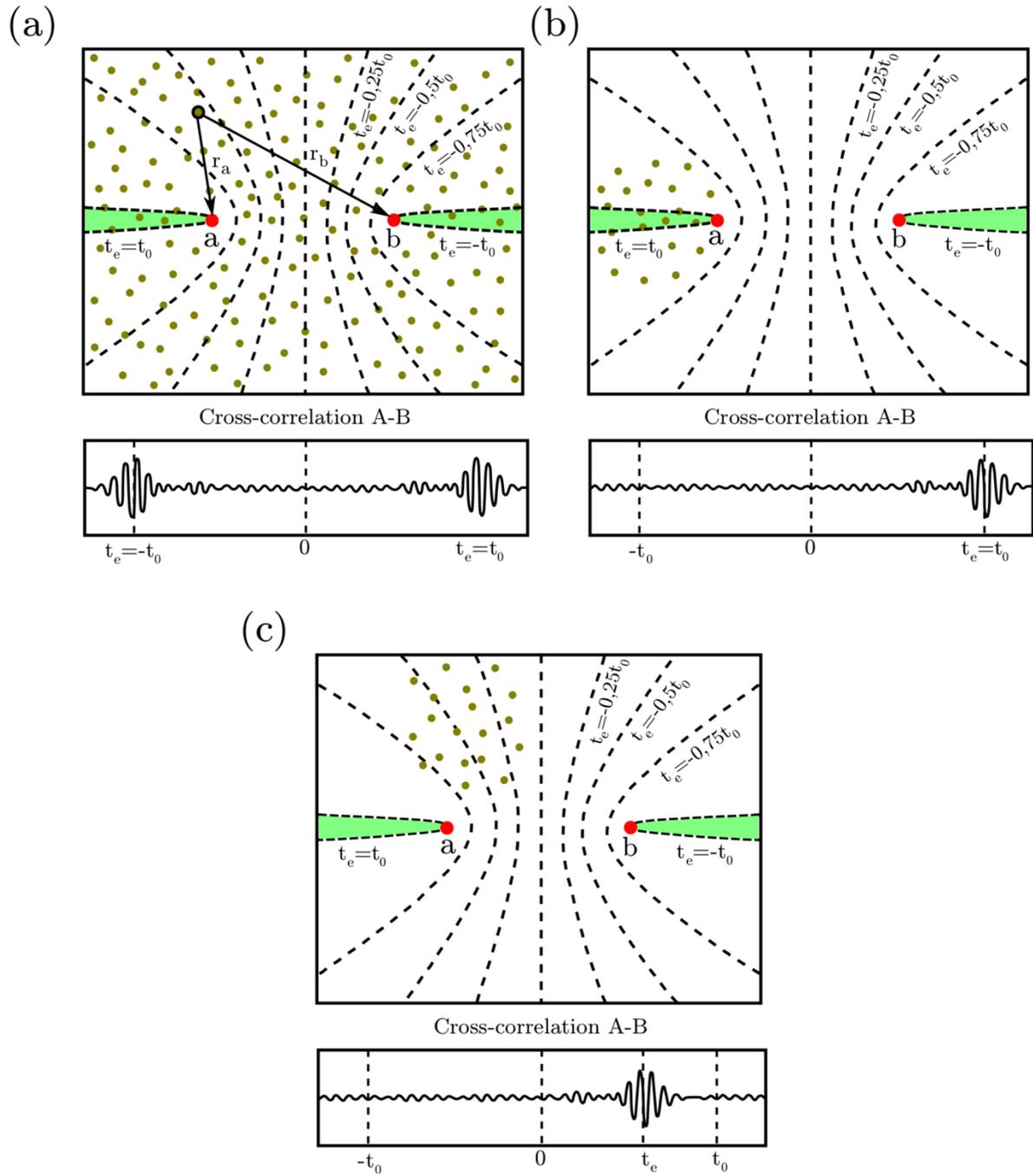


Figura A-4 Efecto de anisotropía en las fuentes de ruido (Salomón, 2017) (Mod. Campillo et al., 2011). (a) Distribución homogénea de fuentes. (b) Fuentes ubicadas sólo en zona de interferencia constructiva. (c) Distribución heterogénea de fuentes.

A.1.2.3 Enfoque Espectral

Debido a la gran restricción que genera la ecuación (A.15) es necesario tener otra metodología para poder obtener velocidades de fase para longitudes iguales a la distancia entre estaciones. Esta solución es la propone Ekström et al. (2009) en la cual, en base a lo estudiado por Aki (1957), se pueden estimar velocidades de fase entre dos estaciones utilizando la información espectral de la correlación cruzada, permitiendo obtener curvas de dispersión para longitudes de onda iguales a la distancia entre sensores (Ekström et al., 2009).

Inicialmente se considera la correlación de ondas polarizadas y dispersivas (Rayleigh y Love) que se propagan horizontalmente entre dos sensores y se concluye que el promedio azimutal del espectro de correlación $\bar{\rho}$ es la función de Bessel de primer tipo de orden cero J_0 que depende de la distancia entre sensores Δ_{ij} , la velocidad de fase c y la frecuencia ω_0 , como se muestra en la ecuación (A.16) (Aki, 1957).

$$\bar{\rho}(\Delta_{ij}, \omega_0) = J_0\left(\frac{\omega_0}{c(\omega_0)}\Delta_{ij}\right) \quad (\text{A.16})$$

Considerando la ecuación (A.16), Aki (1957) establece que también es válida para un par de estaciones, sin considerar la condición de promediar el espectro correlacionado en diferentes azimuts. De aquí, es que se propone una solución sencilla y una metodología automatizable, para encontrar la curva de dispersión analizando los cruces por cero de la parte real del espectro correlacionado (Ekström, 2014; Ekström et al., 2009). Esta metodología no considera la amplitud del espectro de correlación, esto debido a que esta se encuentra controlada por el espectro de ruido ambiental. Sin embargo, basta seguir sólo los cruces por cero de la parte real del espectro, debido a que estos son insensibles a las variaciones espectrales del ruido. En la Figura A-5 se puede apreciar como varía la amplitud de la función de Bessel de primer tipo y de orden cero, con la ubicación de los primeros seis cruces por cero.

Con los cruces por cero, es posible definir la velocidad de fase para el n -ésimo cruce por cero de la función de correlación ω_n como la ecuación (A.17).

$$c(\omega_n) = \frac{\omega_n \Delta_{ij}}{z_{n+m}} \quad (\text{A.17})$$

Donde z_{n+m} corresponde al valor de $(n + m)$ -ésimo cruce por cero de la función de Bessel J_0 de la Figura A-5. El término m toma valores enteros ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) que representan los cruces por cero en que el espectro de correlación y la función de Bessel J_0 está desfasado. En las tesis de magister de Sáez (2016) y Salomón (2017) se consideran los valores de m y se busca la curva de dispersión que posea más sentido físico según los antecedentes geológicos y geotécnicos entre los sensores analizados.

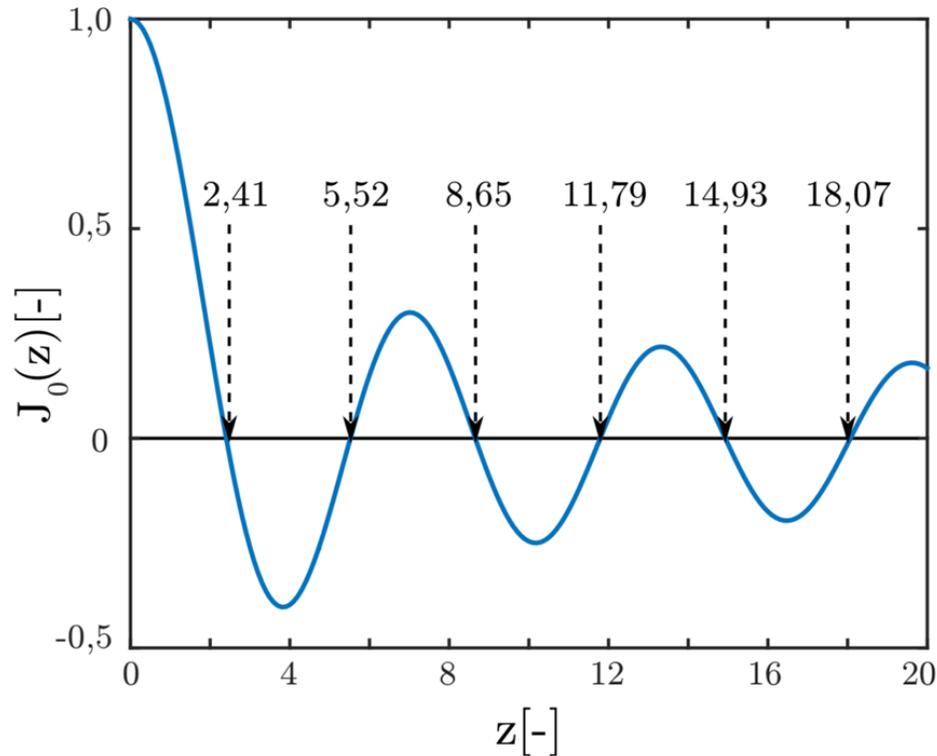


Figura A-5 Función de Bessel del primer tipo de orden cero J_0 . En la línea punteada se muestran los valores de z en que J_0 cruza el origen (Salomón, 2017).

Sin embargo, en esta memoria, se utiliza tan sólo la curva de dispersión asociada a $m = 0$, debido al carácter local que posee este trabajo de investigación. En caso de que las relaciones cruzadas no se comporten con el decaimiento de la función de Bessel, será necesario elegir ya sea $m = \pm 1$ o $m = \pm 2$ según corresponda a los cruces por cero o falsos cruces por cero.

Para mayor información sobre algunas consideraciones de la correlación cruzada de ruido ambiental, se recomienda leer los documentos de tesis de magister de Salomón (2017) y Sáez (2016).

B. Evaluación de Respuesta en Superficie

B.1. Métodos Numéricos

En la literatura existen tres métodos más empleados que se basan en la utilización de métodos numéricos. Estos son: Métodos Analíticos, Métodos de Dominio y Factores de Amplificación. Como la evaluación numérica escapa del alcance de esta memoria, no se explicarán estos métodos a detalle. Sin embargo, el método de Factores de Amplificación entrega un resultado interesante de comparar con los resultados obtenidos en esta memoria.

Con la teoría de propagación unidimensional de onda de corte es posible encontrar el factor de amplificación de movimiento en superficie. A partir de esta, se obtiene la frecuencia predominante del suelo en función de la velocidad de onda de corte y el espesor del estrato a considerar. La relación entre estos factores se muestra en la ecuación (B.1). Cabe destacar que considerando valores de amortiguamiento menores a 10% (5% específicamente) se puede demostrar que los valores se correlacionan con un error bajo (Pasten, 2007). Para mayor detalle en la obtención de esta ecuación, se recomienda visitar el documento de Pasten (2007).

$$f_0 = \frac{V_s}{4H} \quad (\text{B.1})$$

Donde f_0 corresponde a la frecuencia predominante del depósito, V_s la velocidad de onda de corte y H la profundidad del estrato.

B.2. Métodos Experimentales

Los métodos que utilizan datos experimentales para obtener la respuesta en superficie de un depósito son dos: Razones Espectrales Estándares y Razones Espectrales H/V en superficie.

El primer método corresponde a la relación de los movimientos en dos puntos del depósito de suelo analizar. Uno corresponde a la superficie y el otro a la base del depósito.

Es debido a esto que este método es uno de los más confiables para encontrar la respuesta en superficie. Sin embargo, este método al requerir un instrumento en la base es necesario realizar una excavación. Para el caso particular de Santiago, se tienen basamentos rocosos profundos (González et al., 2018), por lo que el alto costo para estas excavaciones hace inviable la utilización de este método.

El segundo método realiza una relación entre los movimientos horizontales y verticales que se obtienen solo en la superficie del lugar de estudio. Al no necesitar una segunda ubicación del instrumento, constituye un método versátil y de fácil aplicación en terreno. Otra particularidad de este método es que no necesita una fuente activa para relacionar los movimientos, sino que hace uso de las vibraciones ambientales que ocurren en el depósito a estudiar. Por último, este método aparece como la opción principal para realizar el estudio de los suelos objetivos de este trabajo, ya que se ha comprobado su excelente comportamiento en depósitos de suelo blando.

A continuación, se procede a explicar el método de las Razones Espectrales H/V en superficie.

B.3. Razones Espectrales H/V en Superficie

Este método, también conocido como el método de Nakamura (Nakamura, 1989), es capaz de determinar dos parámetros importantes de las propiedades dinámicas de un depósito de suelo. Es a partir de vibraciones ambientales obtenidas en terreno, es posible encontrar tanto la frecuencia predominante o dominante del depósito y el factor de amplificación o función de transferencia.

No obstante lo anterior, investigaciones más recientes al estudio realizado por Nakamura (1989) señalan que si bien es posible estimar la frecuencia predominante de vibración del depósito, la obtención del factor de amplificación puede no ser consistente (Lachet & Bard, 1995; Lermo & Chávez-García, 1994).

Para el caso de la aplicación de este método en el país se han obtenido resultados consistentes en términos de obtención de frecuencias fundamentales, tal como es posible apreciar en el trabajo de Pasten (2007) realizado en la ciudad de Santiago. En este se obtienen resultados que se correlacionan muy bien con las datos geológicos y geotécnicos de la cuenca.

B.3.1. Formulación Teórica del Método de Nakamura

Como se señaló anteriormente, un depósito de suelo tiende a vibrar al verse afectado o solicitado por un microsismo. Un ejemplo de este son las vibraciones ambientales que se generan por fuentes naturales o antrópicas. Estas perturbaciones se asocian a la solicitación ocasionada por un frente de ondas SH que se propaga desde la base del depósito hasta la superficie. El método de Nakamura se encarga de medir este tipo de perturbaciones en la superficie del depósito.

En términos de tipo de vibración, las naturales son las que son de mayor envergadura y se caracterizan por ser de baja frecuencia. El conjunto de estas produce una solicitación dinámica aleatoria, que ocasiona la vibración del depósito en su frecuencia predominante.

Siguiendo la misma línea, existen vibraciones de tipo antrópicas que tienden a excitar las capas más superficiales del depósito y se caracterizan por contener un alto contenido de frecuencias altas. Al realizarse la medición en la superficie, se debe considerar que la medición tendrá un contenido de alta frecuencia importante, característica importante para el procesamiento.

Dado que estas vibraciones de tipo antrópica no son estacionarias, es posible minimizarlas condicionando la medición a realizar en ciertos momentos del día, donde la actividad humana es mínima. Como, por ejemplo, sería óptimo realizar mediciones en la noche y también por largos periodos de tiempo, de modo de poder filtrar y eliminar las vibraciones de alta frecuencia y quedarse solo con el contenido de baja frecuencia.

No obstante lo anterior, Nakamura (1989) señala que a pesar de que la actividad antrópica afecta la calidad de la medición, es posible encontrar la frecuencia predominante del depósito y su factor de amplificación, sin tener una restricción horaria.

En términos de amplificación, la evidencia indica que cualquier amplificación del movimiento en la superficie es debido al efecto de la presencia de depósitos sobre la roca basal. En este sentido, mediciones en afloramientos rocosos o en suelos muy rígidos no tendrán una dirección predominante de movimiento. Es por esta razón, que este método resulta de gran ayuda para este trabajo ya que los suelos en estudio son de tipo blando, ideales para la utilización de esta metodología.

La hipótesis principal de la metodología de Nakamura (1989) es que los movimientos horizontales en superficie se asocian a una amplificación de las ondas S debido a la multi-

reflexión de estas, mientras que los movimientos verticales se asocian a una amplificación de las ondas P debido a la multi-reflexión correspondiente. También se acepta que en la componente vertical del movimiento aparece el efecto de las ondas Rayleigh, por lo que es posible cuantificar estos movimientos como una razón entre el movimiento vertical en superficie y vertical en la base.

Según Nakamura (1989), la función de transferencia queda definida por el espectro de Fourier horizontal en superficie, sobre el espectro de Fourier horizontal en la base del depósito, como se muestra en la ecuación (B.2).

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (\text{B.2})$$

La razón espectral de ruido ambiental se encuentra influenciada por las ondas Rayleigh, que afecta a la componente vertical del movimiento. Este efecto se puede cuantificar como la razón entre el movimiento vertical de la superficie y el movimiento vertical en la base del depósito, como se muestra en la ecuación (B.3).

$$E_T = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (\text{B.3})$$

Definiendo una nueva función de transferencia de modo que no se considere el efecto de la onda de Rayleigh, se normaliza la función de transferencia horizontal por la influencia de la onda de Rayleigh, como se muestra en la ecuación (B.4).

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_T} \quad (\text{B.4})$$

Reemplazando las ecuaciones (B.2) y (B.3) en (B.4) se obtiene lo mostrado en la ecuación (B.5).

$$S_{TT} = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \cdot \frac{S_{VB}}{S_{VS}} \quad (\text{B.5})$$

Considerando que en la base del depósito se tiene que la componente horizontal y vertical son bastante similares ($S_{HB} \approx S_{VB}$), es posible considerar la función de transferencia final como se muestra en la ecuación (B.6).

$$S_{TT} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (\text{B.6})$$

Quedando definida la función de transferencia o factor de amplificación de un depósito de suelo a partir de mediciones de vibraciones ambientales tomadas en superficie.

C. Curvas de Dispersión

En la siguiente sección se mostrarán los resultados obtenidos al realizar la metodología expuesta con respecto a las curvas de dispersión. Para lograr obtenerlas, en base a mediciones ambientales se utiliza el software Matlab con la rutina programada en Sáez (2016).

C.1. El Cortijo

a) Medición 001

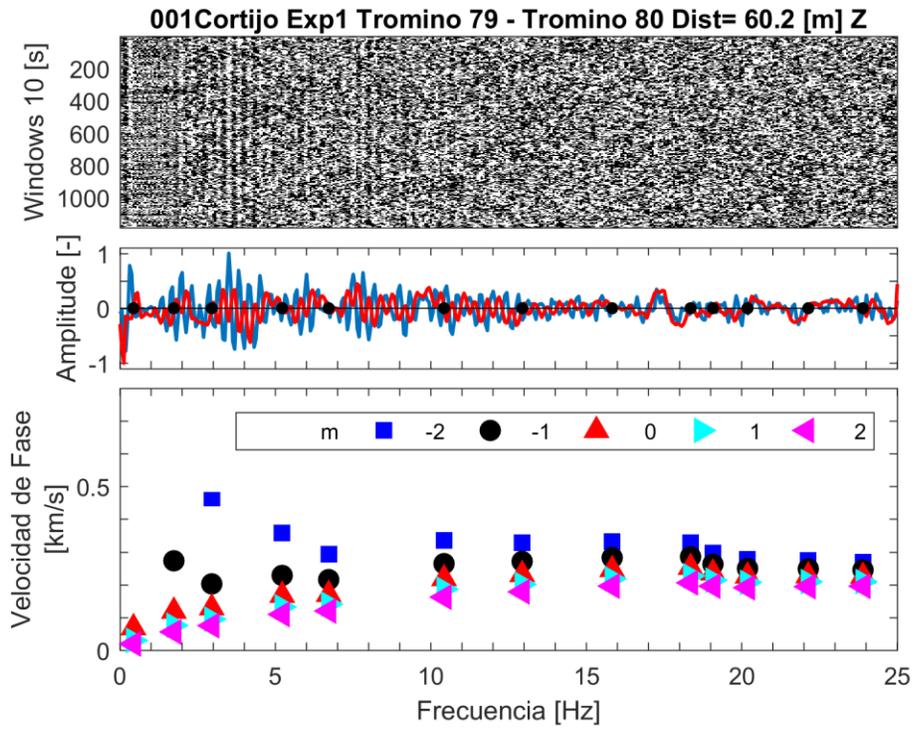


Figura C . 1 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF1.

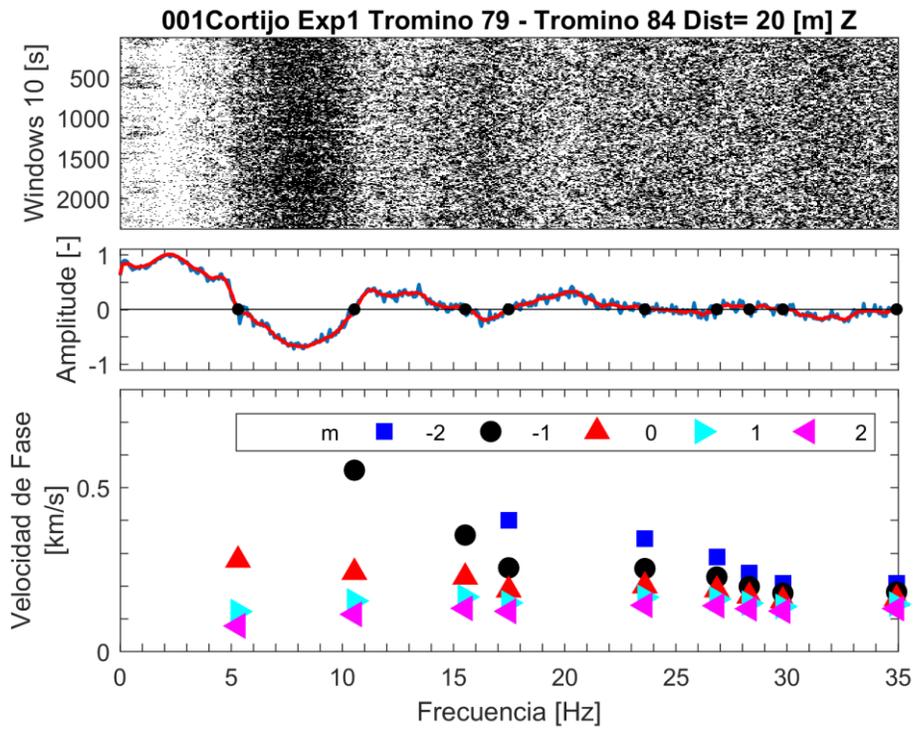


Figura C . 2 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF3.

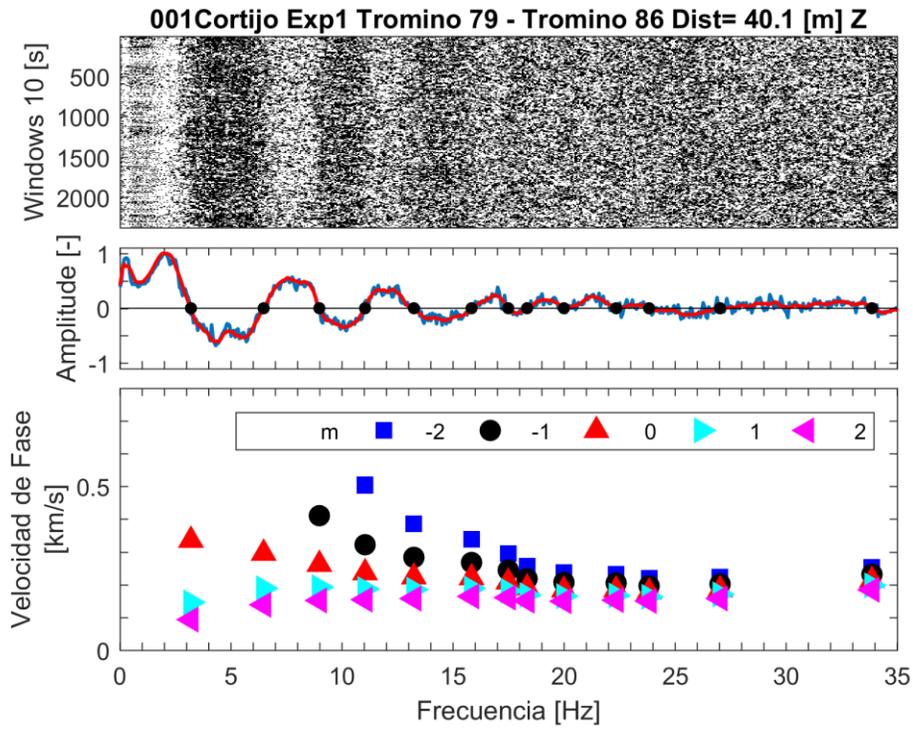


Figura C . 3 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF2.

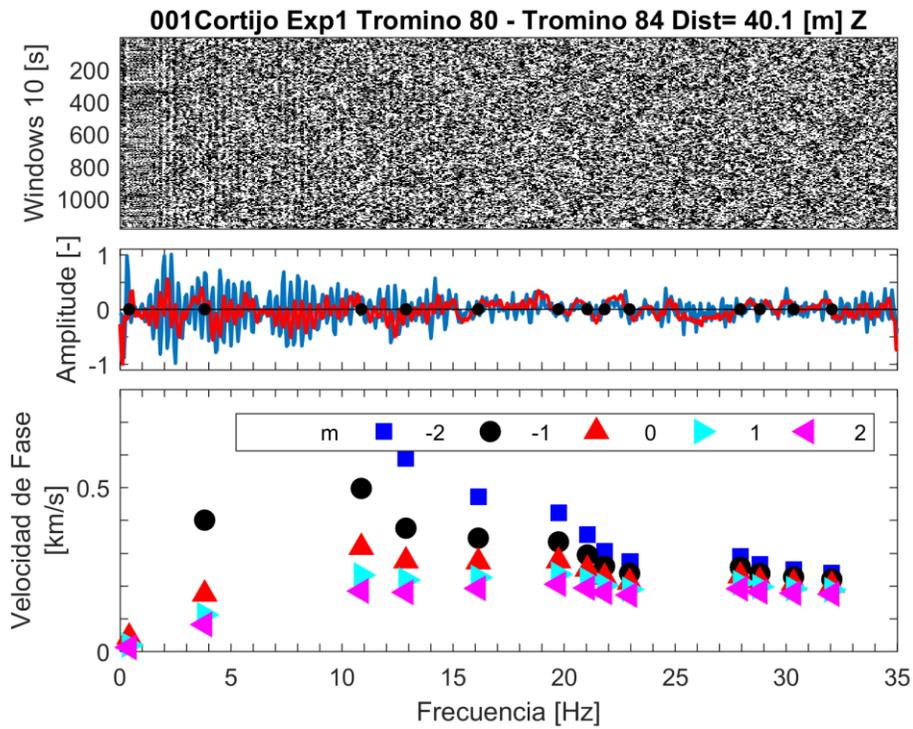


Figura C . 4 Curva de dispersión entre instrumentos DGF1-DGF3.

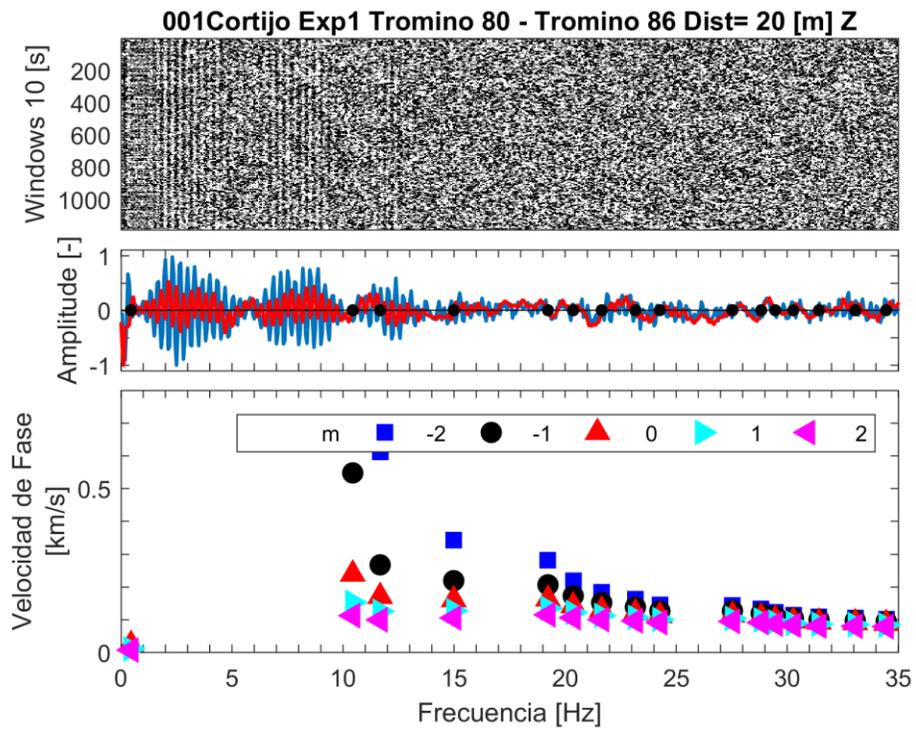


Figura C . 5 Curva de dispersión entre instrumentos DGF1-DGF2.

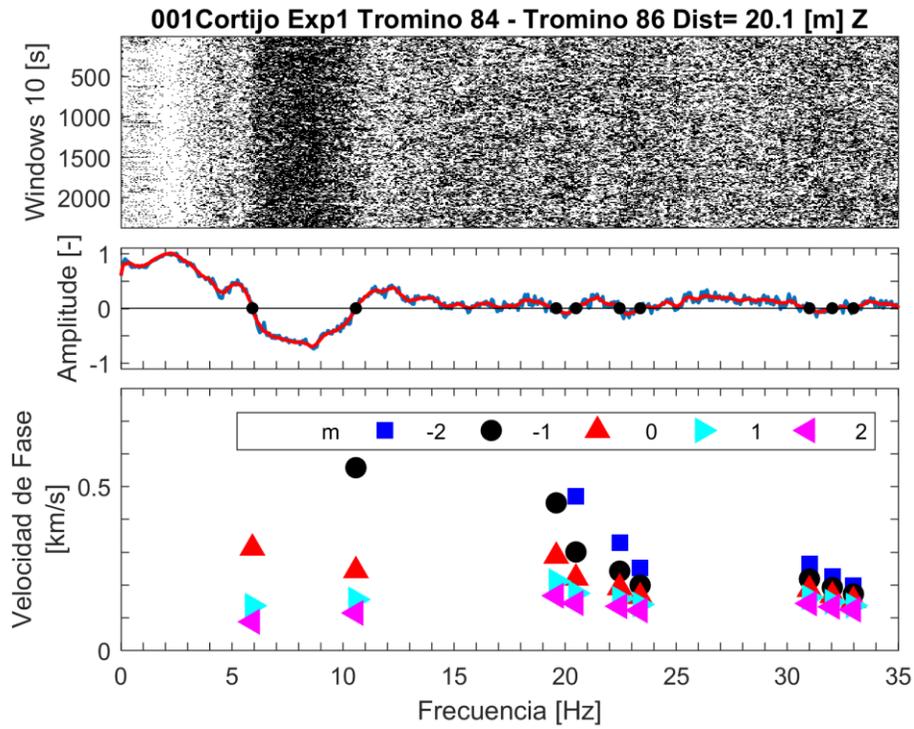


Figura C . 6 Curva de dispersión entre instrumentos DGF3-DGF2.

Es posible apreciar que la correlación cruzada que relaciona al instrumento DGF1 (80) no genera curvas que se asemejen a la función de Bessel, por lo que no aportan información con sentido físico. Para seguir con la metodología se deja fuera las correlaciones que consideren este instrumento en esta medición.

b) Medición 002

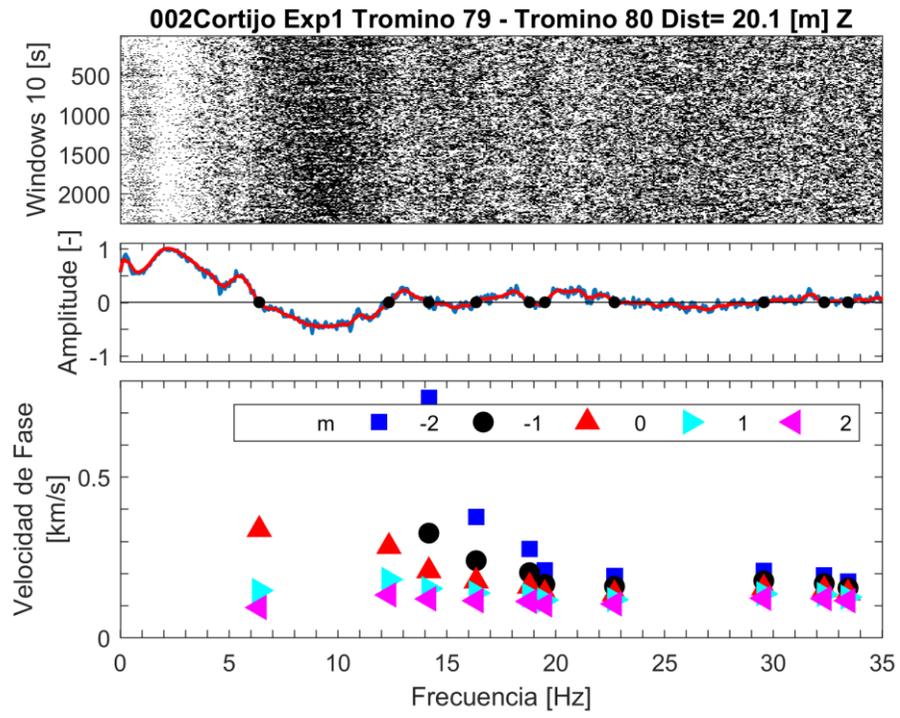


Figura C . 7 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF1.

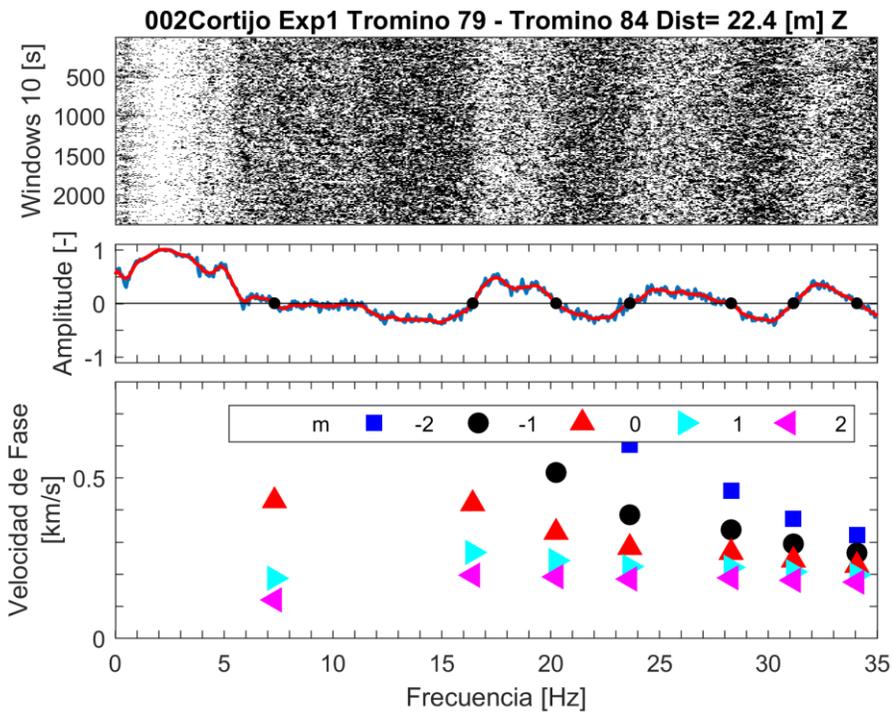


Figura C . 8 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF3.

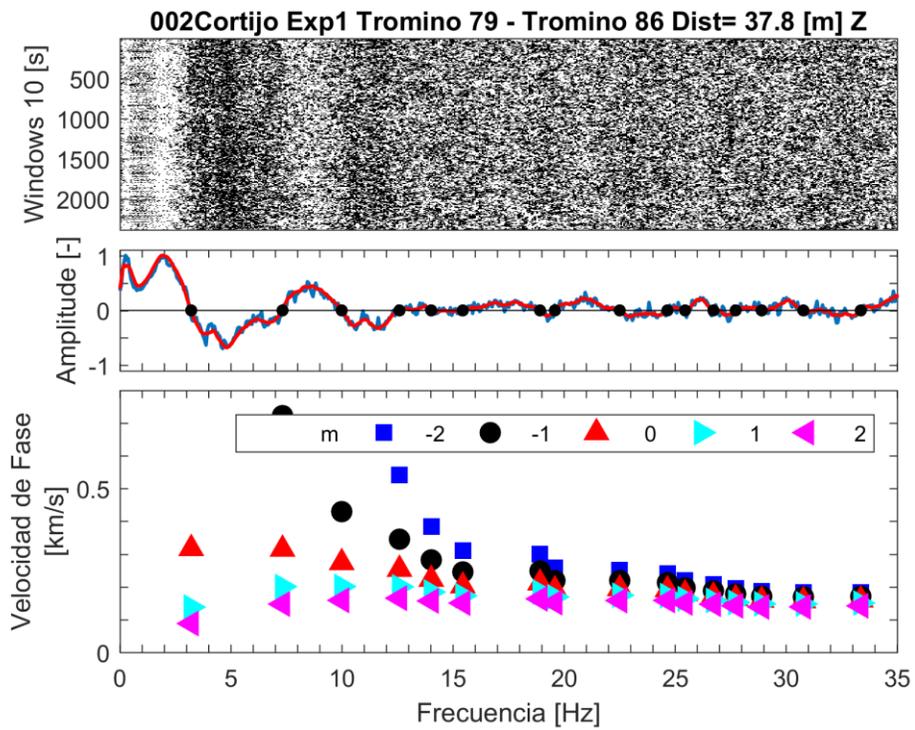


Figura C . 9 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF2.

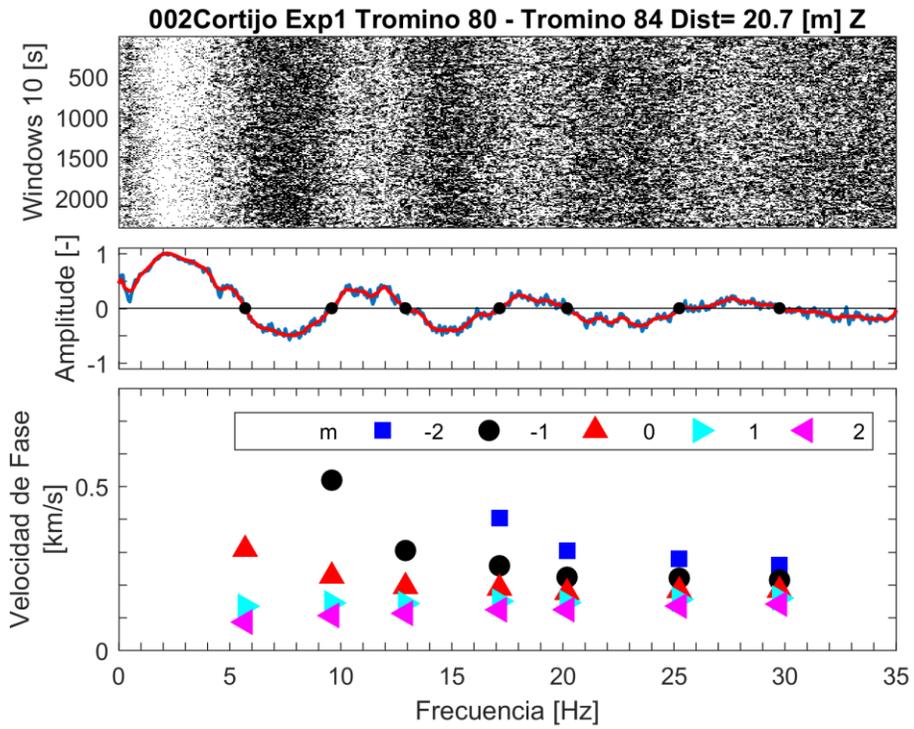


Figura C . 10 Curva de dispersión entre instrumentos DGF1-DGF3.

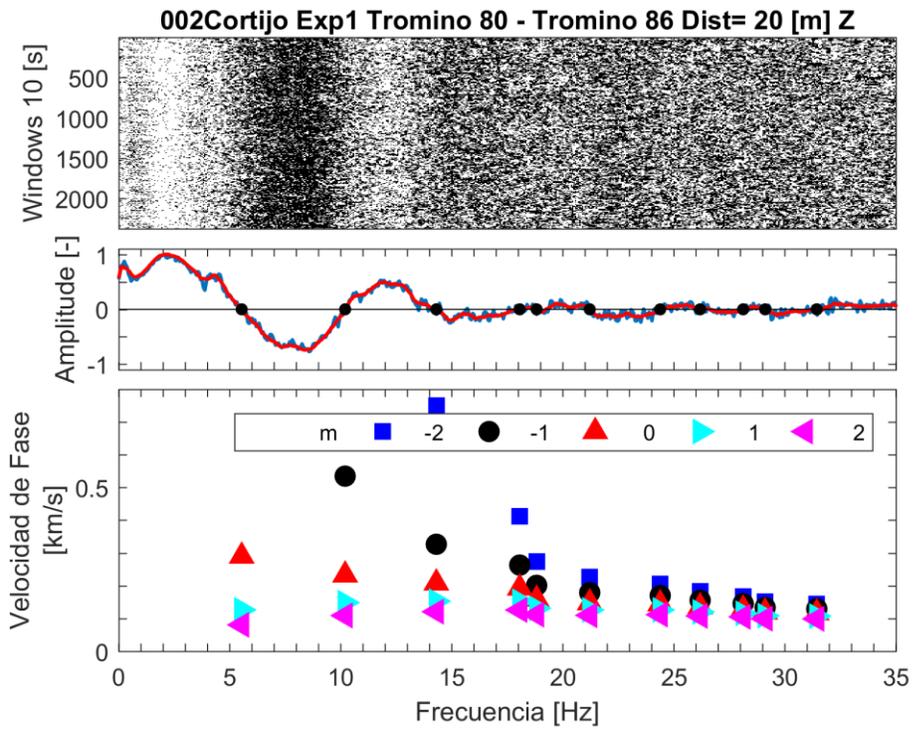


Figura C . 11 Curva de dispersión entre instrumentos DGF1-DGF2.

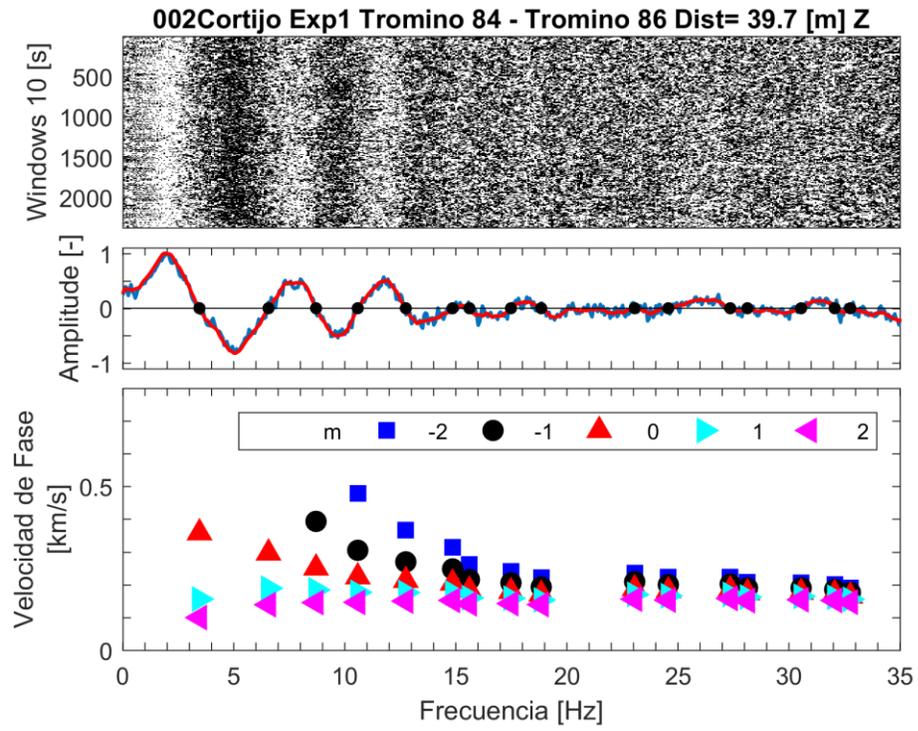


Figura C . 12 Curva de dispersión entre instrumentos DGF3-DGF2.

C.2. Hipódromo Chile

a) Medición 008

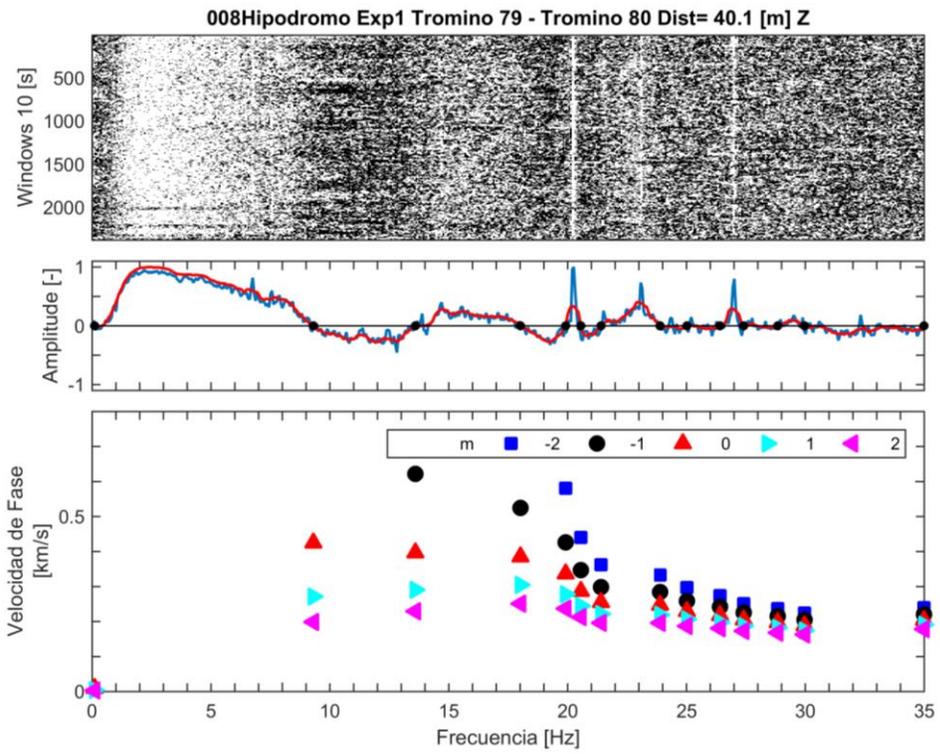


Figura C . 13 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF3.

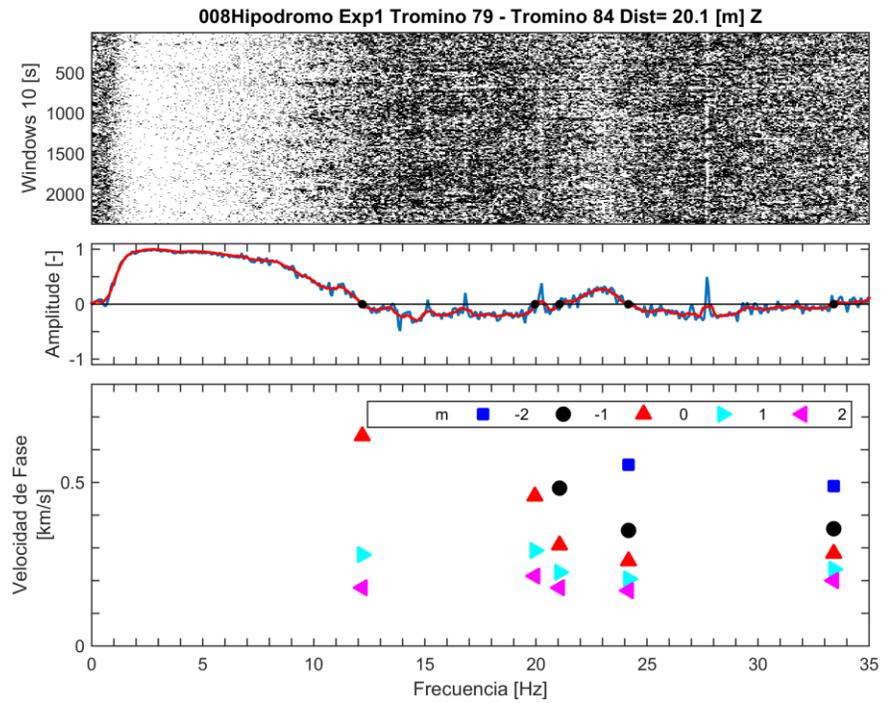


Figura C . 14 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF3.

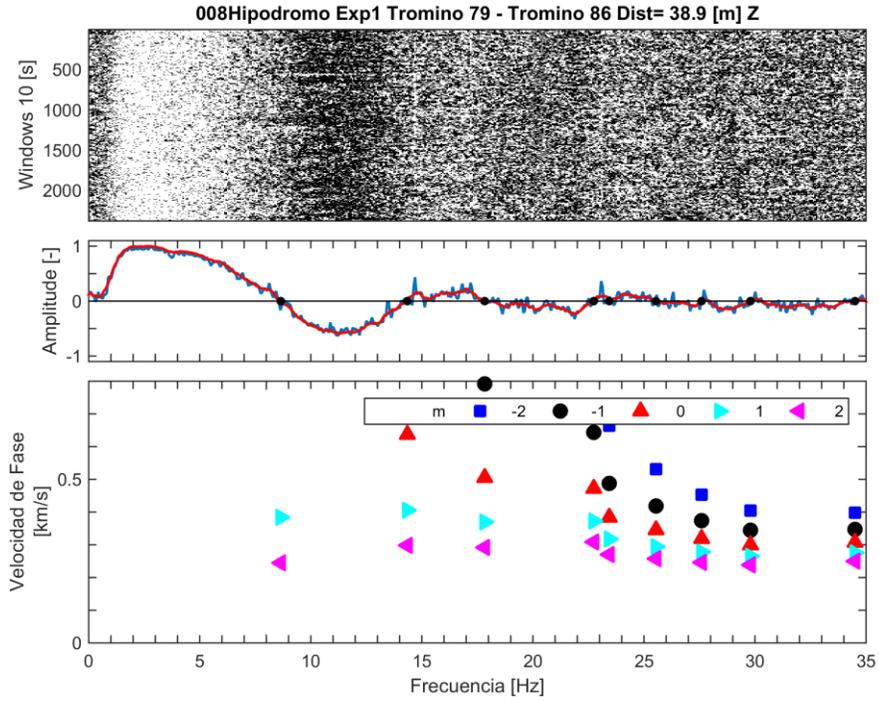


Figura C . 15 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF2.

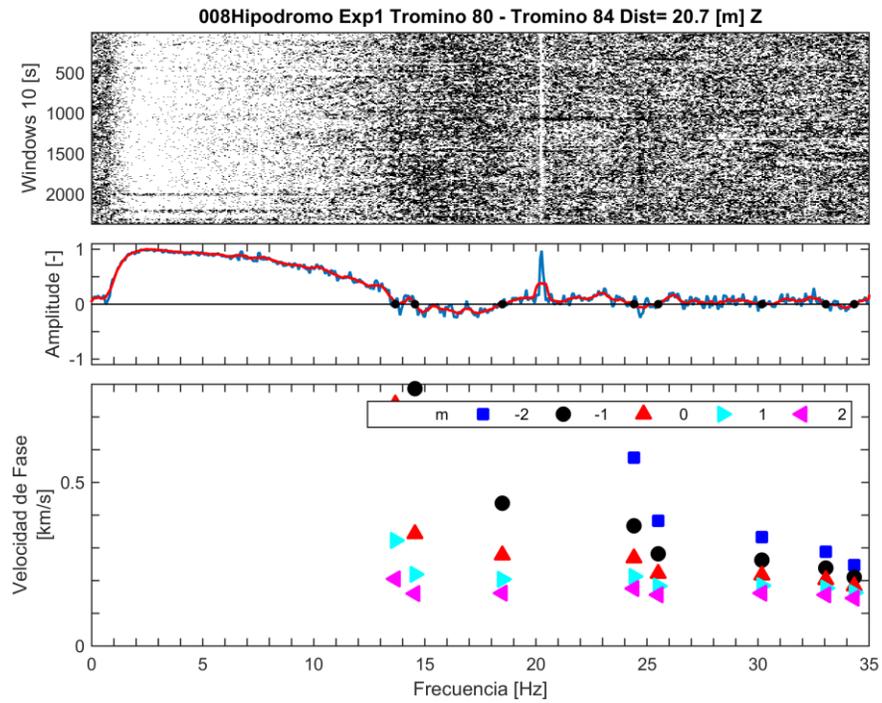


Figura C . 16 Curva de dispersión entre instrumentos DGF1-DGF3.

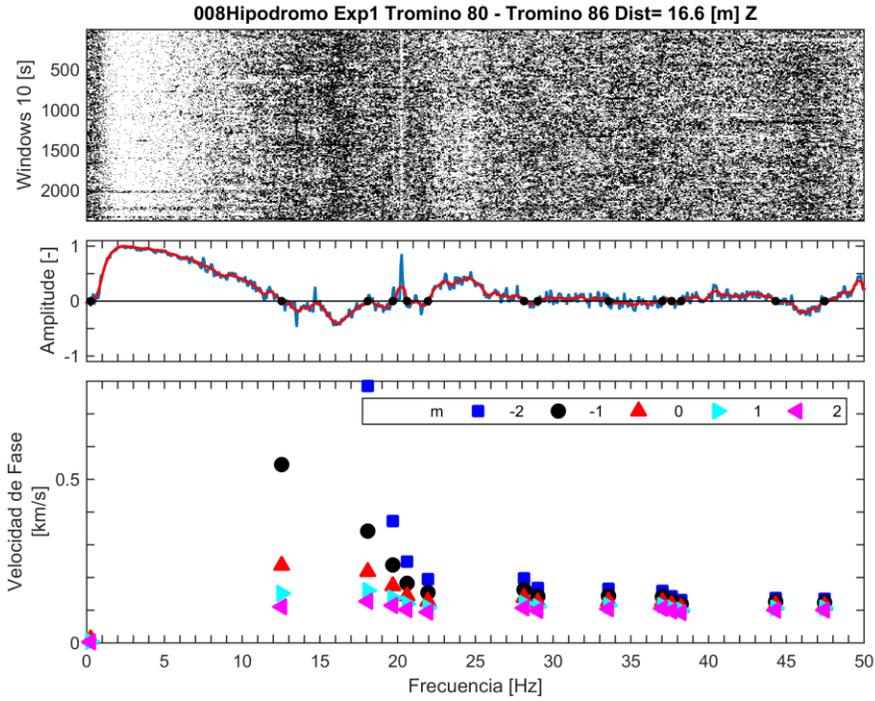


Figura C . 17 Curva de dispersión entre instrumentos DGF1-DGF2.

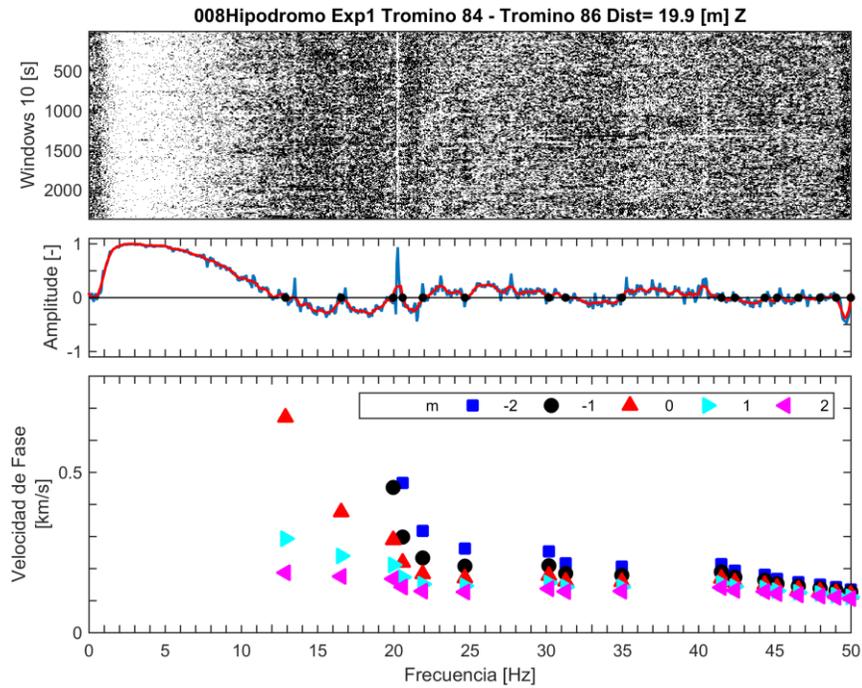


Figura C . 18 Curva de dispersión entre instrumentos DGF3-DGF2.

b) Medición 009

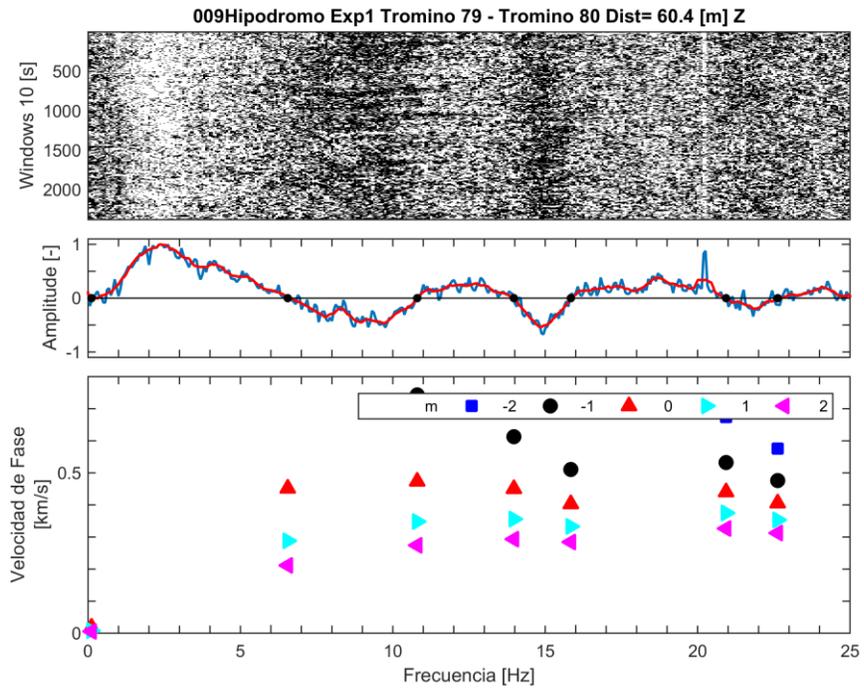


Figura C . 19 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF1.

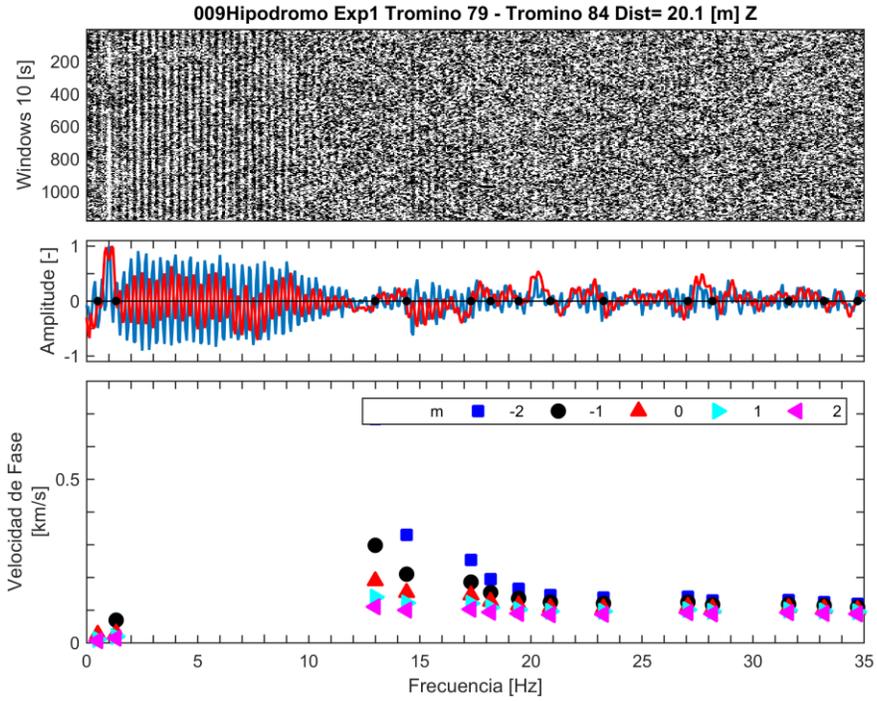


Figura C . 20 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF3.

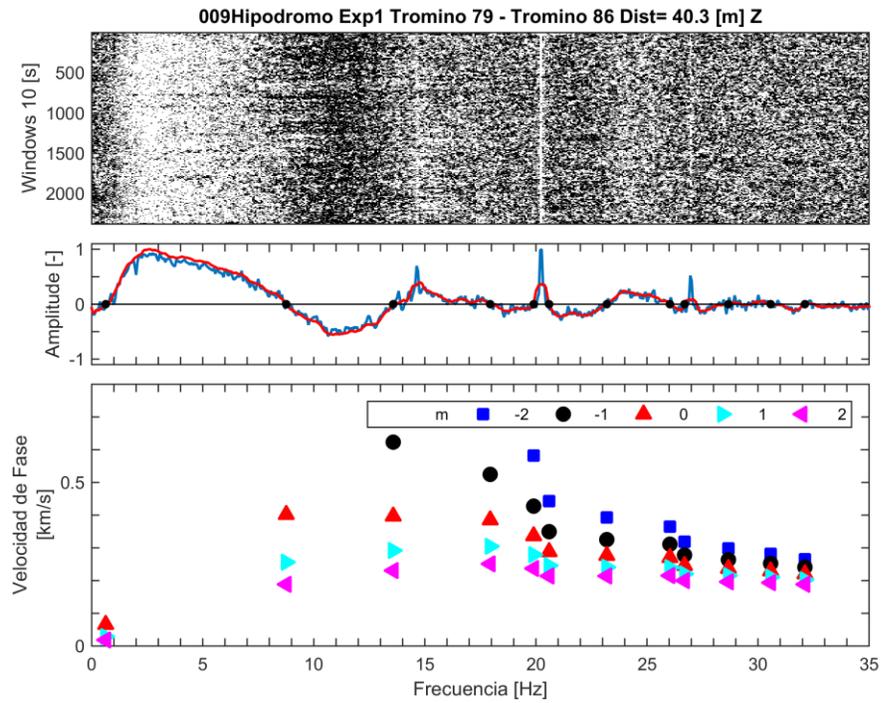


Figura C . 21 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF3.

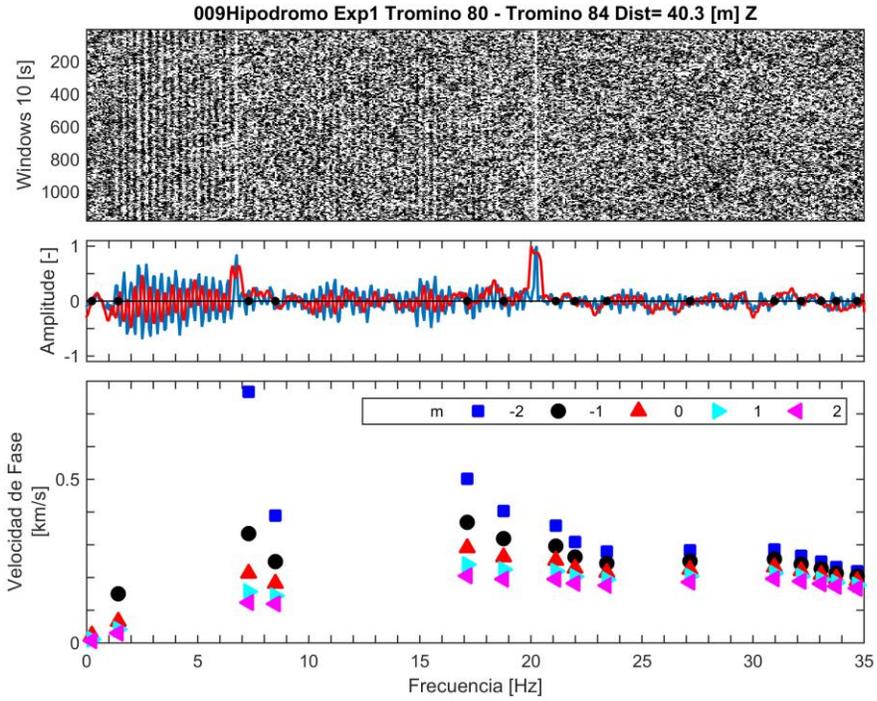


Figura C . 22 Curva de dispersión entre instrumentos DGF1-DGF3.

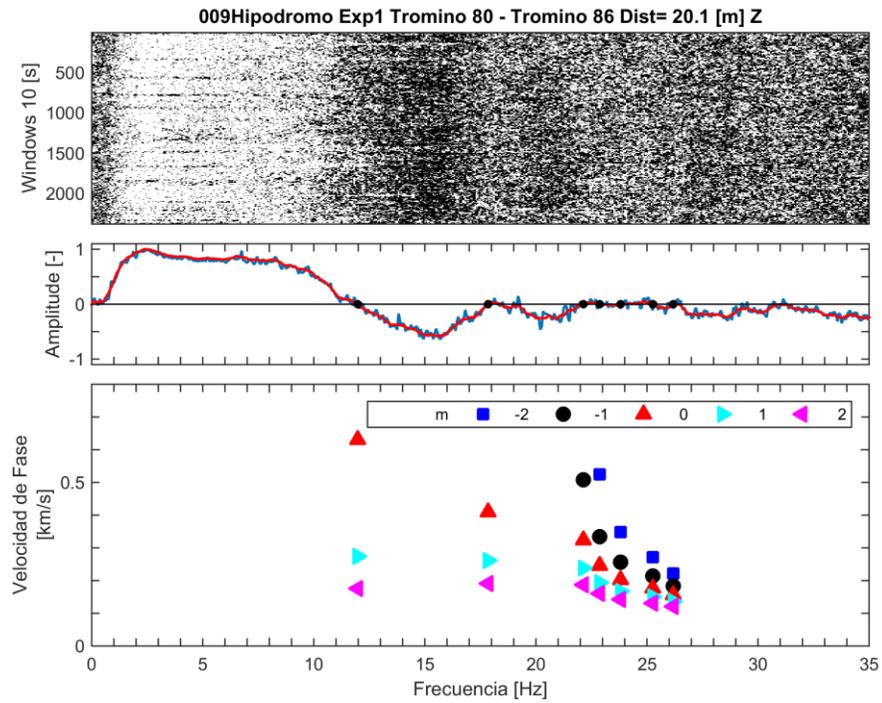


Figura C . 23 Curva de dispersión entre instrumentos DGF1-DGF2.

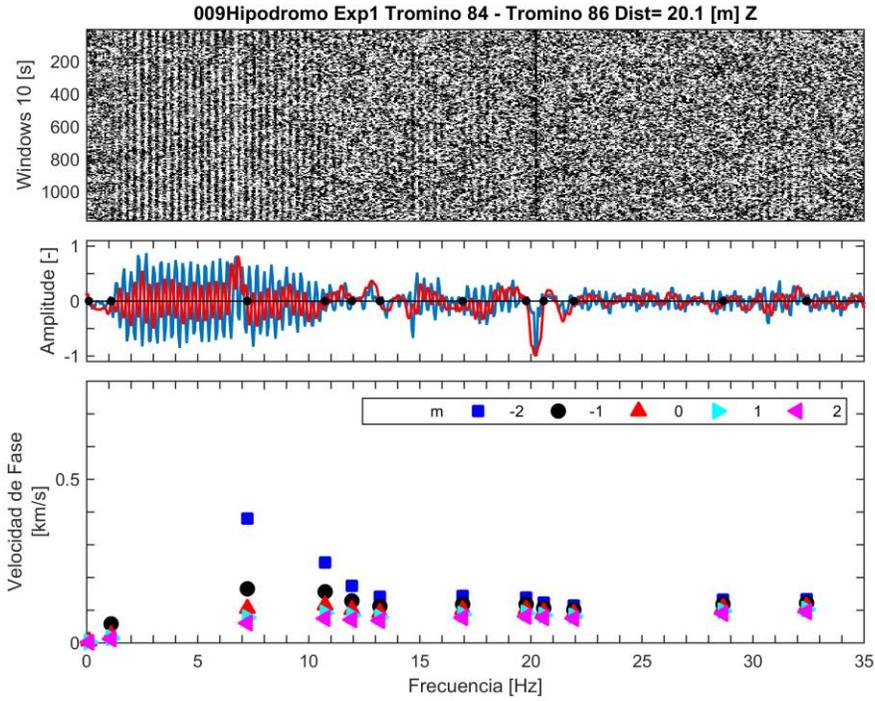


Figura C . 24 Curva de dispersión entre instrumentos DGF3-DGF2.

Es posible apreciar que la correlación cruzada que relaciona al instrumento DGF3 (84) no genera curvas que se asemejen a la función de Bessel, por lo que no aportan información con sentido físico. Para seguir con la metodología se deja fuera las correlaciones que consideren este instrumento en esta medición.

C.3. Santa Marta de Huechuraba

a) Medición 003

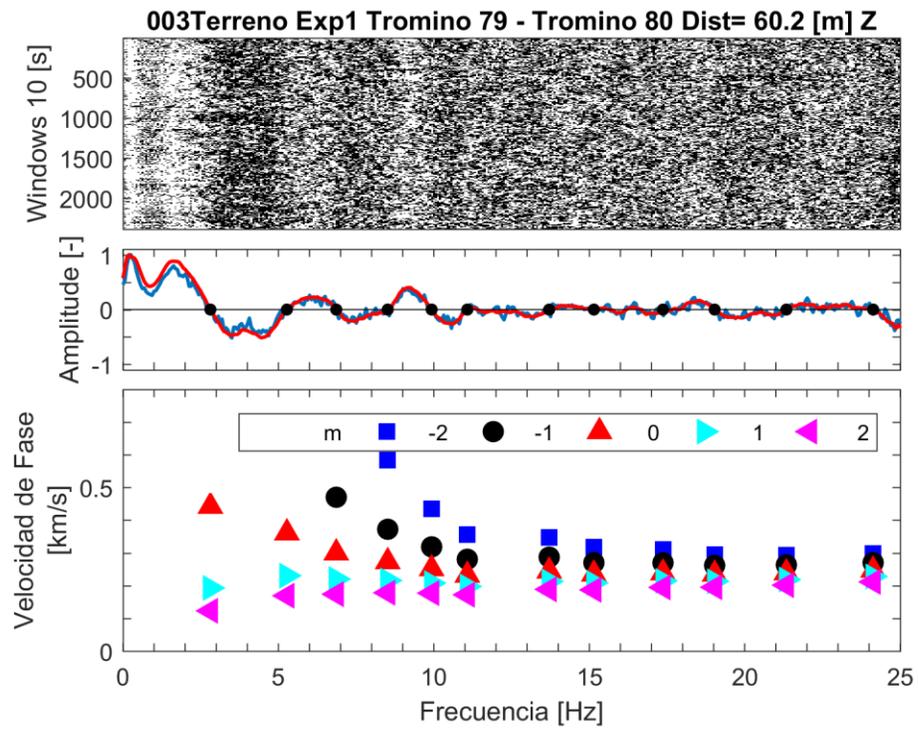


Figura C . 25 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF1.

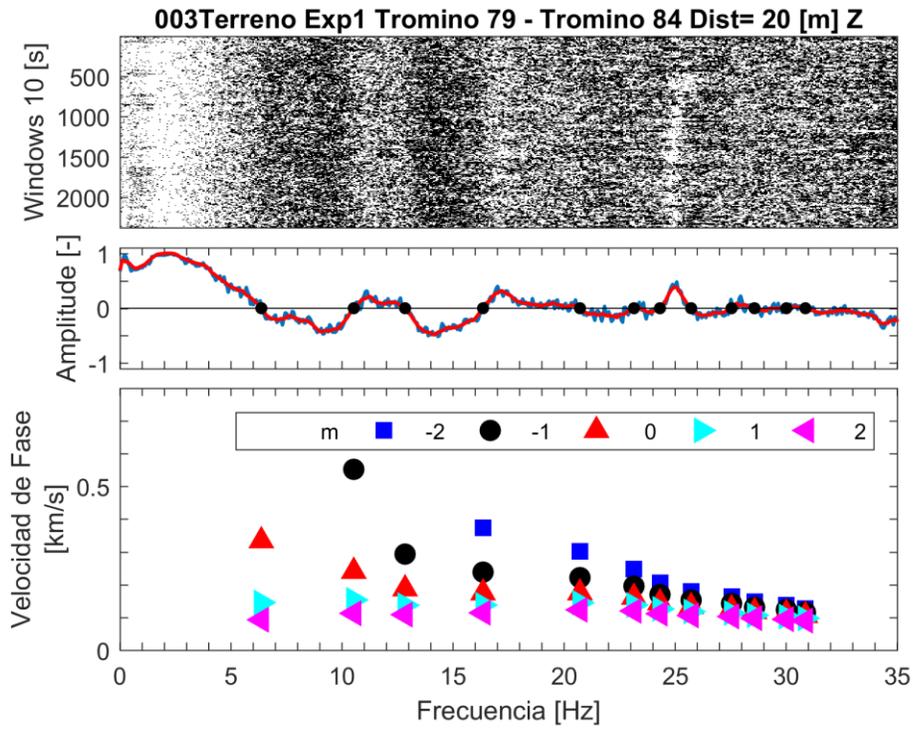


Figura C . 26 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF3.

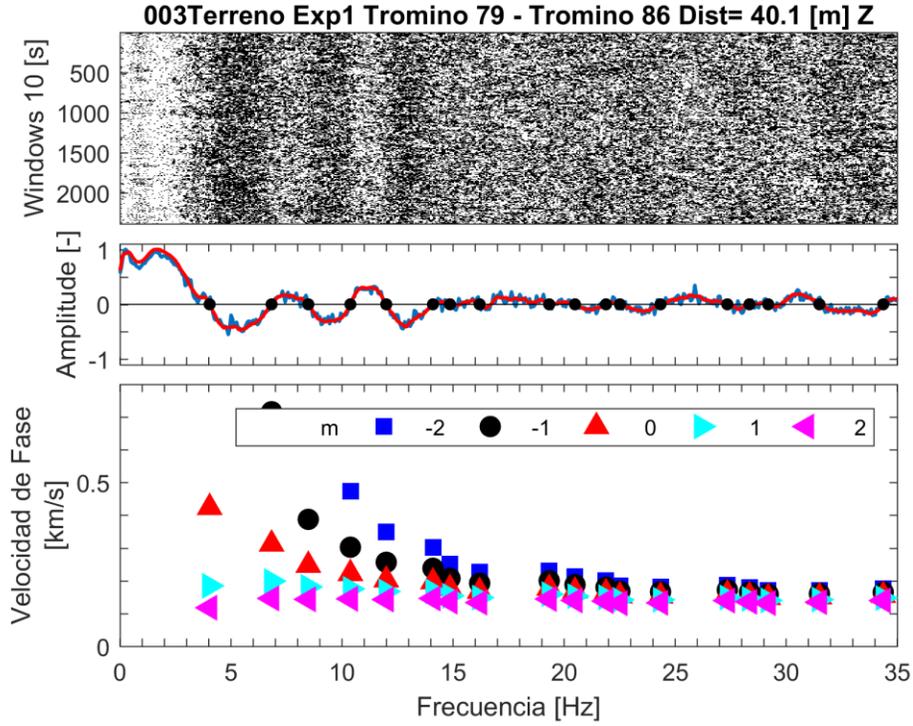


Figura C . 27 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF2.

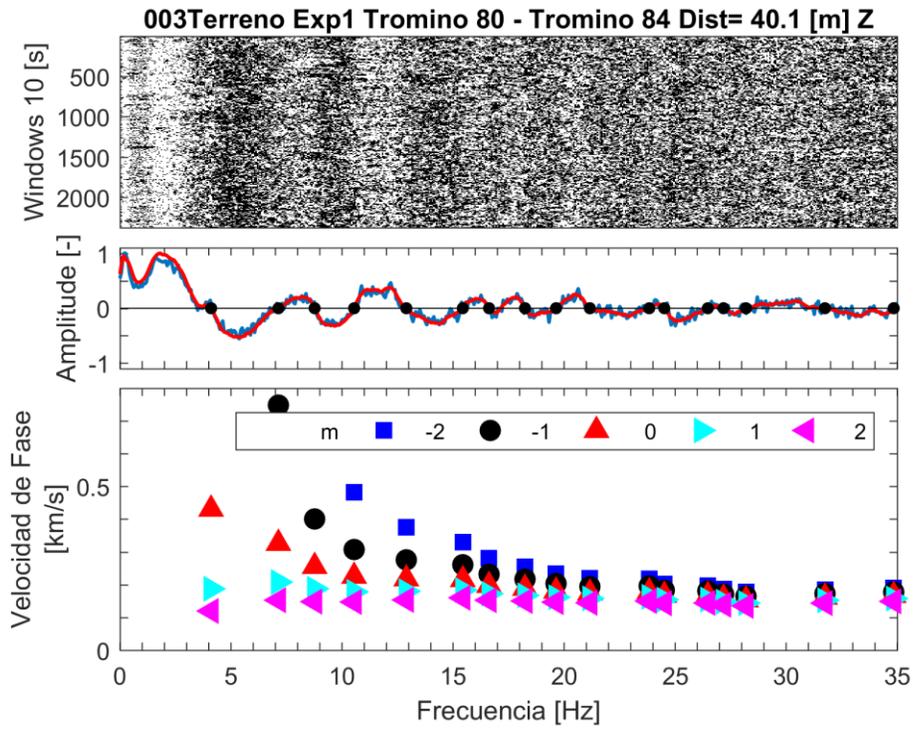


Figura C . 28 Curva de dispersión entre instrumentos DGF1-DGF3.

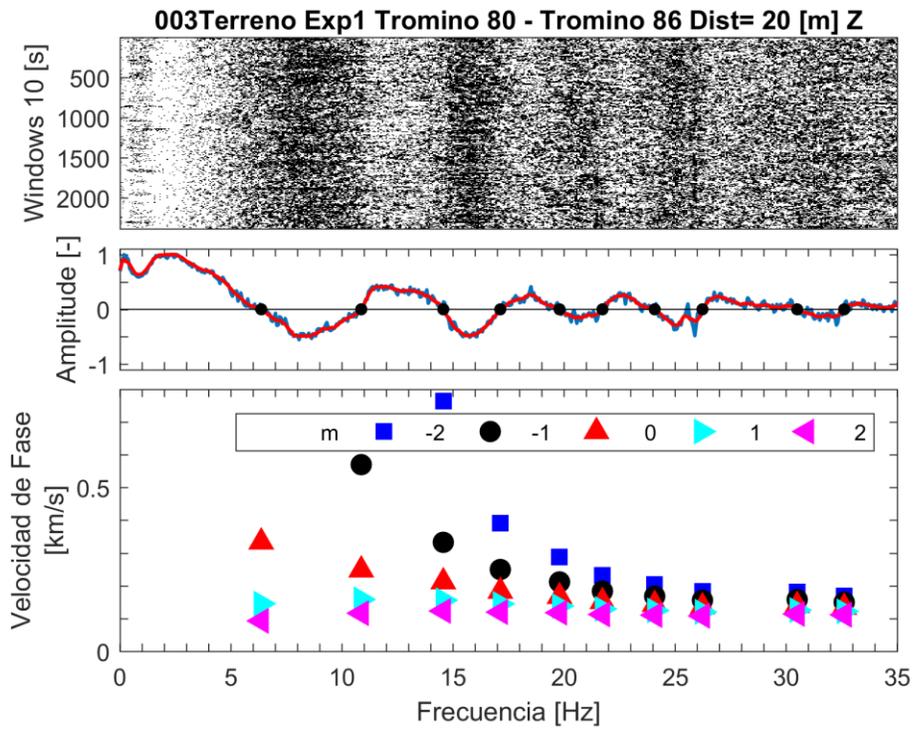


Figura C . 29 Curva de dispersión entre instrumentos DGF1-DGF2.

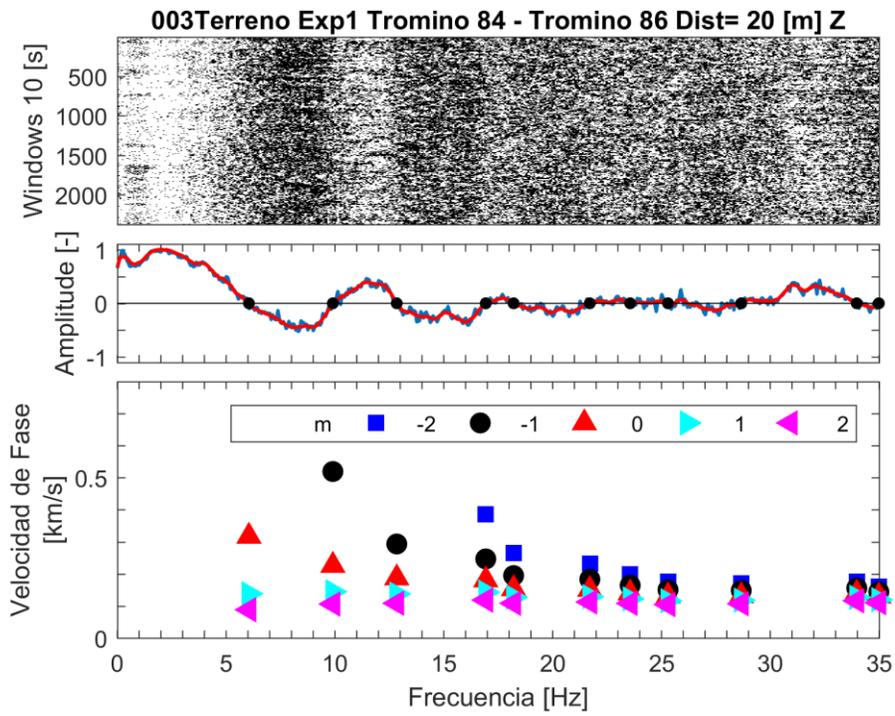


Figura C . 30 Curva de dispersión entre instrumentos DGF3-DGF2.

b) Medición 004

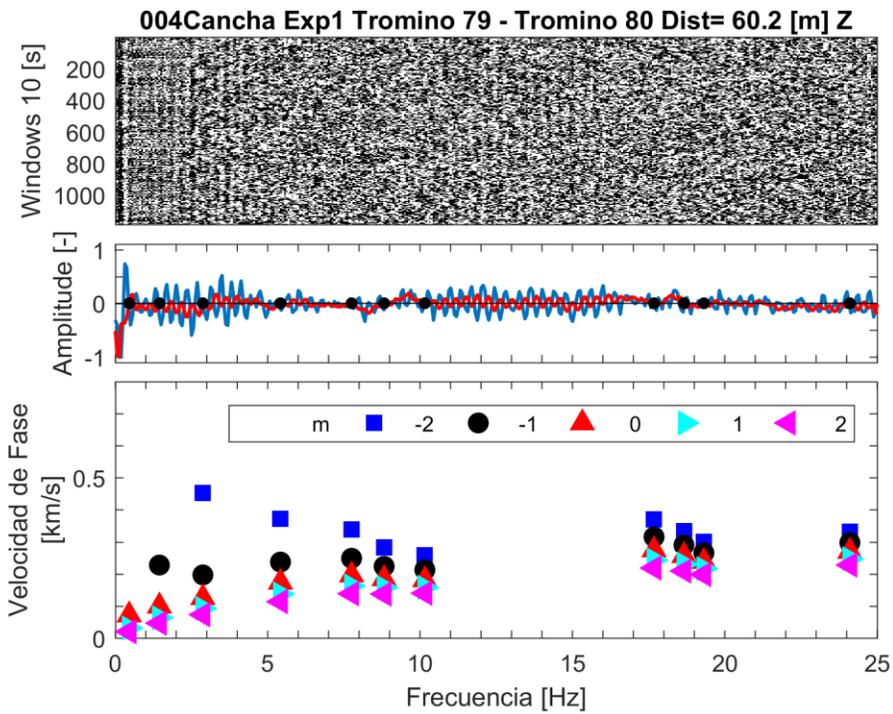


Figura C . 31 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF1.

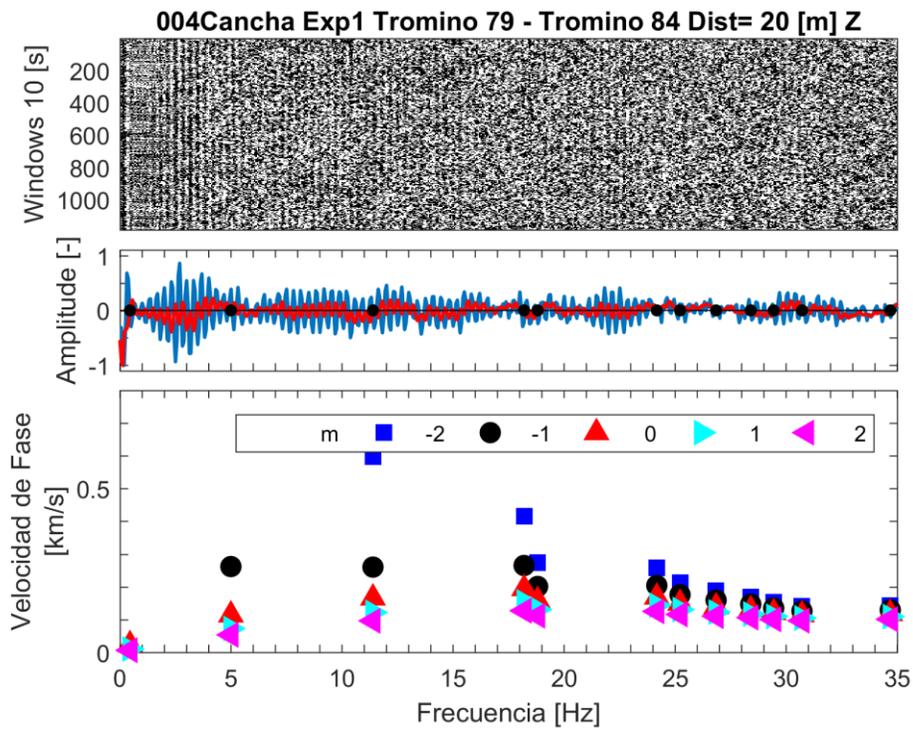


Figura C . 32 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF3.

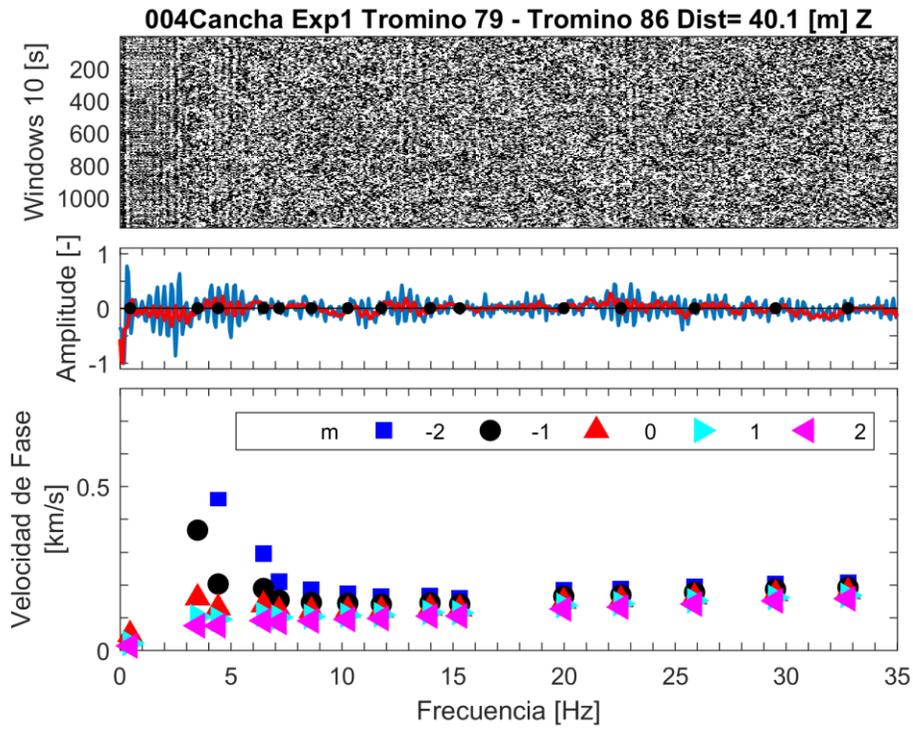


Figura C . 33 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF2.

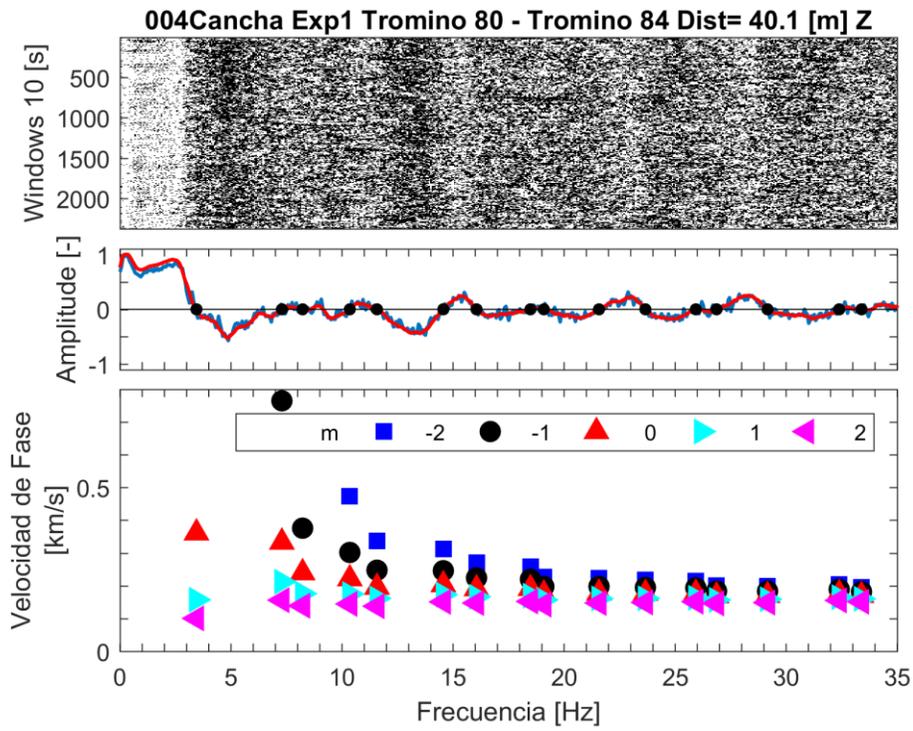


Figura C . 34 Curva de dispersión entre instrumentos DGF1-DGF3.

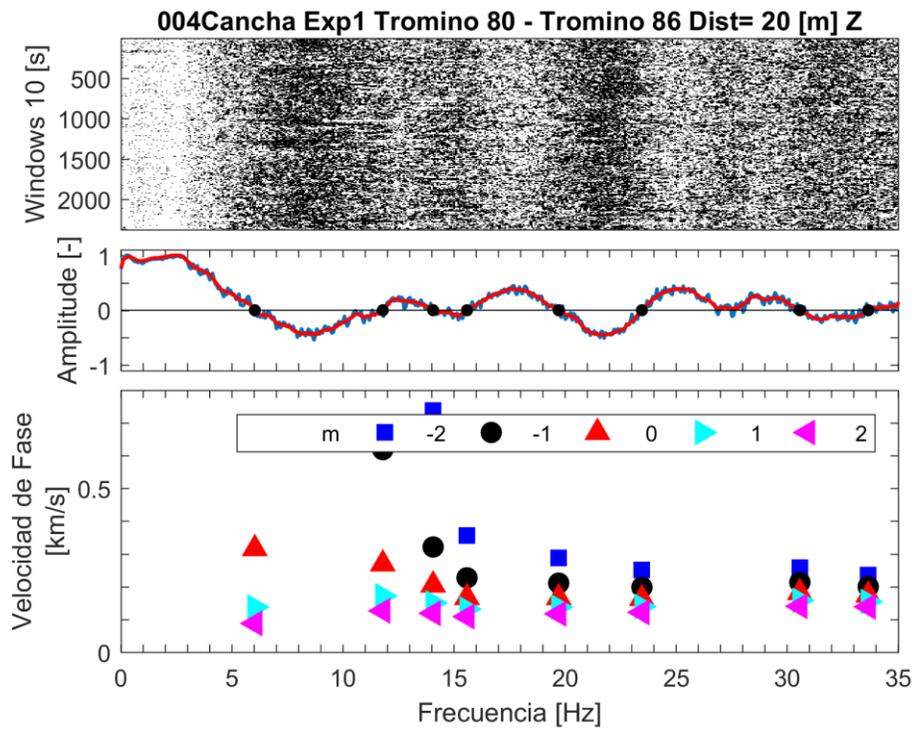


Figura C . 35 Curva de dispersión entre instrumentos DGF1-DGF2.

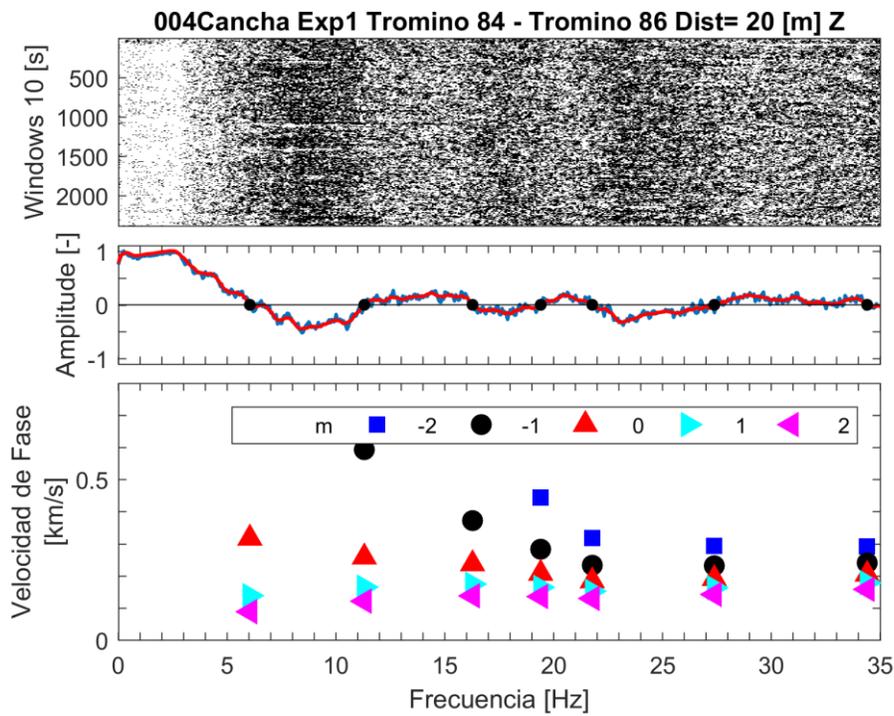


Figura C . 36 Curva de dispersión entre instrumentos DGF3-DGF2.

Es posible apreciar que la correlación cruzada que relaciona al instrumento DGF1 (79) no genera curvas que se asemejen a la función de Bessel, por lo que no aportan información con sentido físico. Para seguir con la metodología se deja fuera las correlaciones que consideren este instrumento en esta medición.

c) Medición 005

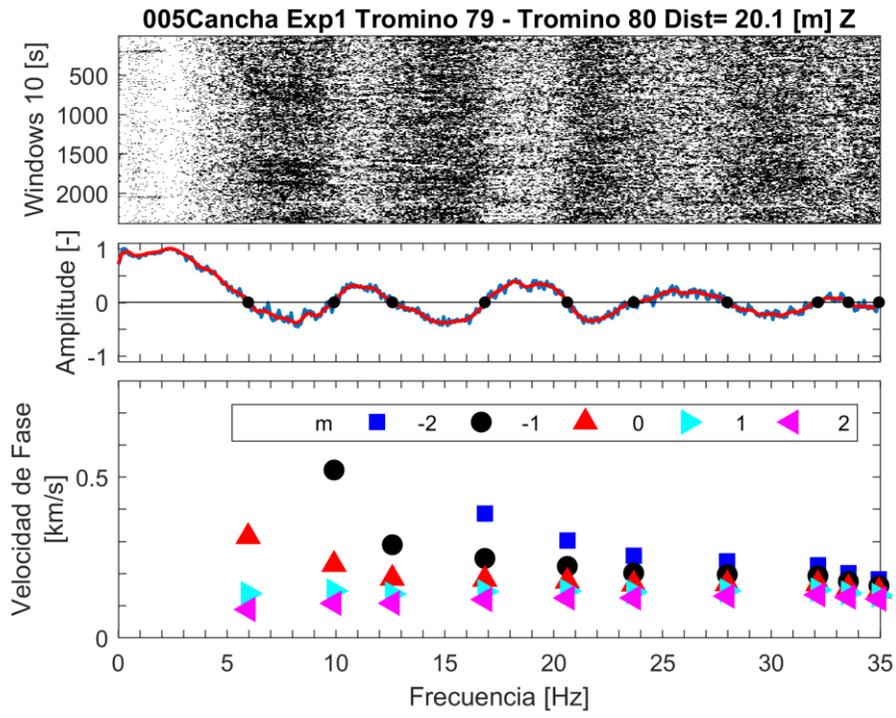


Figura C . 37 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF1.

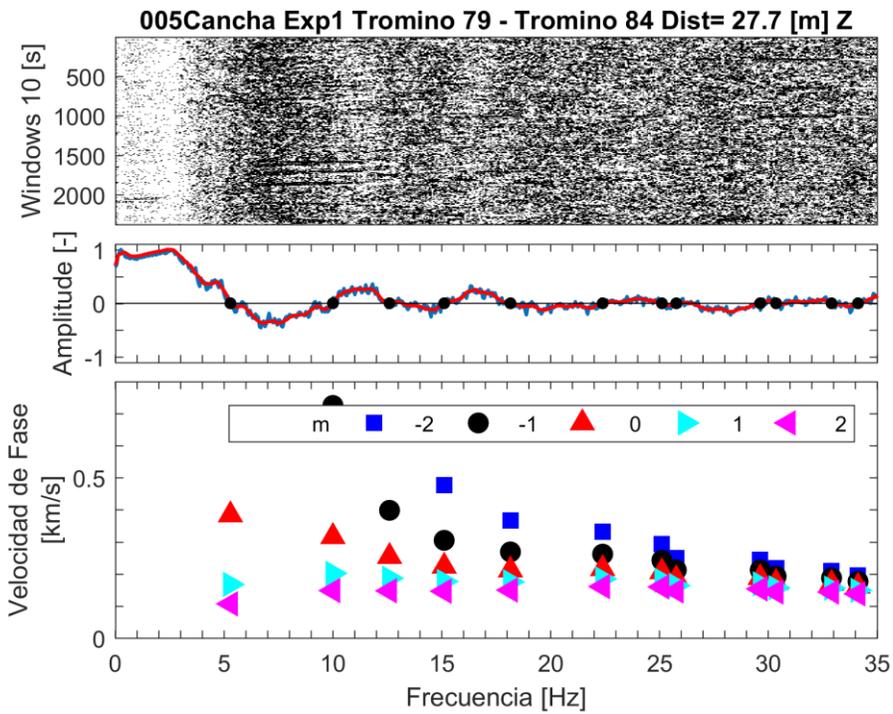


Figura C . 38 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF3.

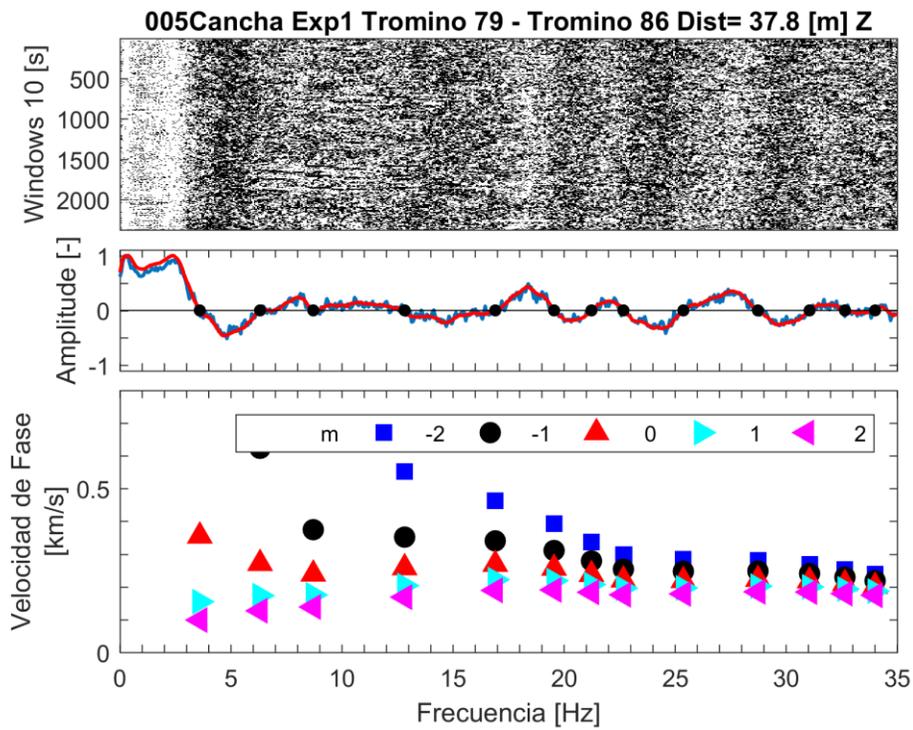


Figura C . 39 Curva de dispersión entre instrumentos DGF4-DGF2.

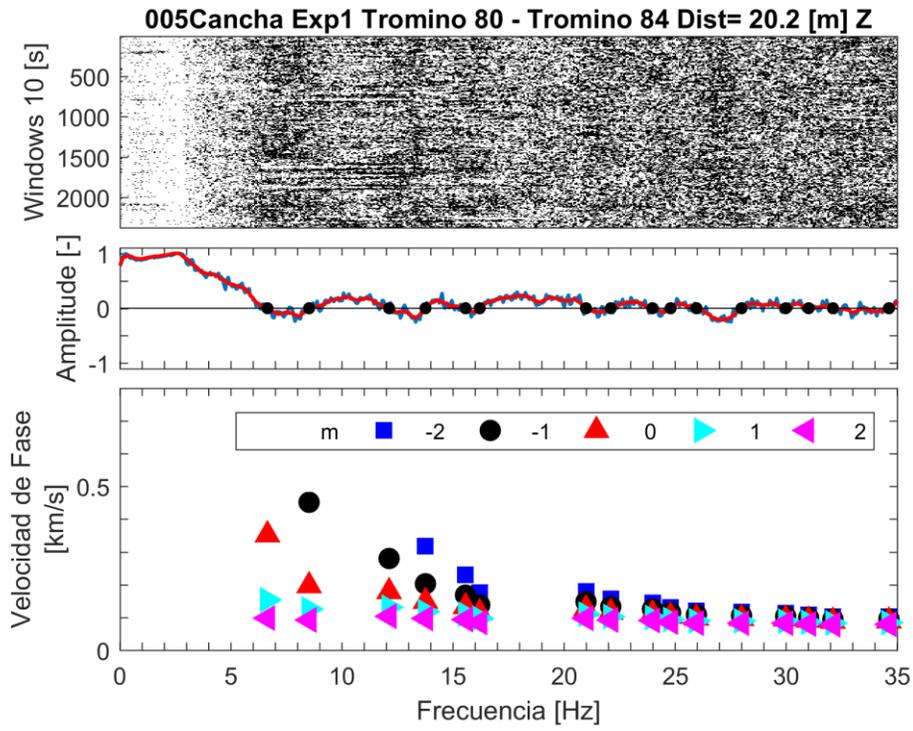


Figura C . 40 Curva de dispersión entre instrumentos DGF1-DGF3.

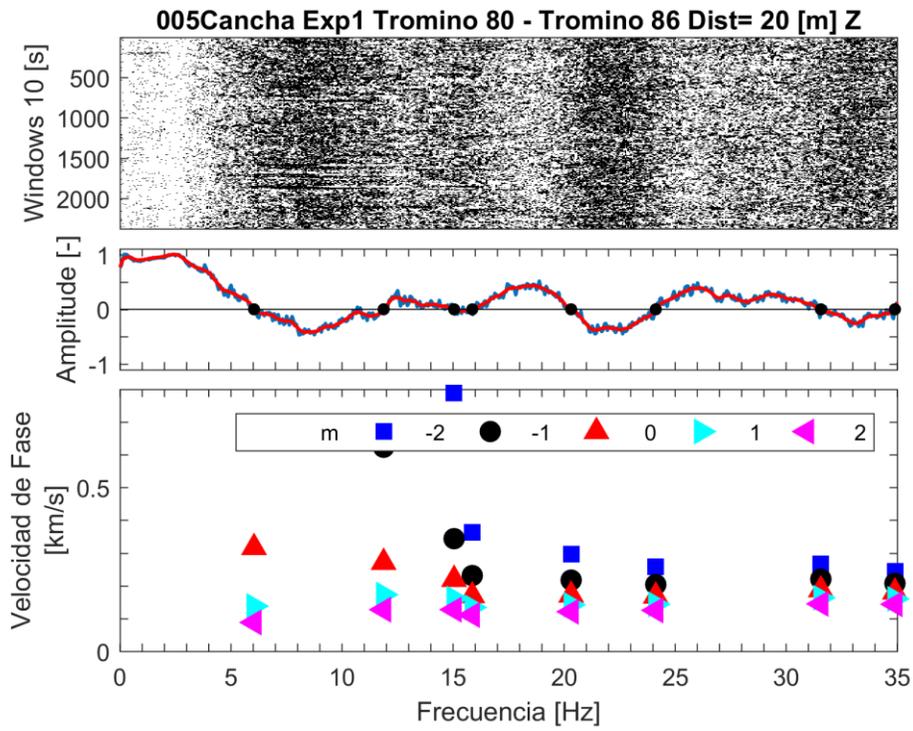


Figura C . 41 Curva de dispersión entre instrumentos DGF1-DGF2.

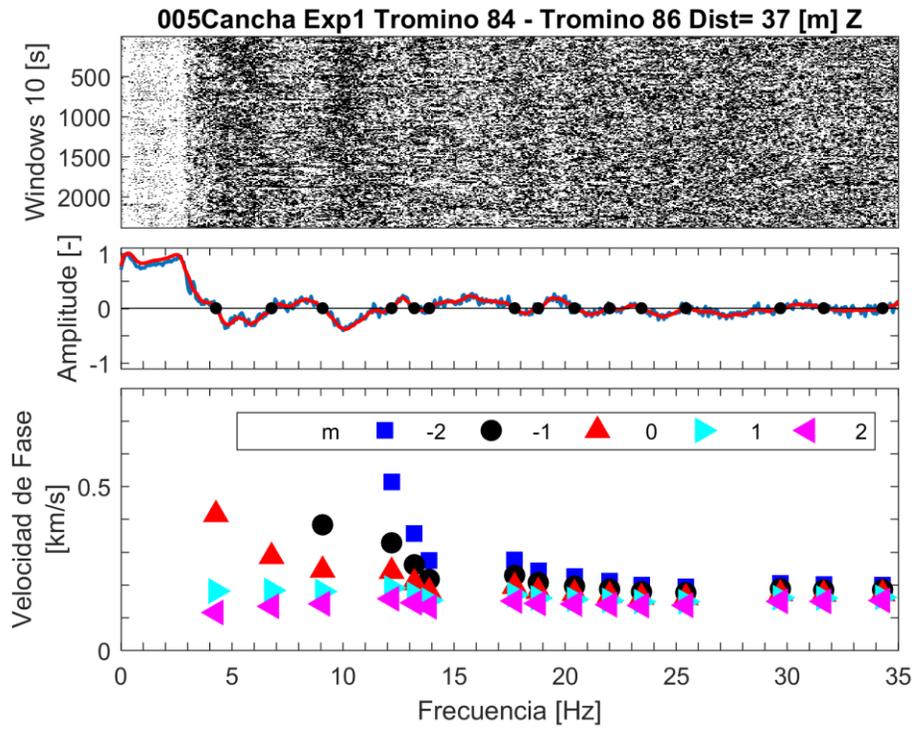


Figura C . 42 Curva de dispersión entre instrumentos DGF3-DGF2.

D. Curvas HVSR

A continuación se muestra el detalle de las curvas HVSR de cada instrumento en cada una de las mediciones realizadas. Cabe destacar que estas fueron generadas por el software Geopsy.

D.1. El Cortijo

a) Medición 001

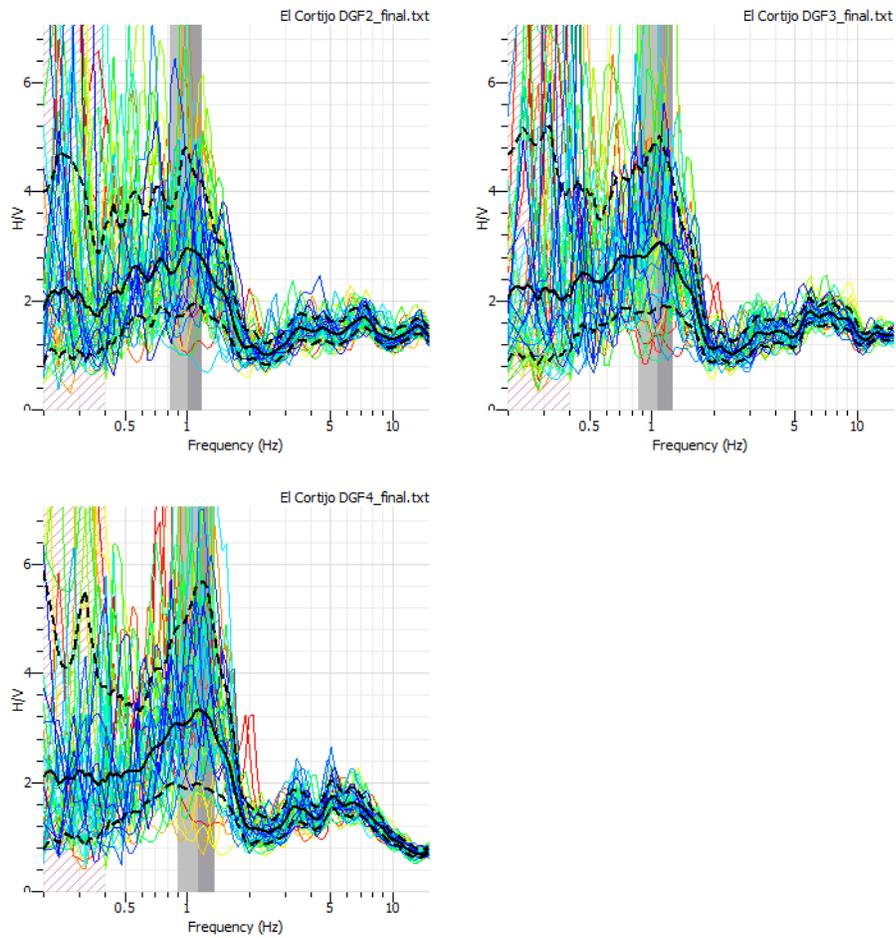


Figura D. 1 Curvas HVSR para instrumentos en El Cortijo.

b) Medición 002

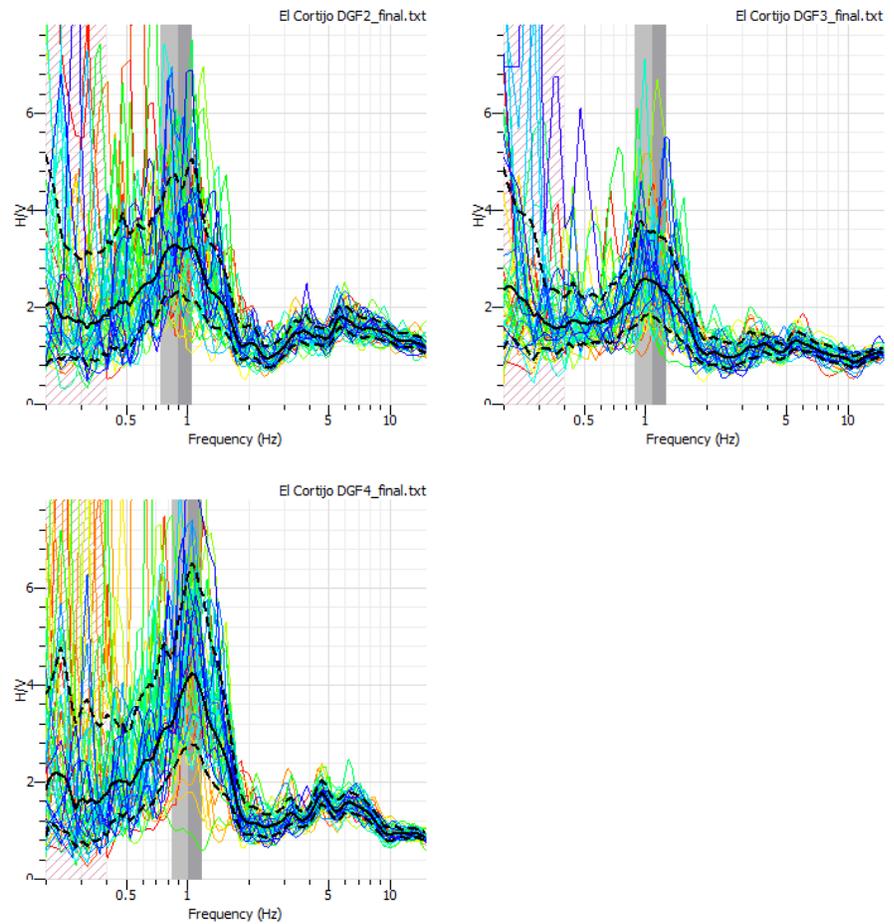


Figura D. 2 Curvas HVSR para instrumentos en El Cortijo.

c) Medición El Cortijo Poniente

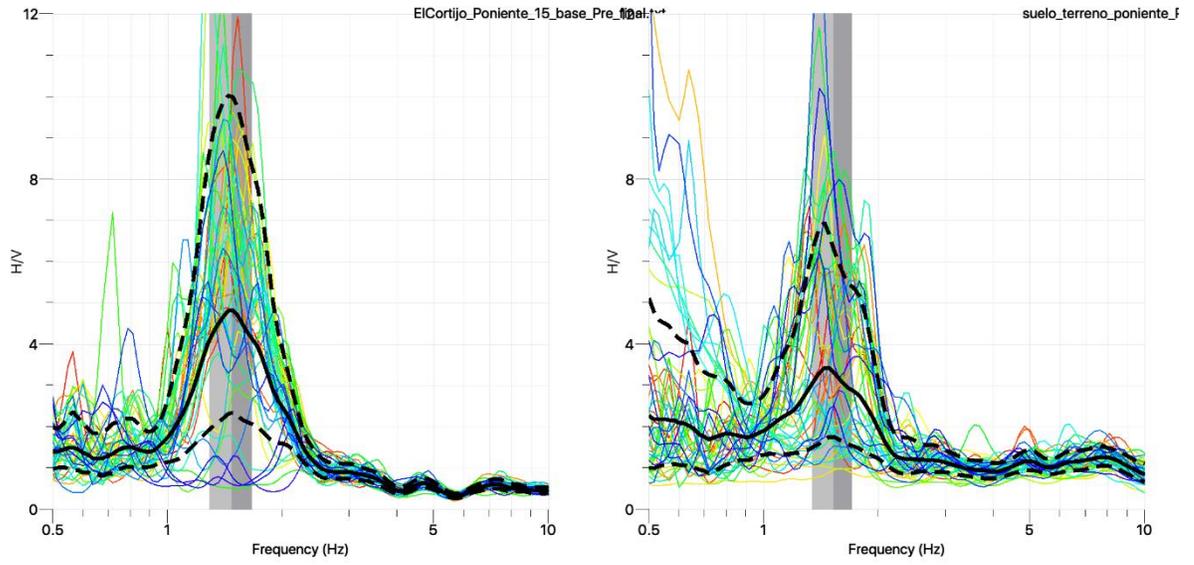


Figura D. 3 Curvas HVSR para instrumentos en El Cortijo.

D.2. Hipódromo Chile

a) Medición 008

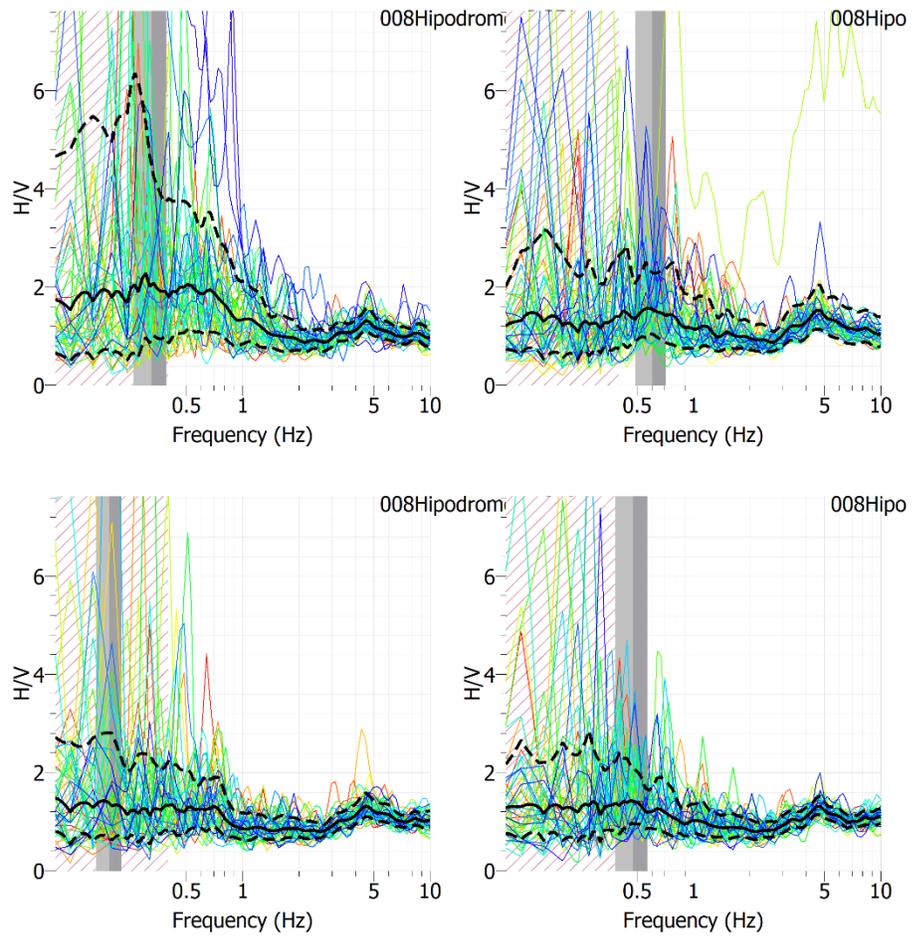


Figura D. 4 Curvas HVSR para instrumentos en Hipódromo Chile.

b) Medición 009

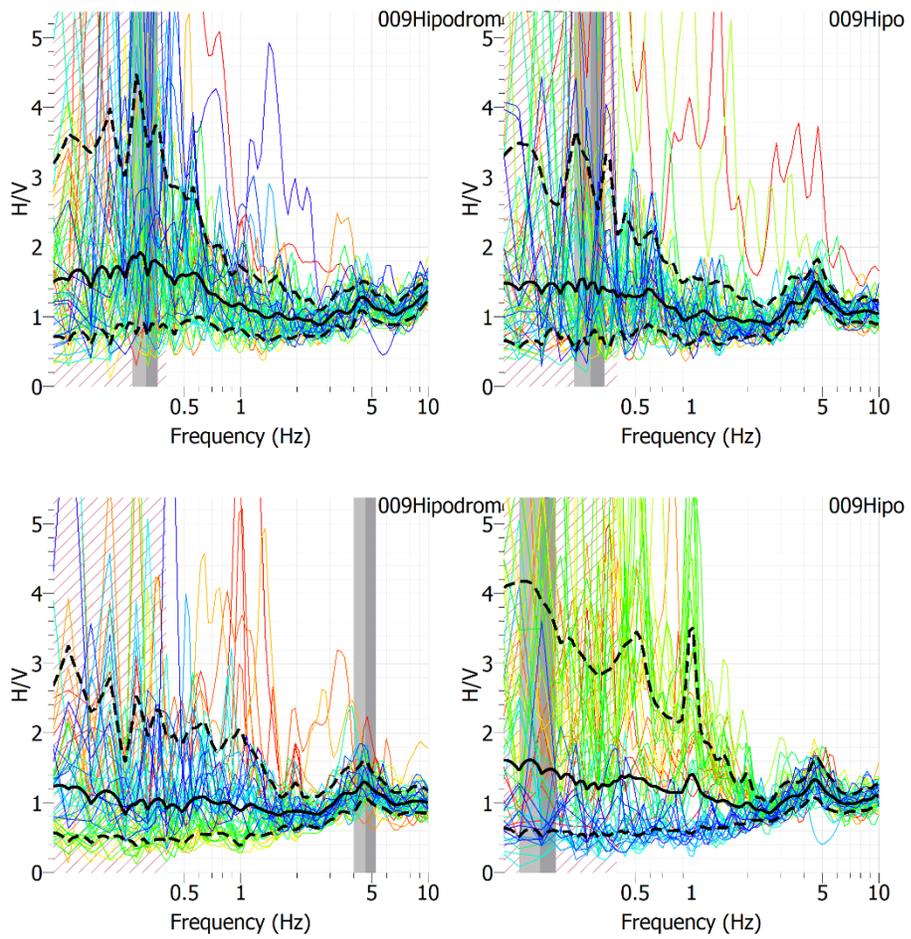


Figura D. 5 Curvas HVSR para instrumentos en Hipódromo Chile.

D.3. Santa Marta de Huechuraba

a) Medición 003

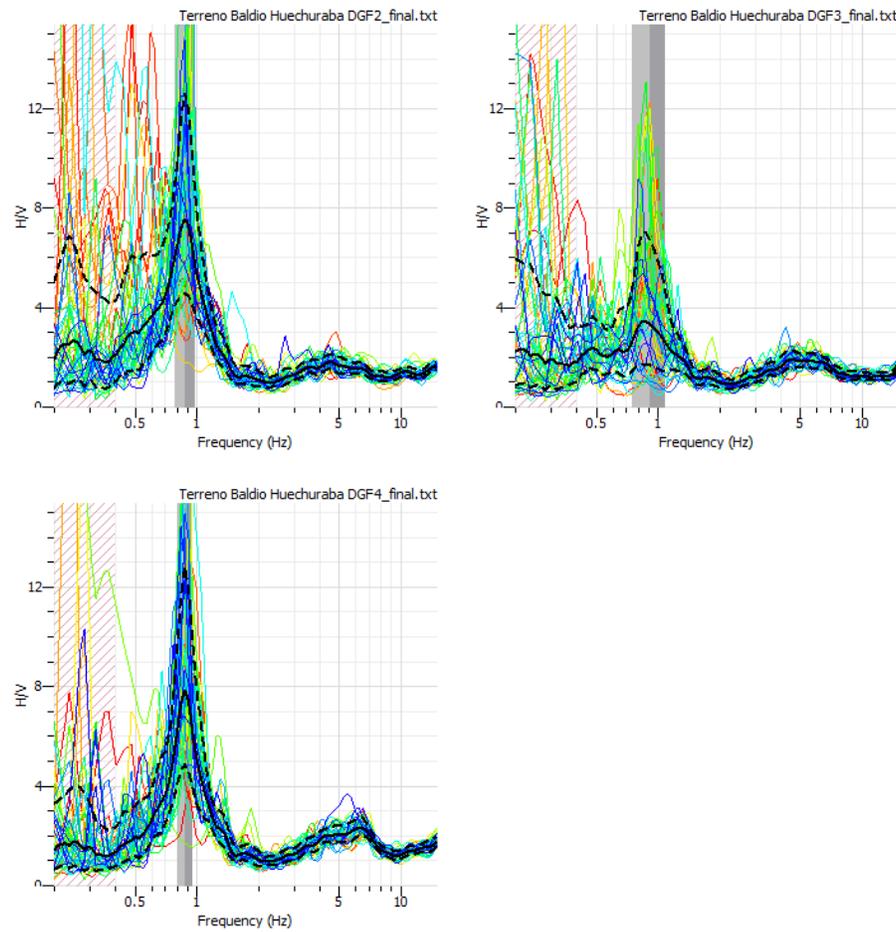


Figura D. 6 Curvas HVSR para instrumentos en Santa Marta de Huechuraba.

b) Medición 004

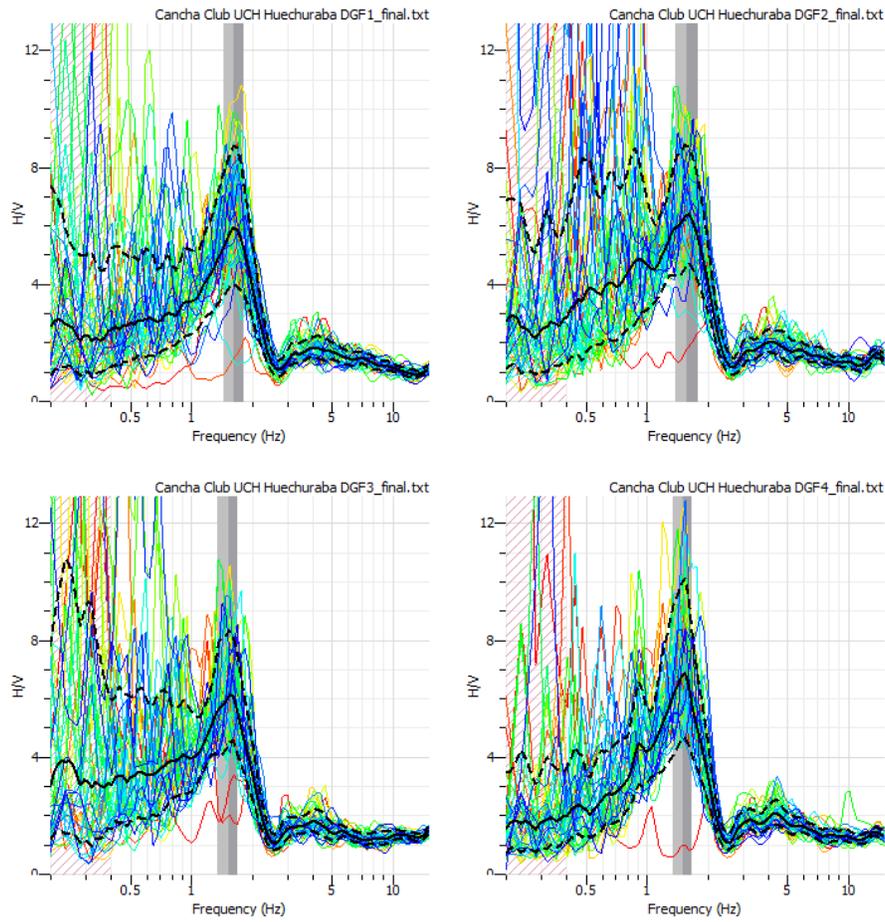


Figura D. 6 Curvas HVSR para instrumentos en Santa Marta de Huechuraba.

c) Medición 005

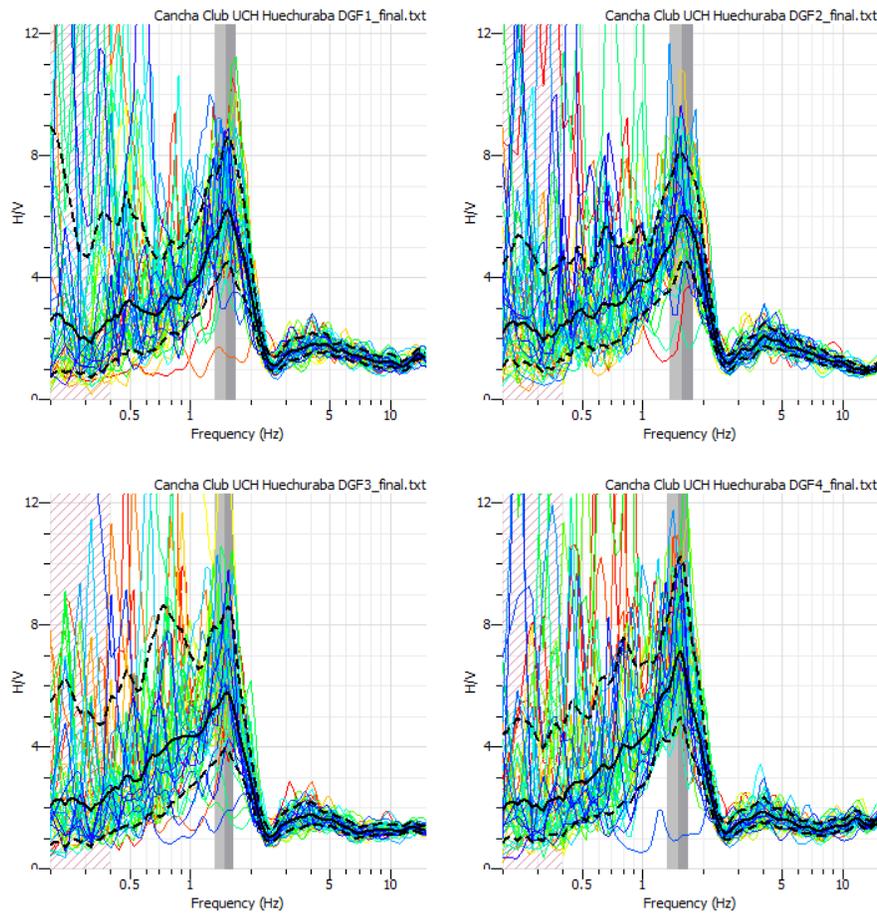


Figura D. 7 Curvas HVSR para instrumentos en Santa Marta de Huechuraba.

d) Medición Interior Condominio Edificios

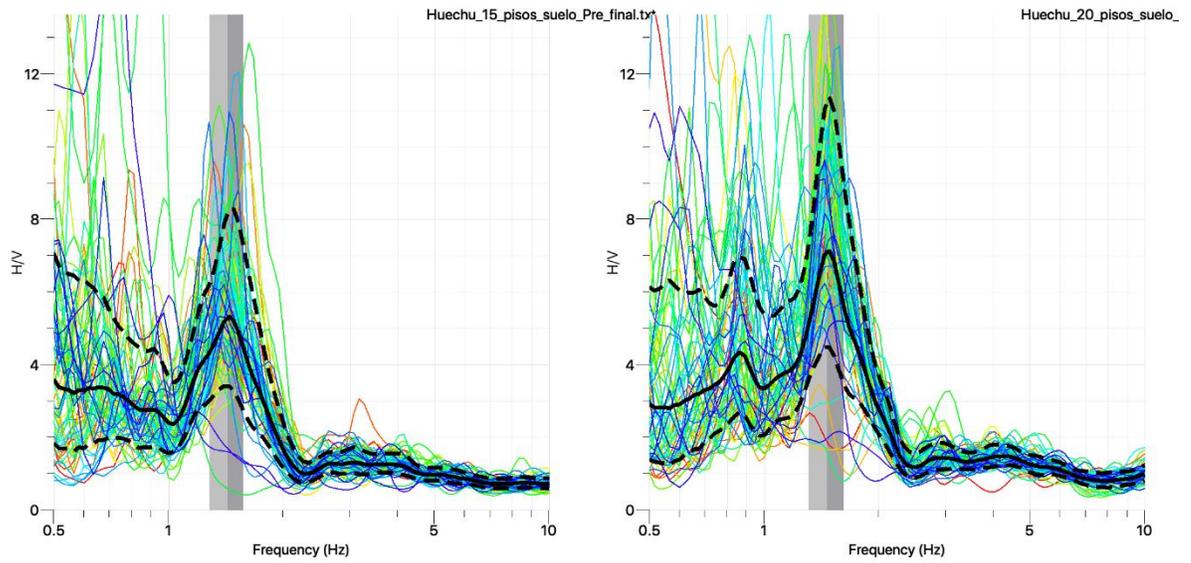


Figura D. 8 Curvas HVSR para instrumentos en Santa Marta de Huechuraba.

E. Coeficientes de Autocorrelación SPAC

E.1. El Cortijo

E.1.1. Medición 001

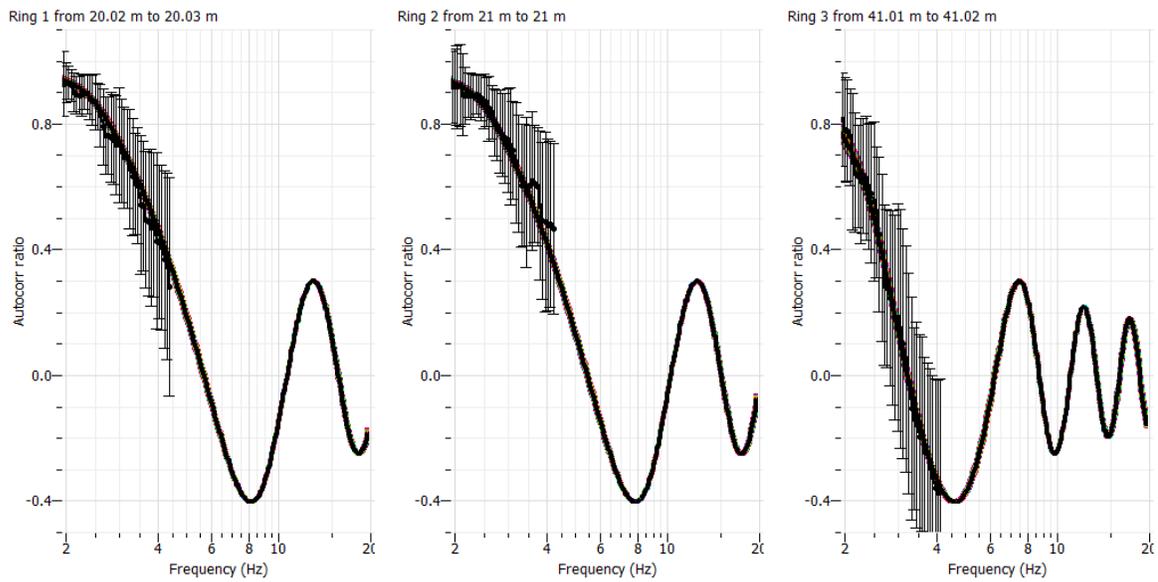


Figura E.1 Coeficientes de autocorrelación entre modelo y SPAC para medición 001.

E.1.2. Medición 002

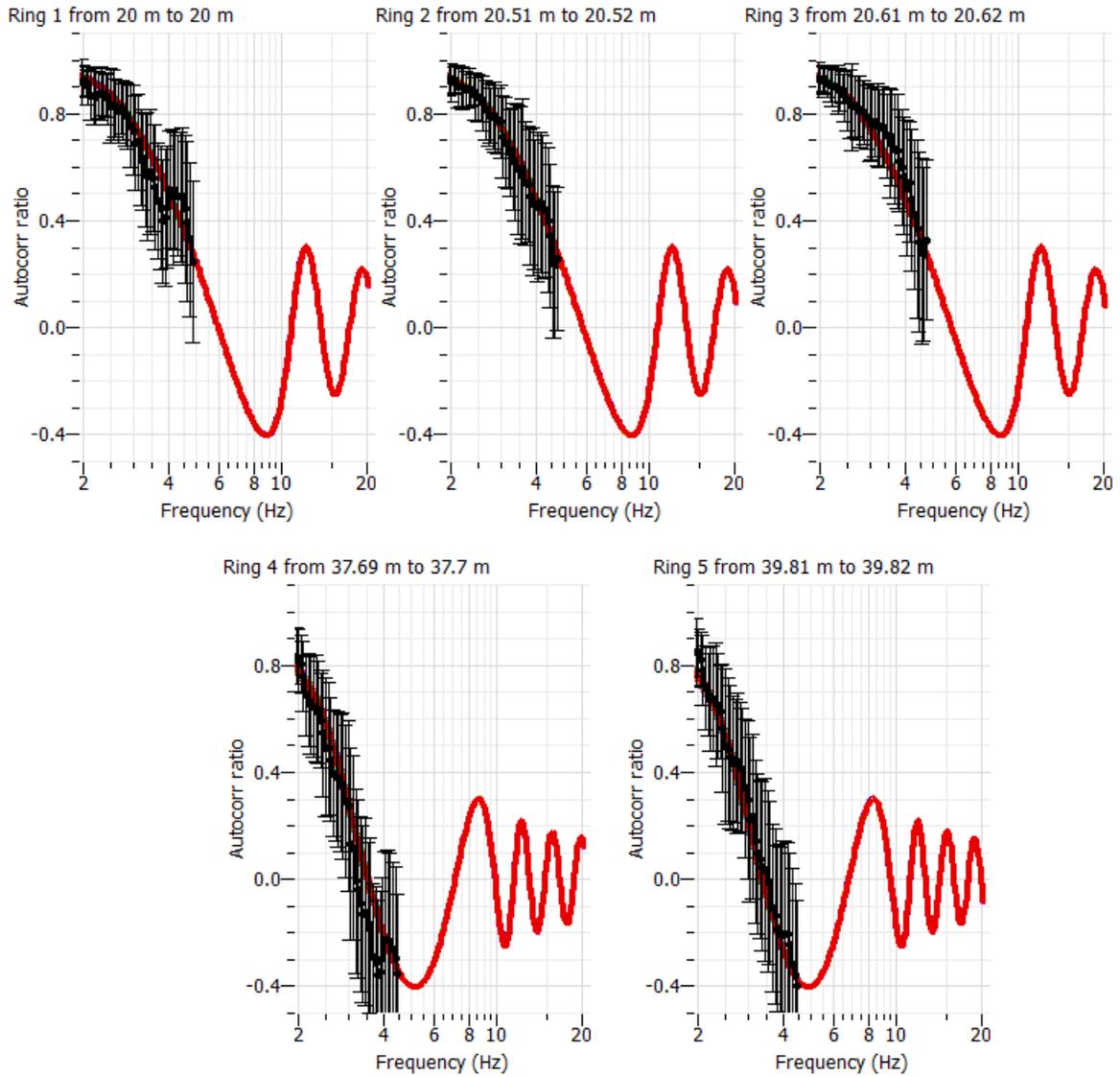


Figura E.2 Coeficientes de autocorrelación entre modelo y SPAC para medición 002.

E.2. Hipódromo Chile

E.2.1. Medición 008

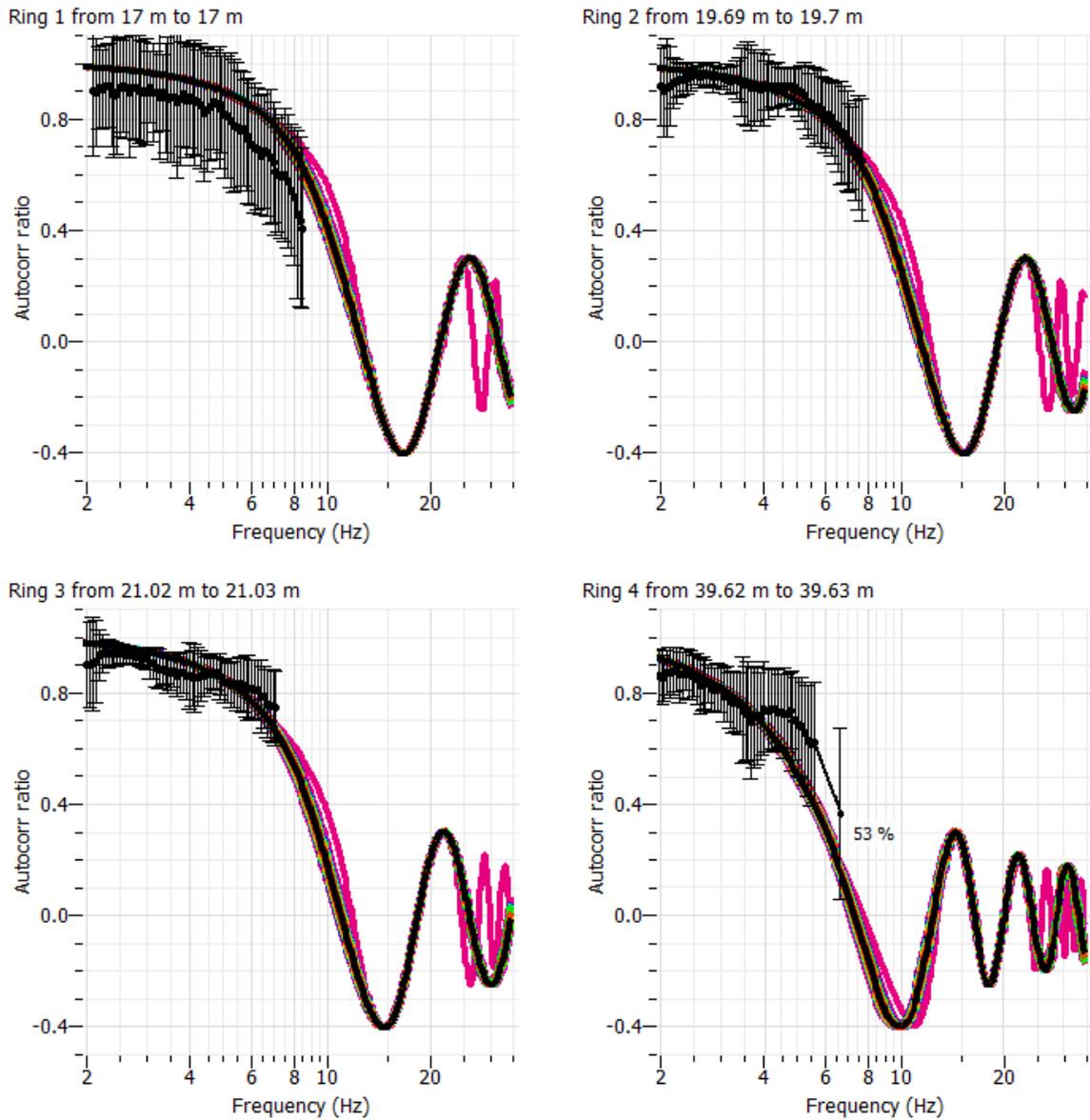


Figura E.3 Coeficientes de autocorrelación entre modelo y SPAC para medición 008.

E.2.2. Medición 009

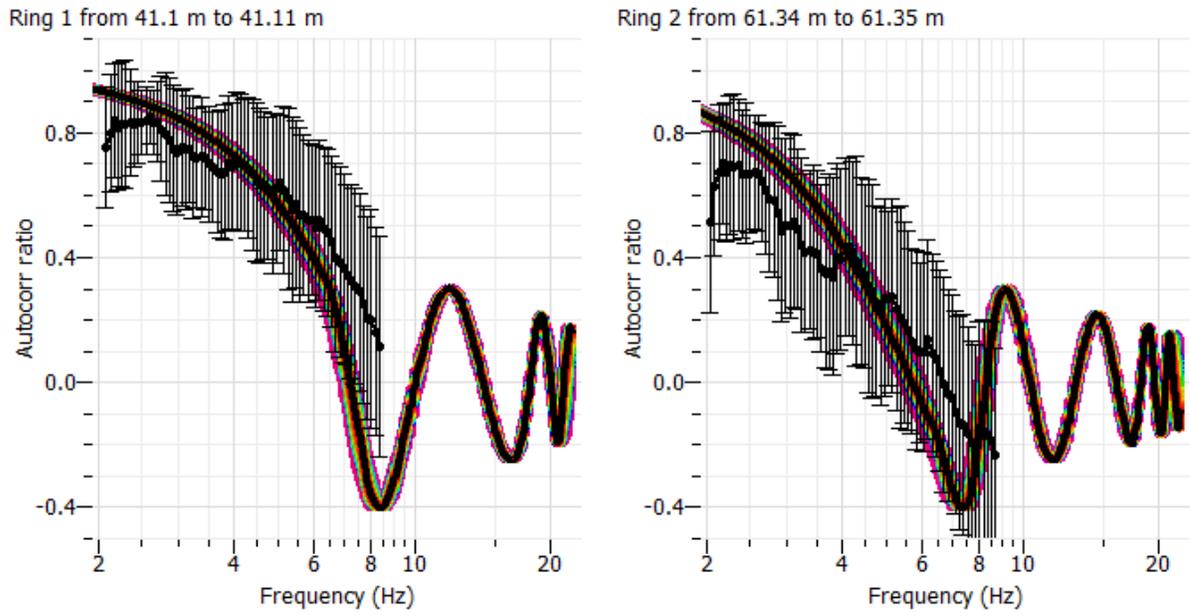


Figura E.4 Coeficientes de autocorrelación entre modelo y SPAC para medición 009.

E.3. Santa Marta de Huechuraba

E.4. Medición 003

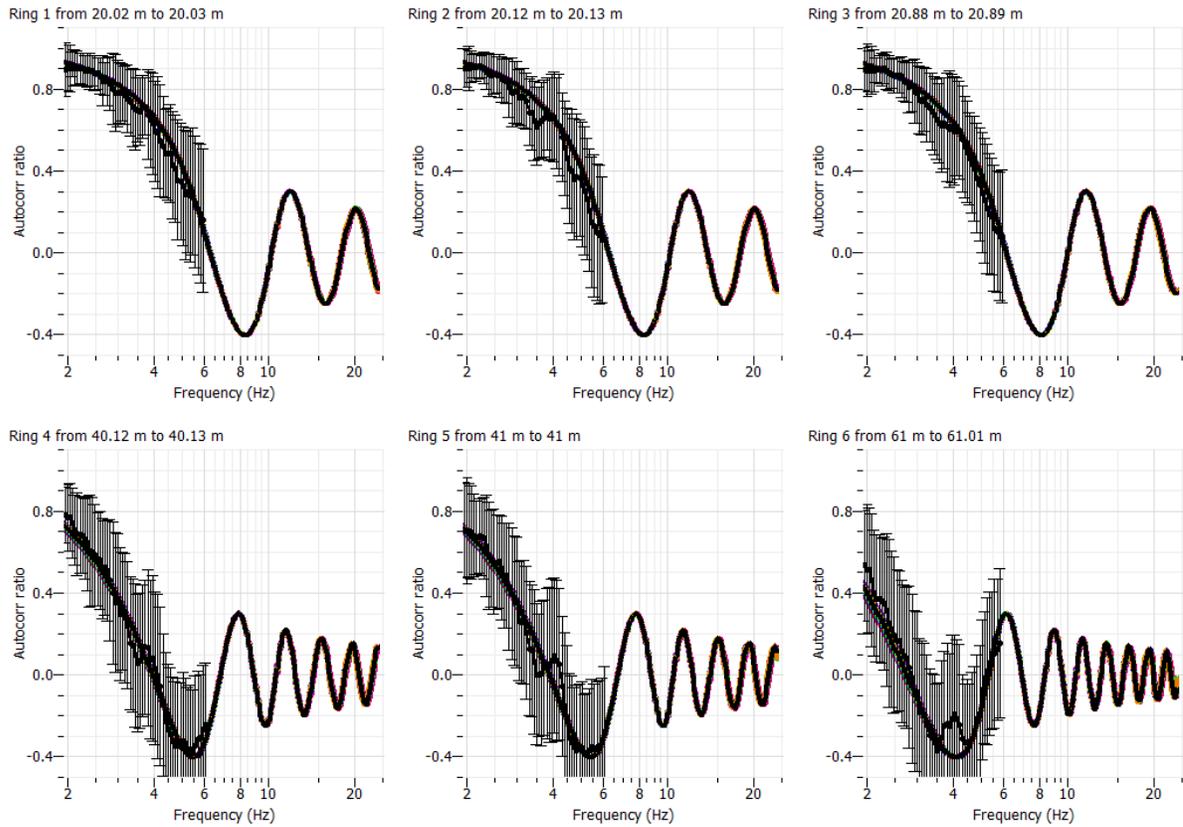


Figura E.5 Coeficientes de autocorrelación entre modelo y SPAC para medición 003.

E.4.1. Medición 004

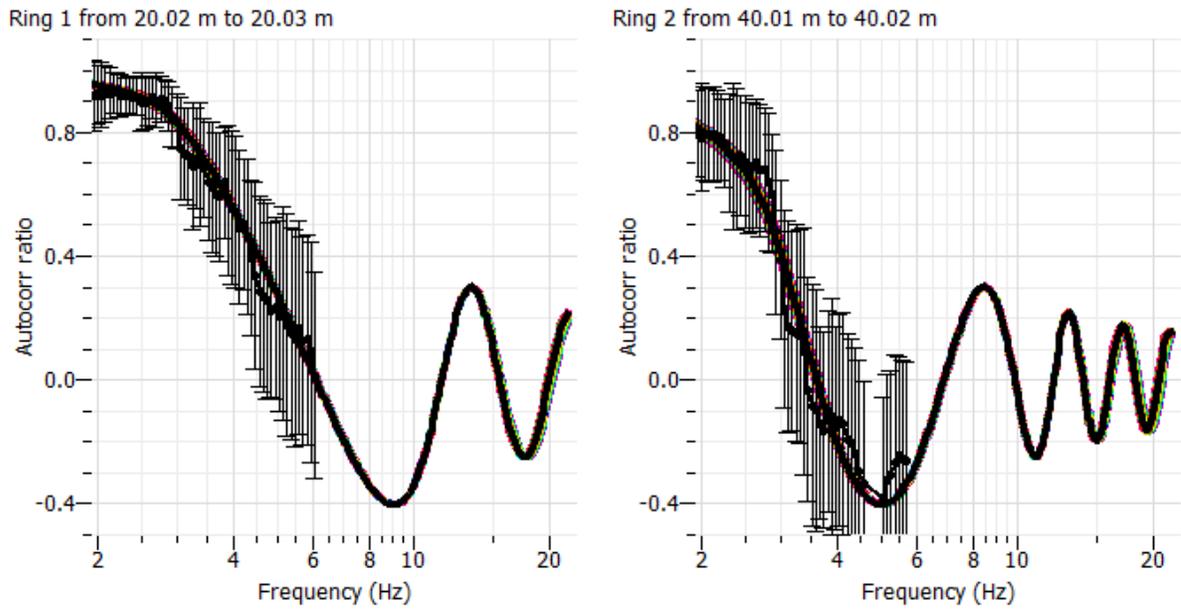


Figura E.6 Coeficientes de autocorrelación entre modelo y SPAC para medición 004.

E.4.2. Medición 005

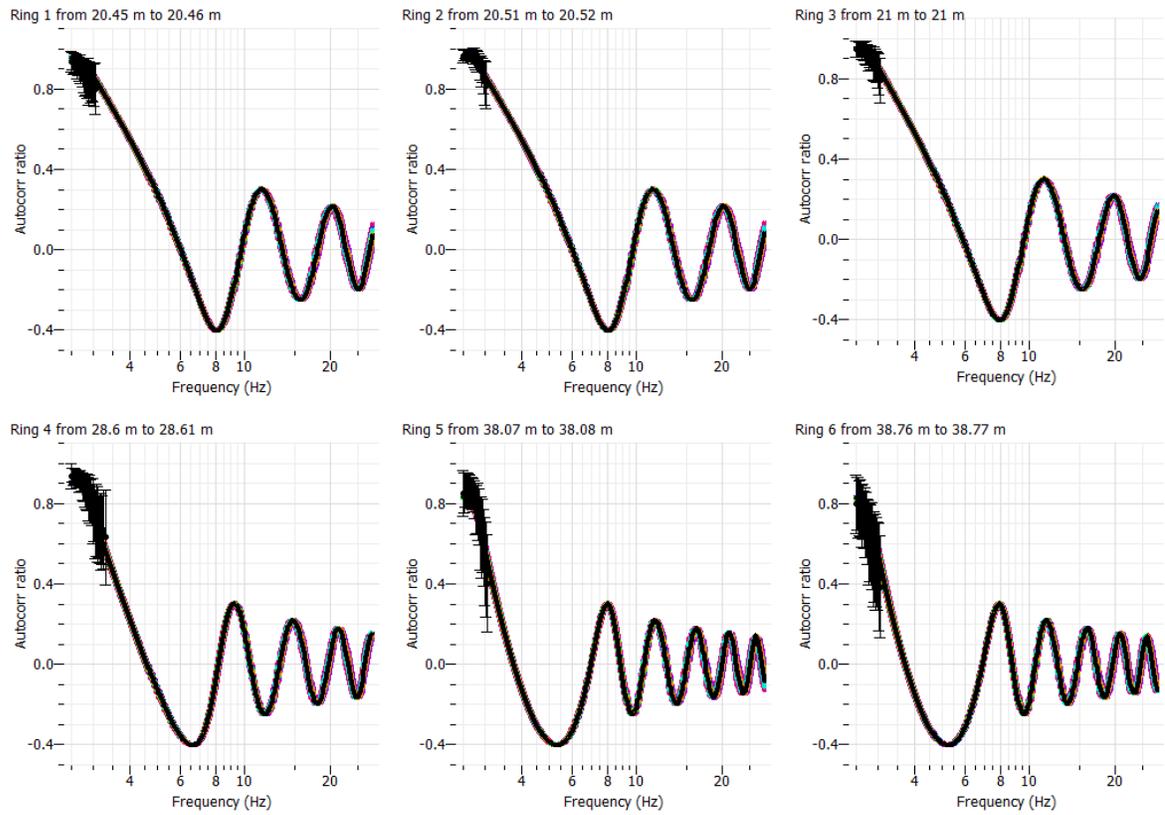


Figura E.7 Coeficientes de autocorrelación entre modelo y SPAC para medición 005.

F. Diagramas de Estabilidad (SSI)

F.1. El Cortijo

F.1.1. Edificio El Cortijo Oriente

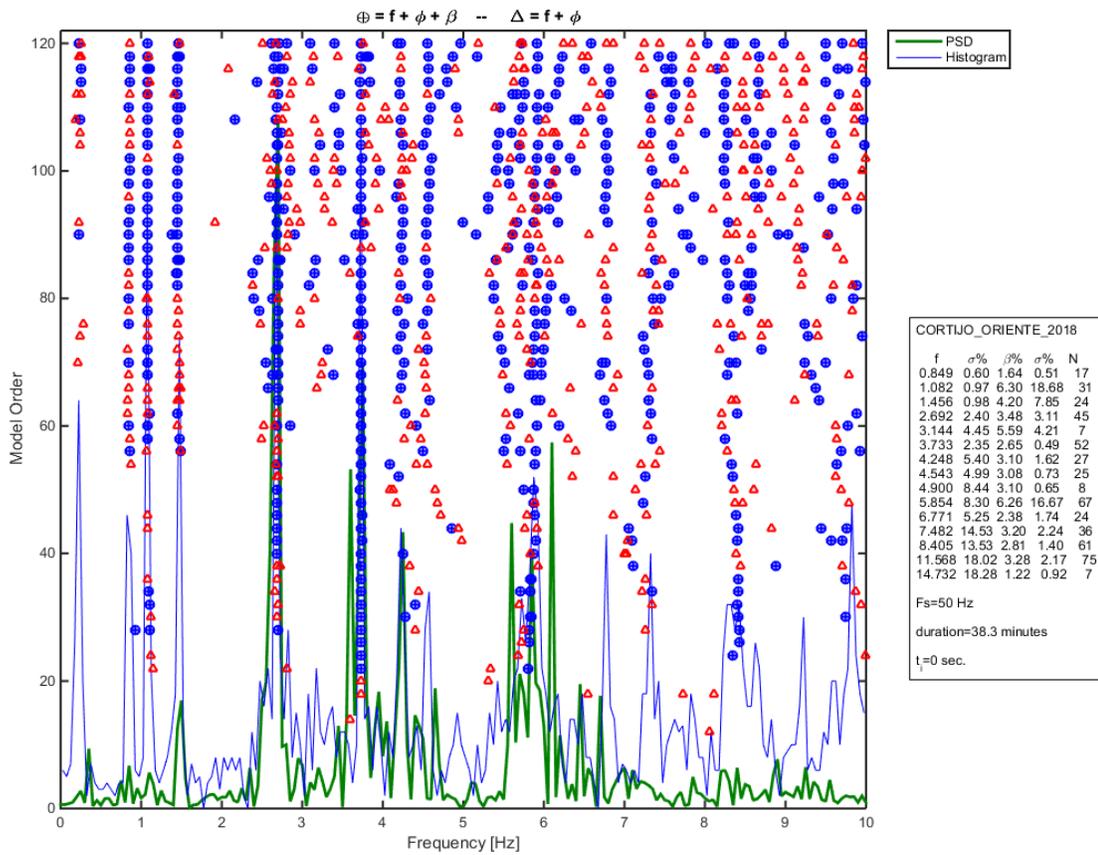


Figura F.1 Diagrama de estabilidad para edificio El Cortijo Oriente utilizando instrumentos Episensor.

F.1.2. Edificio El Cortijo Poniente

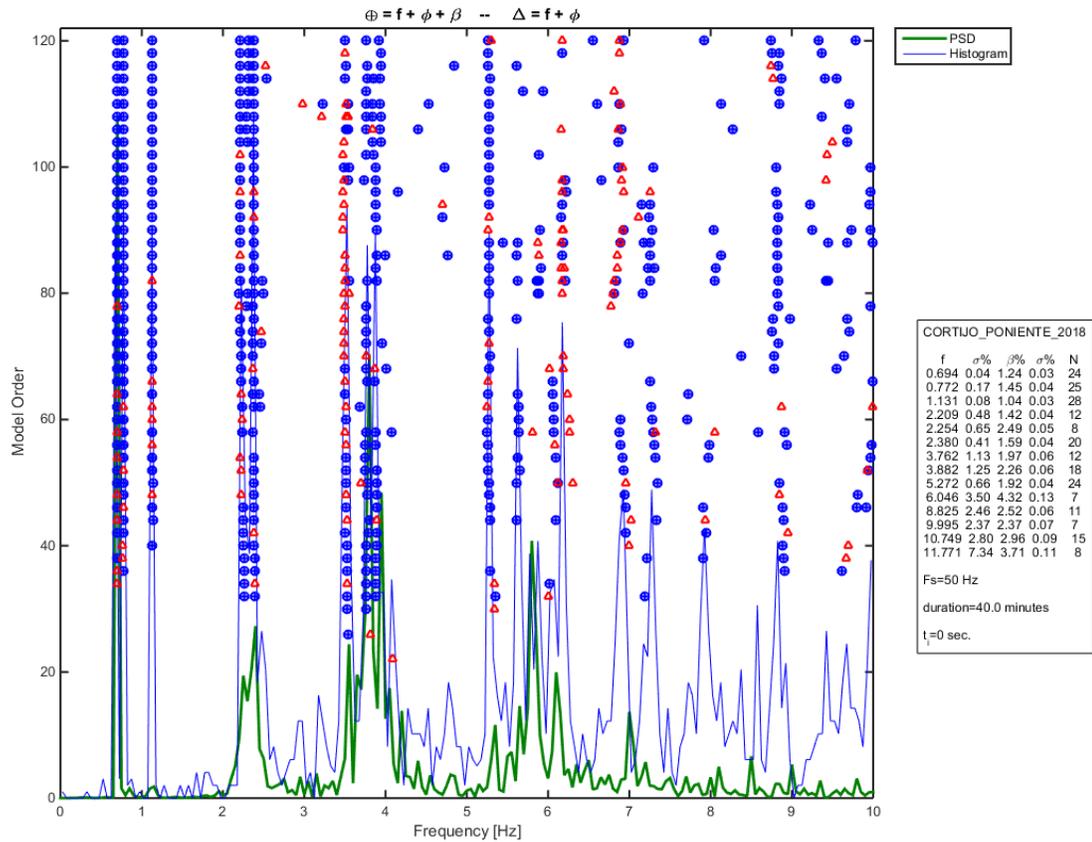


Figura F.2 Diagrama de estabilidad para edificio El Cortijo Poniente utilizando instrumentos Episensor.

F.2. Hipódromo Chile

F.2.1. Edificio Hipódromo Oriente

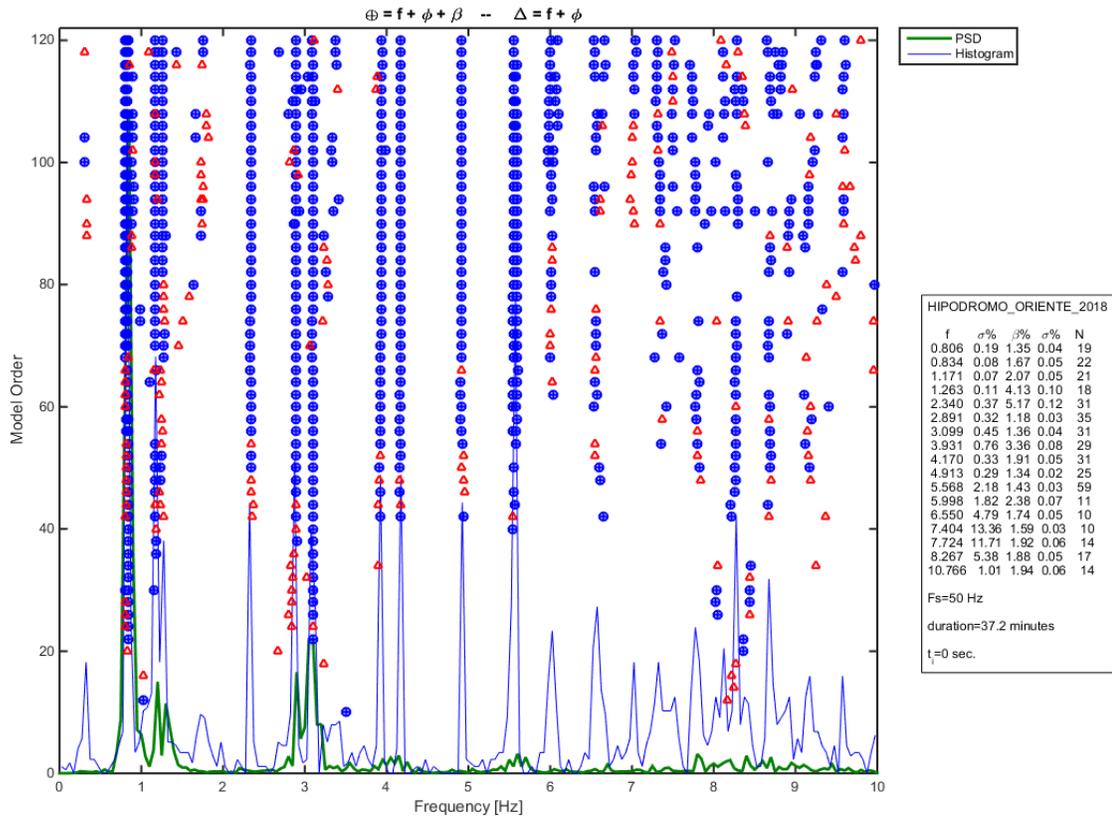


Figura F.3 Diagrama de estabilidad para edificio Hipódromo Oriente utilizando instrumentos Episensor.

F.2.2. Edificio Hipódromo Poniente

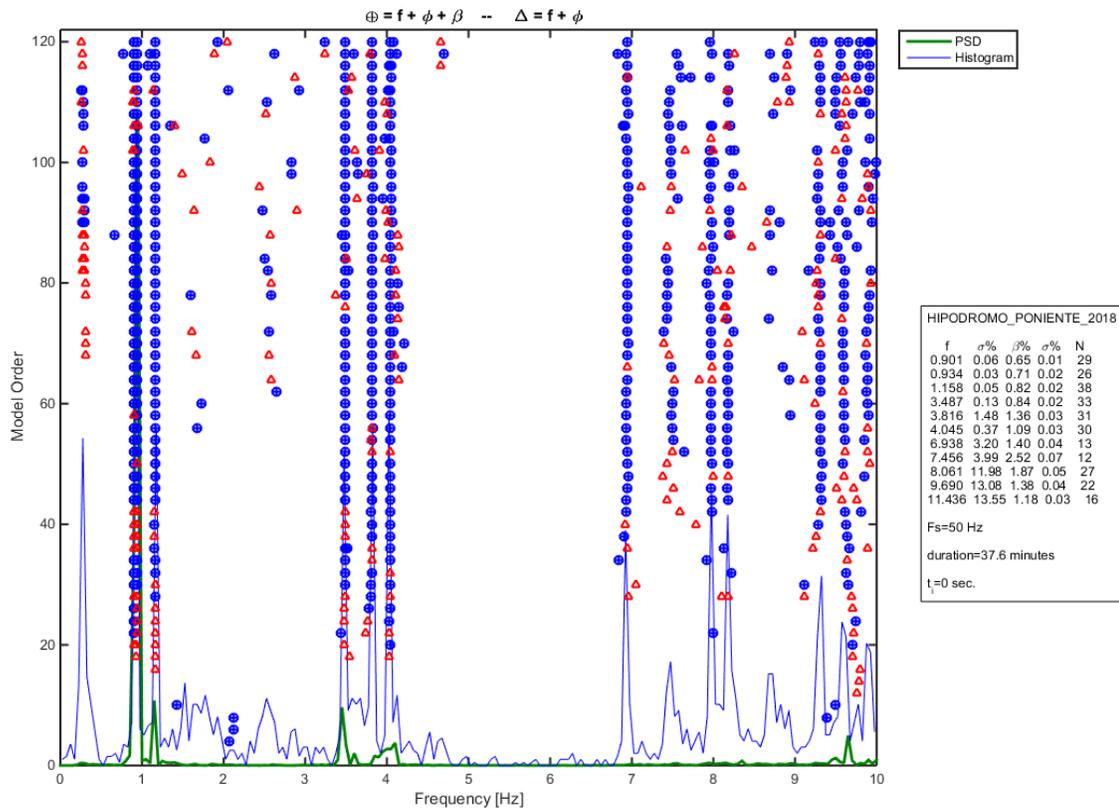


Figura F.4 Diagrama de estabilidad para edificio Hipódromo Poniente utilizando instrumentos Episensor.

F.3. Santa Marta de Huechuraba

F.3.1. Edificio Huechuraba Oriente

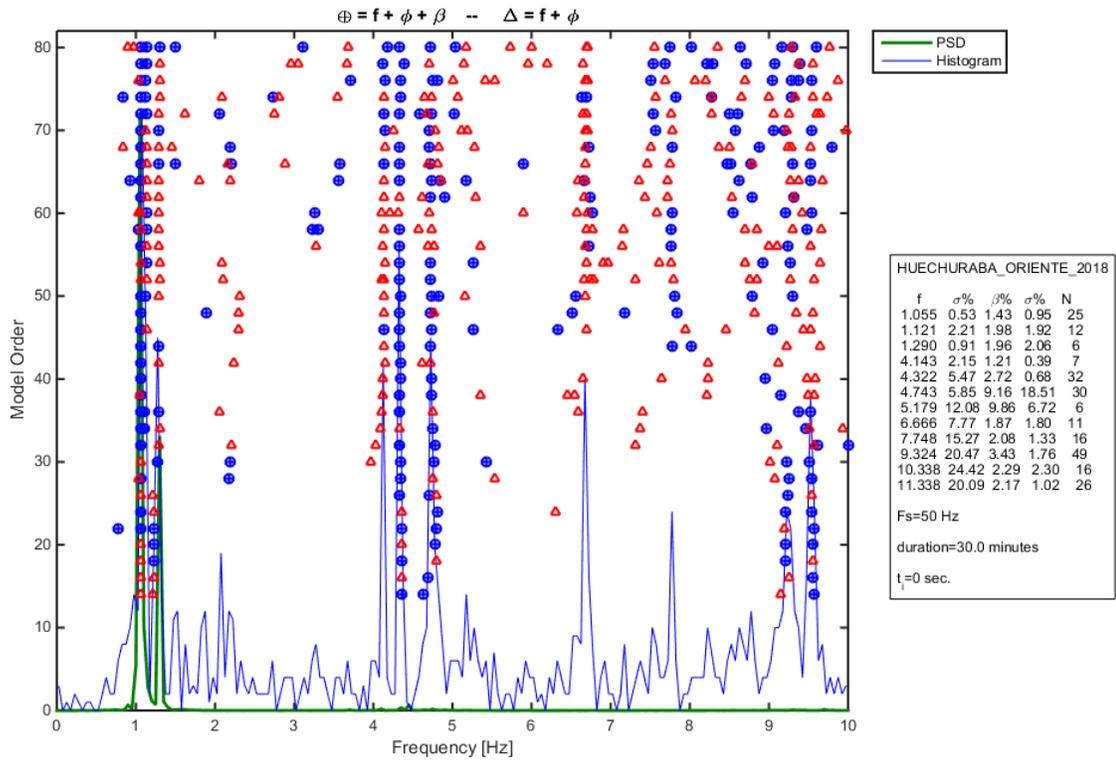


Figura F.5 Diagrama de estabilidad para edificio Huechuraba Oriente utilizando instrumento Tromino.

F.3.2. Edificio Huechuraba Poniente

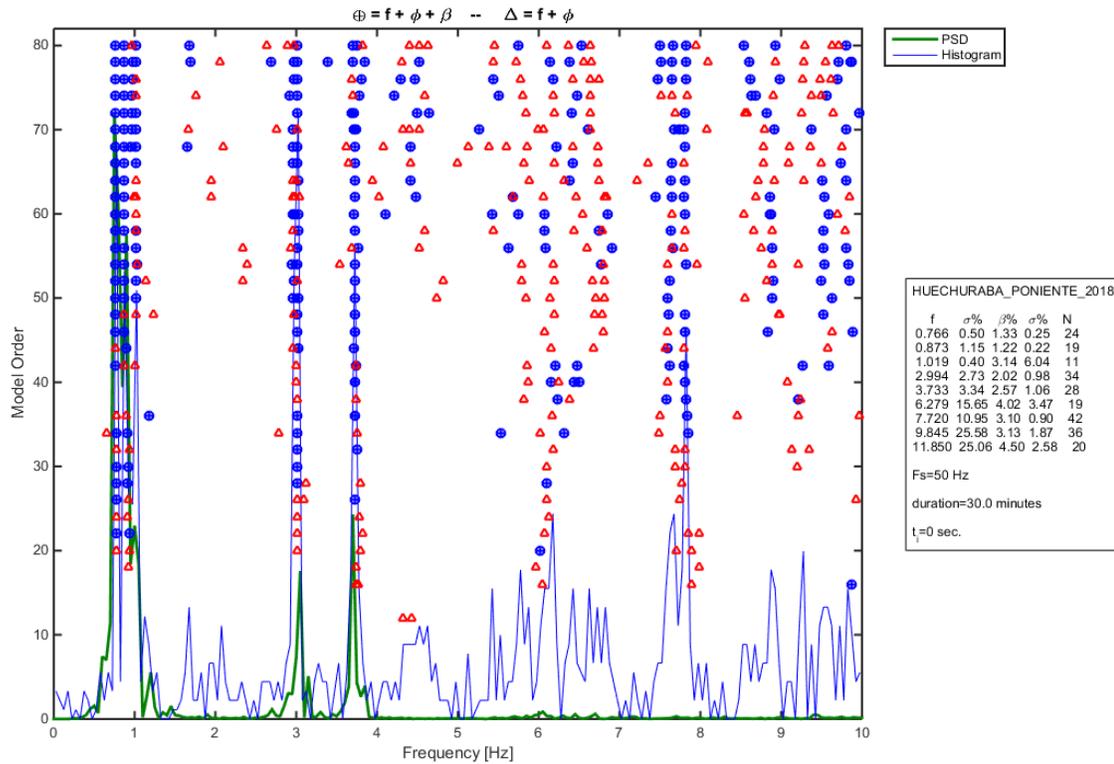


Figura F.6 Diagrama de estabilidad para edificio Huechuraba Poniente utilizando instrumento Tromino.

G. Identificación PSD

G.1. El Cortijo

G.1.1. Edificio El Cortijo Oriente

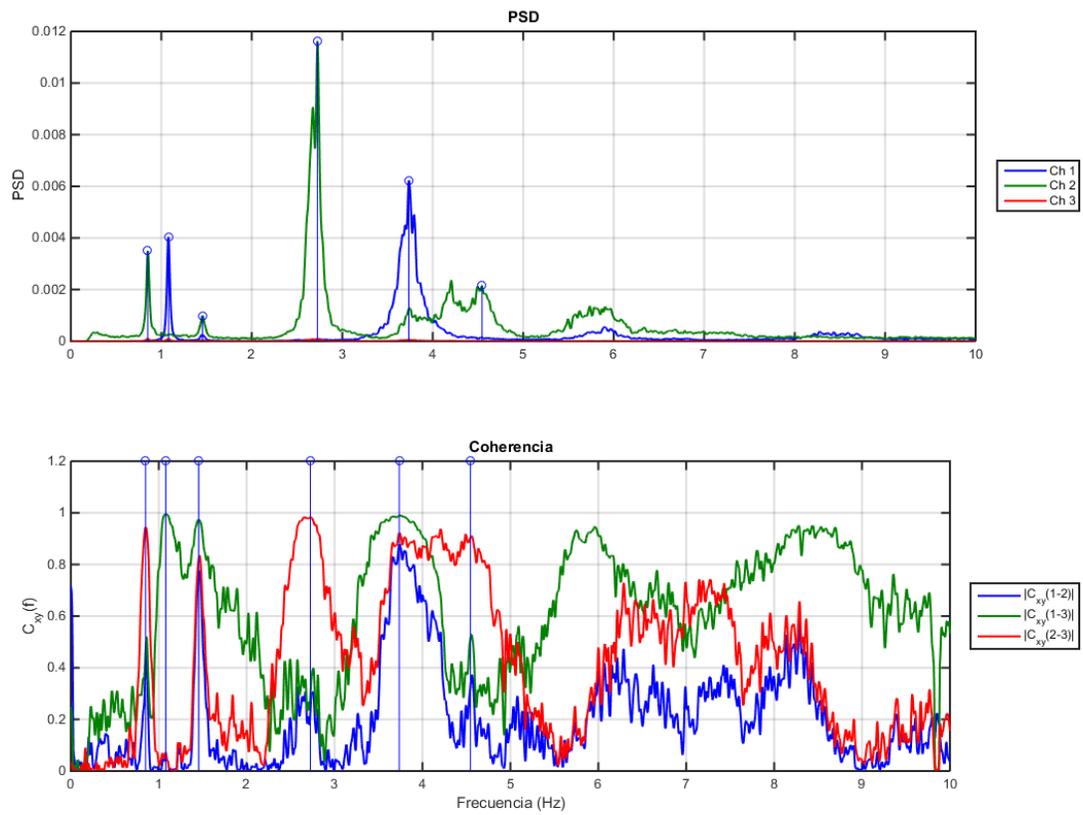


Figura G.1 Análisis PSD para edificio El Cortijo Oriente utilizando instrumentos Episensor.

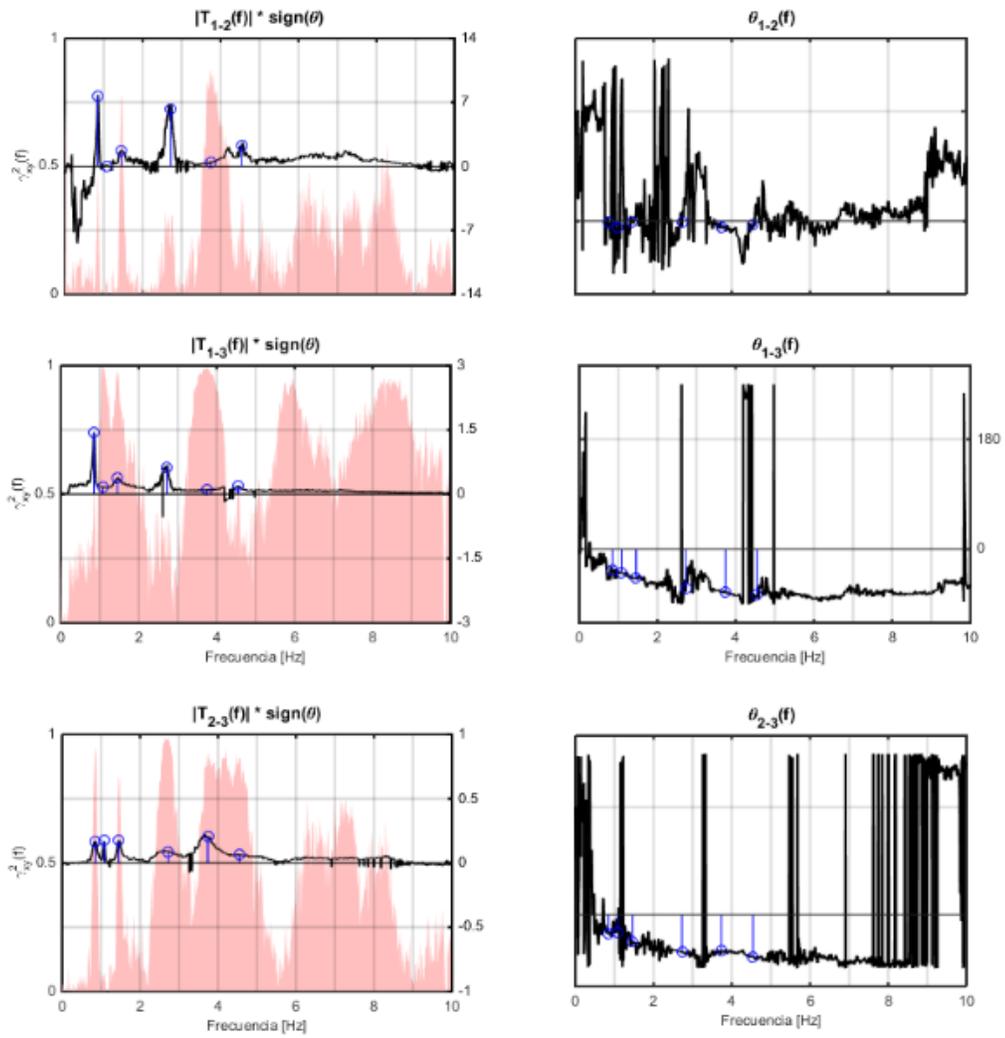


Figura G.2 Funciones de transferencia y coherencia entre canales para edificio El Cortijo Oriente.

G.1.2. Edificio El Cortijo Poniente

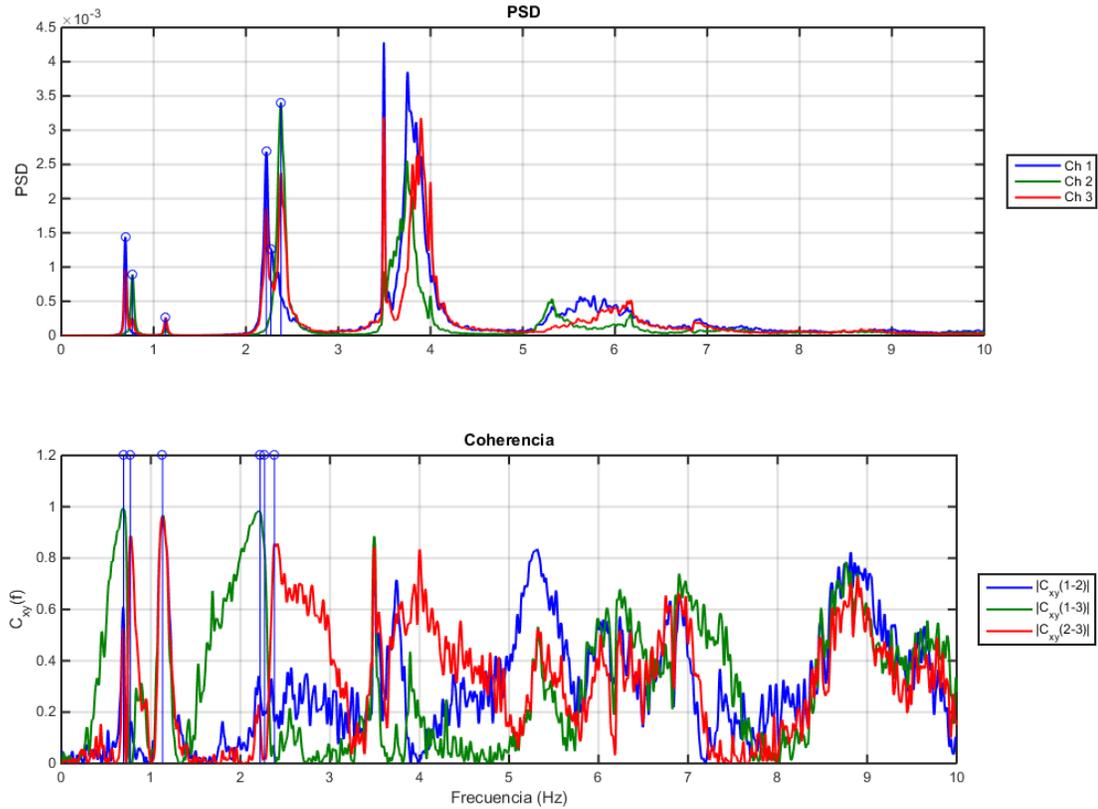


Figura G.3 Análisis PSD para edificio El Cortijo Poniente utilizando instrumentos Episensor.

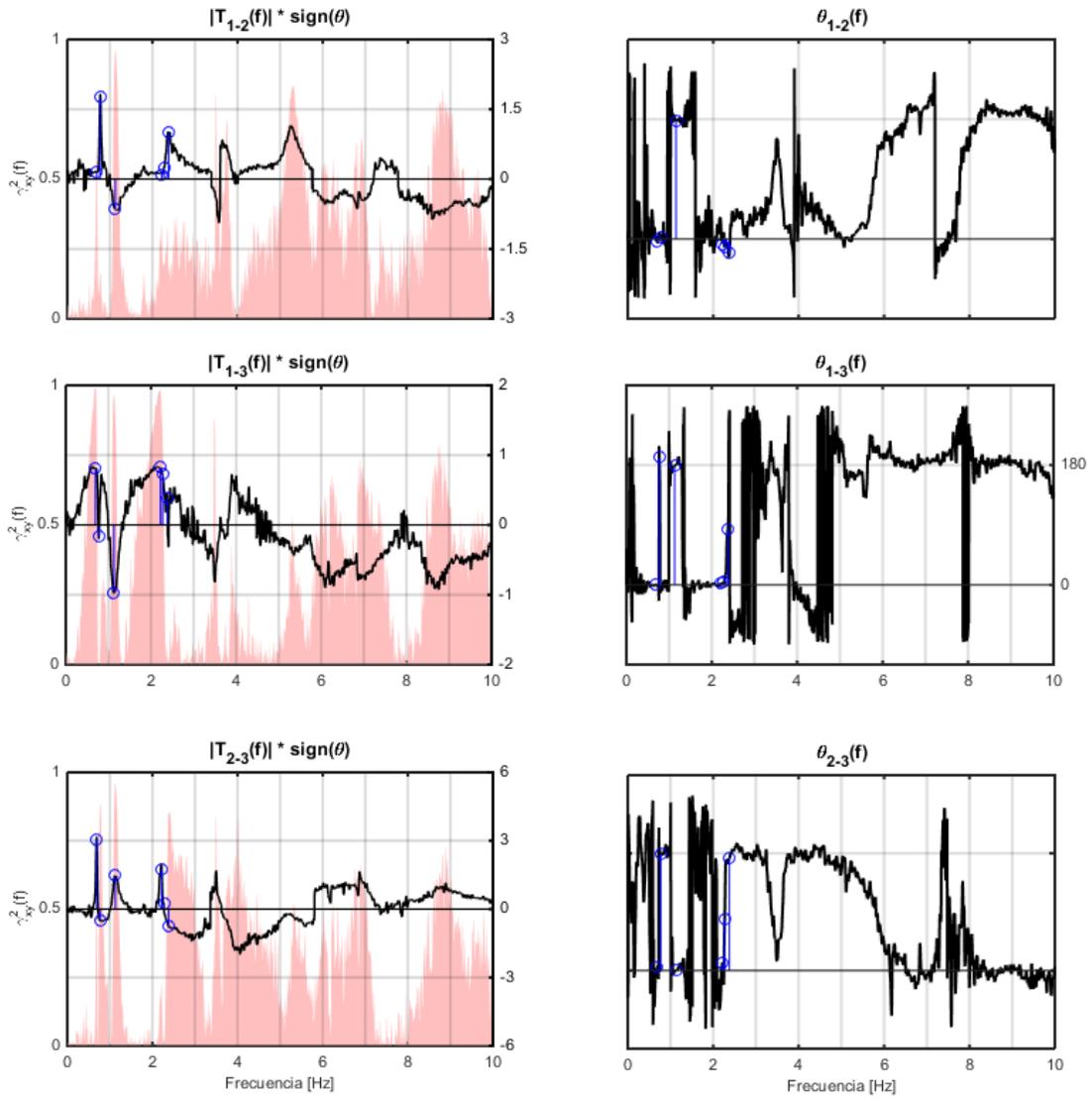


Figura G.4 Funciones de transferencia y coherencia entre canales para edificio El Cortijo Poniente.

G.2. Hipódromo Chile

G.2.1. Edificio Hipódromo Oriente

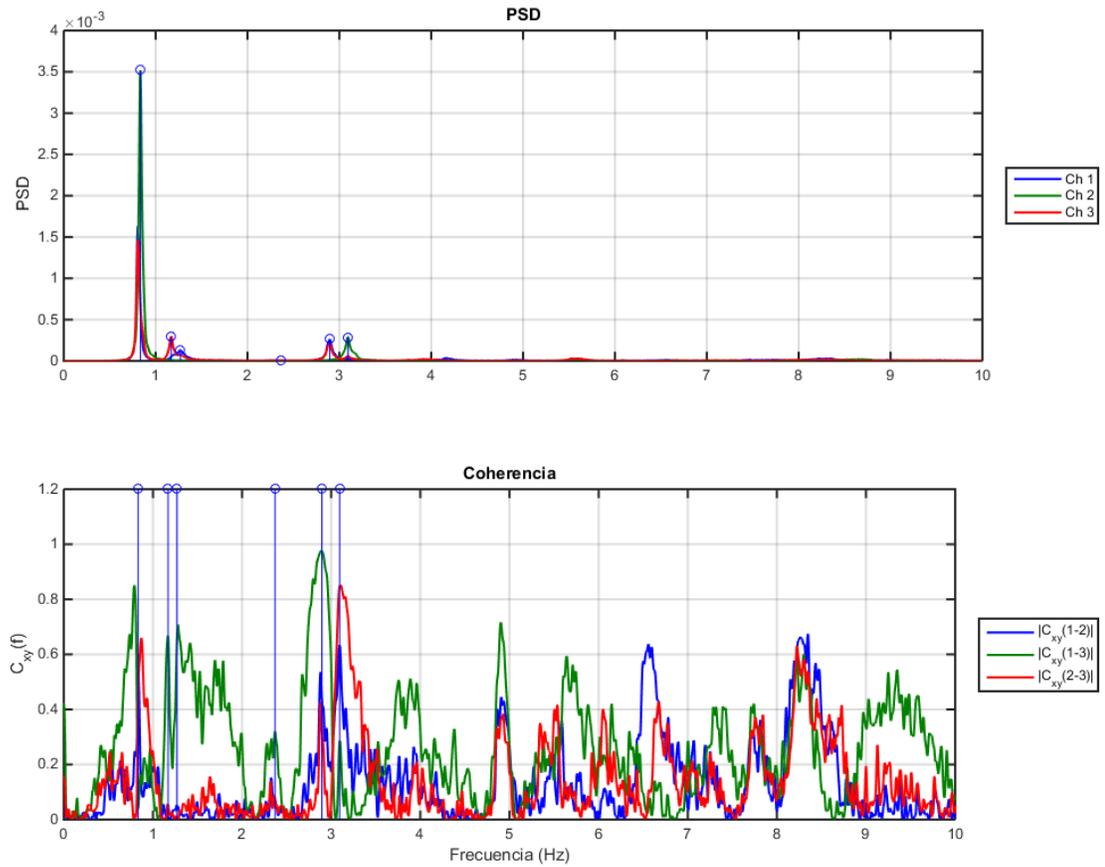


Figura G.5 Análisis PSD para edificio Hipódromo Oriente utilizando instrumentos Episensor.

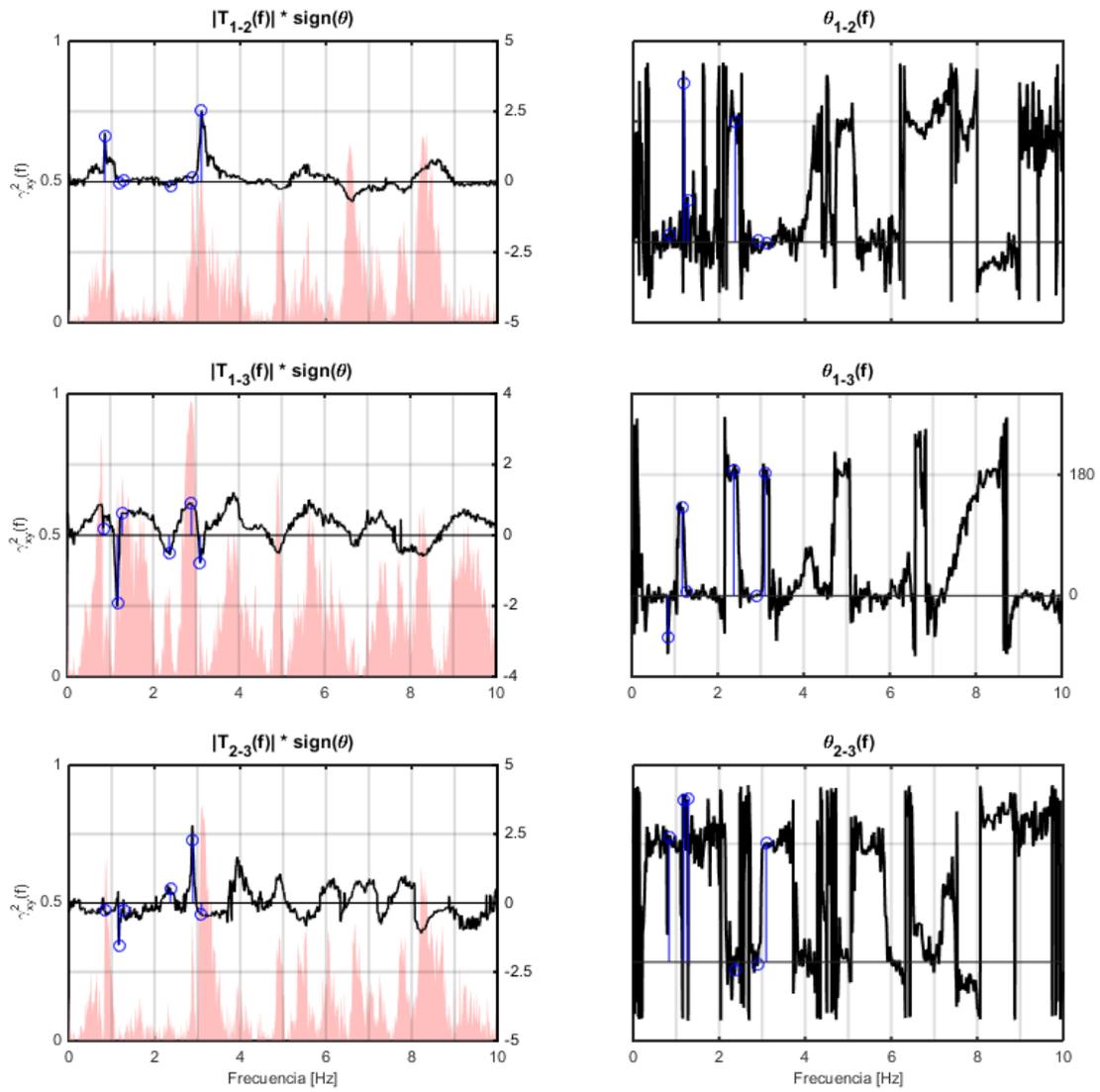


Figura G.6 Funciones de transferencia y coherencia entre canales para edificio Hipódromo Oriente.

G.2.2. Edificio Hipódromo Poniente

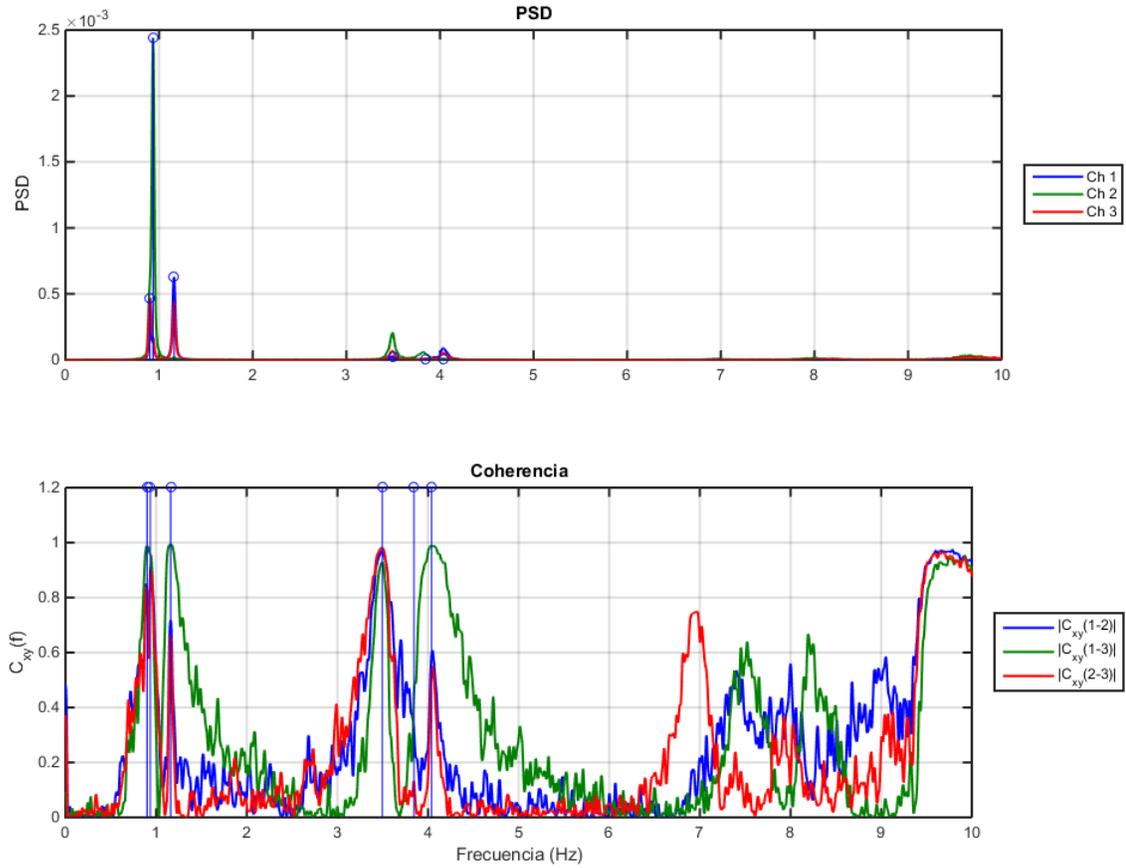


Figura G.7 Análisis PSD para edificio Hipódromo Poniente utilizando instrumentos Episensor.

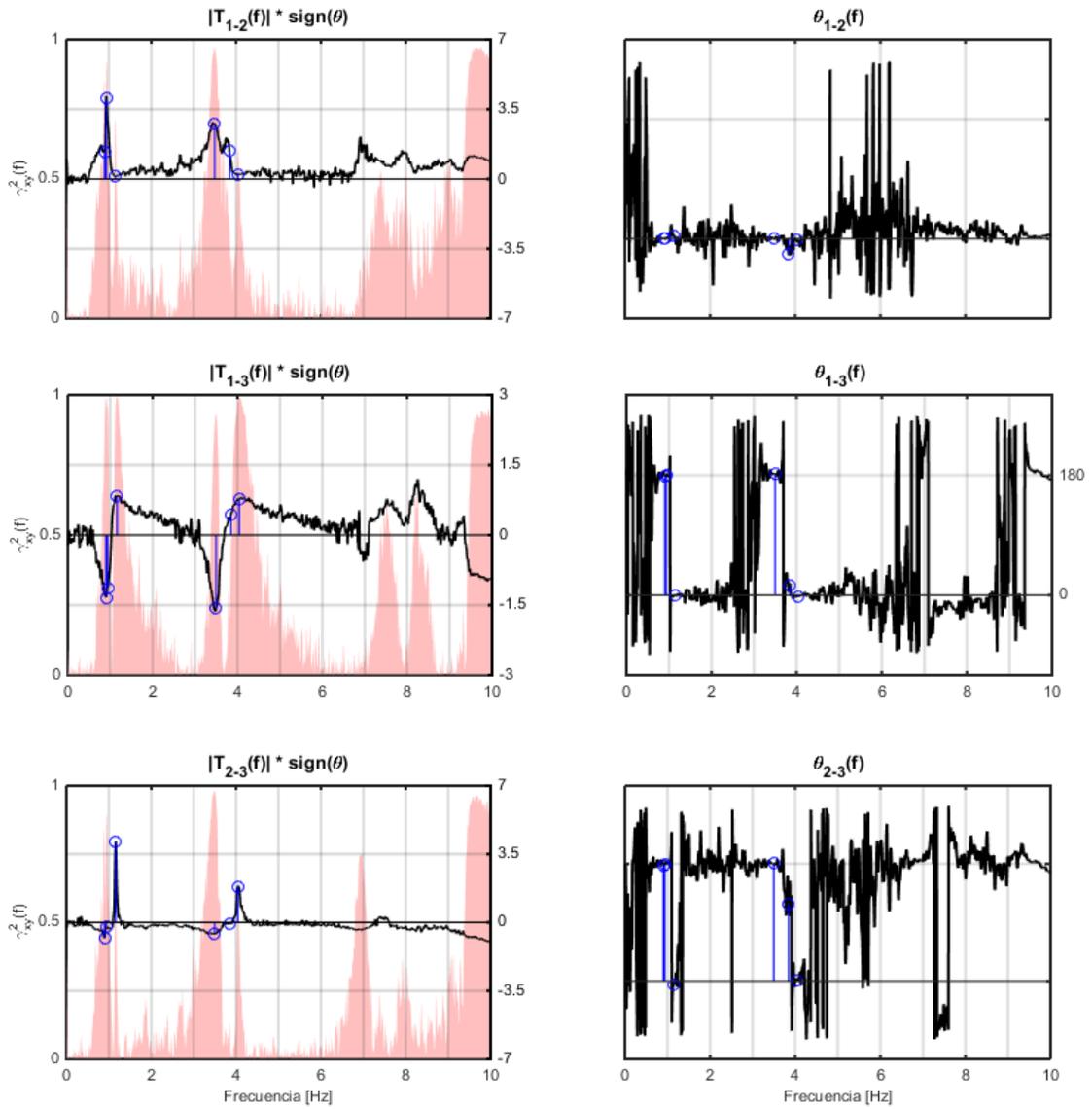


Figura G.8 Funciones de transferencia y coherencia entre canales para edificio Hipódromo Poniente.

G.3. Santa Marta de Huechuraba

G.3.1. Edificio Huechuraba Oriente

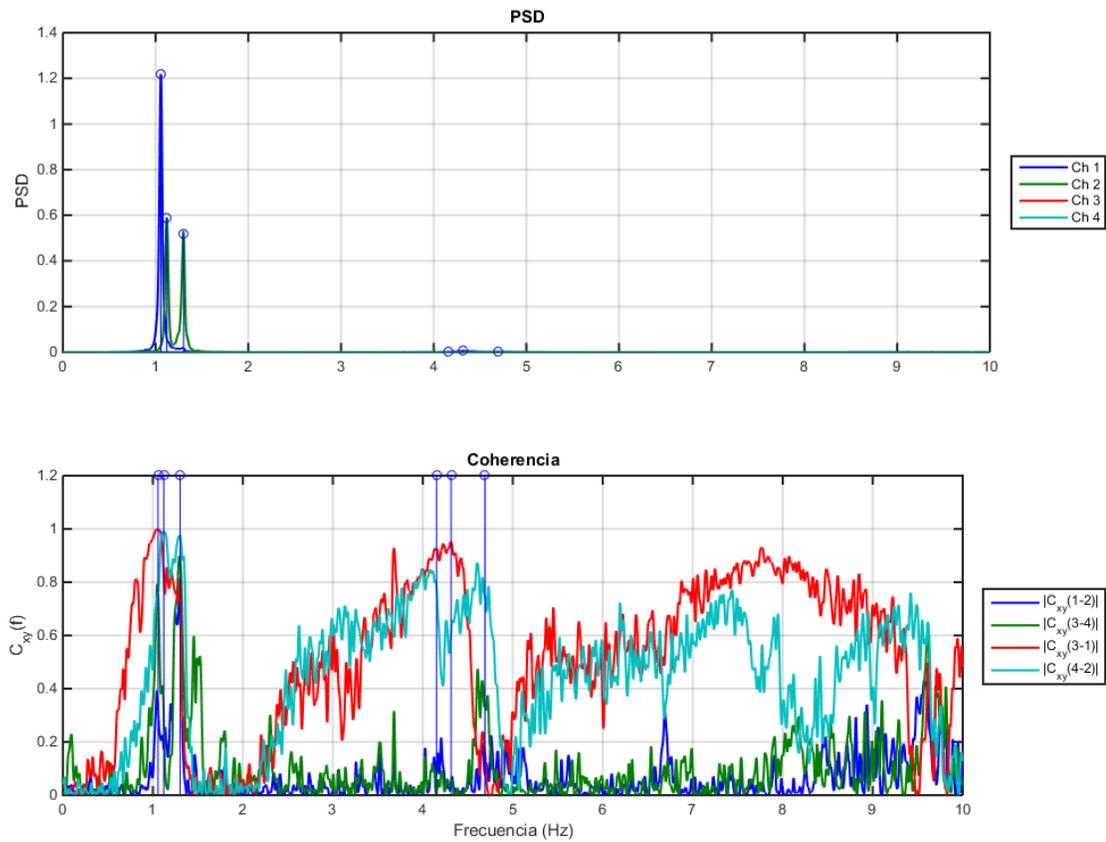


Figura G.9 Análisis PSD para edificio Huechuraba Oriente utilizando instrumento Tromino.

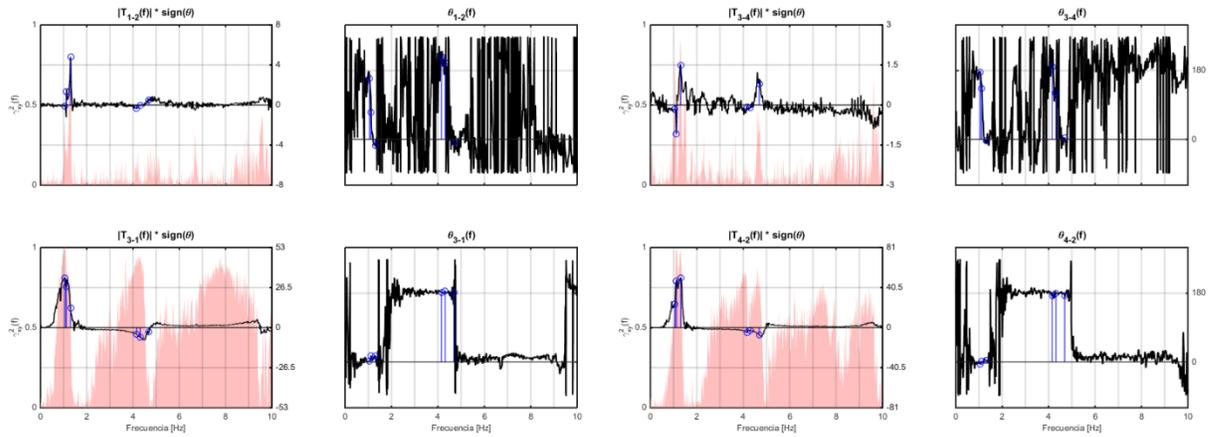


Figura G.10 Funciones de transferencia y coherencia entre canales para edificio Huechuraba Oriente.

G.3.2. Edificio Huechuraba Poniente

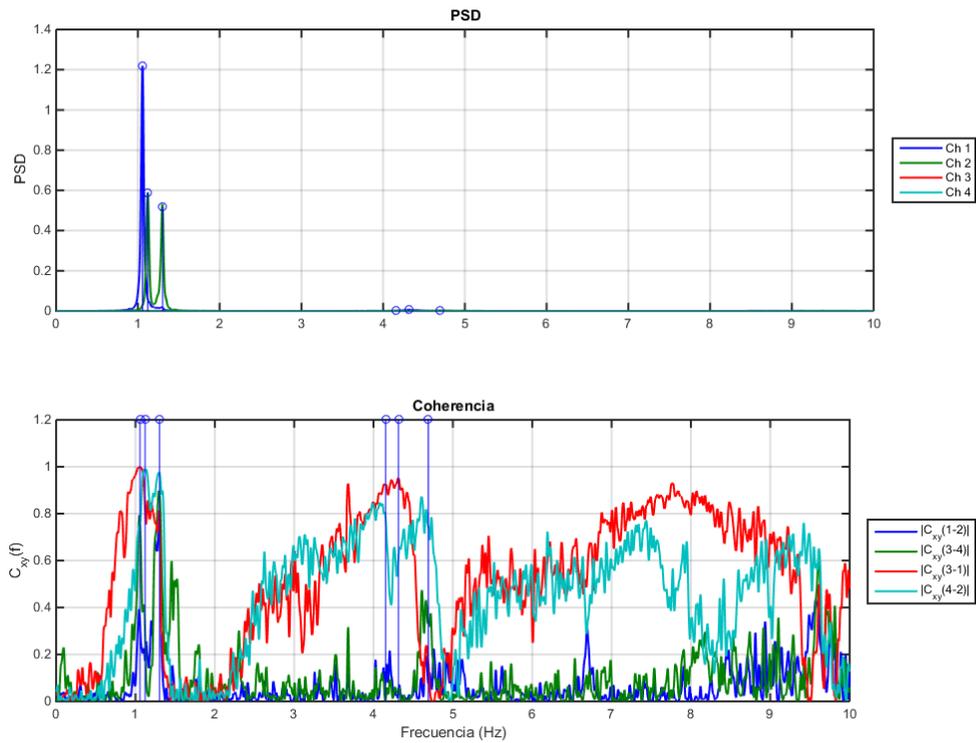


Figura G.11 Análisis PSD para edificio Huechuraba Poniente utilizando instrumento Tromino.

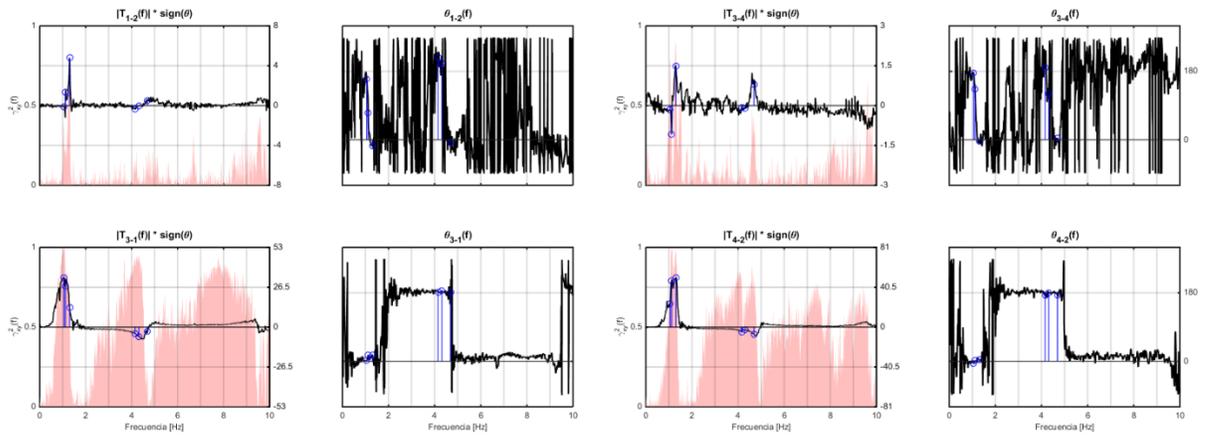


Figura G.12 Funciones de transferencia y coherencia entre canales edificio Huechuraba Poniente.

H. Formas Modales con Método PSD

H.1. El Cortijo

H.1.1. Edificio El Cortijo Oriente

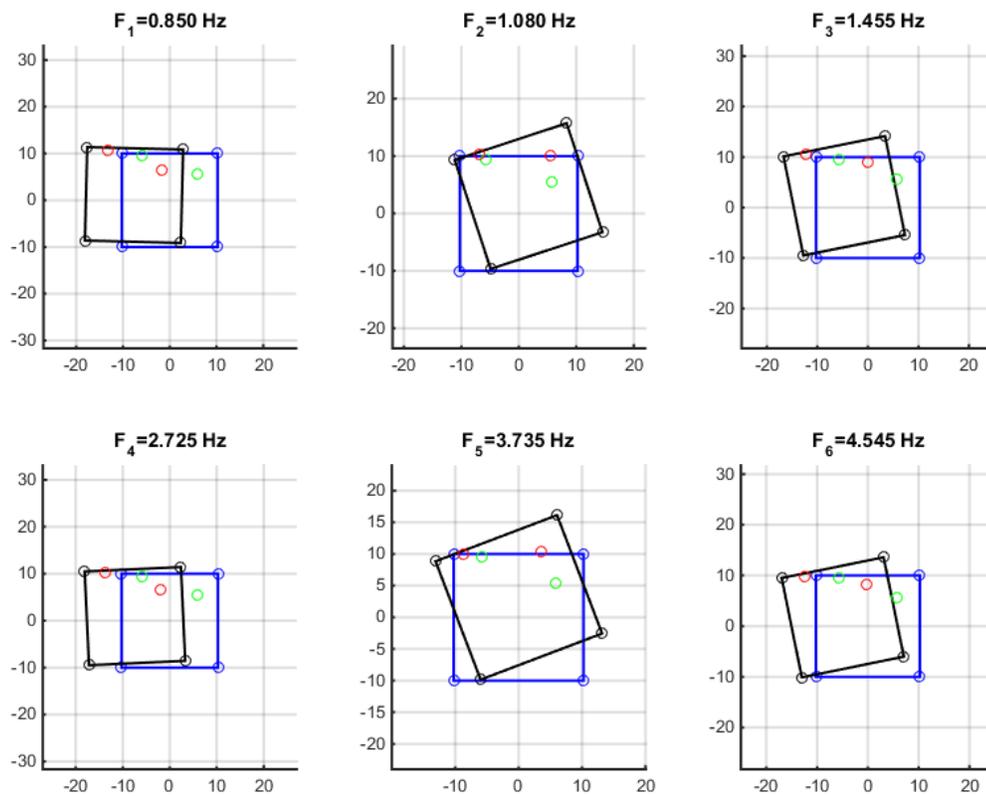


Figura H.1 Formas modales edificio El Cortijo Oriente con método PSD.

H.1.2. Edificio El Cortijo Poniente

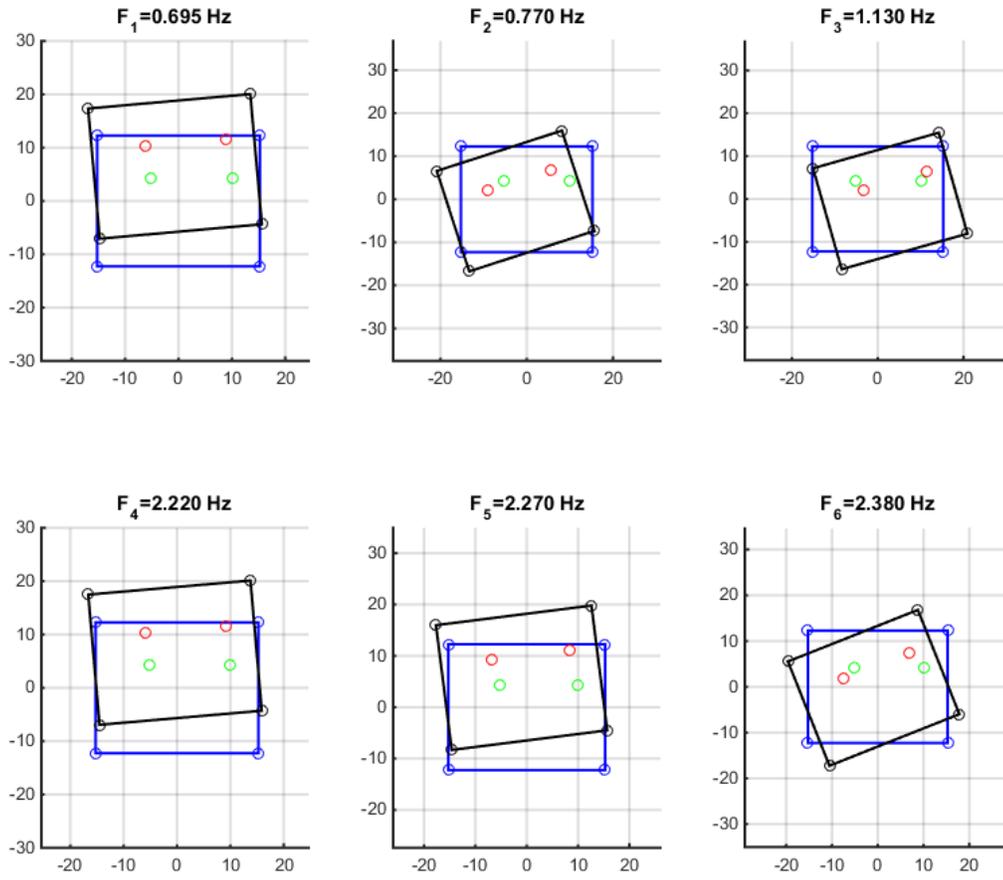


Figura H.2 Formas modales edificio El Cortijo Poniente con método PSD.

H.2. Hipódromo Chile

H.2.1. Hipódromo Oriente

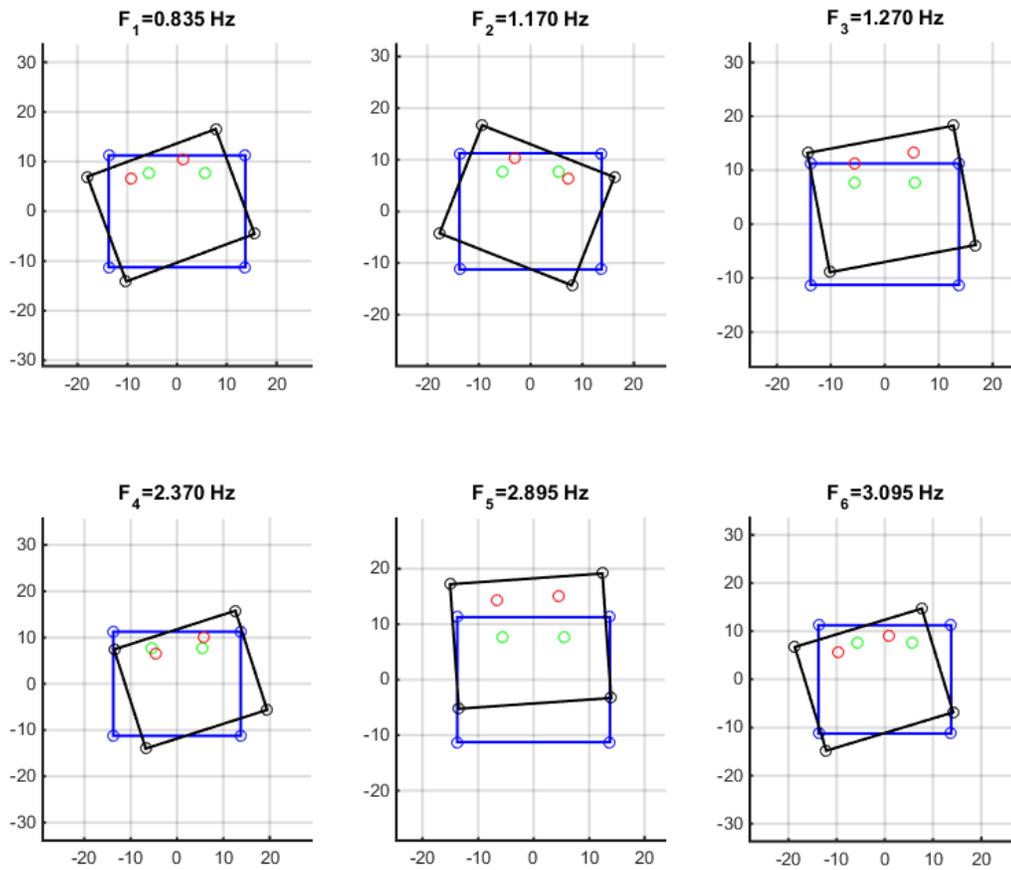


Figura H.3 Formas modales edificio Hipódromo Oriente con método PSD.

H.2.2. Edificio Hipódromo Poniente

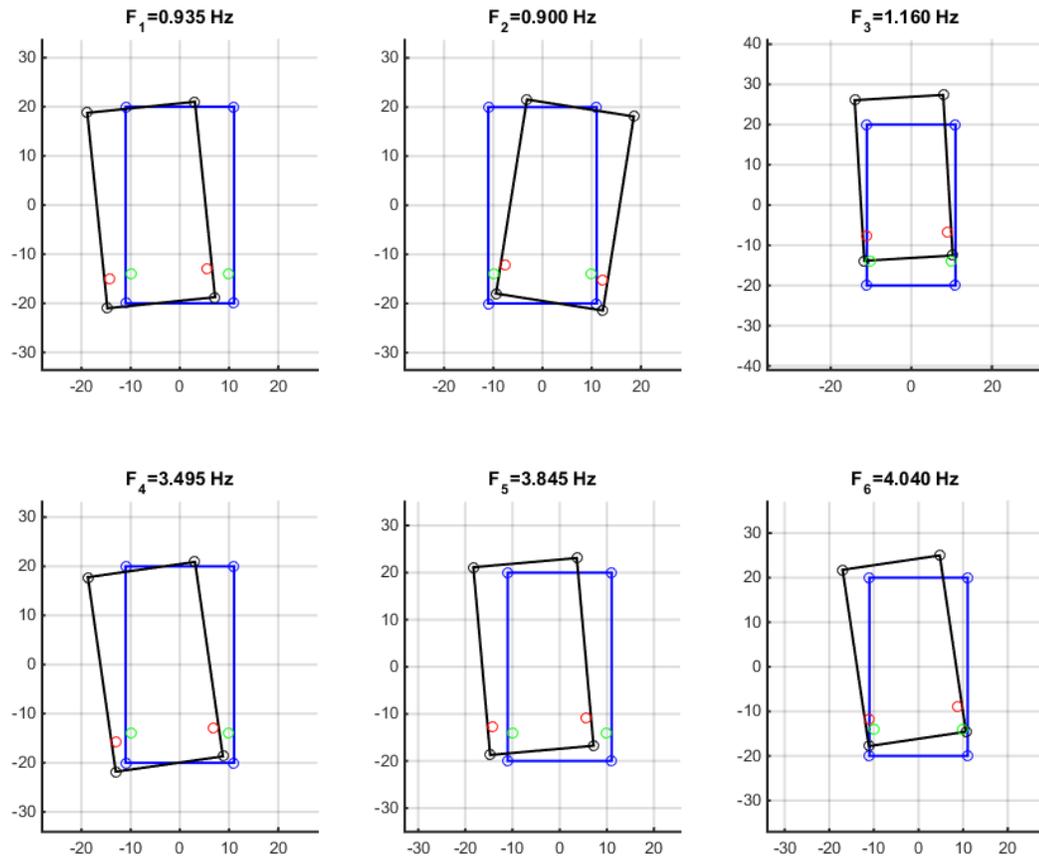


Figura H.4 Formas modales edificio Hipódromo Poniente con método PSD.