



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

**EVALUACIÓN DE EFECTOS DE SITIO EN LA CIUDAD DE
VALDIVIA PRODUCTO DEL MEGA-TERREMOTO DE 1960**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FELIPE IGNACIO CAMPOS RODRIGUEZ

PROFESOR GUÍA:
CÉSAR PASTÉN PUCHI

MIEMBROS DE LA COMSIÓN:
SERGIO RUIZ TAPIA
FELIPE OCHOA CORNEJO

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil con mención en Estructuras, Construcción y Geotecnia.

POR: Felipe Ignacio Campos Rodríguez

FECHA: 19/01/2018

PROFESOR GUIA: César Rodrigo Pastén Puchi

EVALUACIÓN DE EFECTOS DE SITIO EN LA CIUDAD DE VALDIVIA PRODUCTO DEL MEGA-TERREMOTO DE 1960

El presente trabajo de título busca determinar los efectos de sitio ocurridos en la ciudad de Valdivia producto del terremoto del 22 de mayo de 1960. Los principales objetivos son: 1) recolectar antecedentes históricos de los daños ocurridos en el terremoto, 2) caracterizar geomorfológica y geotécnicamente la ciudad de Valdivia con antecedentes bibliográficos, y 3) estudiar la aplicabilidad del método de las razones espectrales H/V con registros de vibraciones ambientales para reconocer las zonas más dañadas durante el terremoto. El trabajo contempla la elaboración de un mapa geológico y de perfiles transversales dentro de la ciudad, asociándoles un modelo de velocidad de ondas de corte. Además, se elaboró un mapa de daños de la ciudad, relacionados a las diferentes estructuras existentes en esa época, y las causas principales de sus daños. Finalmente, se elaboró un mapa de los periodos obtenidos con la metodología H/V según su lugar de medición.

Según lo anterior, los daños ocurridos durante el terremoto están concentrados, principalmente, en las zonas de relleno artificial, siendo los asentamientos excesivos de las fundaciones la principal causa de destrucción de las estructuras presentes. Además, gran parte de los daños menores estuvieron asociados a deficiencias en la estructuración o construcción de las viviendas, tales como materiales defectuosos, fundaciones en mal estado, o la combinación de albañilería no confinada con madera, entre otras cosas.

Con respecto a los resultados obtenidos con el método de razones espectrales H/V, existe una variación en los periodos predominantes del suelo, obteniéndose periodos cercanos a 0,7 segundos en sectores donde la roca se encuentra a menor profundidad, y periodos de hasta 1,5 segundos en sectores donde la roca está más profunda. A pesar de esto, no es claro una relación directa entre el daño y los sectores de mayor periodo. Tampoco es evidente si ocurrió efecto de sitio en la zona, ya que, por la poca variedad de estructuras en Valdivia durante el sismo, no se pudo conocer el comportamiento de estructuras de mayores periodos. Se verifica que las estructuras pequeñas de madera y los edificios de hasta siete pisos de hormigón, como el edificio Prales, respondieron bien a las sollicitaciones sísmicas.

*A mi padre Juan Carlos y mi madre Sofía,
Por estar preocupados de mí durante todo este tiempo y haber estado apoyándome durante
toda mi vida.*

*A Camila,
Por estar a mi lado siempre incondicionalmente.*

*A mis abuelos Roberto y Oscar,
Quienes estuvieron cuando comencé este camino, pero no pudieron acompañarme hasta al
final, aun así, fueron sumamente importantes en mi vida y no podría estar donde estoy sin
ellos.*

*A mis abuelas Eladia y Yolanda,
Quienes se preocuparon de mí en todo momento y me apoyaron en todo lo que pudieron.*

*A mi tía Marisol,
Quien desde la distancia siempre se ha preocupado por mí.*

Agradecimientos

Es necesario escribir estas palabras para agradecer a todas las personas que me han acompañado a lo largo de este difícil camino, ahora que estoy al final de mi carrera puedo darme cuenta la gran cantidad de personas que me han estado apoyando día a día. Si no hubiera contado con el apoyo de mi familia, polola y amigos no podría estar donde estoy y ser quien soy, por eso quiero dedicarle estas palabras a todos los que me han apoyado en todo este tiempo.

Debo comenzar por agradecer a mis padres, abuelos y mi tía, quienes se han preocupado de mi todo este tiempo y me han apoyado en todos los caprichos que he tenido a lo largo de la carrera, gracias a ellos he tenido un paso alegre por la universidad sin mayores problemas y por eso les estoy muy agradecido. También le doy las gracias a mi polola quien ha estado a mi lado todo este tiempo, que a pesar de la distancia y la falta de tiempo nunca me dejó de lado y desde el primer al último día de universidad siempre estuvo conmigo y creyó en mí.

También agradecer mis amigos de la universidad, a quienes conocí a lo largo de la carrera y que poco a poco se fueron convirtiendo en personas muy importantes para mí, juntos vivimos momentos tristes y felices, sufrimos juntos a todos esos profesores que nos hacían la vida imposible en algunos momentos, pero al final pudimos salir adelante. Gracias por todos esos buenos momentos en los que nos juntamos solamente a hablar de la vida y reír.

Finalmente debo agradecer a todos aquellos que me ayudaron a elaborar este trabajo, mi profesor guía y mis profesores co-guías quienes siempre estuvieron dispuestos a ayudarme en las ideas que tenía y recomendarme mejores formas de resolver mis problemas. Junto a esto también debo agradecer al profesor Galo Valdebenito y al Ingeniero David Alvarado quienes facilitaron toda la información que tuvieron disponible sin ningún problema para ayudarme en mi investigación. Por último agradecer al Ingeniero Felipe Leyton quien también se tomó el tiempo de ayudarme con su trabajo.

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Objetivo General	2
1.3	Objetivos Específicos	2
1.4	Metodología	2
2.	Análisis de la geología de Valdivia y elaboración de un modelo de velocidad de onda de corte	4
2.1	Revisión Bibliográfica	4
2.1.1	Estudio de la geología y geotecnia de Valdivia.....	4
2.1.2	Contexto geológico de la formación del suelo de fundación de la ciudad de Valdivia.	4
2.1.3	Caracterización estratigráfica de la ciudad de Valdivia	7
2.2	Geología superficial de Valdivia	8
2.3	Elaboración de perfiles transversales de la ciudad de Valdivia.....	10
2.3.1	Supuestos y consideraciones para los perfiles transversales A-A' y B-B'	13
2.3.2	Perfil transversal A-A'	14
2.3.3	Perfil transversal B-B'	16
2.4	Elaboración del modelo de velocidad de onda de corte.....	18
2.4.1	Modelos de velocidad de onda de corte elaborados por FUCHIGE	18
2.4.2	Perfiles de velocidad obtenidos con el método de correlaciones cruzadas	20
3.	Análisis del daño ocurrido durante el terremoto de 1960 en la ciudad de Valdivia	26
3.1	Antecedentes bibliográficos.....	26
3.2	Mapa de daño de la ciudad de Valdivia	32
3.3	Análisis comparativo del daño y la geología de Valdivia	34
3.4	Análisis y conclusiones de los daños observados, la estratigrafía, y las propiedades geotécnicas de los distintos sectores de la ciudad de Valdivia	39
4.	Aplicabilidad del método de razones espectrales H/V	41
4.1	Revisión bibliográfica.....	41
4.1.1	Aplicación del método de razones espectrales H/V en la ciudad de Valdivia.....	41
4.1.2	Aplicación del método H/V en Valdivia por Alvarado (2012)	41
4.1.3	Aplicación del método H/V en Valdivia por la Universidad de Chile (2016).....	44

4.2	Reprocesamiento de los registros de vibraciones ambientales	45
4.2.1	Reprocesamiento de los registros de Alvarado (2012).....	45
4.2.2	Procesamiento de los registros de la Universidad de Chile (2016)	48
4.2.3	Resumen de registros reprocesados	50
4.3	Estudio de registros que presentan doble peak	51
4.4	Comparación de los periodos predominante con los mapas de daño y geología superficial de Valdivia	53
4.5	Comparación de los periodos predominantes medidos con el perfil transversal A-A'.....	57
4.6	Verificación de la profundidad de la roca en el perfil transversal A-A mediante el método de propagación de ondas en un medio multi-capa.....	60
5.	Conclusiones	64
6.	Bibliografía.....	67
7.	Anexos.....	70
7.1	Anexo 1 “Principales antecedentes para el análisis geológico y geotécnico de la ciudad de Valdivia”	70
7.1.1	Mapa del suelo de fundación de Valdivia (Barozzi y Lemke, 1966)	70
7.1.2	Antecedentes geológicos y geotécnicos de la ciudad de Valdivia (Retamal et al., 1969).....	71
7.1.3	Mapa de la geología y características geotécnicas de la ciudad de Valdivia (Arenas et al, 2004)	74
7.1.4	Sondajes realizados por la empresa M.A.H.S.	76
7.1.5	CPT realizado por la empresa LMMG Geotecnia.....	79
7.1.6	Sondajes y modelos de velocidad de onda de corte realizados por FUCHIGE.....	81
7.1.7	Asignación de velocidad de onda de cortes característica a los estratos presentes en los perfiles transversales	85
7.1.8	Perfiles de velocidad de onda de corte	87
7.1.9	Comparación perfiles de velocidad de onda de corte	90
7.2	Anexo 2 “Análisis de daño durante el terremoto de 1960 en la ciudad de Valdivia”.....	94
7.2.1	Referencias asocias al mapa de daño de la ciudad de Valdivia.....	94
7.2.2	Casas históricas de madera construidas antes del terremoto de Valdivia	114
7.3	Anexo 3 “Aplicabilidad del método H/V en la ciudad de Valdivia”	118
7.3.1	Tablas de resultados de las mediciones de los H/V	118

7.3.2	Gráficos de razón espectral H/V, mediciones Alvarado (2012).....	127
7.3.3	Gráficos de razón espectral H/V, mediciones Universidad de Chile (2016)	143
7.4	Anexo 4 “Mapas de la ciudad de Valdivia”	156
7.4.1	Mapa geológico de la ciudad de Valdivia	156
7.4.2	Mapa de daño de la ciudad de Valdivia.....	156
7.4.3	Mapa de mediciones H/V de la ciudad de Valdivia	156
7.4.4	Mapa general de la ciudad de Valdivia	156

Índice de tablas

Tabla 2.1: Ubicación y longitud del corte transversal A-A'	15
Tabla 2.2: Ubicación y longitud del corte transversal B-B'	17
Tabla 2.3: Velocidades de onda de corte características para cada estrato.	19
Tabla 3.1: Cantidad de estructuras según cantidad de daño y tipo asociada a cada estrato superficial.	35
Tabla 3.2: Cantidad de estructuras según tipo asociadas a cada estrato superficial.	36
Tabla 3.3: Cantidad de estructuras estudiadas según tipo de daño.....	36
Tabla 3.4: Porcentaje de estructuras según cantidad de daño y tipo con respecto al total de estructuras de cada tipo.....	36
Tabla 3.5: Porcentaje de estructuras según cantidad de daño y tipo con respecto al total de estructuras de cada tipo asociadas a los distintos estratos superficiales.....	38
Tabla 4.1: Cantidad de registros por número de ventanas procesadas.	46
Tabla 4.2: Cantidad de registros aceptados asociados a un rango de periodos determinado.	47
Tabla 4.3: Cantidad de registros por número de ventanas procesadas.	49
Tabla 4.4: Cantidad de registros asociados a un rango de periodos determinado.	49
Tabla 4.5: Mediciones que presentan más de un peak.	51
Tabla 4.6: Mediciones complementarias de H/V.	54
Tabla 4.7: Puntos de medición incluidos en la comparación entre el periodo y el perfil transversal.....	57
Tabla 4.8: Datos asociados a la medición 105.	61
Tabla 4.9: Datos asociados a la medición 132.	61
Tabla 4.10: Datos asociados a la medición 148.	61
Tabla 4.11: Comparación entre los periodos obtenidas por ambos métodos.	62
Tabla 4.12: Comparación del espesor del estrato de arena.....	63
Tabla 7.1: Estratigrafía asociada a la estación 3a de la empresa M.A.H.S.	76
Tabla 7.2: Estratigrafía asociada a la estación 3b de la empresa M.A.H.S.	76
Tabla 7.3: Estratigrafía asociada a la estación 4a de la empresa M.A.H.S.	77
Tabla 7.4: Estratigrafía asociada a la estación 4b de la empresa M.A.H.S.	78
Tabla 7.5: Estratigrafía asociada a la estación 1 de FUCHIGE.....	81

Tabla 7.6: Perfil de velocidad de onda de corte asociado a la estación 1 de FUCHIGE.	82
Tabla 7.7: Estratigrafía asociada a la estación 2 de FUCHIGE.....	82
Tabla 7.8: Perfil de velocidad de onda de corte asociado a la estación 2 de FUCHIGE.	83
Tabla 7.9: Estratigrafía asociada a la estación 3 de FUCHIGE.....	83
Tabla 7.10: Perfil de velocidad de onda de corte asociado a la estación 3 de FUCHIGE....	84
Tabla 7.11: Estratigrafía asociada a la estación 4 de FUCHIGE.	84
Tabla 7.12: Perfil de velocidad de onda de corte asociado a la estación 4 de FUCHIGE....	85
Tabla 7.13: Velocidades de onda de corte relacionadas con el estrato de relleno artificial. 85	
Tabla 7.14: Velocidades de onda de corte relacionadas con el estrato de arcilla.	85
Tabla 7.15: Velocidades de onda de corte relacionadas con el estrato de limo arcilloso con poca arena.	85
Tabla 7.16: Velocidades de onda de corte relacionadas con el estrato de arena limosa.	86
Tabla 7.17: Velocidades de onda de corte relacionadas con el estrato de arena con poco limo.	87
Tabla 7.18: Numeración estratos.....	90
Tabla 7.19: Comparación perfiles de velocidad para el mapa geológico y el método de correlaciones cruzadas para el perfil de velocidad UCHP001.	90
Tabla 7.20: Comparación perfiles de velocidad para el mapa geológico y el método de correlaciones cruzadas para el perfil de velocidad UCHP002.	91
Tabla 7.21: Comparación perfiles de velocidad para el mapa geológico y el método de correlaciones cruzadas para el perfil de velocidad UCHP003.	91
Tabla 7.22: Comparación perfiles de velocidad para el mapa geológico y el método de correlaciones cruzadas para el perfil de velocidad CSNP001.....	92
Tabla 7.23: Comparación perfiles de velocidad para el mapa geológico y el método de correlaciones cruzadas para el perfil de velocidad CSNP002.....	92
Tabla 7.24: Comparación perfiles de velocidad para el mapa geológico y el método de correlaciones cruzadas para el perfil de velocidad CSNP003.....	93
Tabla 7.25: Datos asociados a las casas históricas.	116
Tabla 7.26: Resultados de las mediciones de los registros H/V medidos por la Universidad de Chile.....	118
Tabla 7.27: Georreferenciación y resultados de todas las mediciones H/V.	122

Índice de ilustraciones

Figura 2.1: Plano de la ciudad de Valdivia a mediados del siglo XIX (Siemens, 1853).....	5
Figura 2.2: Mapa de caracterización geológica de la ciudad de Valdivia (Barozzi y Lemke, 1966).....	6
Figura 2.3: Mapa de caracterización geológica de la ciudad de Valdivia (Arenas et al., 1966).	7
Figura 2.4: Mapa geológico de Valdivia.	9
Figura 2.5: Ubicación de los sondajes, sitios, estaciones y CPT disponibles (Google Earth, 2017).....	10
Figura 2.6: Ubicación de los cortes transversal con orientación norte-sur sobre la ciudad de Valdivia (Google Earth, 2017).	11
Figura 2.7: Cortes transversales con orientación norte-sur sobre la ciudad de Valdivia.....	11
Figura 2.8: Ubicación de los cortes transversal con orientación este-oeste sobre la ciudad de Valdivia (Google Earth, 2017).	12
Figura 2.9: Cortes transversales con orientación este-oeste sobre la ciudad de Valdivia. ...	12
Figura 2.10: Ubicación perfil transversal A-A' y B-B' (Google Earth, 2017).....	14
Figura 2.11: Perfil transversal, corte A-A'	16
Figura 2.12: Perfil transversal, corte B-B'	18
Figura 2.13: Ubicación de los perfiles de velocidad medidos.....	20
Figura 2.14: Ubicación de los seis perfiles de velocidad elaborados en Valdivia.	21
Figura 2.15: Comparación perfiles de velocidad ubicación “UCHP001”.....	22
Figura 2.16: Comparación perfiles de velocidad ubicación “UCHP002”.....	22
Figura 2.17: Comparación perfiles de velocidad ubicación “UCHP003”.....	23
Figura 2.18: Comparación perfiles de velocidad ubicación “CSNP001”.....	23
Figura 2.19: Comparación perfiles de velocidad ubicación “CSNP002”.....	24
Figura 2.20: Comparación perfiles de velocidad ubicación “CSNP003”.....	24
Figura 3.1: Banco de Chile (a) Vista frontal, (b) Vista lateral (Cambiazo, 1961).	27
Figura 3.2: Hospital Regional (a) Vista lateral, (b) Vista interior (Cambiazo, 1961).....	27
Figura 3.3: Calle Picarte (a) Vista en elevación, (b) Daños en casas de madera. (Lazo, 2008)	28

Figura 3.4: Costanera de la ciudad de Valdivia junto al rio Calle-Calle. (Saint Amand, 1961)	28
Figura 3.5: Calle García-Reyes afectada por grandes asentamientos. (Saint Amand, 1961)	29
Figura 3.6: Mapa de daño de la ciudad de Valdivia. (Weischet, 1961)	30
Figura 3.7: (a) Estanque de agua, (b) Hospital regional de Valdivia (Cambiazo, 1961)	31
Figura 3.8: Mapa de daño de la ciudad de Valdivia	33
Figura 3.9: Mapa de daño de Valdivia, sector central de la ciudad, zona de relleno artificial	34
Figura 3.10: Mapa de daño de Valdivia, sector central de la ciudad, zona de relleno artificial	34
Figura 3.11: Sector Sur de Valdivia, zona de limo arenoso. (AutoCAD, 2015)	40
Figura 3.12: Sector del estrato superficial Arena y ripio bien graduados	40
Figura 4.1: Sectorización de la ciudad de Valdivia (Alvarado, 2012)	42
Figura 4.2: Puntos de instrumentación en la ciudad de Valdivia (Alvarado, 2012)	42
Figura 4.3: Mapa de iso-periodos del suelo, Valdivia (Alvarado, 2012)	43
Figura 4.4: Amplitud máxima de las razones espectrales en Valdivia (Alvarado, 2012)	43
Figura 4.5: Ubicación de las mediciones de H/V del DIC de la Universidad de Chile (Google Earth, 2017)	44
Figura 4.6: Ubicación de los registros aceptados de la campaña de Alvarado (2012) (Google Earth, 2017)	47
Figura 4.7: Histograma de cantidad de registros asociados a un rango de periodo	48
Figura 4.8: Ubicación de los registros de la Universidad de Chile aceptados (Google Earth, 2017)	49
Figura 4.9: Histograma de cantidad de registros de la Universidad de Chile asociados a un rango de periodo	50
Figura 4.10: Histograma del total de mediciones aceptadas según periodo medido	50
Figura 4.11: Comparación entre un gráfico H/V normal (a) y uno con doble peak (b)	51
Figura 4.12: Ubicación de las mediciones que presentan más de un peak (Google Earth, 2017)	52
Figura 4.13: Ubicación de las mediciones con periodos menores a 1.1 segundos (Google Earth, 2017)	53

Figura 4.14: Ubicación de las mediciones con periodos mayores a 1.1 segundos (Google Earth, 2017).	54
Figura 4.15: Mapa de las mediciones H/V en la ciudad de Valdivia.	56
Figura 4.16: Ubicación de los puntos de medición seleccionados.	58
Figura 4.17: Gráfico de periodo predominante y perfil transversal A-A'.	59
Figura 4.18: Función de transferencia asociada a la ubicación del punto 105.	62
Figura 4.19: Función de transferencia asociada a la ubicación del punto 132.	62
Figura 4.20: Función de transferencia asociada a la ubicación del punto 148.	63
Figura 7.1: Mapa del suelo de fundación de Valdivia (Barozzi y Lemke, 1966).	70
Figura 7.2: Plano de ubicación de las estaciones de medición en Valdivia (Retamales et al., 1969).	71
Figura 7.3: Perfiles transversales (Retamal et al., 1969).	72
Figura 7.4: Estratigrafía de estaciones 1, 2, 3, 4, 9 y 10, junto a sus propiedades geotécnicas (Retamal et al., 1969).	73
Figura 7.5: Mapa de geología y características geotécnicas (Arenas et al, 2004).	74
Figura 7.6: Descripción y características geotécnicas (Arenas et al, 2004).	75
Figura 7.7: CPT 1, Resistencia de cono y clasificación típica de los estratos.	79
Figura 7.8: CPT 2, Resistencia de cono y clasificación típica de los estratos.	80
Figura 7.9: Perfil de velocidad UCHP001.	87
Figura 7.10: Perfil de velocidad UCHP002.	88
Figura 7.11: Perfil de velocidad UCHP003.	88
Figura 7.12: Perfil de velocidad (a) CSNP001, (b) CSNP002	89
Figura 7.13: Perfil de velocidad CSNP003	89
Figura 7.14: Daños a viviendas de madera a lo largo de una zona llena de tierra de la calle García Reyes en Valdivia. Se pueden observar los cortafuegos de mampostería entre los edificios de almacén de madera (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).	94
Figura 7.15: Calle García Reyes antes de Beauchef (Fuente: Laso, 2008).	94
Figura 7.16: Calle García Reyes.	95
Figura 7.17: Banco de Chile, (a) Vista lateral (Fuente: Colección fotográfica de Karl V. Steinbrugge). (b) Vista de la azotea (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).	96
Figura 7.18: Ubicación teatro Cervantes (Fuente: Barozzi y Lemke, 1966).	96

Figura 7.19: Teatro Cervantes (Fuente: Google Earth, 2017).	97
Figura 7.20: Hospital ortopédico (a), (b) y (c) Vista frontal de la estructura, (d), (e) y (f) Daños típicos presentes en la estructura (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).	98
Figura 7.21: Ubicación Aduana (Fuente: Barozzi y Lemke, 1966).	99
Figura 7.22: Ubicación Banco Español (Fuente: Barozzi y Lemke, 1966).	99
Figura 7.23: Fábrica de zapatos Weiss (Fuente: https://www.angelfire.com).	100
Figura 7.24: Hospital Regional (a) vista frontal, (b), (c), (d) y (e) fallas interiores (Fuente: Cambiazo, 1961).	101
Figura 7.25: Hospital Regional (a) vista en elevación, (b) vista lateral, (c) elevación ala este, (d) Porción de la elevación este de la torre de servicios médicos, donde se puede apreciar daño por fuerzas de corte, (e) Misma elevación del ala este en pisos inferiores. (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).	103
Figura 7.26: Estanque elevado (a) y (b) vista frontal, (c), (d), (e) y (f) grietas en el pilar y manto (Fuente: Cambiazo, 1961).	104
Figura 7.27: Estanque elevado (a) y (b) vista en elevación, (c) y (d) grietas continuas en elevación (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).	105
Figura 7.28: Población nueva (Fuente: Watanabe y Karzulovic, 1960).	106
Figura 7.29: Edificio Prales (a) Después del terremoto de 1960 (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963), (b) Actualmente (Fuente: Google Earth, 2017).	106
Figura 7.30: Calle Camilo Henríquez antes de llegar a Arauco (Fuente: Gentileza Grupo Terremoto Valdivia).	107
Figura 7.31: Calle Camilo Henríquez (Fuente: Colección fotográfica de Karl V. Steinbrugge y Rodolfo Schild).	107
Figura 7.32: Hotel Pedro de Valdivia (a) Vista frontal, (b) Vista desde el Noreste (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).	108
Figura 7.33: Catedral de Valdivia (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).	108
Figura 7.34: Daño a la cervecería de Valdivia (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).	109
Figura 7.35: Puente Pedro de Valdivia (a) Mirando hacia el sur en un pilar del este. Parte inferior de este pilar esta desplazado hacia el río como se indica por la zona oscura triangular a la izquierda del pilar, (b) Elevación norte, Puente Pedro de Valdivia orilla este. Se aprecia	

una rotura en la calzada del primer pilar. Este pilar es el mismo que se muestra en la Figura 7.58 (b) (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).	110
Figura 7.36: (a) Pavimento desplazado bajo el extremo este del puente Pedro de Valdivia, (b) Vista hacia el sur sobre los pilares del este del puente de Pedro de Valdivia (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).....	110
Figura 7.37: Puente “Las Animas” (a) Elevación oeste, desde la orilla sur, (b) Extremo sur, mirando hacia el este (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).	111
Figura 7.38: Costanera de Valdivia (a) Frente a la calle Arturo Prat, (b) Junto la calle Arturo Prat (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).....	111
Figura 7.39: Costanera de Valdivia. (Fuente: Colección fotográfica de Karl V. Steinbrugge).	112
Figura 7.40: Costanera de Valdivia, subida calle Libertad.	112
Figura 7.41: Calle Picarte con Condell (Fuente: Colección fotográfica de Karl V. Steinbrugge y Rodolfo Schild).	113
Figura 7.42: Calle Picarte (Fuente: Gentileza Grupo Terremoto Valdivia).	113
Figura 7.43: Calle Beauchef (Fuente: Colección fotográfica de Karl V. Steinbrugge y Rodolfo Schild).	114
Figura 7.44: Casas históricas de Valdivia.	116

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Durante un terremoto, uno de los factores más importantes en la naturaleza y distribución de los daños en infraestructuras es la respuesta del terreno frente a las cargas cíclicas, producto de una modificación de las ondas sísmicas al pasar de roca a suelo. La modificación de las ondas por la influencia de las condiciones geológicas y topográficas se conoce como efecto de sitio. Se han realizado numerosos estudios de terremotos clasificados como muy destructivos a los cuales se le asocia un posible efecto de sitio, como Northridge 1994, Mexico 1985, Kobe 1995, Turquía 1999, El Salvador 2001, entre otros (Tsighe et al., 2006; Chavez-Garcia and Bard, 1994).

El parámetro más relevante para el estudio de respuesta de sitio es la velocidad de onda de corte, proporcional a la raíz de la rigidez al corte de los materiales, y que es usada para clasificar sísmicamente un sitio. En Chile, según la normativa vigente de diseño sísmico de estructuras (Norma NCh 433 of. 1996 mod. 2012) y lo estipulado por el D.S. N°61, los suelos se clasifican sísmicamente con diversos parámetros, entre los cuales destaca la velocidad de onda de corte promedio obtenida a partir de los estratos en los 30 metros superiores del terreno, y denominada V_{s30} .

Producto de la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana, grandes terremotos han ocurrido en Chile, como el del 22 de mayo de 1960, el cual generó una zona de ruptura de, aproximadamente, 1000 kilómetros de largo y 200 kilómetros de ancho, entre los paralelos 36,7° y 46,5° (Moreno et al 2009), teniendo su epicentro en las cercanías de Valdivia. Este terremoto es el de mayor magnitud registrada instrumentalmente en el mundo.

Numerosas investigaciones se han realizado para identificar los efectos y daños causados por este sismo. Watanabe y Karzulovic (1960) asociaron los mayores daños a las zonas de relleno artificial presentes en la ciudad Valdivia, las cuales se caracterizaban por poseer una mezcla de material aluvio reciente junto con rellenos de ripio, arcilla, escombros y basura. Cambiazo (1961) realizó un recorrido por la ciudad de Valdivia clasificando las edificaciones según sus materiales de construcción y sus daños observado, reportando una gran cantidad de estructuras dañadas producto de una mala estructuración y deficiencia en sus materiales; Lástrico (1967) realizó una recopilación de antecedentes de daño, y estudios geológicos de la ciudad de Valdivia, para luego realizar un estudio de micro vibraciones del suelo y poder determinar una relación suelo-daño de las estructuras, concluyendo que gran partes del daño estaba asociado a al estrato de relleno artificial presente en Valdivia. Entre los estudios más recientes destacan el de Lazo (2008), que recopiló todos los antecedentes históricos de los daños ocurridos durante el terremoto de Valdivia, y el de Alvarado (2012), que estudió el peligro sísmico usando el método de las razones espectrales H/V con más de 260 mediciones de vibraciones ambientales obtenido como resultado un mapa de iso-periodo de Valdivia.

Dada la relevancia del terremoto de Valdivia, se requiere estudiar los sucesos ocurridos en dicha ciudad para definir las causas de los daños observados. Así mismo, poder explicar por qué existieron estructuras que prácticamente no sufrieron daños, y en contraste, estructuras

que quedaron inutilizables a pesar de estar estructuradas de formas similares y determinar cuan relevante es el tipo de suelo de fundación en el grado de daño registrado. Por otro lado, es deseable determinar si hubo amplificación sísmica en algunos sectores de la ciudad, y ser capaz de identificar todas las estructuras mal diseñadas y construidas para reconocer el real alcance de los daños provocado por el mayor terremoto de la historia.

1.2 Objetivo General

Evaluar los efectos de sitio en la ciudad de Valdivia por el terremoto de 1960, y evaluar si el método razones espectrales H/V puede identificar los sectores donde ocurrieron.

1.3 Objetivos Específicos

- a. Elaborar un modelo de velocidad de onda de corte del suelo de la ciudad de Valdivia.
- b. Elaborar un mapa de la ciudad de Valdivia, identificando estructuras con y sin daño por el terremoto de 1960.
- c. Determinar las causas de los daños reportados en las estructuras del mapa anterior.
- d. Identificar correlaciones entre las zonas dañadas y el modelo de velocidades.
- e. Evaluar la aplicabilidad del método de razones espectrales H/V para identificar zonas donde se manifiesta efecto de sitio.

1.4 Metodología

La metodología se resume en los siguientes pasos:

- a. *Desarrollo de un modelo de velocidades de onda de corte para la ciudad de Valdivia.* El modelo se basó en la recopilación de estudios sobre las características geológicas y geotécnicas de la ciudad de Valdivia, destacando mapas geológicos y estudios geotécnicos. También, se recopiló estudios de velocidad de onda de corte para relacionar este parámetro con los distintos tipos de suelo de la ciudad. De acuerdo a lo anterior se elaboró un mapa de la ciudad de Valdivia, que represente la estratigrafía de las distintas zonas de la ciudad mediante los antecedentes ya recopilados. Por último, se elaborarán dos perfiles transversales dentro de la ciudad representando la estratigrafía en profundidad con sus respectivos valores de Vs. Con esto se comparan y establecen correlaciones entre el mapa de daño y el modelo de velocidad de onda de corte.

- b. *Elaboración de un mapa de estructuras dañadas y no dañadas durante el terremoto.* Este mapa se basa en la recopilación de datos sobre estructuras afectadas por el terremoto. La información se obtendrá usando informes técnicos, revistas, diarios, memorias, y artículos de investigación. Las estructuras se clasificarán en dañadas, agrietadas o inclinadas, y sin daños. Adicionalmente para las estructuras o lugares más importantes, se detalló si el daño fue producto de una mala estructuración, construcción, u otros factores externos al terremoto, o producto del sismo. Por último, se confeccionó un mapa de la ciudad de Valdivia con la ubicación y clasificación de las estructuras identificadas.

- c. *Estudio de la aplicabilidad del método de las razones espectrales H/V para identificar zonas que producen efectos de sitio.* Esta etapa se basa en el re-análisis de mediciones de vibraciones ambientales realizadas por la Universidad Austral de Chile y de la Universidad de Chile. Por medio de la frecuencia predominante de las razones espectrales, se espera identificar zonas de posible amplificación sísmica de acuerdo a los antecedentes de daños recopilados.

2. Análisis de la geología de Valdivia y elaboración de un modelo de velocidad de onda de corte

Este capítulo busca elaborar perfiles transversales que atraviesen la ciudad de Valdivia, para reconocer los distintos estratos de suelo en profundidad, y posteriormente, determinar perfiles de velocidad de onda de corte asociados.

Para esto se realizó una investigación bibliográfica de antecedentes geológicos y geotécnicos del suelo de fundación de Valdivia. Además, se recopiló información estratigráfica de sondajes de algunos sectores, facilitados por empresas privadas y públicas.

2.1 Revisión Bibliográfica

2.1.1 Estudio de la geología y geotecnia de Valdivia

El estudio de la geología de la ciudad de Valdivia tomó real importancia después del terremoto de 1960, por la necesidad de asociar los efectos del terremoto a la geología superficiales de la ciudad. Varios autores estudiaron la composición del suelo de fundación de la ciudad de Valdivia, destacando Doyel et al. (1963), Weischet (1963), Barozzi y Lemke (1966), Lastrico (1967) y Retamal et al. (1969). Estos autores realizaron una clasificación geológica con la finalidad de asociar los daños ocurridos durante el terremoto a las distintas unidades geológicas encontradas en la ciudad. Posteriormente, Arenas et al. (2004) elaboró un mapa de geológico de la ciudad y sus alrededores en base a una recopilación de todos los mapas geológicos anteriores.

Junto a los estudios geológicos de la ciudad, algunas entidades públicas y particulares han realizado estudios del suelo en Valdivia para caracterizar la estratigrafía de la zona, destacando la empresa M.A.H.S. que realizó diversos sondajes en las cercanías de la ciudad, y Fundación Chilena de Geotecnia que caracterizó diversas zonas de Valdivia el 2014 con varias Universidades.

2.1.2 Contexto geológico de la formación del suelo de fundación de la ciudad de Valdivia

La ciudad de Valdivia se localiza a 73°14' longitud oeste y 39°49' latitud sur, en una cuenca desarrollada en la cordillera de la costa, caracterizada por la confluencia de los ríos Calle-Calle y Cruces. El origen de la cuenca basal se atribuye a grandes movimientos tectónicos, modificándose en el tiempo por la erosión marina fluvial. Se constituye principalmente por mica-esquistos de topografía basal irregular (conocida en la zona como "piedra laja"), las cuales corresponden a rocas metamórficas antiguas. Esta roca basal que conforma la cuenca aflora en sectores cercanos a la ciudad, presentando en ciertos puntos dentro de ella profundidades cercanas a los 400 metros (Retamal, 1978).

El primer relleno parcial o total de la cuenca correspondió a una facie marina del terciario superior. Posteriormente un proceso de erosión removió gran parte de estos sedimentos, quedando solamente afloramientos aislados hacia los bordes de la cuenca. Luego de esto se produjo un segundo ciclo de sedimentación, principalmente de origen fluvial con algunas intercalaciones litorales, el cual culminó con el relleno total de la cuenca hasta alturas de 15 a 25 m. sobre el nivel actual de los ríos. Este segundo proceso sedimentario experimentó luego el descenso de sus niveles superficiales debido a hundimientos tectónicos y compactación por vibración provocada por sismos (Retamal, 1978).

Otra unidad importante y típica del paisaje valdiviano corresponde a las terrazas bajas de las planicies de inundación. Estas terrazas están parcial o permanentemente inundadas, cubriéndose de agua durante las crecidas de río y lluvias invernales según sus características topográficas y de drenaje, el cual suele ser insuficiente debido a la limitada capacidad de los colectores. El sector más representativo de esta unidad se encuentra en los llamados "Barrios Bajos" de Valdivia (Alvarado 2012).

Finalmente, una de las unidades más importantes son los rellenos artificiales, los cuales están presentes en variadas zonas de la ciudad de Valdivia. El origen de estos rellenos se debe a la necesidad de expansión de la ciudad de Valdivia en fechas posteriores al 1850, en donde numerosos terrenos estaban inundados o clasificados como zonas pantanosas. Esto se puede apreciar mejor en el plano de la ciudad de Valdivia a mediados del siglo XIX (Siemens, 1853) donde se pueden apreciar las zonas inundadas y los límites de las construcciones hasta esa fecha (Figura 2.1).

De acuerdo a Doyel et al. (1963) y Barozzi y Lemke (1966) el relleno artificial depositado en estas zonas pantanosas consistió principalmente en una mezcla de limo, arena y ripio con escombros, maderas y desechos. Posteriormente Arenas et al. (2004) lo clasifica como un estrato de espesor muy variable, compuesto por arcillas, limos, arenas, gravas, escombros, maderas, desechos y bloques de roca, manteniendo una clasificación similar de este estrato.

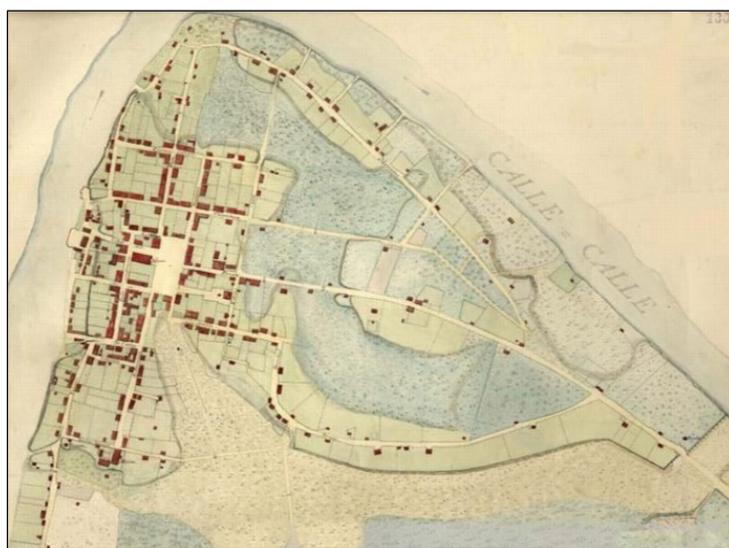


Figura 2.1: Plano de la ciudad de Valdivia a mediados del siglo XIX (Siemens, 1853).

De acuerdo a lo anterior, es necesario destacar el estudio de la geología de Valdivia realizado por Barozzi y Lemke (1966), el cual elaboro un mapa que clasificó las distintas unidades geológicas de la ciudad y representó las principales estructuras dañadas.

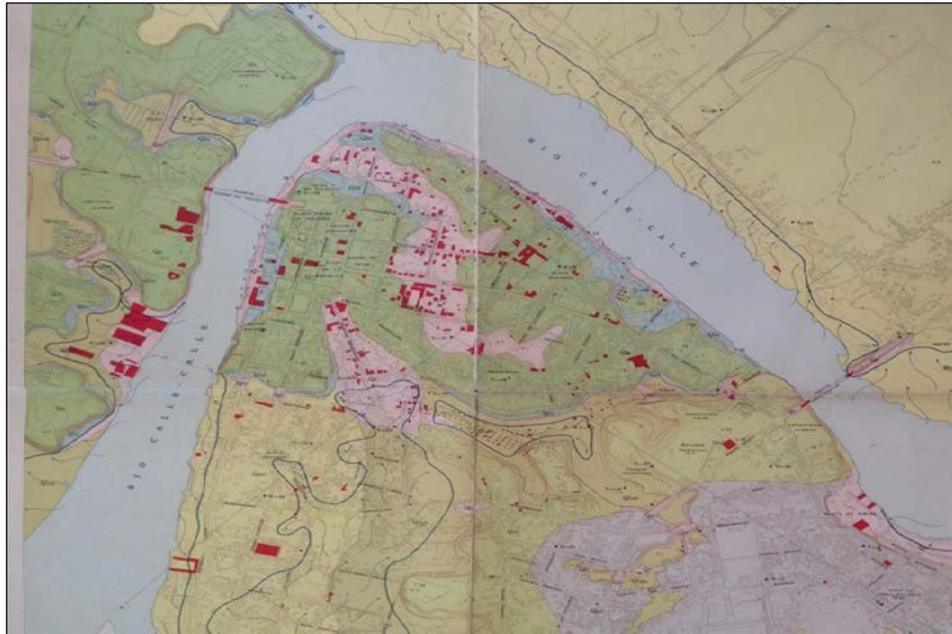


Figura 2.2: Mapa de caracterización geológica de la ciudad de Valdivia (Barozzi y Lemke, 1966).

Finalmente, de acuerdo al mapa de Barozzi y Lemke (1966) y a investigaciones posteriores se desarrolló el mapa de Arenas et al. (2004) el cual caracteriza de forma aún más precisa la geología superficial de la ciudad, pues combina estudios antiguos con los estudios más recientes.

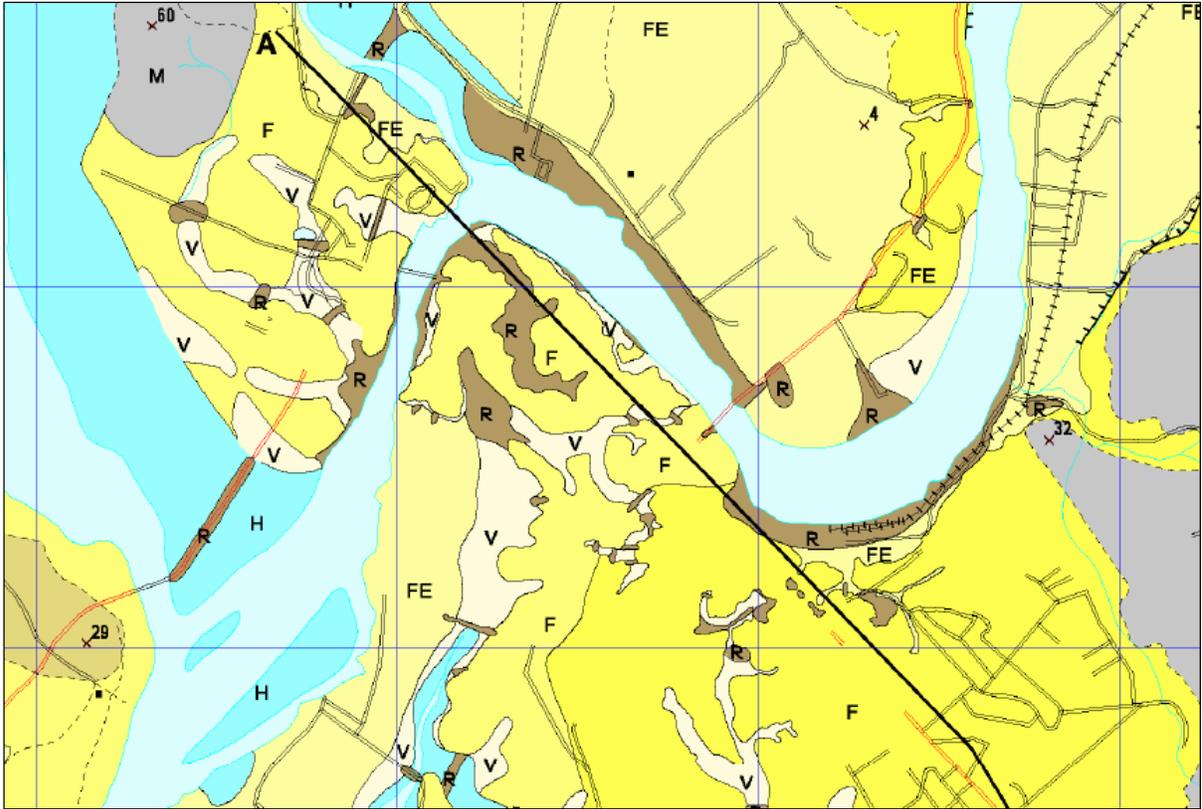


Figura 2.3: Mapa de caracterización geológica de la ciudad de Valdivia (Arenas et al., 1966).

De acuerdo al mapa de Arenas et al. (1966) se ha determinado una clasificación para cada una de las unidades geológicas superficiales en la ciudad de Valdivia, la cual se considera la más actualizada y completa hasta la fecha y se encuentra adjunta en el Anexo 1 junto a la descripción geológica y geotécnica de sus estratos.

2.1.3 Caracterización estratigráfica de la ciudad de Valdivia

Uno de los primeros estudios enfocados en la caracterización estratigráfica de la ciudad de Valdivia, se remonta a Retamal et al. (1969) quienes recopilaron los antecedentes del subsuelo de la ciudad emitidos por distintas empresas públicas y privadas, con la finalidad de generar perfiles longitudinales de la ciudad y la estratigrafía de algunas estaciones de estudio. Adicionalmente, determinaron las velocidades de onda de corte de los estratos mediante aproximaciones, usando la velocidad de onda longitudinal medida en terreno y la velocidad de onda de corte determinada en laboratorio.

De acuerdo a las Figuras 7.3 y 7.4 presentes en el Anexo 1, se pueden ver las 12 estaciones estudiadas por Retamal et al. (1969) con las cuales se construyeron los perfiles longitudinales de la ciudad, se pueden ver perfiles estratigráficos identificados en profundidad y la estratificación de algunas estaciones caracterizadas geotécnicamente.

Posteriormente, se recopilaron estudios realizados por la empresa M.A.H.S. la cual determinó la estratigrafía de 4 sitios, los cuales se encuentran ubicados en las posiciones indicadas por la Figura 2.5, realizándose 2 sondajes para los sitios 2, 3 y 4.

Finalmente, se incluyen los estudios realizados por FUCHIGE en 5 sitios, donde se determinó la estratigrafía de la zona y se obtuvieron los resultados de un ensayo SPT y un modelo de velocidad de onda de corte en profundidad.

De acuerdo a los datos aportados por cada uno de los autores mencionados es posible identificar los estratos predominantes en la ciudad de Valdivia y asignarles las correspondientes propiedades geotécnicas, corroborando que los datos aportados tengan relación entre sí y sean coherentes con su entorno.

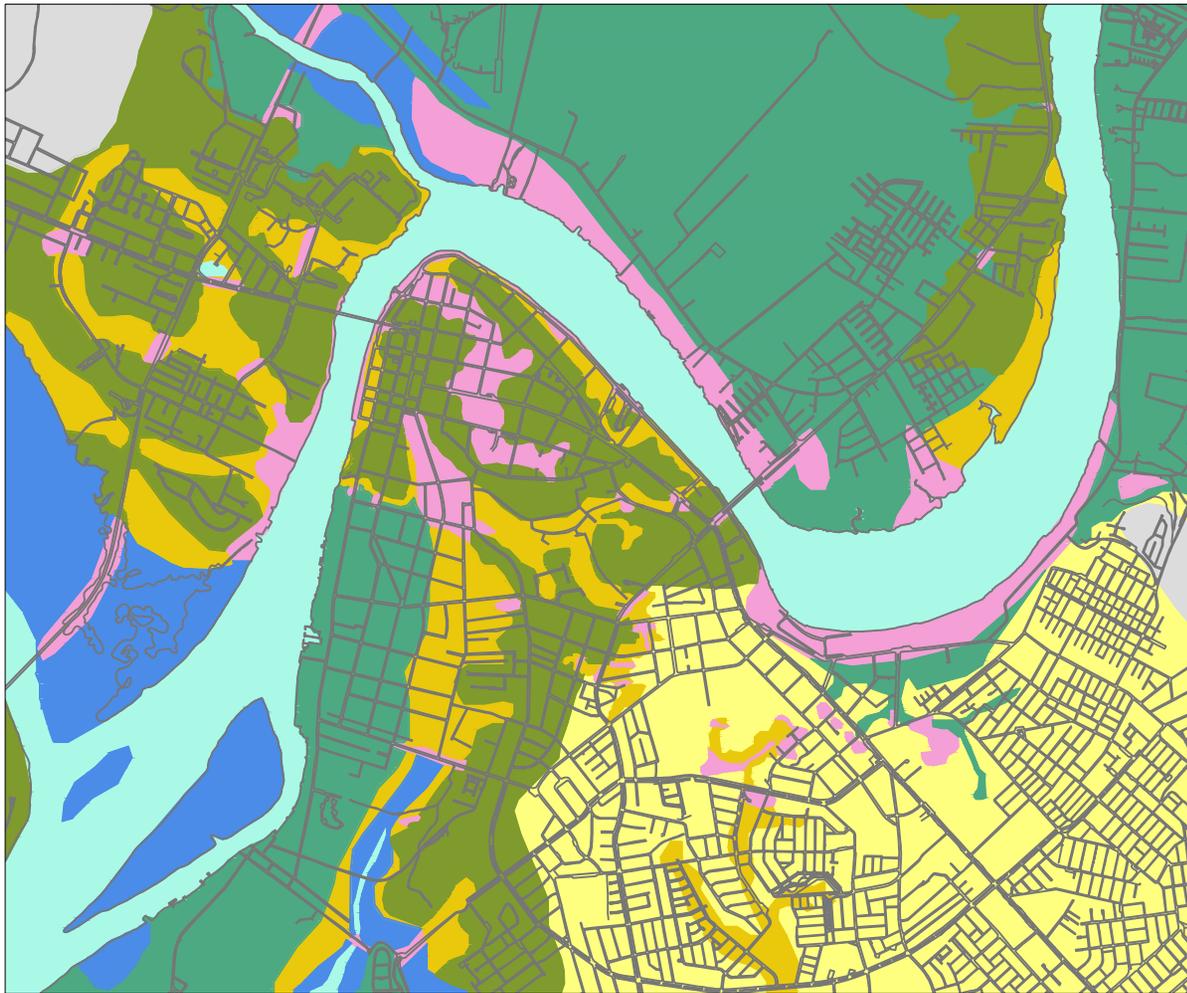
Es necesario considerar toda la información disponible hasta la fecha al momento de generar un modelo de velocidad de onda de corte de la ciudad de Valdivia, debido a la gran cantidad de incertezas al medir este parámetro y la poca cantidad de información disponible.

2.2 Geología superficial de Valdivia

De acuerdo a los estudios realizados por Arenas et al. (2004) se procede a traspasar la geología superficial de Valdivia a un nuevo mapa elaborado mediante el programa AutoCAD (2015). Adicionalmente se corrige la geología entregada por el mapa de Arenas et al (2004) de acuerdo las fotografías satelitales de la ciudad de Valdivia registradas por Google Earth (2017).

De acuerdo a lo anterior se procedió a elaborar un mapa geológico de Valdivia el cual se presenta en el Anexo 4. La Figura 2.4 muestra una representación esquemática del mapa geológico sin escala.

Adicionalmente, para determinar la descripción de los estratos superficiales, se compararon las descripciones realizadas por Doyel et al. (1963), Barozzi y Lemke (1966) y Arenas et al. (2004) obteniéndose una descripción más completa de cada estrato, la cual fue corroborada con los sondajes disponibles.



Simbología	
	Relleno Artificial
	Depositos limo arcilloso con poca arena
	Humedales
	Depositos de arena y ripio bien graduados
	Depositos de arena limosa
	Depositos arcillosos
	Roca sedimentaria
	Roca metamórfica
	Ríos

Figura 2.4: Mapa geológico de Valdivia.

2.3 Elaboración de perfiles transversales de la ciudad de Valdivia

Para la elaboración de los perfiles transversales de la ciudad de Valdivia primero fue necesario ubicar toda la información disponible de la estratigrafía del suelo. Esto incluye sondajes, estaciones de estudio y los cortes transversales mostrados en la revisión bibliográfica.

En la Figura 2.5 se pueden apreciar los sondajes, sitios, estaciones y CPT disponibles en Valdivia. La información detallada de cada sondaje y CTP se encuentra en el Anexo 1.

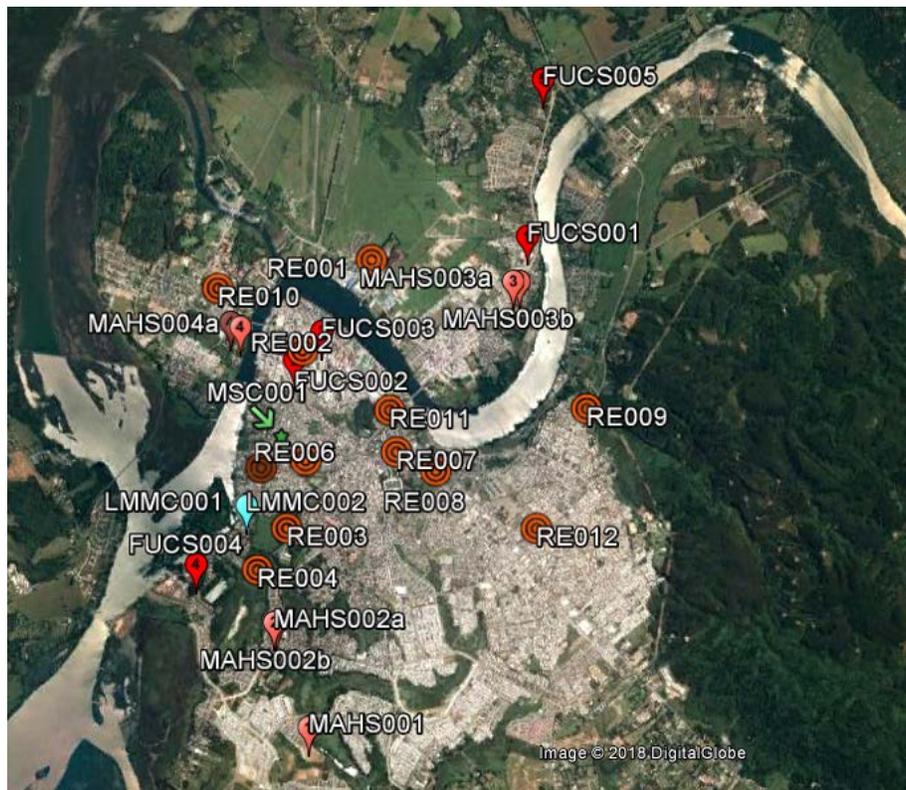


Figura 2.5: Ubicación de los sondajes, sitios, estaciones y CPT disponibles (Google Earth, 2017).

Los cortes transversales elaborados por otros estudios se redibujaron utilizando el programa AutoCAD. De esta forma es posible comparar los cortes en una escala común, y unificar las unidades geológicas similares.

Las Figuras 2.6 y 2.7 muestran la ubicación y la estratigrafía de los perfiles transversales respectivamente, realizados sobre la ciudad de Valdivia que poseen una orientación norte-sur, y las Figuras 2.8 y 2.9 muestran la ubicación y la estratigrafía de los perfiles transversales respectivamente, que presentan una orientación este-oeste. Todos los perfiles transversales poseen en la misma escala, de modo que es posible comparar los espesores y la clasificación de sus estratos.

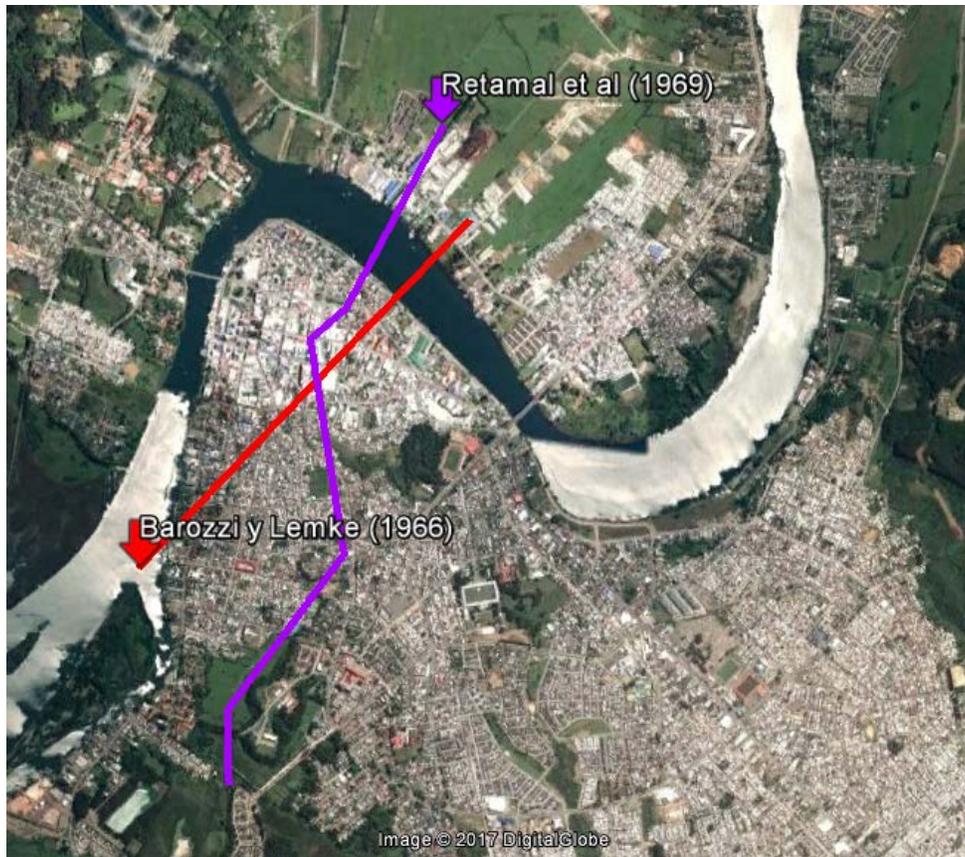


Figura 2.6: Ubicación de los cortes transversal con orientación norte-sur sobre la ciudad de Valdivia (Google Earth, 2017).

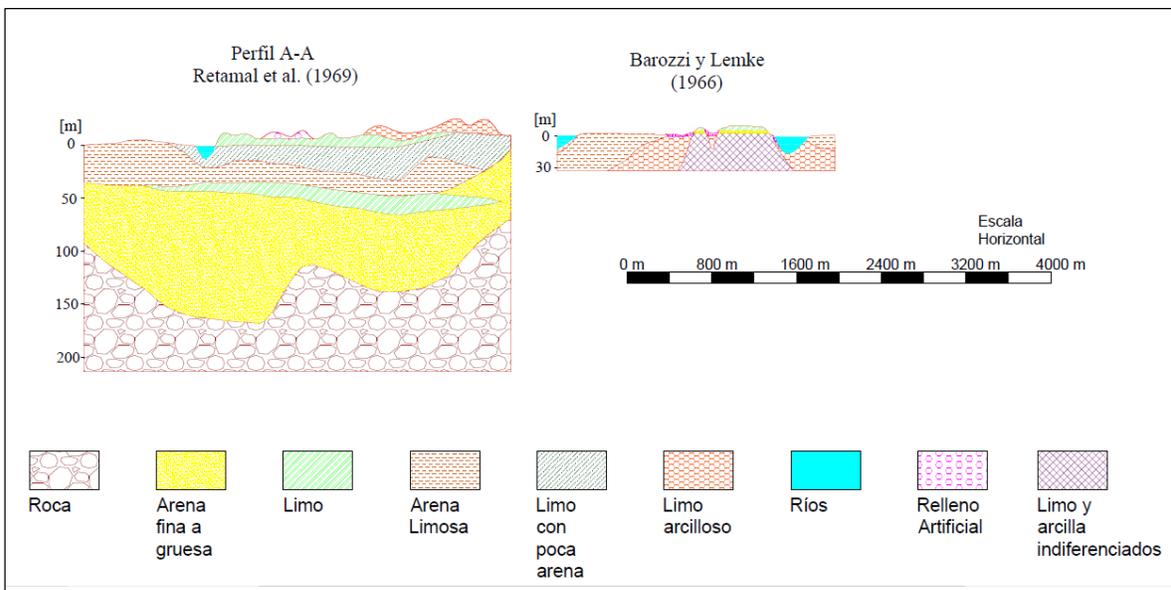


Figura 2.7: Cortes transversales con orientación norte-sur sobre la ciudad de Valdivia.

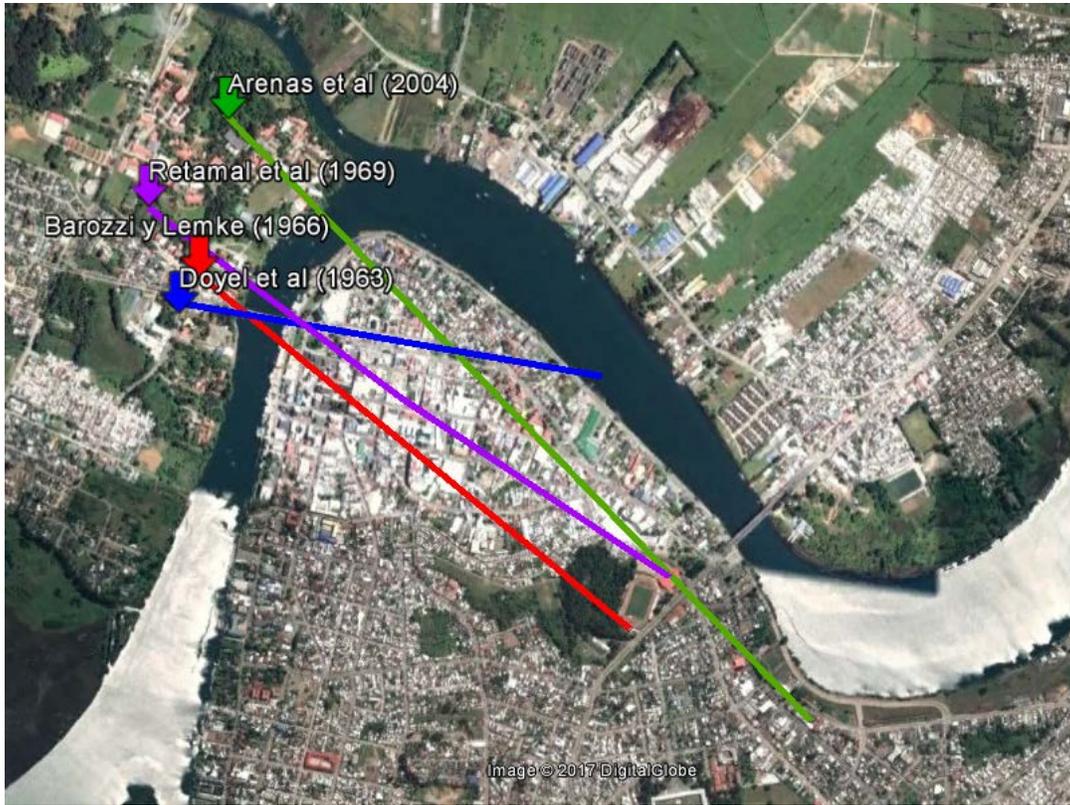


Figura 2.8: Ubicación de los cortes transversal con orientación este-oeste sobre la ciudad de Valdivia (Google Earth, 2017).

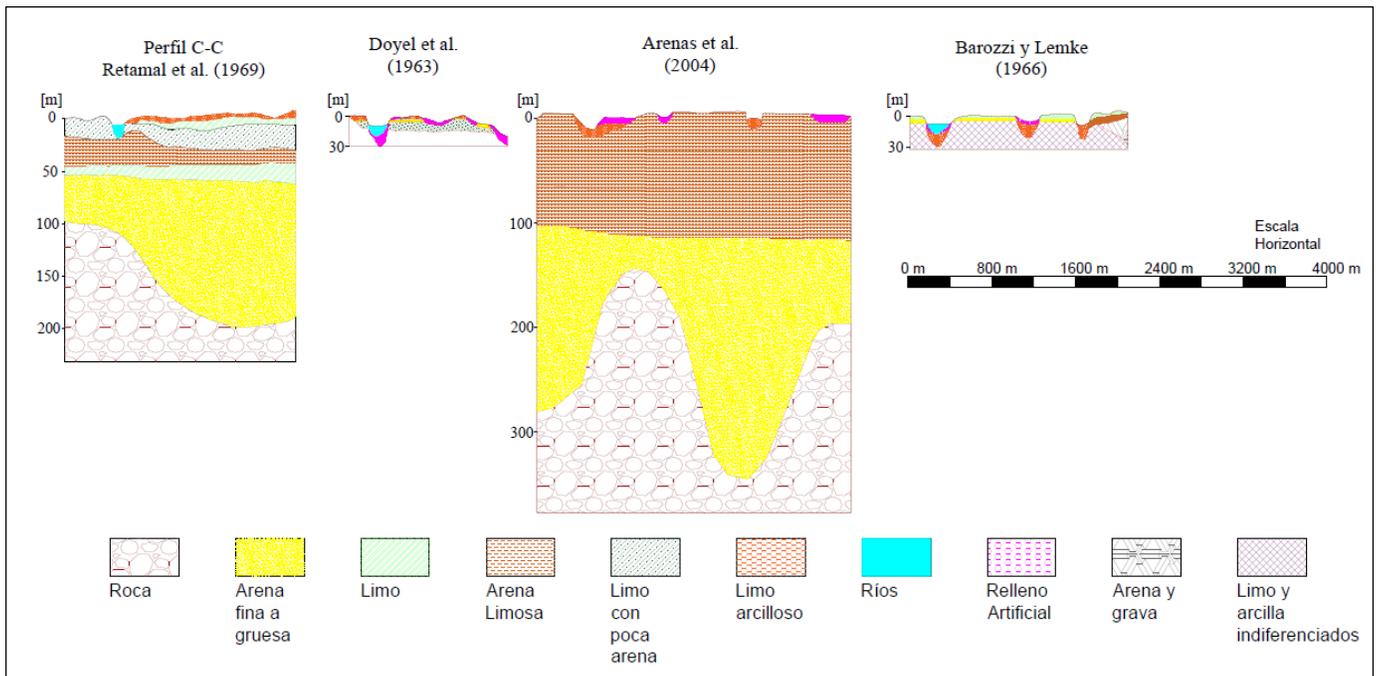


Figura 2.9: Cortes transversales con orientación este-oeste sobre la ciudad de Valdivia.

2.3.1 Supuestos y consideraciones para los perfiles transversales A-A' y B-B'

- Estratos con composiciones geológicas similares se unifican en una sola clasificación. De esta forma, se ha obtenido la nomenclatura final de cada estrato para los perfiles transversales estudiados.
- Las escalas representan de forma visible todos los estratos determinados en cada perfil.
- La topografía superficial se ha obtenido con el programa Google Earth y se ha corregido de acuerdo a los perfiles cercanos elaborados por otros estudios previos.
- Según todos los sondeos disponibles cercanos a Valdivia, se ha determinado que en los perfiles transversales están presentes estratos de: Relleno artificial, limo arcilloso con poca arena, arcilla, arena limosa, arena con poco limo, arena, y roca.
- Los estratos determinados presentan una descripción más específica de su composición a un costado del mapa geológico presente en el Anexo 4, basada en lo informado por Barozzi y Lemke (1966), Arenas et al. (2004), y la información de los distintos sondeos disponibles.
- Los estratos inferiores a la máxima profundidad de los sondeos disponibles se han elaborado a partir de la información entregada por Retamal et al (1969), y Arenas et al. (2004), quienes representaron la estratigrafía de Valdivia hasta elevaciones menores a 350 [m.s.n.m.], siempre manteniendo coherencia geológica con la forma de los estratos superiores.
- Los límites del mapa elaborado por Arenas et. al. (2004) serán usados para definir la geología superficial del perfil transversal, pero la definición de los estratos superficiales cambiará con respecto a la mostrada en el mapa geológico.
- La simbología utilizada para cada uno de los estratos se ha elegido de acuerdo con la NCh 1508 de 2008, "Geotecnia - Estudio de Mecánica de Suelos".

La Figura 2.10 indica la ubicación de los perfiles transversales A-A' y B-B' visto en planta, las ubicaciones A1 y B1 indican los puntos de quiebre del perfil transversal donde cambia la orientación del corte.

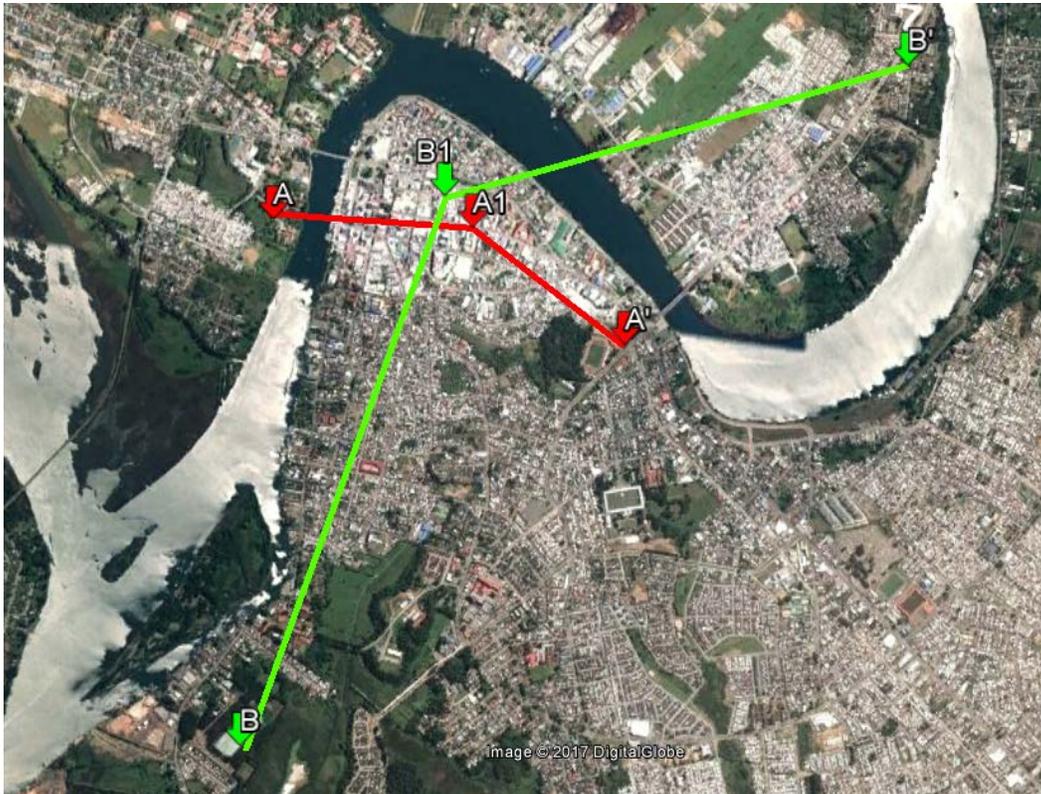


Figura 2.10: Ubicación perfil transversal A-A' y B-B' (Google Earth, 2017).

2.3.2 Perfil transversal A-A'

La elaboración del perfil transversal A-A' consideró la siguiente metodología:

- Inicialmente, se determinó el sector de interés donde se busca representar la estratigrafía del suelo. En este caso, se quiere determinar la estratigrafía de la zona central de Valdivia, entre los ríos Valdivia y Calle-Calle, para representar las zonas de relleno, y sus alrededores, y tener más información para estudiar el daño en este sector.
- De acuerdo a esto, se estudiaron los perfiles elaborados por otros autores, los cuales pasaban cercanos a la zona de interés, usándose como principal referencia para definir la estratigrafía del suelo. Estos perfiles son los de Doyel et. al. (1963), Barozzi y Lemke (1966), Retamal et. al. (1969), y Arenas et. al. (2004).
- A continuación, se determinó la ubicación exacta del corte transversal, para que este pase cercano a la mayor cantidad de sondajes o estaciones de estudio disponibles. Según esto, los puntos importantes que se usaron como base del perfil A-A' son los sondajes realizados por la empresa M.A.H.S. (sitio 4a y 4b), el sondaje realizado por FUCHIGE (sitio 4), y las estaciones de estudio 2 y 11 de Retamal et al (1969). Esta información se encuentra en el Anexo 1.

- Los distintos autores generan perfiles transversales diferentes, a pesar de tener cortes muy similares. Sin embargo, se puede detectar un patrón común entre ellos, el cual fue usado como guía en la elaboración del perfil transversal.
- Se les ha dado mayor importancia a los perfiles de Doyel et al (1963) y Barozzi y Lemke (1966) al determinar la estratigrafía de los primeros estratos, debido a que sus perfiles son más detallados y coinciden correctamente con la información obtenida en los sondajes. Perfiles más actuales como el de Arenas et. al. (2004) considera estratigrafías demasiado generales, no siendo una buena referencia para determinar estratos más detallados.

De acuerdo las consideraciones anteriores se definió el corte transversal A-A' representado anteriormente en la Figura 2.10. La ubicación de los puntos principales del corte A-A' se especifican en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Ubicación y longitud del corte transversal A-A'.

Coordenadas perfil A-A', Longitud 2 kilómetros			
Punto	m E	m S	Elevación [m]
A	649553	5591415	13
A1	650585	5591305	12
A'	651342	5590699	14

Finalmente, el corte transversal A-A' está representado por la Figura 2.11, y se presenta en el mapa geológico mostrado en la Figura 2.4.

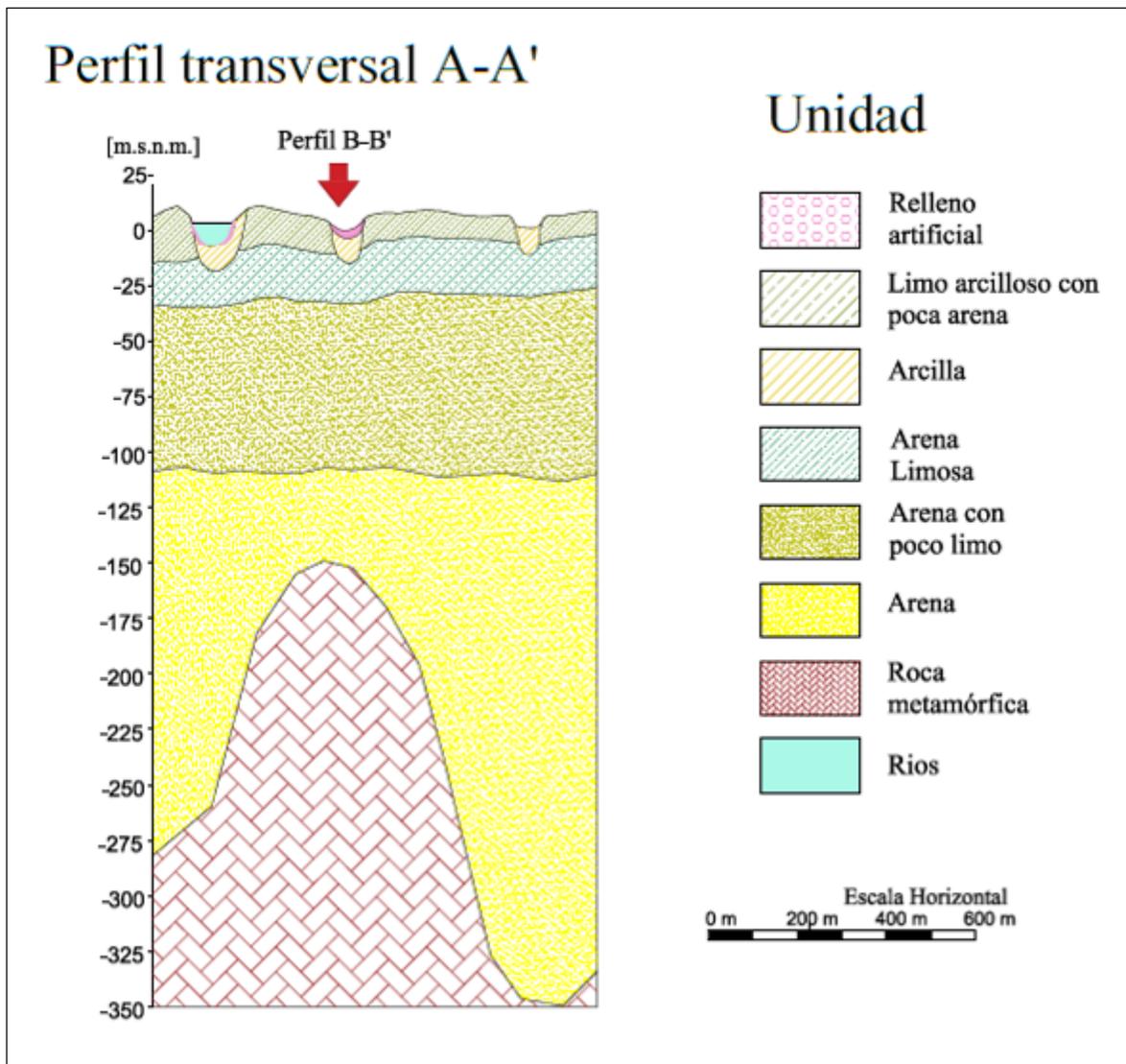


Figura 2.11: Perfil transversal, corte A-A'.

2.3.3 Perfil transversal B-B'

La elaboración del perfil transversal B-B' consideró la siguiente metodología:

- Inicialmente, se determinó el sector de interés donde se busca representar la estratigrafía del suelo. En este caso, se quiere determinar la estratigrafía de la zona contigua al río Valdivia para tener más información al estudiar el daño en esta zona.
- De acuerdo a esto, se estudiaron los perfiles elaborados por otros autores que pasaban cercanos a la zona de interés, usándose como principal referencia para definir la estratigrafía de los perfiles de Barozzi y Lemke (1966), y el de Retamal et. Al. (1969).

- Seguido de esto, se determinó la ubicación exacta del corte transversal para que este pase cercano a la mayor cantidad de sondajes o estaciones de estudio disponibles. Los puntos base del corte B-B' son los sondajes realizados por FUCHIGE (sitios 1, 2, 3 y 4), los dos resultados de ensayo CPT elaborados por la empresa LMMG, una grilla de CPT elaborada por Moffat y Sobarzo (2016), los sondajes realizados por la empresa M.A.H.S. (sitio 3a y sitio 3b), y finalmente las estaciones de estudio 2 y 5 de Retamal et al (1969). La información de los sondajes y ensayos CPT se encuentra adjunta en el Anexo 1.
- El perfil transversal dibujado por Retamal et. al (1969) no coincide con los sondajes estudiados, por lo cual se considera que no representa correctamente la geología superficial actual, pero ya que es el único perfil que representa la estratigrafía en profundidades mayores a 50 [m] se usó de referencia para determinar la ubicación del estrato arenoso y la roca.
- El perfil transversal de Barozzi y Lemke (1966) representa bien la geología superficial actual, y concuerda con los sondajes y CTP estudiados, por lo que su distribución de estratos superficiales será el principal modelo al definir los estratos actuales.

De acuerdo a las consideraciones anteriores, se definió el corte transversal B-B' representado anteriormente en la Figura 2.10. La ubicación de los puntos principales del corte B-B' se especifica en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Ubicación y longitud del corte transversal B-B'.

Coordenadas perfil B-B', Longitud 5.4 kilómetros			
Punto	m E	m S	Elevación [m]
B	649376	5588735	04
B1	650473	5591445	10
B'	652804	5592084	16

Finalmente, el corte transversal B-B' está representado por la Figura 2.12, y se encuentra en el mapa geológico adjunto en Anexos 4.

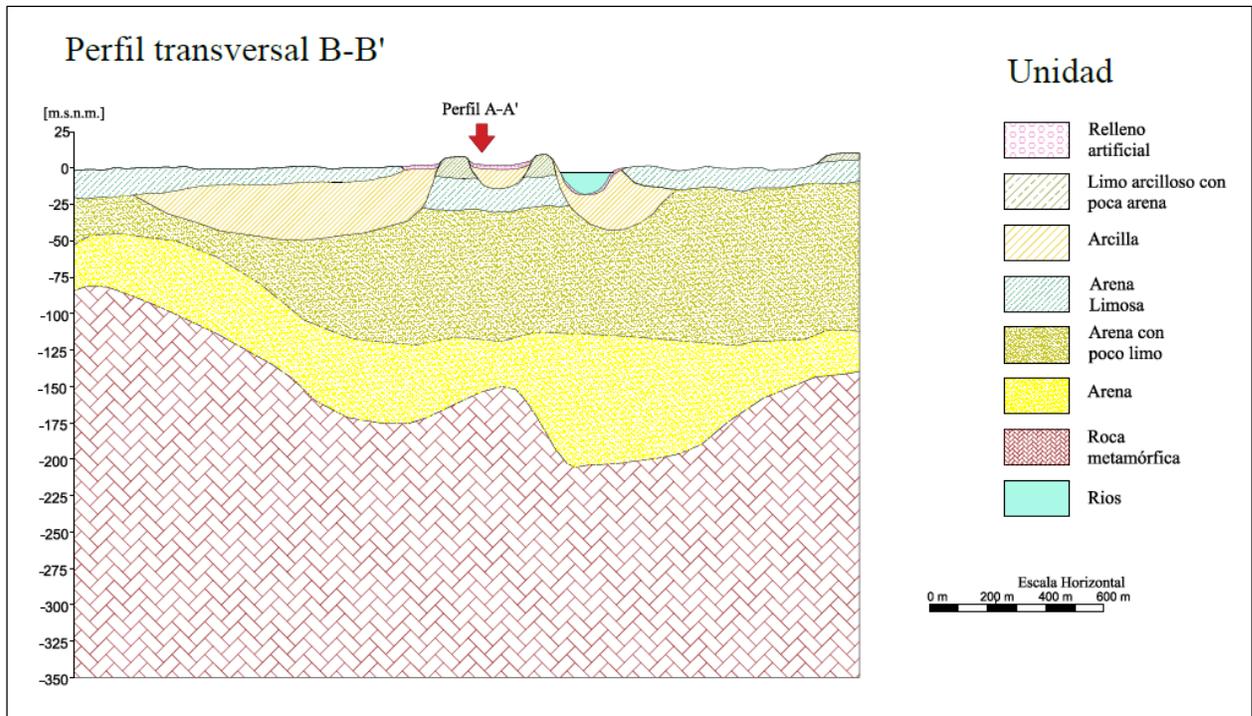


Figura 2.12: Perfil transversal, corte B-B'.

2.4 Elaboración del modelo de velocidad de onda de corte

2.4.1 Modelos de velocidad de onda de corte elaborados por FUCHIGE

Para la elaboración del modelo de velocidad de onda de corte se hizo uso de los antecedentes entregados por FUCHIGE (2014), donde se elaboraron hasta dos modelos de velocidad de onda de corte por estación de estudio.

Los modelos de velocidad de onda de corte entregados por FUCHIGE se presentan en el Anexo 1, en las Tablas 7.6, 7.8, 7.10, y 7.12, asociadas a cada uno de sus sitios.

Para la elaboración del modelo de velocidad de onda de corte se consideraron los siguientes criterios:

- Para asignar una velocidad de onda de corte a un estrato, se consideró la estratigrafía entregada por el sondaje de la estación de estudio, la profundidad, y espesor del estrato asociado a la velocidad de onda de corte, y finalmente, que su valor fuera coherente con el tipo de estrato asignado, en caso contrario no se consideró la velocidad indicada.
- No se consideraron las velocidades de onda de corte que presentaran valores poco coherentes con su profundidad, o con el tipo de estrato al que están relacionadas, según el sondaje de su misma estación.

- Solamente se asignó una velocidad de onda de corte característica a los estratos presentes en el rango de profundidad de los modelos generados por FUCHIGE. Estos estratos son: Relleno artificial, deposito arcilloso, limo arcilloso con poca arena, arena limosa y arena con poco limo.
- Se determinó una velocidad característica para un estrato como el promedio aritmético de todas las velocidades medidas en el modelo de FUCHIGE que cumplen las condiciones para ser asociadas al estrato.

De acuerdo a lo anterior, se procedió a relacionar las velocidades de onda de corte a cada uno de los estratos antes mencionados obteniéndose las velocidades de onda de corte promedio presentadas en la Tabla 2.3. El detalle de las velocidades de cada estación asignadas a los estratos se encuentra en el Anexo 2 en las Tablas 7.13, 7.14, 7.15, 7.16, 7.17 y 7.18.

Tabla 2.3: Velocidades de onda de corte características para cada estrato de cada estación.

Estrato	Vs [m/s]	Profundidad [m]
FUCP001		
Limo arcilloso con poca arena	174	5
Arena Limosa	279	16
Arena con poco limo	503	100
FUCP002		
Relleno Artificial	87	3
Deposito Arcilloso	135	22
Arena con poco limo	400	5
FUCP003		
Limo arcilloso con poca arena	149	12
Arena Limosa	283	26
Arena con poco limo	400	75
FUCP004		
Arena Limosa	215	20
Arena con poco limo	400	27

2.4.2 Perfiles de velocidad obtenidos con el método de correlaciones cruzadas

Las velocidades de onda de corte determinadas en la Tabla 2.3, se verifican y comparan con los resultados obtenidos con el método de correlaciones cruzadas de ruido sísmico, Sáez (2016), con el cual se pretende obtener perfiles de velocidad de onda de corte en seis ubicaciones.

En la Figura 2.13 se presentan los primeros tres perfiles de velocidad, UCHP001, UCHP002 y UCHP003, elaborados a partir de mediciones de ruido ambiental realizadas el DIC de la Universidad de Chile. Estos perfiles están ubicados directamente sobre el perfil transversal B-B', por lo que su estratigrafía será obtenida directamente del perfil.

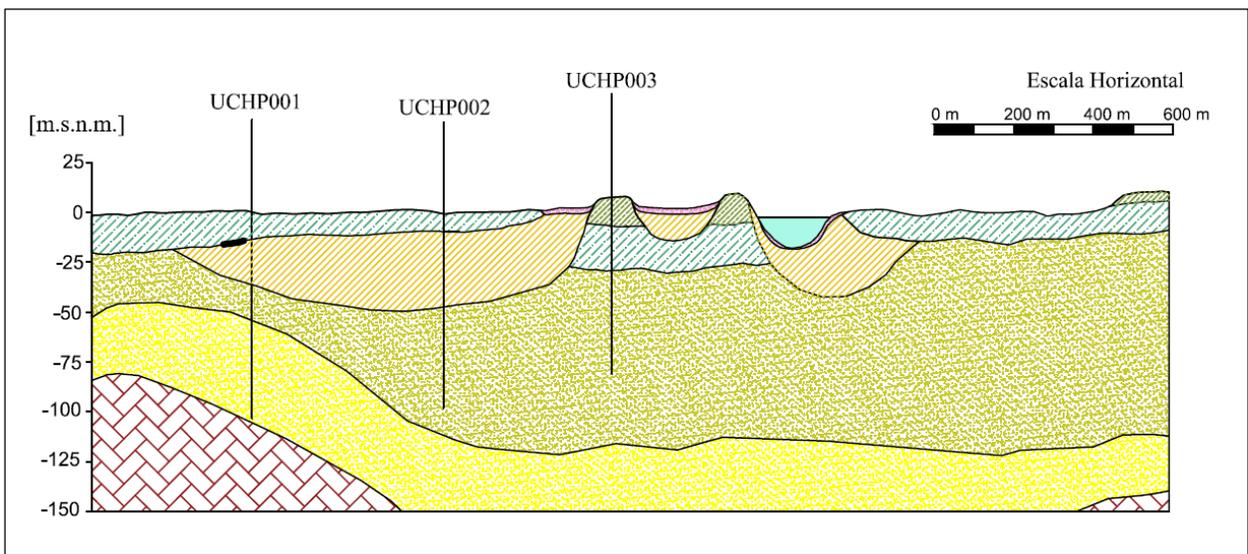


Figura 2.13: Ubicación de los perfiles de velocidad medidos.

Adicionalmente, el Centro Sismológico Nacional, de la Universidad de Chile, facilitó tres perfiles adicionales, CSNP001, CSNP002, y CSNP003, determinados con el método de correlaciones cruzadas. Dado que estos perfiles no están ubicados directamente sobre los perfiles transversales, la estratigrafía asignada a ellos es una estimación a partir de los perfiles transversales A-A' y B-B', la estratigrafía superficial, y el perfil de velocidad asociado.

La Figura 2.14 muestra la ubicación de los seis perfiles de velocidad estudiados. Los resultados detallados de los perfiles obtenidos con el método de correlaciones cruzadas se presentan en el Anexo 1.

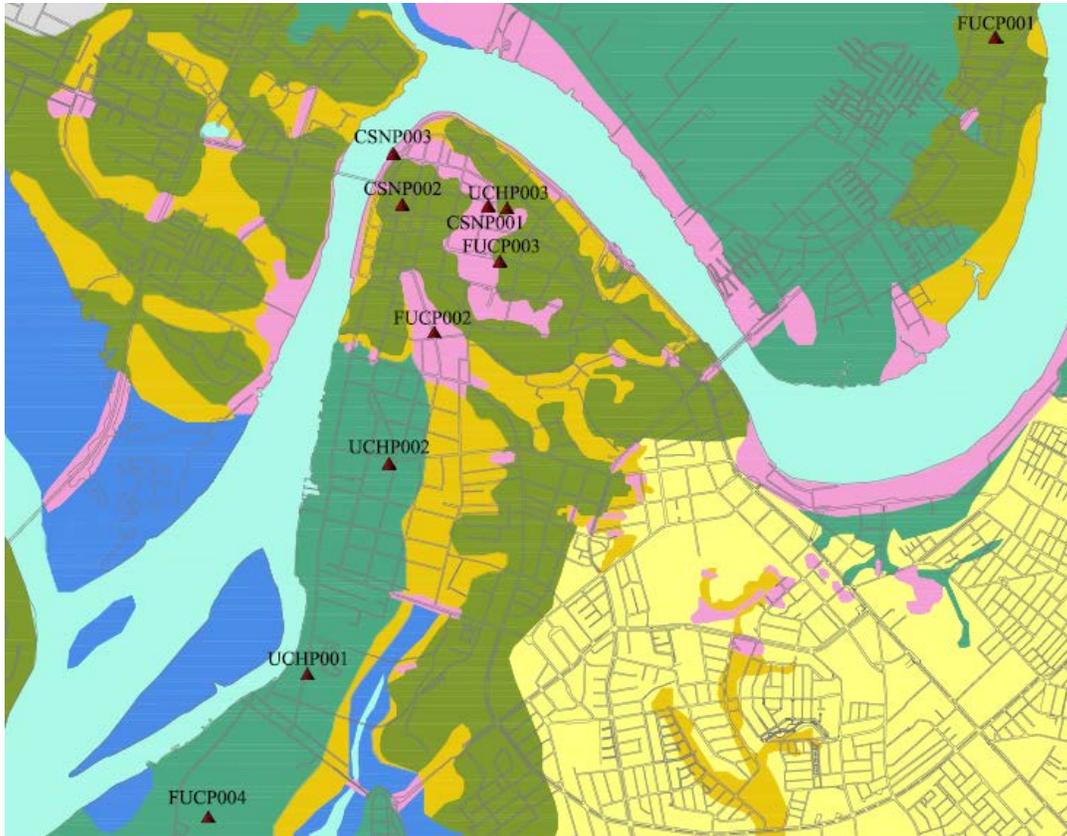


Figura 2.14: Ubicación de los seis perfiles de velocidad elaborados en Valdivia.

Las Figuras 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, y 2.20, presentan un resumen de las velocidades de onda de corte medidas por el Centro Sismológico Nacional en las distintas ubicaciones. Adicionalmente, se presentan las velocidades de onda de corte obtenidas por FUCHIGE asociadas a los estratos. De esta forma se pueden analizar los rangos en los que fluctúa la velocidad de onda de corte por estrato y comprobar la coherencia entre ambas mediciones.

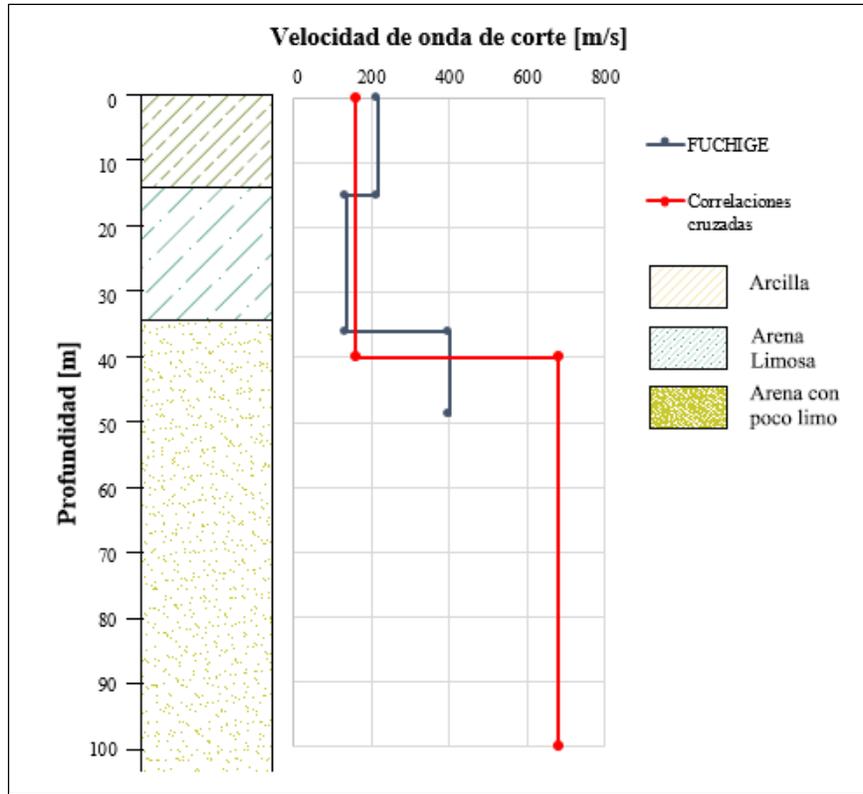


Figura 2.15: Comparación perfiles de velocidad ubicación “UHP001”.

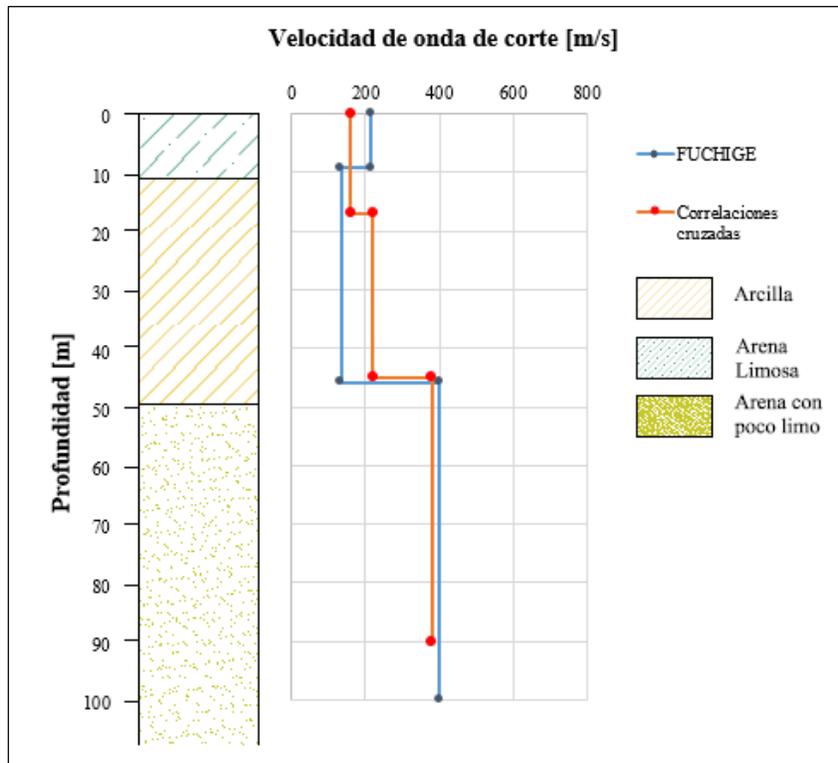


Figura 2.16: Comparación perfiles de velocidad ubicación “UHP002”.

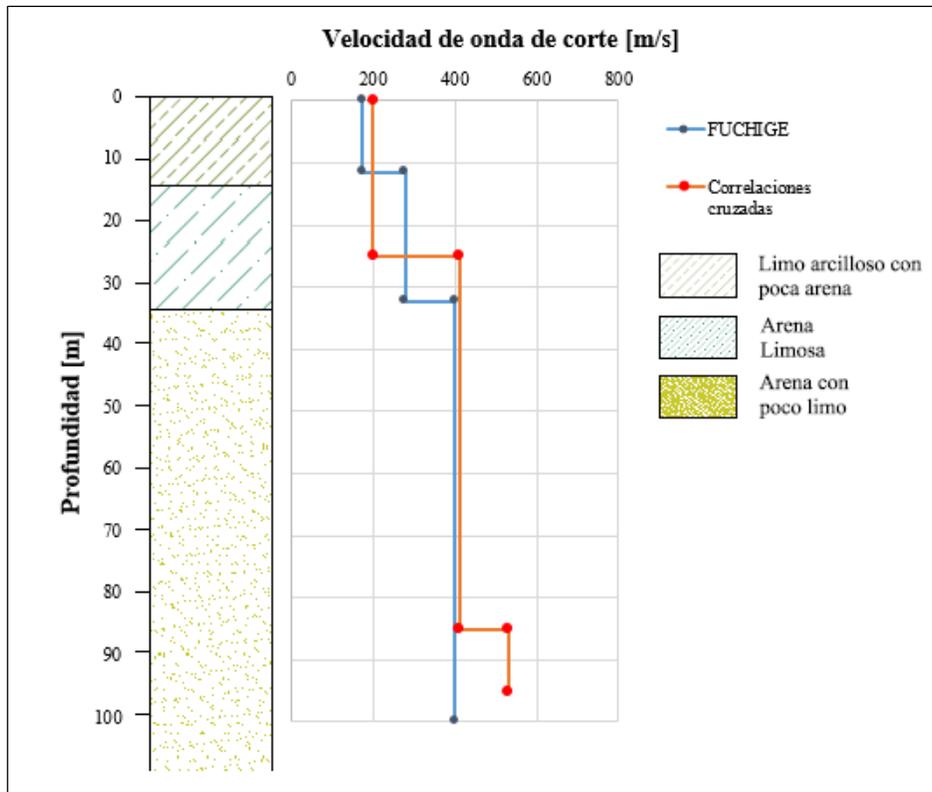


Figura 2.17: Comparación perfiles de velocidad ubicación “UCHP003”.

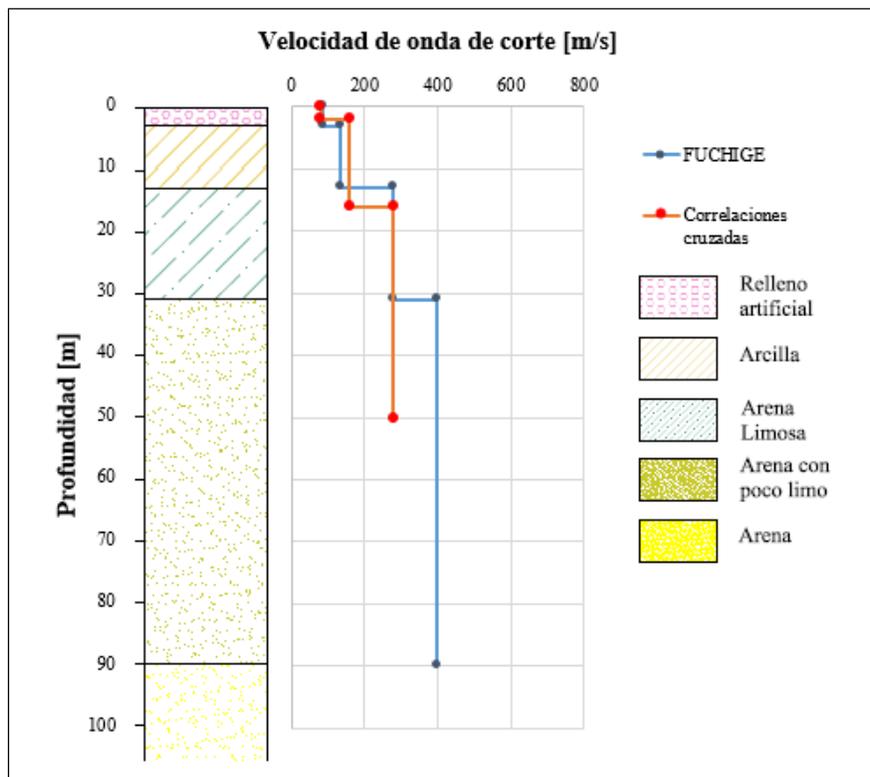


Figura 2.18: Comparación perfiles de velocidad ubicación “CSNP001”.

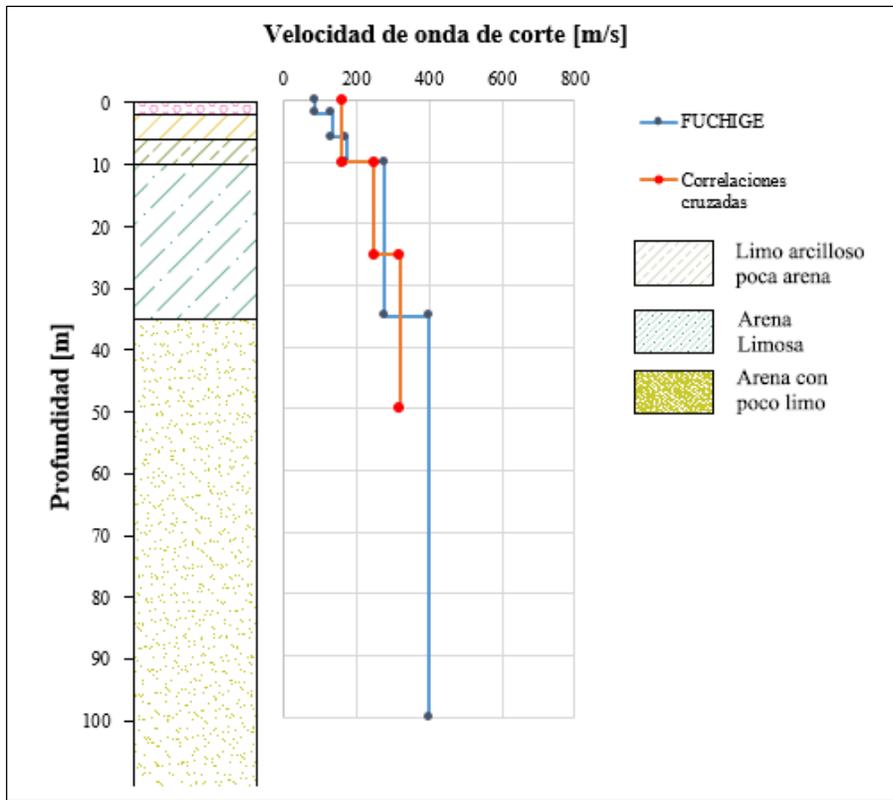


Figura 2.19: Comparación perfiles de velocidad ubicación “CSNP002”.

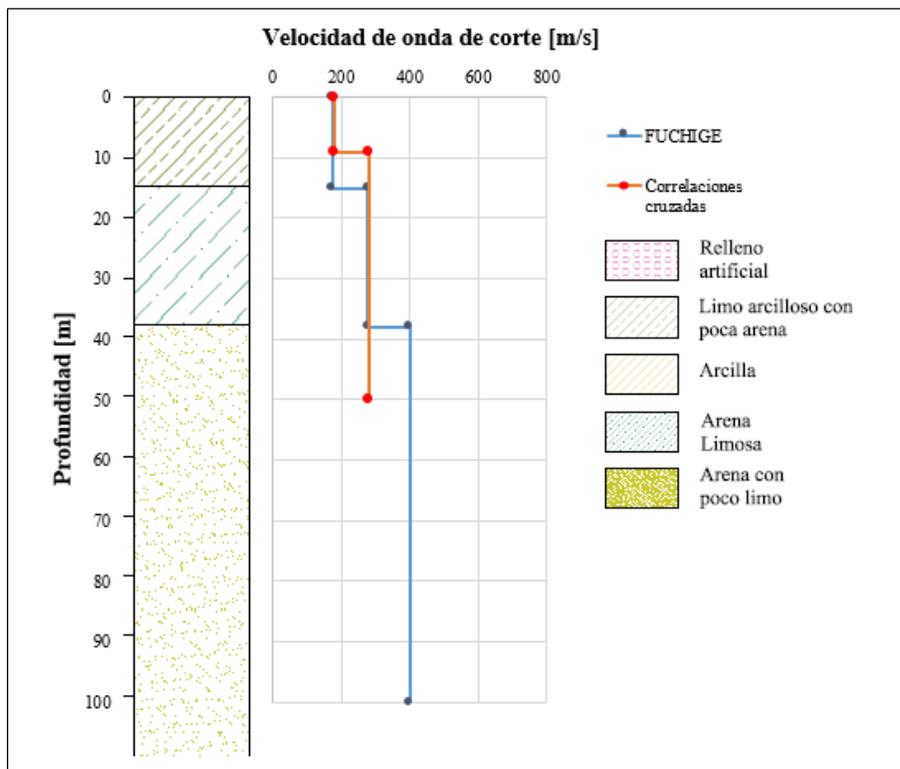


Figura 2.20: Comparación perfiles de velocidad ubicación “CSNP003”.

De acuerdo con la Figura 2.15 asociado al perfil “UCHP001” se puede ver que el primer estrato medido por el método de correlaciones cruzadas representa los dos primeros estratos mostrados por el perfil transversal B-B’ obteniéndose una velocidad de 160 [m/s]. Comparando las velocidades de onda de corte medidas por FUCHIGE para estos estratos se obtiene en promedio una velocidad aproximadamente similar. También se puede observar que desde tercer estrato se muestra una velocidad de 680 [m/s] por el método de correlaciones cruzadas, de lo cual se puede inferir que esta velocidad corresponde a una ponderación del tercer y cuarto estrato, asumiendo que como mínimo el cuarto estrato arenoso posee una velocidad de 680 [m/s].

De acuerdo con la Figura 2.16 asociado al perfil “UCHP002” se puede ver claramente como el perfil de velocidades asociado al método de correlaciones cruzadas reconoce los tres primeros estratos del perfil transversal B-B’. Adicionalmente se observa que las velocidades de onda de corte de los dos primeros estratos no coinciden con las estimadas por FUCHIGE, pero dado que el primer estrato es más rígido que el segundo estrato de acuerdo al CPT realizado en la misma zona, las mediciones calculadas por FUCHIGE son más coherentes.

Con respecto a la Figura 2.17 asociado al perfil “UCHP003” se puede ver que el primer estrato detectado por el método de correlaciones cruzadas con una velocidad de 200 [m/s] corresponde a los dos primeros estratos presentados por el perfil transversal. De acuerdo con esto se puede ver que el promedio de las velocidades calculadas por FUCHIGE para estos dos estratos es similar, lo cual indica que 200 [m/s] es una velocidad coherente con el perfil transversal asociado. Respecto al tercer estrato detectado, se puede ver que las velocidades coinciden en ambas mediciones por lo que se asume que 400 [m/s] es la velocidad de onda de corte asociada al estrato de arena con poco limo. Finalmente se puede detectar un aumento de velocidad cerca de los 85 metros de profundidad, lo cual se puede atribuir a la aparición del estrato arenoso.

En el caso de la Figura 2.18 asociado al perfil “CSNP001” se puede ver que el método de correlaciones cruzadas detecta correctamente los tres primeros estratos, obteniéndose velocidades de onda de corte muy similares a las medidas por FUCHIGE para ellos. Dado que únicamente se pudo medir la velocidad hasta una profundidad de 50 metros, no se alcanza a detectar la aparición del cuarto estrato presente en el perfil transversal.

De acuerdo a la Figura 2.19 asociada al perfil “CSNP002” se detectan los primeros dos estratos, presentando velocidades y espesores similares a los esperados según la estratigrafía del perfil transversal A-A’ que es el más próximo a esta ubicación.

Finalmente, en el caso de la Figura 2.20 asociada al perfil “CSNP003” se puede ver método de correlaciones cruzadas detecta correctamente los primeros dos estratos del perfil transversal. También se puede apreciar que las velocidades calculadas por FUCHIGE para estos mismos estratos son similares a las obtenidas lo cual corrobora estos valores. Dado que las mediciones alcanzan una profundidad máxima de 50 metros no se alcanzó a detectar la presencia del tercer estrato.

3. Análisis del daño ocurrido durante el terremoto de 1960 en la ciudad de Valdivia

Este capítulo presenta un mapa de la ciudad de Valdivia, en el cual se represente la mayor parte de las edificaciones construidas hasta 1960, clasificadas según su materialidad y daño reportado durante el terremoto de 1960. Para esto se realizó una revisión bibliográfica de todos los antecedentes de daño reportados hasta hoy, junto con una síntesis de las conclusiones obtenidas a partir de los daños registrados.

Además, se pretende comparar el daño registrado en la ciudad de Valdivia revisado en este capítulo, con la geología superficial de la ciudad revisada en el Capítulo 2. Se pretende superponer ambos mapas y realizar una comparación sectorizada de modo de detectar si las causas del daño están asociadas a los distintos tipos de suelo. Se cuantificaron las estructuras dañadas por sector, o estrato, descartándose las estructuras con antecedentes que indiquen que sufrieron daños debido a problemas estructurales y no producto del terremoto.

3.1 Antecedentes bibliográficos

Varios estudios han descrito las consecuencias del terremoto del 22 de mayo de 1960 en la localidad de Valdivia. El principal enfoque de estudio ha sido en los daños estructurales. Estos estudios se han enfocado principalmente en recopilar antecedentes sobre los daños ocasionados, junto a sus causas. Algunos autores han llegado a la conclusión de que no todos los daños fueron ocasionados únicamente por el terremoto, sino que un conjunto de factores incidió en la cantidad de daños, dependiendo de la estructura, y su ubicación.

Entre los estudios, se reconocen dos grupos. El primero lo forman aquellos que se enfocaron en la recopilación de datos sobre los daños, e hicieron un análisis simplificado. Entre estos autores están Cambiazo C. (1961), Saint Amand (1961), Weischet (1963) y Lazo R. (2008). En el segundo grupo están los autores que se enfocaron en estudiar la relación entre los daños y sus causas, destacando donde se puede encontrar a Watanabe y Karzulovic (1960), Doyel (1963), Duke y Leeds (1963), Steinbrugge y Flores (1963), y Lastrico (1967), quienes recopilaron tanto antecedentes de daño como de la geología y geotecnia de Valdivia.

De acuerdo a la investigación realizada por el primer grupo de autores dedicados a la recopilación de daños producto del terremoto, es posible tener una idea general del suceso. Cambiazo C. (1961), Saint Amand (1961), y Lazo R. (2008) presentaron diversas imágenes que evidencian daños, junto a una descripción.



(a)

(b)

Figura 3.1: Banco de Chile (a) Vista frontal, (b) Vista lateral (Cambiazo, 1961).

La Figura 3.1 (a) y (b) muestran el Banco de Chile, es una estructura construida con albañilería sin reforzar. El edificio no colapsó, pero sufrió graves daños.



(a)



(b)

Figura 3.2: Hospital Regional (a) Vista lateral, (b) Vista interior (Cambiazo, 1961).

Según Cambiazo (1961), el hospital regional (Figuras 3.2 (a) y (b)) estaba construido en hormigón armado. Aun así, sufrió grandes daños durante el terremoto de Valdivia. El autor señala que, de acuerdo a la inspección realizada, fue posible notar una geometría irregular en el edificio, junto a problemas en su construcción, sugiriendo que se investiguen a fondo las causas de los daños. Este edificio destaca, debido a que, cercano a su ubicación, se registraron muy pocos daños.



(a)



(b)

Figura 3.3: Calle Picarte (a) Vista en elevación, (b) Daños en casas de madera. (Lazo, 2008)

La calle Picarte (Figura 3.3 (a) y (b)) es una de las calles que sufrió mayores daños en toda la ciudad de Valdivia. Lazo (2008) señala que en esta calle ocurrieron grandes asentamientos, provocando severos daños en todo tipo de estructuras. Esta calle está ubicada en el estrato superficial de relleno artificial, el cual es el estrato peor catalogado, debido a sus malas propiedades geotécnicas, según lo visto en el capítulo 2.



Figura 3.4: Costanera de la ciudad de Valdivia junto al río Calle-Calle. (Saint Amand, 1961)

En la Figura 3.4 muestra la costanera de Valdivia, junto al río Calle Calle. Saint Amand (1961) menciona el gran daño que sufrió esta zona por grandes asentamientos y fisuras en las calles, junto con a la subida del agua inundando parcialmente el lugar.



Figura 3.5: Calle García-Reyes afectada por grandes asentamientos. (Saint Amand, 1961)

En la Figura 3.5 se aprecian los grandes daños producidos por asentamientos en casas de madera. Saint Amand (1961) menciona que, probablemente, esto ocurrió por el efecto de deslizamiento del terreno producto del suelo de fundación, clasificándolo como relleno artificial.

De acuerdo a las figuras anteriores en general es posible ver que los distintos autores recopilaron todo tipo de daños en estructuras, de las cuales se pueden ver distintos factores que ocasionaron los daños. Es posible clasificar las estructuras según los materiales de construcción utilizados en la época que son:

- Hormigón Armado
- Albañilería confinada
- Albañilería no confinada
- Madera
- Madera con albañilería no confinada

Finalmente, Weischet (1961) recopiló daños asociados únicamente a estructuras de madera y albañilería, diferenciándolas por la cantidad de pisos. A pesar de no especificar las causas de los daños, su estudio abarcó la totalidad de la ciudad de Valdivia, clasificando los daños en las siguientes categorías:

- Destruído
- Agrietado(Albañilería)/Inclinado(Madera)
- Sin daños

La Figura 3.6 muestra el mapa de daño elaborado por Weischet (1961), el cual será usado como una de las principales referencias de daño en la ciudad.

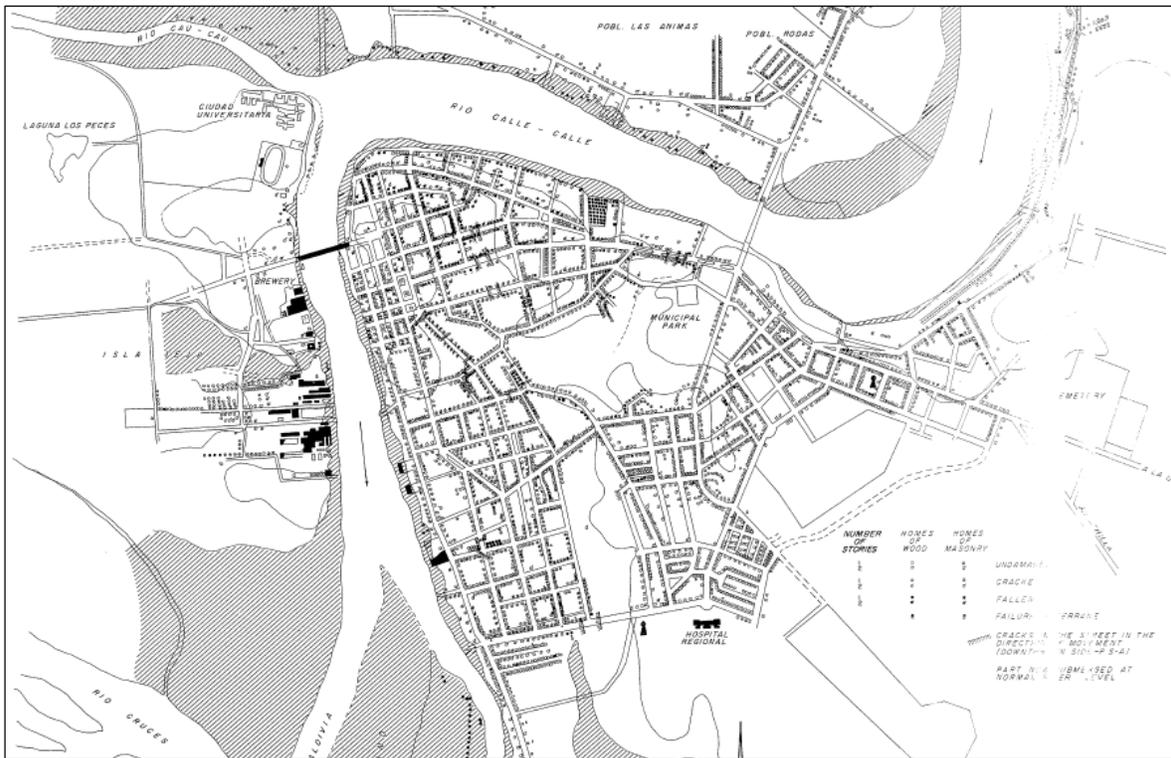


Figura 3.6: Mapa de daño de la ciudad de Valdivia. (Weischet, 1961)

El segundo grupo de autores que se enfocaron en estudiar los daños y las causas de estos: Watanabe y Karzulovic (1960), Doyel (1963), Duke y Leeds (1963), Steinbrugge y Flores (1963), y Lastrico (1967), visitaron las distintas estructuras dañadas a lo largo de Valdivia, y estudiaron los materiales, y estructuración, de numerosos edificios. Además, relacionaron los daños con el suelo de fundación.

Lastrico (1967) atribuyó el daño en una estructura ante un sismo a dos factores principales: 1) aceleraciones excesivas que provocaron tensiones de corte sobre las admisibles, 2) falla del suelo de fundación, provocando excesivos asentamientos diferenciales, deslizamientos en el terreno, y 3) colapso de la estructura por disminuir su capacidad de soporte a un límite menor que la sollicitación aplicada.

Watanabe y Karzulovic (1960), Doyel et. al (1963), Duke y Leeds (1963), Steinbrugge y Flores (1963) estudiaron la relación entre los suelos de fundación y los daños observados, concluyendo que gran parte de los daños estuvo asociado a los terrenos de relleno artificial en la ciudad de Valdivia. Adicionalmente, encontraron estructuras que estaban mal diseñadas y construidas; entre ellas destacan el Hospital Regional, y el estanque de agua colindante (Figuras 3.7 (a) y (b)).



(a)



(b)

Figura 3.7: (a) Estanque de agua, (b) Hospital regional de Valdivia (Cambiazo, 1961).

Los estudios realizados permiten concluir que los daños no se pueden atribuir solo a las fallas de diseño o a defectos constructivos, o excesivas aceleraciones, sino que los tres factores se presentaron en varios grados, agregando el agravante de las malas condiciones del suelo en muchas partes (Lástrico 1967).

Lo anterior permite clasificar los daños según los siguientes factores:

- Tipo de estructuración:
 - Disposición de materiales en la estructura (Hormigón, albañilería con madera, etc)
 - Diseño.
- Tipo de suelo de fundación:
 - Asentamiento.
 - Aceleraciones.
- Calidad de la construcción:
 - Mano de obra.
 - Materiales.

Adicionalmente, se puede ver que las estructuras estudiadas por los distintos autores presentaron un comportamiento común, el cual fue asociado a factores similares. Con esto es posible enumerar las principales causas que influyeron en el daño.

- 1) Varias construcciones afectadas por el sismo, que resultaron destruidas, eran antiguas.

- 2) Las casas de materiales homogéneos fueron menos afectadas que aquellas estructuras construidas con diferentes materiales. Por ejemplo, las casas de madera y ladrillo sufrieron daños mayores debido a la falta de integridad de su estructura sismo resistente.

- 3) Gran parte de las construcciones de hormigón con estructura sismo resistente que sufrieron graves daños, producto del terremoto, presentaban fallas en su diseño y construcción. Por ejemplo, el Hospital Regional, Estanque Elevado, y el Hospital Ortopédico, exceptuando las que fallaron producto de asentamientos diferenciales.

- 4) Las construcciones de madera, a pesar de ser excelentes para zonas sísmicas, si poseen una deficiente mano de obra no son capaces de soportar la aceleración sísmica. En el caso de Valdivia, muchas de ellas se derrumbaron por tres razones: 1) las casas presentaban una insuficiente cantidad de clavos, o estaban mal clavadas, 2) los pilares sobre los que las fundaron estaban debilitados por la humedad y fallaron, y 3) por la combinación de un esqueleto de madera con hormigón débilmente armado o albañilería sin reforzar.

- 5) Las condiciones locales, especialmente el suelo de fundación de relleno artificial, fueron determinantes en los daños observados. En este sentido, las construcciones ubicadas en el sector alto de la ciudad, fundadas en un suelo firme, resultaron menos afectadas.

3.2 Mapa de daño de la ciudad de Valdivia

De acuerdo a los antecedentes bibliográficos recopilados, se procedió a elaborar un mapa de daño de Valdivia, presentado en Anexos 4 de este informe. Durante la elaboración del mapa se consideró la mayor cantidad de estructuras estudiadas por los autores antes mencionados, teniendo en cuenta estructuras importantes, las cuales, adicionalmente, se referenciaron debidamente, explicando las causas del daño presentado o el tipo de estructuración en caso de no presentar daños. Las referencias indicadas en el mapa de daño se encuentran en el Anexo 2.1. La Figura 3.8 muestra una representación esquemática del mapa de daño sin escala.

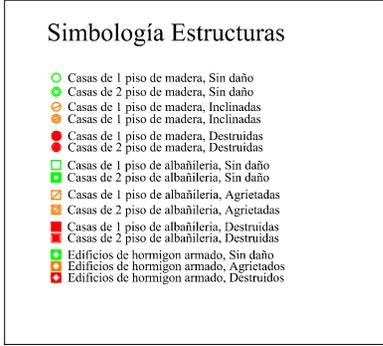
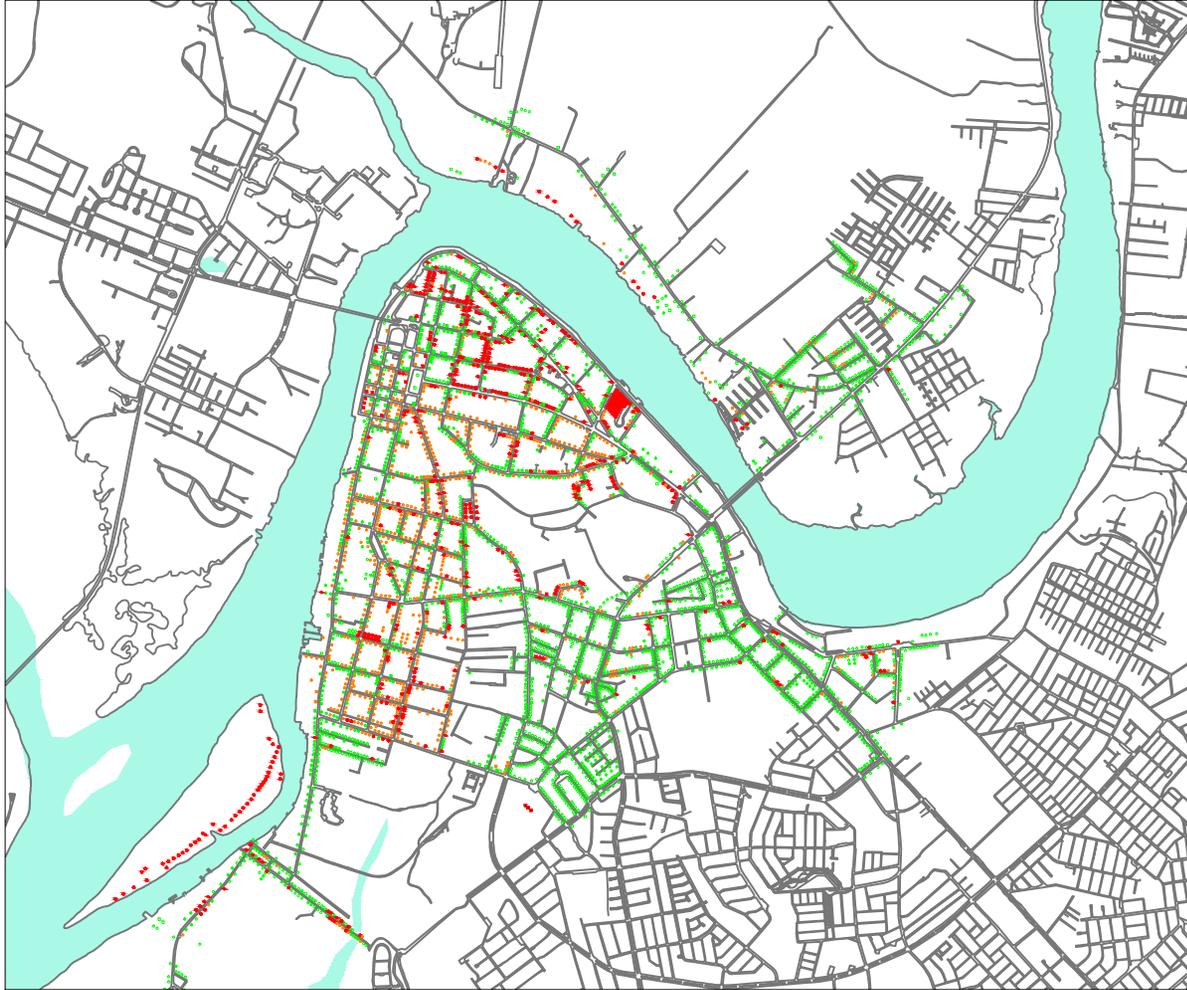


Figura 3.8: Mapa de daño de Valdivia.

3.3 Análisis comparativo del daño y la geología de Valdivia

Para comparar los mapas de la Figura 2.4 y la Figura 3.8, se realizará una sectorización por estrato superficial. De acuerdo a las Figuras 3.9 y 3.10 se pueden ver superpuestos el mapa geológico con el mapa de daño. Estas figuras se focalizan las zonas de relleno artificial con lo que se puede apreciar que este estrato presenta la mayor cantidad de daño.



Figura 3.9: Mapa de daño de Valdivia, sector central de la ciudad, zona de relleno artificial.



Figura 3.10: Mapa de daño de Valdivia, sector central de la ciudad, zona de relleno artificial.

Para cuantificar el daño se han elaborado las Tablas 3.1 y 3.2, en las cuales se indican las cantidades de estructuras según su materialidad, cantidad de pisos, y estrato superficial en el cual están ubicadas. Las estructuras que se han referenciado en el mapa, y que se ha

mencionado que sus daños fueron producto de una mala estructuración o construcción, no han sido consideradas en el conteo anterior; por ejemplo, el hospital regional y la fábrica de zapatos Weiss.

Tabla 3.1: Cantidad de estructuras según cantidad de daño y tipo asociada a cada estrato superficial.

Tipo de estructura	Cantidad de estructuras por estrato superficial						Total
	Arcilla	Arena limosa	Limo arcilloso con poca arena	Arena y ripio bien graduados	Humedales	Relleno artificial	
Madera 1 Piso, Sin daño	85	433	321	313	0	116	1268
Madera 1 Piso, Inclinada	73	177	48	4	0	29	331
Madera 1 Piso, Destruida	35	48	57	8	45	103	296
Madera 2 Pisos, Sin daño	80	295	391	285	0	67	1118
Madera 2 Pisos, Inclinada	45	156	159	1	0	91	452
Madera 2 Pisos, Destruida	24	17	51	5	1	73	171
Albañilería 1 Piso, Sin daño	5	28	32	5	0	9	79
Albañilería 1 Piso, Agrietada	1	0	4	0	0	0	5
Albañilería 1 Piso, Destruida	3	2	2	0	0	0	7
Albañilería 2 Pisos, Sin daño	10	27	93	7	0	4	141
Albañilería 2 Pisos, Agrietada	5	6	38	1	0	9	59
Albañilería 2 Pisos, Destruida	7	2	13	1	0	10	33
Hormigón Sin daño	0	0	12	0	0	1	13
Hormigón Agrietado	0	0	1	0	0	0	1
Hormigón Destruido	0	0	1	0	0	0	1
Total	373	1191	1223	630	46	512	3975

Tabla 3.2: Cantidad de estructuras según tipo asociadas a cada estrato superficial.

Cantidad de estructuras por estrato							
Tipo de estructura	Arcilla	Arena limosa	Limo arcilloso con poca arena	Arena y ripio bien graduados	Humedales	Relleno artificial	Total por tipo
Madera 1 Piso	193	658	426	325	45	248	1895
Madera 2 Pisos	149	468	601	291	1	231	1741
Albañilería 1 Piso	9	30	38	5	0	9	91
Albañilería 2 Pisos	22	35	144	9	0	23	233
Hormigón	0	0	14	0	0	1	15

La Tabla 3.3 muestra que, en total, se estudiaron 3975 estructuras, de las cuales solamente el 12,8% resultó destruido.

Tabla 3.3: Cantidad de estructuras estudiadas según tipo de daño.

Tipo de daño	Cantidad de estructuras	Porcentaje [%]
Sin daño	2619	65,9
Inclinado/Agrietado	848	21,3
Destruído	508	12,8
Total	3975	100,0

Tabla 3.4: Porcentaje de estructuras según cantidad de daño y tipo con respecto al total de estructuras de cada tipo.

Tipo de estructura	Porcentaje de estructuras con respecto al total de cada tipo [%]						
	Arcilla	Arena limosa	Limo arcilloso con poca arena	Arena y ripio bien graduados	Humedales	Relleno artificial	Total
Madera 1 Piso, Sin daño	4,5	22,8	16,9	16,5	0,0	6,1	66,9
Madera 1 Piso, Inclinada	3,9	9,3	2,5	0,2	0,0	1,5	17,5
Madera 1 Piso, Destruída	1,8	2,5	3,0	0,4	2,4	5,4	15,6
Madera 2 Pisos, Sin daño	4,6	16,9	22,5	16,4	0,0	3,8	64,2
Madera 2 Pisos, Inclinada	2,6	9,0	9,1	0,1	0,0	5,2	26,0
Madera 2 Pisos, Destruída	1,4	1,0	2,9	0,3	0,1	4,2	9,8

Albañilería 1 Piso, Sin daño	5,5	30,8	35,2	5,5	0,0	9,9	86,8
Albañilería 1 Piso, Agrietada	1,1	0,0	4,4	0,0	0,0	0,0	5,5
Albañilería 1 Piso, Destruída	3,3	2,2	2,2	0,0	0,0	0,0	7,7
Albañilería 2 Pisos, Sin daño	4,3	11,6	39,9	3,0	0,0	1,7	60,5
Albañilería 2 Pisos, Agrietada	2,1	2,6	16,3	0,4	0,0	3,9	25,3
Albañilería 2 Pisos, Destruída	3,0	0,9	5,6	0,4	0,0	4,3	14,2
Hormigón Sin daño	0,0	0,0	80,0	0,0	0,0	6,7	86,7
Hormigón Aguetado	0,0	0,0	6,7	0,0	0,0	0,0	6,7
Hormigón Destruído	0,0	0,0	6,7	0,0	0,0	0,0	6,7

La Tabla 3.4, muestra los porcentajes de las estructuras presentes en cada categoría con respecto al total de estructuras asociadas a un tipo de materialidad, y cantidad de pisos. De esta tabla se observa que el mayor porcentaje de estructuras destruidas no supera el 15,6%, siendo las casas de madera de 1 piso las que presentan mayor porcentaje de daño. Adicionalmente, se puede observar que del 15,6% de daño registrado, un 5,4% se encontraba sobre el Relleno artificial, seguido de un 3% asociado al estrato de Limo arcilloso con poca arena, evidenciando que el daño registrado sobre el Relleno artificial es superior al de los demás estratos para este tipo de estructuras.

También es posible ver que el mayor porcentaje de casas agrietadas o inclinadas no supera el 26%, correspondiendo a casas de madera de 2 pisos. Adicionalmente se puede observar que la mayor cantidad de estas casas inclinadas estaban sobre los estratos superficiales de Arena limosa y Limo arcilloso con poca arena, presentando porcentajes de 9%, y 9,1% respectivamente, lo que indica que en estos estratos fue más común este daño por sobre la destrucción total de las viviendas.

Finalmente es posible observar que, el estrato superficial de Arena y ripio bien graduados tuvo el mejor desempeño, teniendo como máximo un 0,4% de estructuras pertenecientes a la categoría de dañadas, e igualmente un máximo de 0,4% de estructuras pertenecientes a la categoría de inclinadas o agrietadas.

Tabla 3.5: Porcentaje de estructuras según cantidad de daño y tipo con respecto al total de estructuras de cada tipo asociadas a los distintos estratos superficiales.

Tipo de estructura	Porcentaje de estructuras con respecto al total por tipo de estructura en cada estrato superficial [%]					
	Arcilla	Arena limosa	Limo arcilloso con poca arena	Arena y ripio bien graduados	Humedales	Relleno artificial
Madera 1 Piso, Sin daño	44,0	65,8	75,4	96,3	0,0	46,8
Madera 1 Piso, Inclinada	37,8	26,9	11,3	1,2	0,0	11,7
Madera 1 Piso, Destruida	18,1	7,3	13,4	2,5	100,0	41,5
Madera 2 Pisos, Sin daño	53,7	63,0	65,1	97,9	0,0	29,0
Madera 2 Pisos, Inclinada	30,2	33,3	26,5	0,3	0,0	39,4
Madera 2 Pisos, Destruida	16,1	3,6	8,5	1,7	100,0	31,6
Albañilería 1 Piso, Sin daño	55,6	93,3	84,2	100,0	-	100,0
Albañilería 1 Piso, Agrietada	11,1	0,0	10,5	0,0	-	0,0
Albañilería 1 Piso, Destruida	33,3	6,7	5,3	0,0	-	0,0
Albañilería 2 Pisos, Sin daño	45,5	77,1	64,6	77,8	-	17,4
Albañilería 2 Pisos, Agrietada	22,7	17,1	26,4	11,1	-	39,1
Albañilería 2 Pisos, Destruida	31,8	5,7	9,0	11,1	-	43,5
Hormigón Sin daño	-	-	85,7	-	-	100,0
Hormigón Agrietado	-	-	7,1	-	-	0,0
Hormigón Destruido	-	-	7,1	-	-	0,0

Para estudiar el comportamiento general de las estructuras con respecto a cada estrato, se elaboró la Tabla 3.5, la cual muestra el porcentaje de estructuras de cada categoría de daño con respecto al total de estructuras de su mismo tipo en el mismo estrato superficial. Según la Tabla 3.5 se observa que el 100% de las estructuras ubicadas en el estrato de Humedales fueron destruidas. Esto se debe, principalmente, a que estas zonas fueron inundadas durante el terremoto.

También se observa que el Relleno artificial fue el que sufrió más daño, lo cual queda en evidencia al notar que el 43,5% de las casas de albañilería de 2 pisos en esa zona fueron destruidas, junto al 41,5% y 31,6% de casas de madera de 1 y 2 pisos respectivamente.

El segundo estrato en presentar mayor daño respecto a la cantidad de estructuras fue el estrato de Arcilla. En el cual se pueden observar porcentajes de destrucción del 33%, 32% y 18% asociados a casas de albañilería de 1 y 2 pisos, y casas de madera de 1 piso respectivamente.

Nuevamente, el estrato que presentó menor cantidad de daño fue el estrato de Arena y ripio bien graduados en el cual solamente destaca el 11% de daño en casas de albañilería de 2 pisos, siendo el resto de los porcentajes de daño menores a un 3%.

3.4 Análisis y conclusiones de los daños observados, la estratigrafía, y las propiedades geotécnicas de los distintos sectores de la ciudad de Valdivia

Los resultados de la Sección 3.3 sugieren que la mayor cantidad de daño se encuentra asociado al relleno artificial. Además, de acuerdo con las fotografías de las calles Picarte, Camilo Henríquez, y García-Reyes, ubicadas en este estrato, la mayoría de las fallas fueron por problemas de fundación por asentamientos diferenciales excesivos, y no a problemas asociados a altas aceleraciones producto del terremoto.

También es necesario considerar que en el estudio realizado solamente se clasificaron casas de madera y casas de albañilería por separado, considerándose todas las casas de materialidad mixta como casas de madera. Debido a esto muchas de las casas con materialidad mixta fueron catalogadas como casas de madera inclinadas producto de su mala respuesta frente a eventos sísmicos. En la Sección 3.1 se indica que en este periodo eran comunes las construcciones de madera afirmada en albañilería sin confinar; construcciones de este tipo son vulnerables a los terremotos por lo que no se necesitan aceleraciones excesivas para generar daño. Sumado a esto es necesario recordar que variadas casas de madera presentaban construcciones deficientes, sumado a que muchas de ellas poseían también fundaciones de pilotes podridos.

En complemento con esto, se tienen las poblaciones al sur de Valdivia en la zona de limo arenoso indicadas en la Figura 3.11 donde se puede observar una gran cantidad de casas de madera inclinadas o destruidas. En este caso se tiene que estas casas están ubicadas bajo un gran estrato arcilloso como se puede ver en el corte B-B' presentado en el Capítulo 2, lo cual pudo provocar que esta zona sufriera asentamientos y aceleraciones mayores, ya que a medida que se avanza hacia la orilla del río al oeste se ve disminuida la cantidad de daño. De acuerdo a esto, se puede suponer que las casas en esta zona pudieron sufrir daño debido ya sea a su condición al momento del sismo (materialidad mixta, fundaciones deterioradas o construcción deficiente), así como a elevadas aceleraciones o asentamiento del terreno. Pero aun, así como evidencia de que las aceleraciones en esta zona no fueron demasiado altas es que aún existen una gran cantidad de casas de madera en pie construidas antes del terremoto, estas casas son consideradas patrimonio histórico y no sufrieron mayores daños gracias a la

calidad de sus materiales y estructuración. Son de origen alemán y fueron construidas cerca del año 1900, su información detallada se encuentra en el Anexo 2.



Figura 3.11: Sector Sur de Valdivia, zona de limo arenoso. (AutoCAD, 2015).

Finalmente, el daño presente en el estrato de arena y ripio bien graduados fue casi nulo, y las pocas estructuras que sufrieron daños, en este estrato, están aisladas unas de otras. Se puede suponer que estas estructuras fallaron por problemas puntuales, y no producto del terremoto. En la Figura 3.12 se pueden observar las estructuras presentes en este estrato y las pocas estructuras dañadas.



Figura 3.12: Sector del estrato superficial Arena y ripio bien graduados.

4. Aplicabilidad del método de razones espectrales H/V

En este capítulo se evalúa si el método de razones espectrales H/V puede detectar zonas en Valdivia con variaciones en el periodo predominante de vibración del suelo. Para esto se analiza la mayor cantidad de mediciones de ruido ambiental posibles y se busca un patrón en los periodos. Se pretende detectar si alguna zona específica de la ciudad presenta anomalías, como, por ejemplo, un aumento localizado en el periodo predominante de vibración del suelo.

Se ha determinado usar el método H/V, conocido como el método de Nakamura (Nakamura, 1989), debido a su fácil ejecución y procesamiento de datos. Es un método eficiente para determinar el periodo predominante del suelo (Nakamura, 1989) y que ha demostrado una correcta correlación con datos geológicos y geotécnicos (Pastén, 2007; Leyton et al., 2013; Pastén et al., 2015). A pesar de esto, se ha determinado que este método no funciona muy bien para determinar la amplificación de las ondas sísmicas por medio del valor de la razón H/V obtenida en la posición de periodo fundamental, debido a que este parámetro es muy sensible a variaciones durante las mediciones (Lermo y Chaves-García, 1993; Alvarado, 2012) por lo que para este estudio no se considerará este parámetro. El método de las razones espectrales H/V para el procesamiento de señales de micro vibraciones ambientales se encuentra explicado en detalle en la memoria de Alvarado (2012).

4.1 Revisión bibliográfica

4.1.1 Aplicación del método de razones espectrales H/V en la ciudad de Valdivia

De acuerdo a lo anterior se ha optado por realizar un estudio en el cual se determine el periodo predominante del suelo en la ciudad de Valdivia por el método H/V. Para esto se utilizaron los registros medidos por Alvarado (2012), y los registros obtenidos por la Universidad de Chile (2016).

4.1.2 Aplicación del método H/V en Valdivia por Alvarado (2012)

Alvarado (2012) reportó 260 mediciones de vibraciones ambientales en Valdivia, en siete sectores dentro de la ciudad. La Figura 4.1 muestra los sectores elegidos por Alvarado (2012) para su estudio, y en la Figura 4.2 se puede ver la ubicación de cada una de las mediciones, en todos los sectores considerados.



Figura 4.1: Sectorización de la ciudad de Valdivia (Alvarado, 2012).

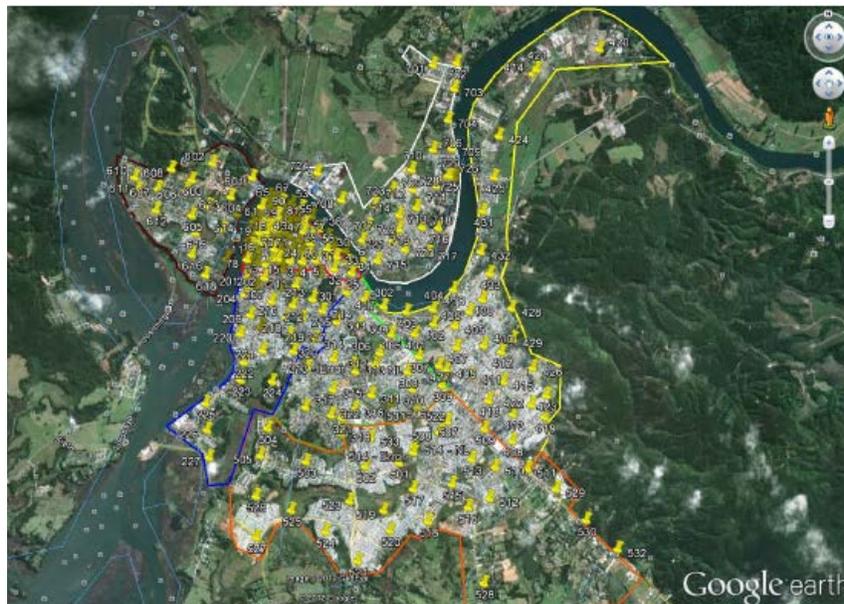


Figura 4.2: Puntos de instrumentación en la ciudad de Valdivia (Alvarado, 2012).

Luego de realizar las 260 mediciones en la ciudad, se aplicó el método de Nakamura para cada una de ellas para obtener los periodos del suelo en toda la ciudad. Finalmente, los resultados de Alvarado (2012) generaron dos mapas de la ciudad de Valdivia. El primero indicando los periodos del suelo, y el segundo indicando su potencial para generar amplificación sísmica, basado en la amplitud de la razón espectral H/V. El parámetro de amplitud obtenido a partir del método H/V puede indicar posibles modificaciones en las

ondas medidas dependiendo de su valor, pero para que este parámetro sea válido es necesario realizar mediciones homogéneas y con la menor cantidad de interferencia exterior.

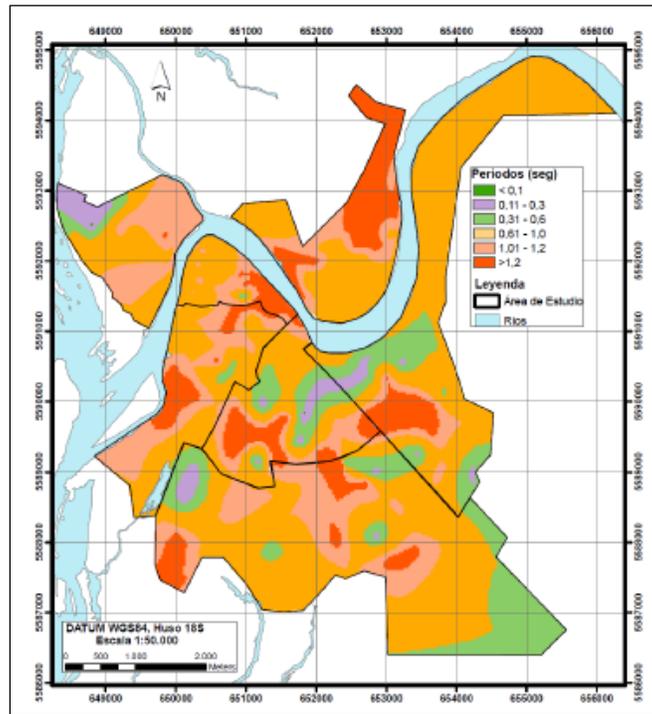


Figura 4.3: Mapa de iso-periodos del suelo, Valdivia (Alvarado, 2012).

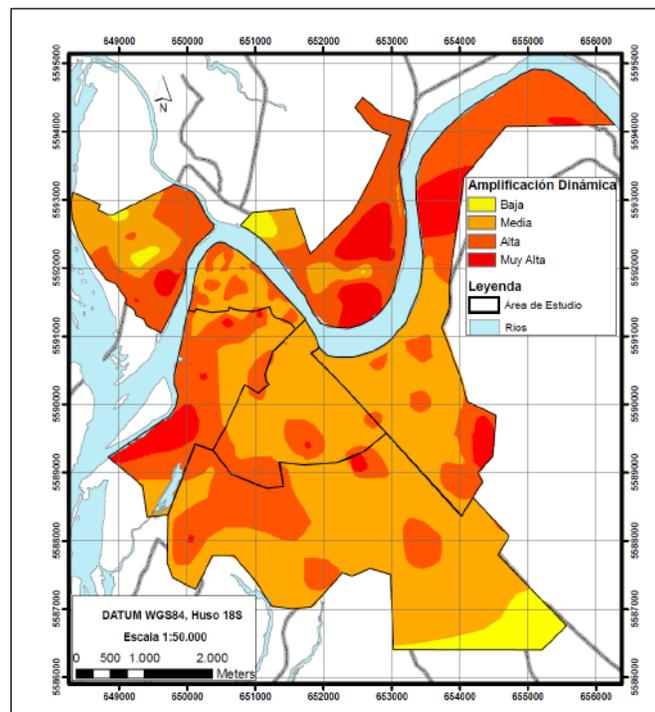


Figura 4.4: Amplitud máxima de las razones espectrales en Valdivia (Alvarado, 2012).

De acuerdo a Alvarado (2012), el método de Nakamura no es capaz de determinar una posible amplificación sísmica, debido a que los periodos medidos por este mismo no presentan una relación con la geología de la ciudad, la cual es el primer indicador de amplificación sísmica. Adicionalmente las amplitudes medidas presentan una leve relación con la geología de la ciudad, pero debido a la gran incerteza de las mediciones de amplitud no es posible considerar estos resultados como un buen indicador de efecto de sitio en la ciudad.

Debido a que el estudio de Alvarado (2012) no obtuvo buenos resultados con la aplicabilidad del método H/V, es necesario analizar nuevamente los datos, filtrando de forma más rigurosa los resultados obtenidos y relacionarlos con la geología de Valdivia, aplicando un enfoque más completo. Por ejemplo, comparando los resultados con la geología superficial y los perfiles transversales de la zona, de esta forma es posible buscar una relación entre el periodo y tanto los estratos superficiales como en profundidad.

4.1.3 Aplicación del método H/V en Valdivia por la Universidad de Chile (2016)

El 2016 la Universidad de Chile realizó una serie de mediciones de vibraciones ambientales en Valdivia y sus alrededores. Según esto, fue posible identificar 29 sitio con entre 3 y 4 mediciones en cada uno. Las ubicaciones de las zonas de medición se observan en la Figura 4.5.

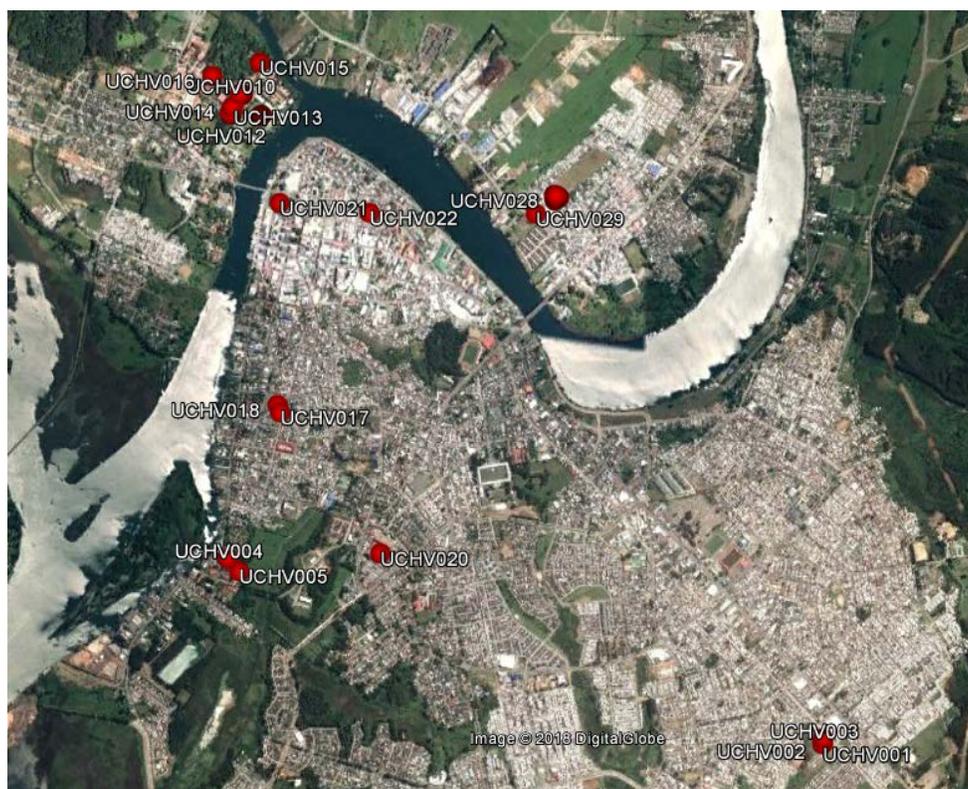


Figura 4.5: Ubicación de las mediciones de H/V del DIC de la Universidad de Chile (Google Earth, 2017).

Los datos obtenidos por esta campaña fueron reprocesados mediante un riguroso criterio de selección, eligiendo las mejores mediciones para un posterior estudio del periodo del suelo usando los resultados.

4.2 Reprocesamiento de los registros de vibraciones ambientales

Para realizar el reprocesamiento de las mediciones de vibraciones ambiental, se optó por usar el programa “Geopsy”, el cual es capaz aplicar el método de Nakamura. Los parámetros utilizados para el análisis de datos mediante este programa fueron los siguientes:

- Se considera para el procesamiento de la señal, ventanas con parámetro STA igual a 1 segundo y LTA igual a 30 segundos, y un mínimo de razón STA/LTA de 0,2s y un máximo de 2,5s.
- Se considera un tipo de suavizado “Konno Ohmachi” con una constante de suavizado de “40”.
- Se considera el componente horizontal promedio, obtenido a partir de las orientaciones Norte y Este.

4.2.1 Reprocesamiento de los registros de Alvarado (2012)

Durante el reprocesamiento de las mediciones de Alvarado (2012) solo se pudo analizar los registros realizados a partir del equipo GeoSIG GVB-316 debido a que no fue posible obtener los datos de las mediciones realizadas por el equipo Tromino. Debido a esto, de los 260 puntos medidos por Alvarado (2012), solamente se reprocesaron 119 puntos, entre los cuales 67 pertenecen al sector 1, 28 al sector 2 y 24 al sector 7 acorde a las ubicaciones especificadas por Alvarado (2012) (Figura 4.1).

Los registros reprocesados presentan las siguientes características:

- Los datos de muestreo se obtuvieron a partir de equipos GeoSIG GVB-316
- La tasa de muestreo varía según la medición entre los 50 y 100 Hz.
- La duración de las mediciones varía entre 15 y 16 minutos.
- El rango de medición del equipo es capaz de registrar frecuencias entre 4.5 y 50 Hz.

Para el reprocesamiento, se estableció un criterio de selección para filtrar las mediciones con un alto contenido de vibraciones transientes (todo tipo de acciones que generar vibraciones externas a las vibraciones ambientales) que puede provocar una variación en el periodo medido. De acuerdo a esto, se estableció el siguiente criterio de clasificación.

De acuerdo a esto se estableció el siguiente criterio:

- Los registros en los cuales se obtuvieran más de 20 ventanas de muestreo y que la forma del gráfico obtenido presente un peak distinguible son aceptados.
- Los registros en los cuales se obtengan entre un rango de 10 a 20 ventanas de muestreo y que la forma del gráfico H/V obtenido presente un peak marcado y fácil de reconocer son aceptados.

- Los registros en los cuales se obtuvieran menos de 10 ventanas de muestreo o que no se cumpla con los criterios de peak anteriores no serán considerados para el estudio del periodo del suelo de Valdivia.

Acorde al criterio de selección, la Tabla 4.1 muestra la cantidad de registros asociada a cada uno de los rangos mencionados anteriormente.

Tabla 4.1: Cantidad de registros por número de ventanas procesadas.

Datos		N° Ventanas		
		< 10	10 – 20	> 20
Sector	1	6	32	29
	2	7	12	9
	7	2	9	13
Total		15	53	51

Los resultados del reprocesamiento se presentan en la Tabla 7.27 del Anexo 3, junto a los gráficos asociados generados por el programa “Geopsy”. Se indican los registros que fueron aceptados y los que no superaron el criterio de selección junto a la razón de esto.

Finalmente, los resultados que superaron el criterio de selección se muestran en la Figura 4.6, indicando su ubicación en el mapa generado por Google Earth (2017). Adicionalmente, la Tabla 4.2 presenta un resumen de los periodos obtenidos según sector del registro, y según el rango de este. La Figura 4.7 muestra el histograma de la cantidad de registros por periodo asociado a cada sector y uno asociado al total de los registros.

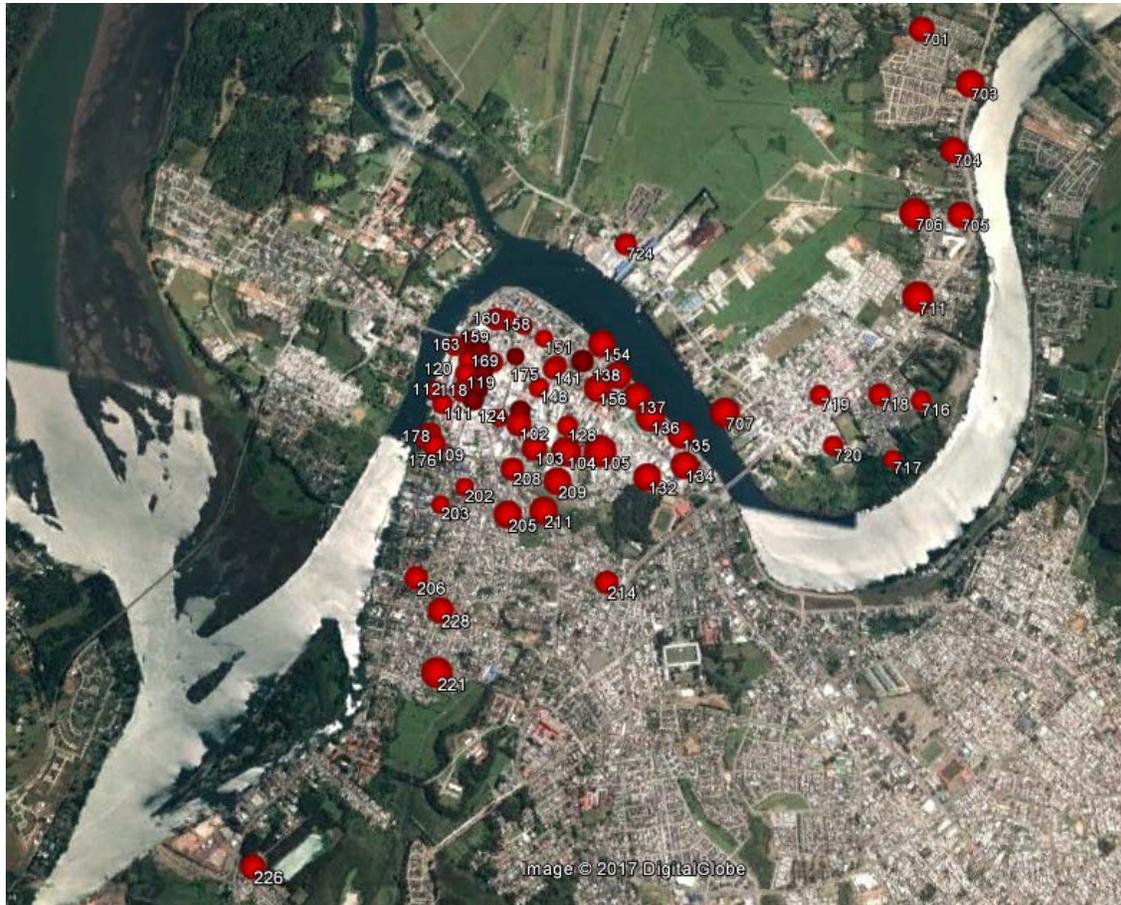


Figura 4.6: Ubicación de los registros aceptados de la campaña de Alvarado (2012) (Google Earth, 2017).

Tabla 4.2: Cantidad de registros aceptados asociados a un rango de periodos determinado.

Datos		Periodo [s]							
		< 0,8	0,8 - 0,9	0,9 - 1,0	1,0 - 1,1	1,1 - 1,2	1,2 - 1,3	1,3 - 1,4	> 1,4
Medición	Sector 1	3	7	14	4	4	5	1	1
	Sector 2	1	1	2	2	3	2	0	0
	Sector 7	1	2	1	2	2	3	1	1
Total		5	10	17	8	9	10	2	2

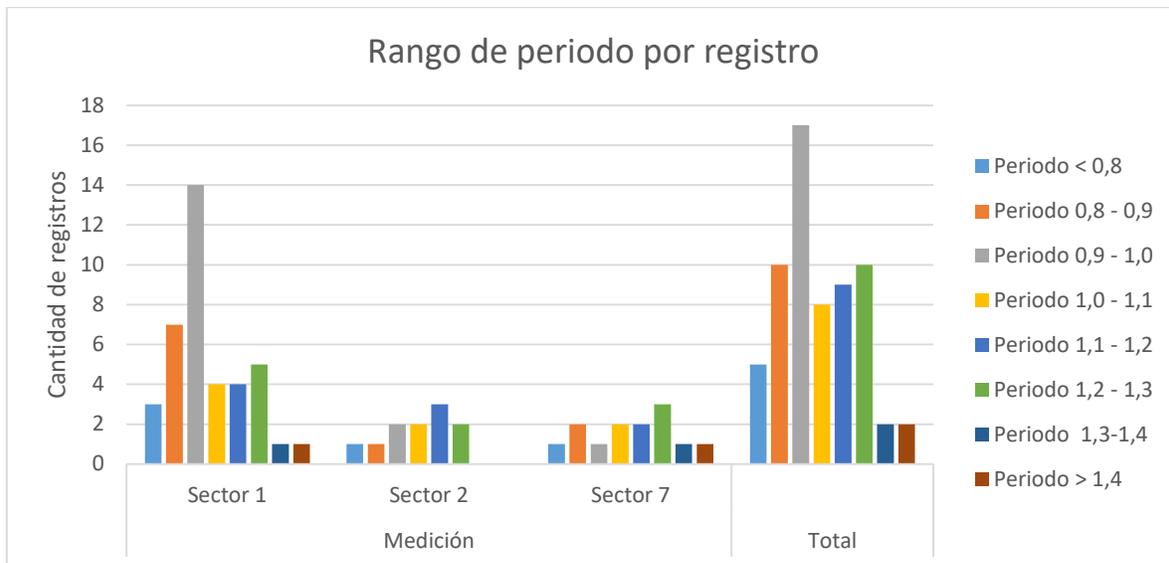


Figura 4.7: Histograma de cantidad de registros asociados a un rango de periodo.

4.2.2 Procesamiento de los registros de la Universidad de Chile (2016)

Para el procesamiento de los registros de a la Universidad de Chile se tienen 29 sitios donde se realizaron 3 o 4 mediciones con las siguientes características:

- Los datos de muestreo se obtuvieron a partir de sensores Tromino.
- La tasa de muestreo de todas las mediciones es de 128 Hz.
- La duración de las mediciones varía entre 24 y 40 minutos.

Igual que con los registros de Alvarado (2012), se estableció un criterio de selección para filtrar las vibraciones transientes, y que pueden provocar una variación en el periodo medido. De acuerdo a esto, se estableció el siguiente criterio de clasificación para las mediciones con duración entre 26 y 30 minutos:

- Los registros en los cuales se obtuvieran más de 35 ventanas de muestreo y que la forma del gráfico obtenido presente un peak distinguible.
- Los registros en los cuales se obtuvieran entre un rango de 25 a 35 ventanas de muestreo y que la forma del gráfico H/V obtenido presente un peak marcado y fácil de reconocer.
- Los registros en los cuales se obtuvieran menos de 25 ventanas de muestreo o que no se cumpla con los criterios de peak anteriores no serán considerados para el estudio del periodo del suelo de Valdivia.

Para las mediciones de entre 30 y 40 minutos se exigirá dos ventanas extra por minuto adicional para cada criterio.

Acorde al criterio de selección, la Tabla 4.3 muestra la cantidad de registros asociada a cada uno de los rangos mencionados anteriormente.

Tabla 4.3: Cantidad de registros por número de ventanas procesadas.

Datos	N° Ventanas		
	< 25	25 – 35	> 35
Criterio de grupo	8	27	63

Los resultados del reprocesamiento se presentan en la Tabla 7.27 del Anexo 3, donde se indica los registros que fueron aceptados y los que no superaron el criterio de selección junto a la razón de esto. También en el Anexo 3 se presentan los gráficos generados por el programa “Geopsy”, asociados a todas las mediciones de H/V estudiadas.

Finalmente, los resultados que superaron el criterio de selección se encuentran representados en la Figura 4.8, donde se indica su ubicación en el mapa generado por Google Earth (2017). Adicionalmente en la Tabla 4.4 se presenta un resumen de los periodos obtenidos, los cuales se calcularon a partir de un promedio simple de los periodos de todos los registros aceptados para cada ubicación. La Figura 4.9 muestra el histograma de la cantidad de registros por periodo asociado a cada sector y uno asociado al total de los registros. El detalle del reprocesamiento de las mediciones realizadas por los estudiantes de la Universidad de Chile se presenta en la Tabla 7.26 en el Anexo 3.



Figura 4.8: Ubicación de los registros de la Universidad de Chile aceptados (Google Earth, 2017).

Tabla 4.4: Cantidad de registros asociados a un rango de periodos determinado.

Datos		Periodo [s]							
		< 0,8	0,8 - 0,9	0,9 - 1,0	1,0 - 1,1	1,1 - 1,2	1,2 - 1,3	1,3-1,4	> 1,4
Medición	U Chile	0	2	1	0	1	9	4	0

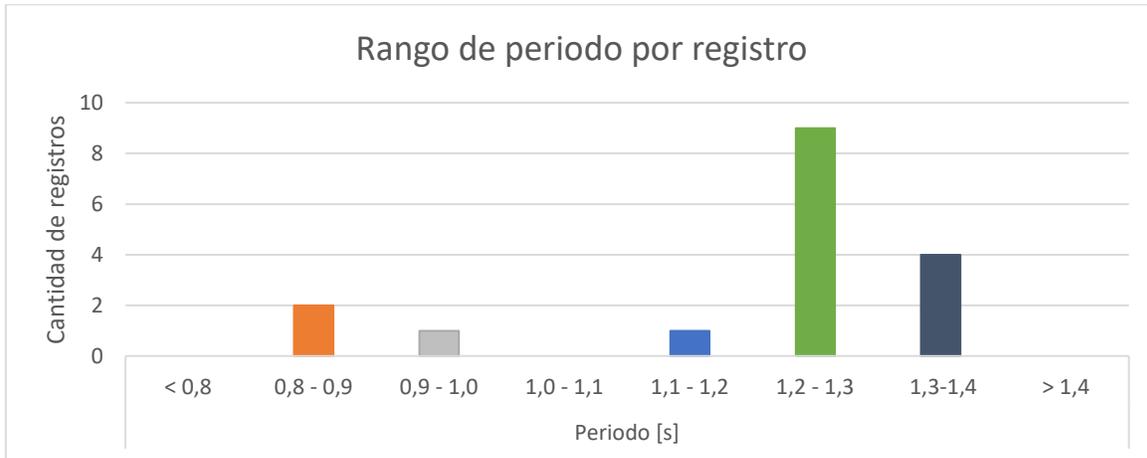


Figura 4.9: Histograma de cantidad de registros de la Universidad de Chile asociados a un rango de periodo.

4.2.3 Resumen de registros reprocesados

Se obtuvieron un total de 80 registros aceptados los cuales se representan en el histograma de la Figura 4.10 ordenados de acuerdo a su periodo medido. Los periodos oscilan entre 0,7 y 1,5 segundos, y la mayor cantidad de periodos se encuentran entre los rangos 0,9 – 1,0 segundos y 1,2 – 1,3 segundos.

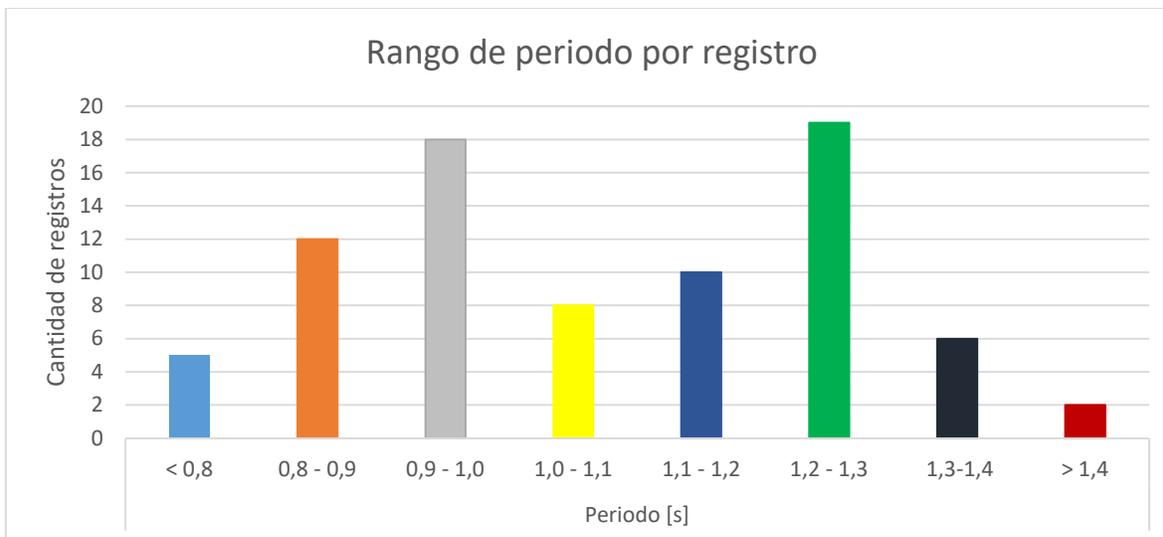


Figura 4.10: Histograma del total de mediciones aceptadas según periodo medido.

4.3 Estudio de registros que presentan doble peak

Durante el procesamiento de los registros de H/V, se han obtenido algunos gráficos en los cuales se aprecia un segundo peak que aparece después del peak asociado a la frecuencia predominante del suelo. Para estudiar este fenómeno primero es necesario conocer todas las mediciones en las que este fenómeno ocurre. La Figura 4.11 presenta una comparación entre una medición normal y una con doble peak.

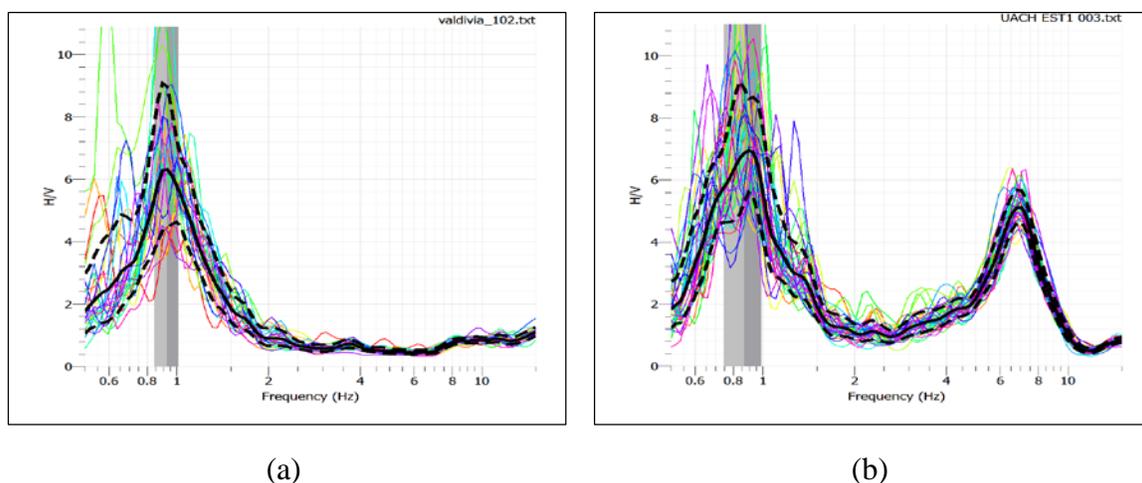


Figura 4.11: Comparación entre un gráfico H/V normal (a) y uno con doble peak (b).

El criterio para seleccionar las mediciones con doble peak está definido por mediciones que hayan superado los criterios de filtro y en la cuales se pueda apreciar claramente la existencia de un segundo peak, separado del primero. La Tabla 4.5 muestra todos los registros en los cuales se puede reconocer más de un peak, y la Figura 4.12 muestra la ubicación de cada una de estas mediciones.

Tabla 4.5: Mediciones que presentan más de un peak.

Resultados mediciones			
Sector	Medición	Periodo primer peak [s]	Periodo segundo peak [s]
1	120	0,820	0,280
1	156	1,220	0,140
7	701	1,170	0,125
7	703	1,276	0,250
7	704	1,172	0,111
-	UCHV006	1,168	0,128
-	UCHV007	1,224	0,127
-	UCHV009	1,227	0,123
-	UCHV010	1,212	0,125
-	UCHV011	1,283	0,111
-	UCHV012	1,248	0,112



Figura 4.12: Ubicación de las mediciones que presentan más de un peak (Google Earth, 2017).

De acuerdo a la Figura 4.12 es posible observar que en las mediciones cercanas a la Universidad Austral, ubicada en Isla Teja, presentan un patrón común de dos peaks, lo cual se repite en la zona norte de Valdivia en el sector de “Las Animas” donde las mediciones 701, 703, y 704 presentan este mismo comportamiento. Las mediciones 120 y 156 presenta dos peak, pero dado que son mediciones aisladas no se puede asociar a un efecto propio de la zona en la que están ubicadas.

Según las mediciones ubicadas en isla Teja es posible ver, según los gráficos adjuntos en el Anexo 3, que el segundo peak oscila entre los 0,1 y los 0,14 segundos aproximadamente, teniendo siempre una amplitud menor al peak principal. Dado que todas las mediciones realizadas en este sector presentan el mismo fenómeno, es posible afirmar que esto ocurre debido a una anomalía local del sector.

Por otro lado, las mediciones realizadas al norte de Valdivia en el sector de “Las Animas”, presentan un segundo peak que oscila entre los 0,125 y los 0,25 segundos, y presentan una amplitud menos marcada que las mediciones de Isla Teja.

4.4 Comparación de los periodos predominante con los mapas de daño y geología superficial de Valdivia

Primero, es necesario verificar si las mayores concentraciones de daño dentro de la ciudad de Valdivia presentan alguna relación con las zonas de mayor periodo del suelo. Para esto se debe verificar si existen zonas donde los periodos del suelo presenten un aumento con respecto a su alrededor. Dado que los periodos predominantes dentro de la ciudad de Valdivia se encuentran entre 0,7 y 1,5 segundos, se dividirá la ciudad en sectores con periodos menores a 1.1s y los sectores con periodos mayores a 1.1 segundos de modo de observar si se puede detectar un patrón dentro de la ciudad. Las Figura 4.13 y Figura 4.14, muestran la ubicación de los periodos menores y mayores a 1.1s respectivamente, de forma conjunta se ha usado el mapa geológico para estudiar de mejor manera la distribución de periodos dentro de la ciudad.

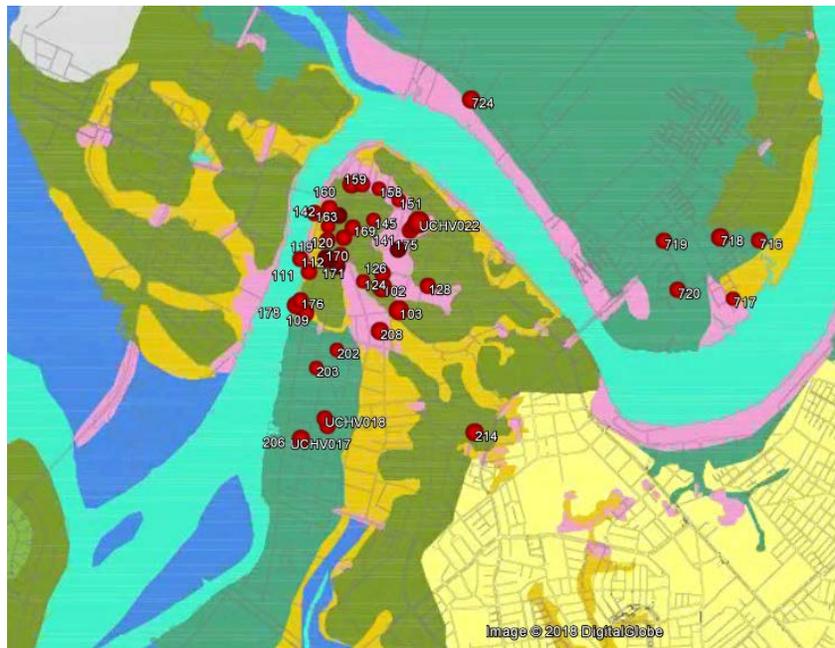


Figura 4.13: Ubicación de las mediciones con periodos menores a 1.1 segundos (Google Earth, 2017).

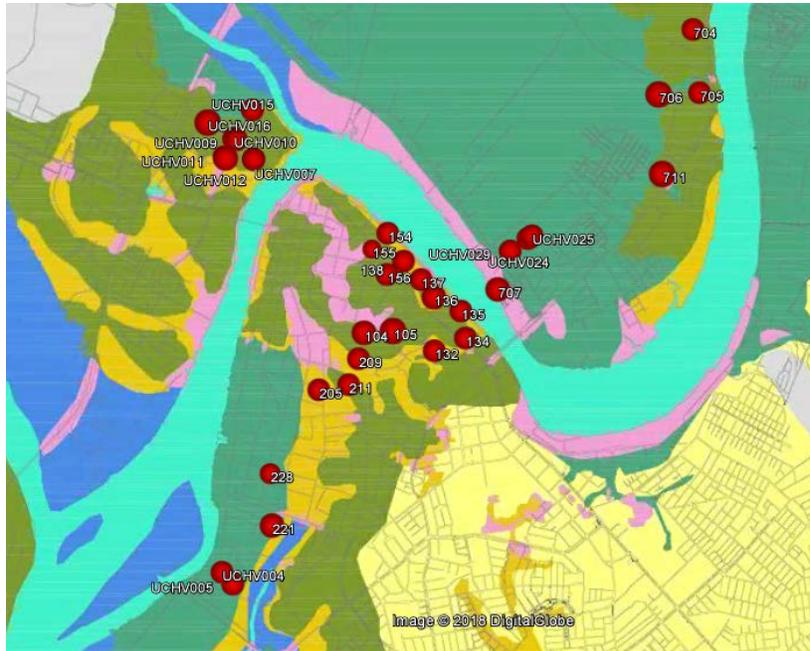


Figura 4.14: Ubicación de las mediciones con periodos mayores a 1.1 segundos (Google Earth, 2017).

De acuerdo con las Figura 4.13 y Figura 4.14 es posible reconocer claramente un patrón en el valor del periodo del suelo y su ubicación. Se puede ver que en la franja central de la ciudad se encuentra una zona de periodos superiores a 1.1 segundos y hacia el este y oeste de esta franja se encuentran zonas de menor periodo. Adicionalmente, se observa que la geología superficial no presenta relación alguna con las variaciones de periodo medidas.

Para estudiar mejor estas zonas de aumento de periodo se revisarán los periodos obtenidos por todas las mediciones que no superaron el criterio de filtro y adicionalmente se revisaran los gráficos H/V de las mediciones de Alvarado (2012) realizadas con el equipo Tromino. La finalidad de esto es poder agregar una serie de mediciones complementarias que confirmen la ubicación de las zonas de mayores periodos.

Los gráficos H/V asociados a estas mediciones se encuentran en el Anexo 3. La Tabla 4.6 muestra todas las mediciones que según la revisión complementan de forma correcta las zonas encontradas anteriormente.

Tabla 4.6: Mediciones complementarias de H/V.

Mediciones complementarias					
Sector	Medición	Frecuencia [1/s]	Periodo [s]	Nº Ventanas	Comentario
2	210	0,765	1,307	27	No se distingue el peak
2	213	0,903	1,107	6	Insuficientes datos
3	301	1,087	0,920	-	Tromino, Alvarado (2012)
3	302	1,163	0,860	-	Tromino, Alvarado (2012)

3	304	1,136	0,880	-	Tromino, Alvarado (2012)
7	708	0,813	1,230	13	No se distingue el peak
7	709	0,744	1,344	25	No se distingue el peak
7	710	0,723	1,383	25	No se distingue el peak
7	715	1,006	0,994	19	No se distingue el peak
7	721	1,110	0,901	23	No se distingue el peak

Para un mejor estudio de la variación de periodos dentro de la ciudad de Valdivia se elaboró un mapa de mediciones H/V, donde se presentan todas las mediciones aceptadas junto con las mediciones complementarias. Adicionalmente, se ha asignado una escala de colores a las mediciones teniendo como referencia los colores verde y rojo asignados a los periodos entre 0,7-0,8 y 1,4-1,5 respectivamente y para todas las mediciones con periodos intermedios se han asignado colores en degradé a medida que se alejan de los extremos, siendo 1,1 segundos el punto intermedio. La Figura 4.15 muestra el mapa de mediciones H/V.

Se puede ver al comparar los mapas de daño y mediciones H/V de las Figura 3.8 y 4.15 respectivamente que en las zonas de periodos más altos existen tanto sectores dañados como sectores prácticamente sin daño. Esto sugiere que el periodo del suelo no define por si solo la causa del daño encontrado.

De acuerdo con los antecedentes revisados, la mayor parte de las casas construidas en esa época son de 1 o 2 pisos, de madera o albañilería, por lo que sus periodos son menores a los periodos predominantes del suelo. Sumado a eso los edificios más altos construidos no superaban los 7 pisos, como es el caso del edificio Prales, el cual no sufrió daños dado que su periodo fue inferior al periodo predominante de esa zona (aproximadamente 0,9 segundos).

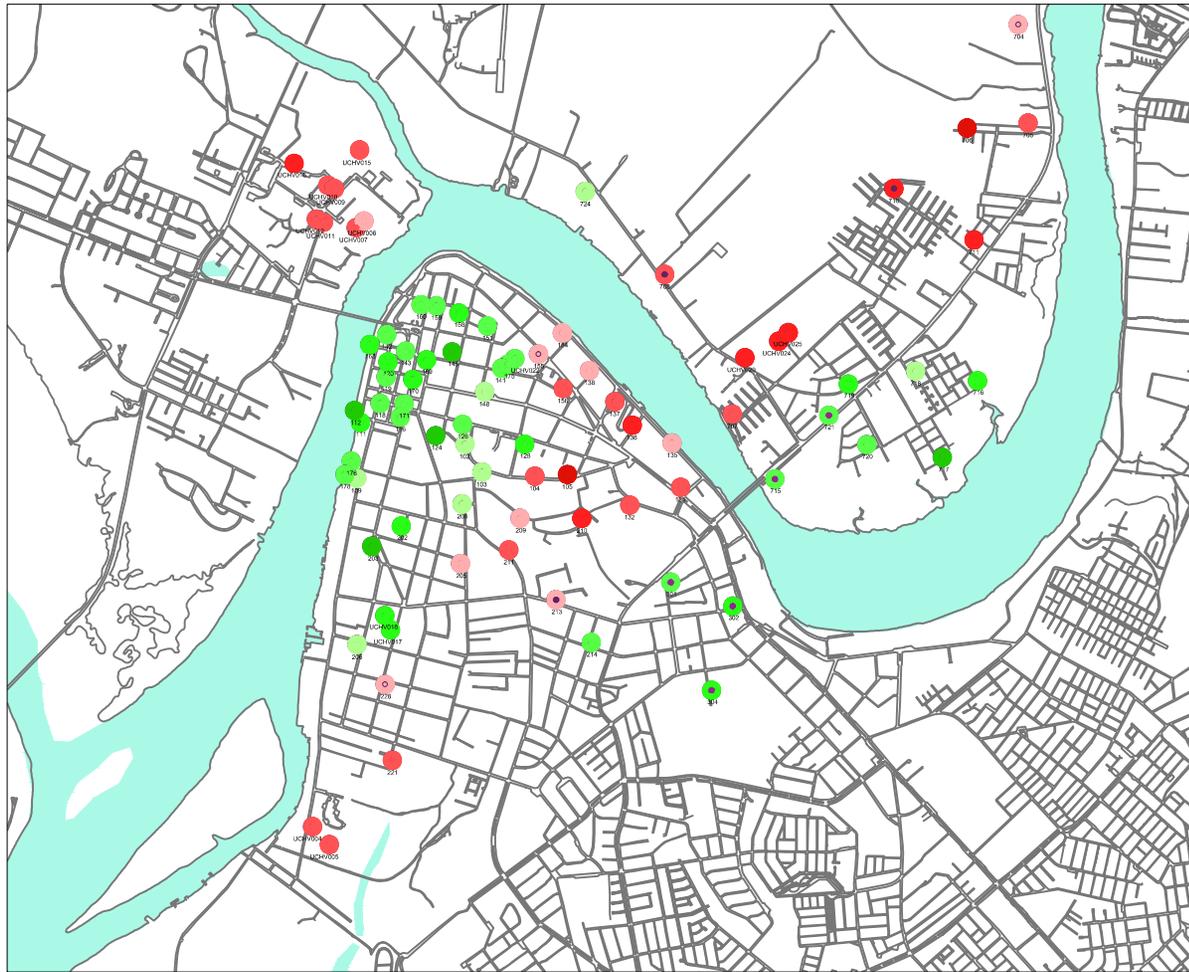


Figura 4.15: Mapa de las mediciones H/V en Valdivia.

4.5 Comparación de los periodos predominantes medidos con el perfil transversal A-A'

Dado que se ha detectado una zona de aumento del periodo predominante del suelo en la ciudad de Valdivia, se hace necesario establecer una relación entre la estratigrafía de la zona y su periodo predominante. Al comparar el mapa de la Figura 4.15 con los mapas geológico y de daño de la ciudad de Valdivia de las Figuras 2.4 y 3.8 respectivamente, es posible notar que los estratos superficiales no presentan relación alguna con el periodo y que el daño tampoco se concentra en las zonas de mayor o menor periodo.

Una de las posibles razones por las cuales se puede generar un aumento en el periodo fundamental del suelo es una variación en la profundidad de la roca, ya que para sectores donde la roca es más profunda tienden a presentar periodos mayores y para sectores en que la roca es menos profunda ocurre lo contrario. Se ha elegido realizar una comparación entre los periodos obtenidos y el perfil transversal A-A' dado que este es casi perpendicular al sector donde los periodos varían y si existe una variación en la profundidad de la roca debiese coincidir con este perfil transversal. Para esto, primero es necesario recordar que durante la creación de este perfil todos los estratos bajo los 30 metros se elaboraron en base a antecedentes de otros autores, puesto que los sondajes y ensayos CPT no superaron los 30 metros de profundidad. Debido a esto, para determinar la ubicación de la roca, fue necesario replicar la ubicación presentada por Retamal et al. (1969) y Arenas et al. (2004). Estos autores infirieron la ubicación de la roca mediante ensayos geofísicos, y solamente Retamal et al. (1969) reporta un sondaje que alcanzó un estrato rocoso. Debido a lo anterior la profundidad de la roca como sus variaciones de profundidad son solo aproximaciones.

Para la comparación entre el perfil transversal A-A' y las mediciones H/V se han seleccionado las mediciones más cercanas al estrato de modo de poder representar como varia el periodo a lo largo del perfil. Los primeros puntos seleccionados pertenecen a Isla Teja y no están directamente sobre el perfil transversal, pero si ubicados en la misma trayectoria, dado que no se poseen mediciones más cercanas, será necesario usar estas mediciones. Así mismo, los puntos finales seleccionados están ubicados más allá del final del perfil transversal, pero, dado que están en línea con él, también serán incluidos. Finalmente, la Tabla 4.7 representa todos los puntos incluidos en esta comparación, la Figura 4.16 muestra los puntos ubicados en el mapa geológico y la Figura 4.17 muestra un gráfico donde está representado el periodo de cada punto ubicados exactamente sobre su posición en el perfil transversal también incluido.

Tabla 4.7: Puntos de medición incluidos en la comparación entre el periodo y el perfil transversal.

Datos		
Medición	Frecuencia [1/s]	Periodo [s]
UCHV016	0,733	1,365
UCHV009	0,815	1,227
UCHV006	0,856	1,168

112	1,270	0,787
111	1,147	0,872
119	1,100	0,909
118	1,032	0,969
170	1,140	0,877
171	1,070	0,935
126	1,070	0,935
102	0,928	1,078
148	0,959	1,043
156	0,820	1,220
104	0,789	1,267
137	0,825	1,212
105	0,712	1,404
136	0,768	1,302
210	0,765	1,307
132	0,817	1,224
134	0,821	1,218
301	1,087	0,920
302	1,163	0,860



Figura 4.16: Ubicación de los puntos de medición seleccionados.

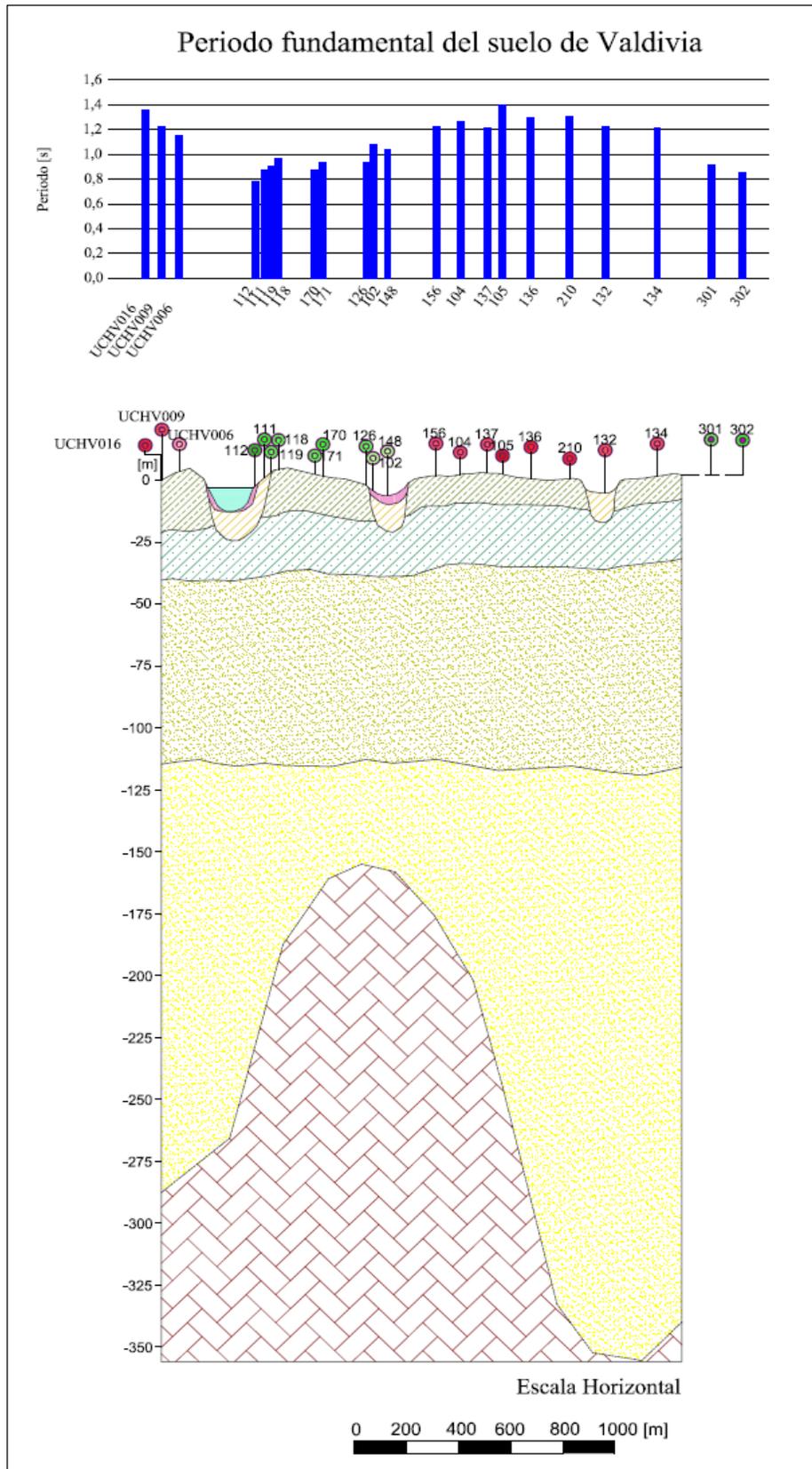


Figura 4.17: Gráfico de periodo predominante y perfil transversal A-A'.

De acuerdo a la Figura 4.17 se puede observar que el periodo predominante del suelo varia acorde con la profundidad de la roca, lo cual indica que la posición inferida de la roca en el perfil transversal representa relativamente bien el efecto de aumento de periodo detectado en la ciudad de Valdivia, a pesar de no coincidir exactamente, pues se detecta que la roca comienza a disminuir su profundidad antes de lo mostrado en el perfil transversal.

4.6 Verificación de la profundidad de la roca en el perfil transversal A-A mediante el método de propagación de ondas en un medio multi-capas

Según el análisis anterior la ubicación de la roca inferida por Arenas et al. (2004) y representada en el mapa geológico sería coherente con los resultados de periodo fundamental obtenidos mediante el método H/V. Sin embargo, dado que no existen estudios que hayan determinado de forma precisa la ubicación de la roca, es necesario realizar una comprobación de su ubicación y corrección en caso de ser necesario.

El método de propagación de ondas en un medio multi-capas considera una aproximación unidimensional del suelo con estratos perfectamente horizontales y gracias a su aplicación es posible obtener la función de transferencia entre la superficie y el basamento rocoso. Las variables y ecuaciones usadas para este método se encuentran mencionadas en el manual "SHAKE" elaborado por Schnabel et al. (1970).

Para la aplicación de este método es necesario conocer la cantidad y espesor de los estratos, su velocidad de onda de corte, y su densidad. De acuerdo a lo anterior se realizará una comprobación en 3 puntos de medición ubicados en la zona donde se quiere comprobar la profundidad de la roca. Los puntos de medición elegidos son el 105, 132 y 148 los cuales se pueden ver en la Figura 4.17. La elección de estos puntos es debido a que están ubicados en distintas combinaciones de estratos y en posiciones donde debiese variar la profundidad de la roca.

Para determinar los espesores de cada uno de los estratos se hará uso del perfil transversal A-A' de la Figura 4.17. Para la velocidad de onda de corte se hará uso de las mediciones obtenidas en el Capítulo 2. Para las densidades se hará uso de los datos entregados por Retamal et al. (1969) en su modelo geotécnico presentado en la Figura 7.4, relacionándose los valores de los estratos de ese perfil transversal a los estratos más similares definidos en este trabajo. Dado que no se tiene antecedentes del valor de los amortiguamientos se hará uso del valor 2% para los estratos de suelo y 1% para la roca, considerando que variaciones de este valor presentan únicamente variaciones considerables en la amplitud del peak de la función de transferencia, pero no en el valor del periodo fundamental.

Los espesores asociados a cada punto de medición se presentan en las Tablas 4.8, 4.9, y 4.10. El espesor del estrato arenoso en la base del depósito de suelos se mantendrá variable dado que de éste depende el periodo predominante de la función de transferencia. Adicionalmente, se presentan los valores de velocidad de onda de corte y densidad utilizados para cada estrato.

Tabla 4.8: Datos asociados a la medición 105.

Medición 105			
Estrato	Espesor [m]	Velocidad [m/s]	Densidad [ton/m3]
Limo arcilloso con poca arena	12	149	1,4
Arena Limosa	25	283	1,4
Arena con poco limo	82	400	1,5
Arena	60	680	1,8
Roca metamórfica	-	2340	2,30

Tabla 4.9: Datos asociados a la medición 132.

Medición 132			
Estrato	Espesor [m]	Velocidad [m/s]	Densidad [ton/m3]
Arcilla	12	135	1,5
Arena Limosa	19	283	1,4
Arena con poco limo	82	400	1,5
Arena	35	680	1,8
Roca metamórfica	-	2340	2,30

Tabla 4.10: Datos asociados a la medición 148.

Medición 148			
Estrato	Espesor [m]	Velocidad [m/s]	Densidad [ton/m3]
Relleno artificial	4	87	1,2
Arcilla	11	135	1,5
Arena Limosa	18	283	1,4
Arena con poco limo	75	400	1,5
Arena	20	680	1,80
Roca metamórfica	-	2340	2,30

De acuerdo a los datos anteriores, se procedió a determinar la función de transferencia para cada uno de los puntos de medición determinando el espesor aproximado del último estrato de modo de obtener una frecuencia predominante similar a la obtenida por el método H/V. La Tabla 4.11 compara las frecuencias obtenidas por el método H/V y las frecuencias obtenidas por la función de transferencia. Adicionalmente las Figuras 4.18, 4.19, y 4.20 presentan los gráficos asociados a la función de transferencia entre la superficie del depósito y la base, en los cuales se puede apreciar las diferentes funciones de transferencia asociadas a la combinación de estratos utilizada.

Tabla 4.11: Comparación entre los periodos obtenidas por ambos métodos.

Medición	Periodo [s]	
	H/V	Función de transferencia
Medición 105	1,40	1,43
Medición 132	1,22	1,26
Medición 148	1,04	1,07

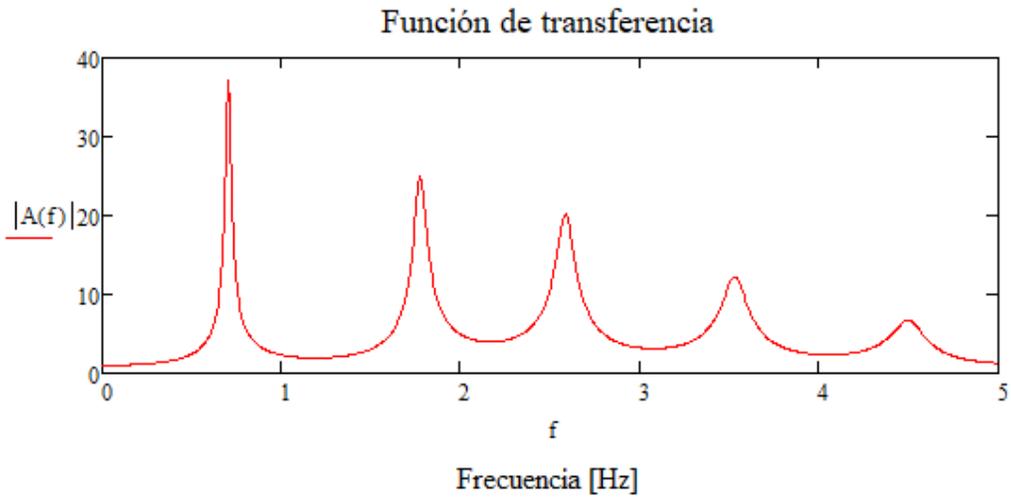


Figura 4.18: Función de transferencia asociada a la ubicación del punto 105.

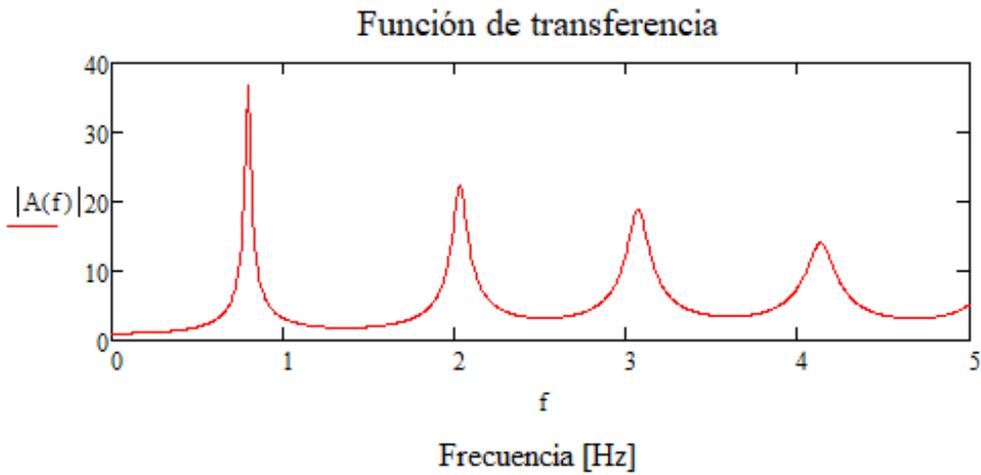


Figura 4.19: Función de transferencia asociada a la ubicación del punto 132.

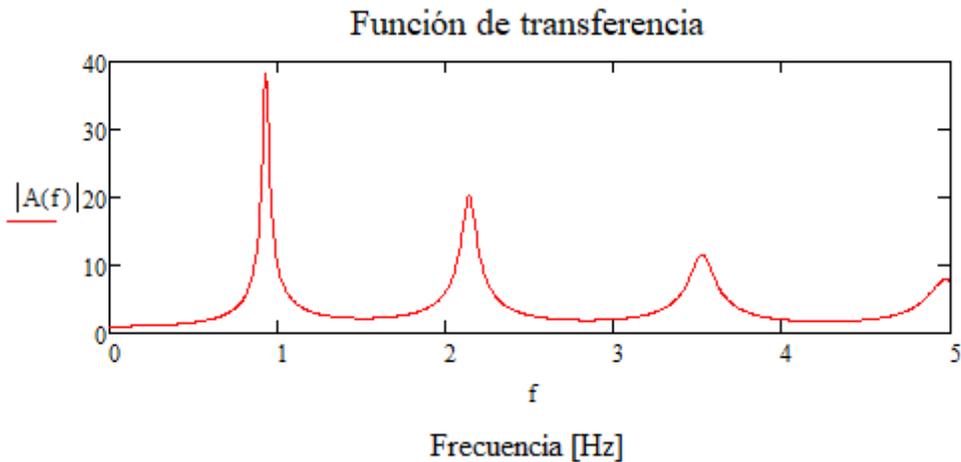


Figura 4.20: Función de transferencia asociada a la ubicación del punto 148.

La Tabla 4.12 muestra la comparación entre el espesor inferido del estrato de arena en el perfil transversal y el espesor calculado para la función de transferencia.

Tabla 4.12: Comparación del espesor del estrato de arena.

Medición	Estrato de arena	
	Espesor reportado [m]	Espesor calculado [m]
Medición 105	128	60
Medición 132	236	35
Medición 148	44	15

De acuerdo a la Tabla 4.12, se puede ver que la ubicación reportada de la roca no corresponde con las mediciones de H/V ya que la roca tiene que estar ubicada a una menor profundidad para que la función de transferencia sea consistente. Para determinar la función de transferencia, se asignaron propiedades de acuerdo a antecedentes bibliográficos y algunos supuestos como es el caso de la velocidad de onda de corte de la arena, pero aun así estos parámetros modificaban levemente la frecuencia predominante, siendo la ubicación de la roca el parámetro al cual era más sensible la frecuencia predominante.

5. Conclusiones

De acuerdo al estudio realizado sobre un total de 3975 estructuras afectadas por el terremoto de 1960 en la ciudad de Valdivia, el 12,8% resultó completamente destruidas, concentrándose la mayor parte de la destrucción en el estrato de relleno artificial ubicado en el centro de la ciudad provocada principalmente por grandes asentamientos. Adicionalmente el 21,3% de las estructuras sufrieron un daño menor, provocando agrietamiento o inclinación según su materialidad. Según los antecedentes bibliográficos vistos en el Capítulo 1, gran parte de este grupo de estructuras presentaban deficiencias asociadas a su construcción, o al estado de sus fundaciones en el momento del terremoto. Estas observaciones sugieren que el nivel de daño provocado por el terremoto de Valdivia esta principalmente asociado a factores constructivos y al relleno artificial, el cual presentó asentamientos excesivos, generando una gran cantidad de fallas en las fundaciones de las estructuras ubicadas en esta zona.

La cantidad de estructuras que fallaron únicamente producto de la aceleración generada por el terremoto no se puede cuantificar. Sin embargo, en vista de los antecedentes, y el bajo porcentaje de daño en estratos de mejor calidad, es posible afirmar que el daño por las aceleraciones inducidas fue menor en comparación al daño producto de una mala construcción y el relleno artificial. Como prueba de lo anterior, es posible observar estructuras ubicadas en zonas de alto porcentaje de destrucción, que no presentaron daño durante el terremoto, como las estructuras de hormigón correspondientes al edificio Prales y el Hotel Pedro de Valdivia, o estructuras de madera como las casas ubicadas en la calle Yungay y que son consideradas emblemáticas, ya que han perdurado en el tiempo sin sufrir daños.

De acuerdo con las velocidades de ondas de corte medidas dentro de la ciudad de Valdivia, se puede ver que los resultados son coherentes con la estratigrafía propuesta por los perfiles A-A' y B-B'. También se pudo detectar que las velocidades de los estratos más superficiales como el de arcilla y el de arena limosa estaban entre los 150 y 200 [m/s], mientras que para el relleno artificial se midió una velocidad de aproximadamente 80 [m/s]. Según lo anterior, se pueden corroborar el hecho de que la mayor cantidad de daño se concentrara en el relleno artificial debido a su deficiente capacidad de soporte, lo cual genero asentamiento en las estructuras que contenía, mientras que esto no ocurrió en los estratos de arena limosa y arcilla.

Con respecto a la aplicabilidad de método de las razones espectrales H/V en la ciudad de Valdivia, se pudo comprobar que el periodo dentro de la zona de estudio estaba ubicado entre los 0,7 y 1,5 segundos, reconociéndose sectores de mayor y menor periodo. Al comprar el valor de los periodos con los perfiles transversales presentados en el Anexo 4, fue posible observar que la geología superficial guardaba relación con el periodo. Sin embargo, la ubicación reportada de la roca si era coherente con los resultados obtenidos, siendo más profunda en las zonas de mayor periodo y más superficial en las zonas de menor periodo. Adicionalmente, mediante el método de propagación de onda en medio multi-capas se determinó la posibilidad de que la roca en general esté ubicada en una posición más superficial que la presentada en los perfiles transversales.

De acuerdo a lo anterior, fue posible detectar zonas con mayor y menor periodo dentro de la ciudad de Valdivia asociado, posiblemente, a su topografía local, pero aun así no fue posible detectar zonas donde hubiese ocurrido un efecto de sitio. Se puede afirmar que el daño estuvo únicamente relacionado a los estratos superficiales y a la calidad de las estructuras. Esto, ya que para el terremoto de 1960 las estructuras existentes eran principalmente casas de madera o albañilería con periodos menores a 0,7 segundos, y las pocas estructuras de hormigón no superaban los 7 pisos de altura. Dado que el rango de periodos en el suelo de Valdivia es superior a los periodos de las estructuras de esa época no fue posible asociar el daño documentado durante el terremoto al periodo de las estructuras, ni detectar periodos en los cuales pudiese haber habido mayores aceleraciones. Lo anterior sugiere que mientras las estructuras en Valdivia cumplan las normas vigentes, sus fundaciones estén ubicadas en estratos competentes, y su altura sea tal que su periodo sea menor a 0,7 segundos, otro sismo de similares condiciones no debiese generar daños excesivos. Para edificios con periodos mayores, no es posible determinar cómo responderá si se encuentra ubicado en las zonas de mayor periodo dentro de la ciudad.

Finalmente, las recomendaciones que surgen a partir de este estudio están asociadas a prevenir posibles daños futuros y estudiar de forma más completa la ciudad de Valdivia.

- Estructuras antiguas de madera, albañilería y hormigón que no cumplan con las normativas vigentes deben ser reforzadas para prevenir posibles daños. Esto incluye todas las estructuras antiguas que presentan estructuraciones mixtas con albañilería u hormigón sin reforzar. También, en el caso de las estructuras de madera, se deben revisar la cantidad de clavos y el estado de sus fundaciones.
- Se recomienda que todas las estructuras ubicadas en las zonas de relleno artificial deben poseer fundaciones que no estén en contacto con este estrato o haber realizado un mejoramiento del suelo de fundación. Esto debido a posibles asentamientos futuros.
- Se debe tener en cuenta que el periodo fundamental del suelo de la ciudad de Valdivia varía entre 0,7 y 1,5 segundos. Esto se debe tener en consideración al momento de diseñar una estructura con periodos similares pues se desconoce cómo esta responderá durante un nuevo terremoto.
- En el sector sur-este de Valdivia no se pudo determinar el periodo predominante del suelo debido a que las mediciones en ese sector no entregaban una lectura con un peak claro, ya que los estratos presentes en este sector son más competentes y la roca se encuentra a menor profundidad. Dado el bajo contraste de impedancia no es posible obtener buenas mediciones por lo que se recomienda realizar otros métodos de estudios para analizar el comportamiento de estos suelos.
- De acuerdo a los resultados obtenidos por el método de propagación en onda en medio multicapa se ha determinado la posibilidad de que la profundidad de la roca en Valdivia sea menor a la reportada en investigaciones anteriores, por lo que se hace necesario

verificar esta información. A pesar de esto, y debido a que la roca probablemente este una profundidad cercana a los 100 metros. se recomienda el uso de métodos indirectos.

6. Bibliografía

Alvarado, D., 2012. "Microzonificación sísmica de la ciudad de Valdivia. Etapa 1: Determinación del peligro uniforme y caracterización dinámica de los suelos empleando la técnica de la razón espectral de nakamura.", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Austral de Chile, Valdivia.

Arenas, M., Jara, C., Milovic, J., Pérez, Y., Troncoso, R., Behlau, J., ... y Helms, F., 2004. "Geología para el ordenamiento territorial: área de Valdivia, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería".

Astroza, M. y Lazo, R., 2010. "Estudio de los daños de los terremotos del 21 y 22 de mayo de 1960", Universidad de Chile

Barozzi, R. y Lemke, R., 1966. "El suelo de fundación de la ciudad de Valdivia", Instituto de Investigaciones Geológicas, Estudios geotécnicos N°1, Santiago.

Barrientos, S. y Ward, S., 1990. "The 1960 Chile earthquake: inversion for slip distribution from surface deformation", *Geophysical Journal International*.

Cambiazo, C., 1961. "Daños en las estructuras causados por el sismo del 22 de mayo de 1960 en las provincias de Valdivia, Osorno y Llanquihue", Informes sobre sismos de mayo 1960, Universidad de Chile.

Chavez-Garcia, F. and Bard, P., 1994. "Site effects in Mexico City eight years after the September 1985", Michoacan earthquakes, *Soil Dyn, Earthquake Eng.*

Doyel, W., Moraga, A. y Falcon, E., 1963. "Relation between the Geology of Valdivia, Chile, and the damage produced by the earthquake of 22 May 1960", *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 53.

Duke, C. y Leeds, D., 1963. "Response of soils, foundations, and earth structures to the chilean earthquakes of 1960", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 53.

Flores, R., 1976. "Recuento y lecciones de los terremotos de mayo 1960", *Segundas Jornadas Chilenas de sismología e ingeniería antisísmica*, Santiago.

Fundación Chilena de Geotecnia, 2014. "Caracterización geotécnica entre Copiapó y Valdivia", Rev 1.

Godoy, C., González, L., y Sáez, E., 2015. "Importancia de la velocidad de onda de corte y del período predominante para la evaluación de la respuesta de sitio en Santiago", *Obras y proyectos*.

Lastrico, R., 1967." Relación entre los daños en los terremotos de 1960 y los suelos de fundación de Valdivia", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago.

- Lazo, R., 2008. "Estudio de los daños de los terremotos del 21 y 22 de mayo de 1960", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago.
- Lermo, J. & Chávez-García, F., 1993. "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station", *Bulletin of the seismological society of America*, 83(5): 1574-1594.
- Leyton, F., Ruiz, S., Sepúlveda, S., Contreras, J., Rebolledo, S., & Astroza, M., 2013. "Microtremors HVSR and its correlation with Surface geology and damage observed after the 2010 Maule earthquake (Mw 8.8) at Talca and Curicó", Central Chile, *Engineering Geology*.
- Moreno, M. S., Bolte, J., Klotz, J. & Melnick, D., 2009. "Impact of megathrust geometry on inversion of coseismic slip from geodetic data: application to the 1960 Chile earthquake", *Geophys. Res. Lett.*, 36, L16310.
- NCh 433 of. 1996, 2012. "Diseño sísmico de edificios", Instituto Nacional de Normalización.
- NCh 1508 of. 2008. "Geotecnia - Estudio de Mecánica de Suelos", Instituto Nacional de Normalización.
- Nakamura, Y., 1989. "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface", Quarterly report of railway technical research institute.
- Pastén, C., Lezna, F., Leyton, F. y Ruiz, S., 2015. "Razones espectrales H/V de una red temporal de estaciones sismológicas en la Cuenca de Santiago", Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica.
- Pastén, C., 2007. "Respuesta Sísmica de la Cuenca de Santiago", Memoria para optar al grado de Magister, Universidad de Chile.
- Retamal, E., Norambuena, C., Veiga, J. y Ortigosa, P., 1969. "Microrregionalización sísmica de la ciudad de Valdivia", Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Lima, Perú.
- Retamal, E., 1978. "Informe de mecánica de suelos: Barrios Bajos de Valdivia entre calles Baquedano, Pérez Rosales, Frick y Phillippi", IDIEM (Instituto de Investigaciones y Ensayes de Materiales), Universidad de Chile, Santiago.
- Rojas, C., 2003. "Geomorfología del sitio de la ciudad de Valdivia", XXIV Congreso Nacional y IX Internacional de Geografía, 10-14 de noviembre de 2003, Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso.
- Rojas, C., 2010. "Valdivia 1960. Entre aguas y escombros", Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- 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 Ingeniería Sísmica, Universidad de Chile.

Saint, P., 1961. "Observaciones e interpretación de los terremotos chilenos de 1960", Comunicación de la escuela de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Schnabel, P., J. Lysmer and H. Seed. 1970. "SHAKE - A Computer Program for the Earthquake Response for Horizontally Layered Sites", EERC Report No. 72-2, University of California, Berkeley.

Servicio Nacional de Geología y Minería, 2004. "Geología para el ordenamiento territorial: Área de Valdivia, Región de los Ríos. Mapa 6: Características Geotécnicas Básicas y Respuesta Sísmica", Santiago.

Siemens, H., 1853. "Plano de Valdivia, 1853", Memoria Chilena. Biblioteca Nacional Digital de Chile.

Sobarzo, D., Moffat R., 2016. "Ejemplo de variabilidad vertical y horizontal en un sector de Valdivia mediante sondajes CPTu", IX Congreso Chileno de ingeniería geotécnica, Sociedad Chilena de Geotecnia (SOCHIGE).

Steinbrugge, K. y Flores, A., 1963. "The chilean earthquakes of May, 1960: A structural engineering viewpoint", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 53.

Tsige, M. y García-Flórez, I., 2006. "Propuesta de clasificación geotécnica del "Efecto Sitio" de las formaciones geológicas de la región de Murcia", Geogaceta.

Watanabe, T. y Karzulovic, J., 1960. "Los movimientos sísmicos del mes de mayo de 1960 en Chile", Universidad de Chile, Anales, Vol. 17.

Weishet, W., 1960. "Contribuciones al estudio de las transformaciones geográficas en la parte Septentrional del Sur de Chile por efecto del sismo del 22 de mayo de 1960", Universidad de Chile, Anales, Vol. 17.

Weishet, W., 1963. "The distribution of the damage caused by the earthquake in Valdivia in relation to the terrane", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 53.

7. Anexos

7.1 Anexo 1 “Principales antecedentes para el análisis geológico y geotécnico de la ciudad de Valdivia”

7.1.1 Mapa del suelo de fundación de Valdivia (Barozzi y Lemke, 1966)

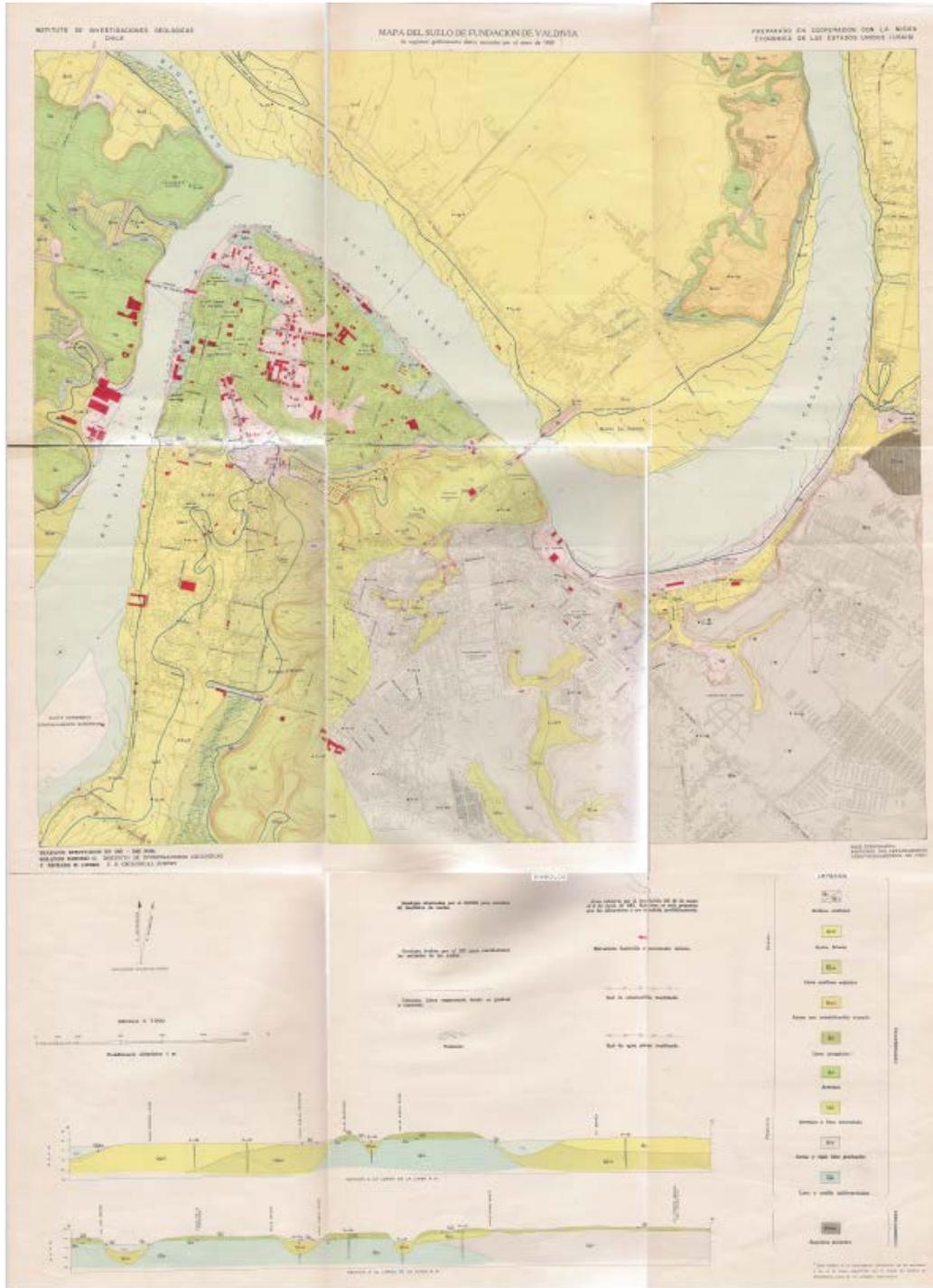


Figura 7.1: Mapa del suelo de fundación de Valdivia (Barozzi y Lemke, 1966).

7.1.2 Antecedentes geológicos y geotécnicos de la ciudad de Valdivia (Retamal et al., 1969)

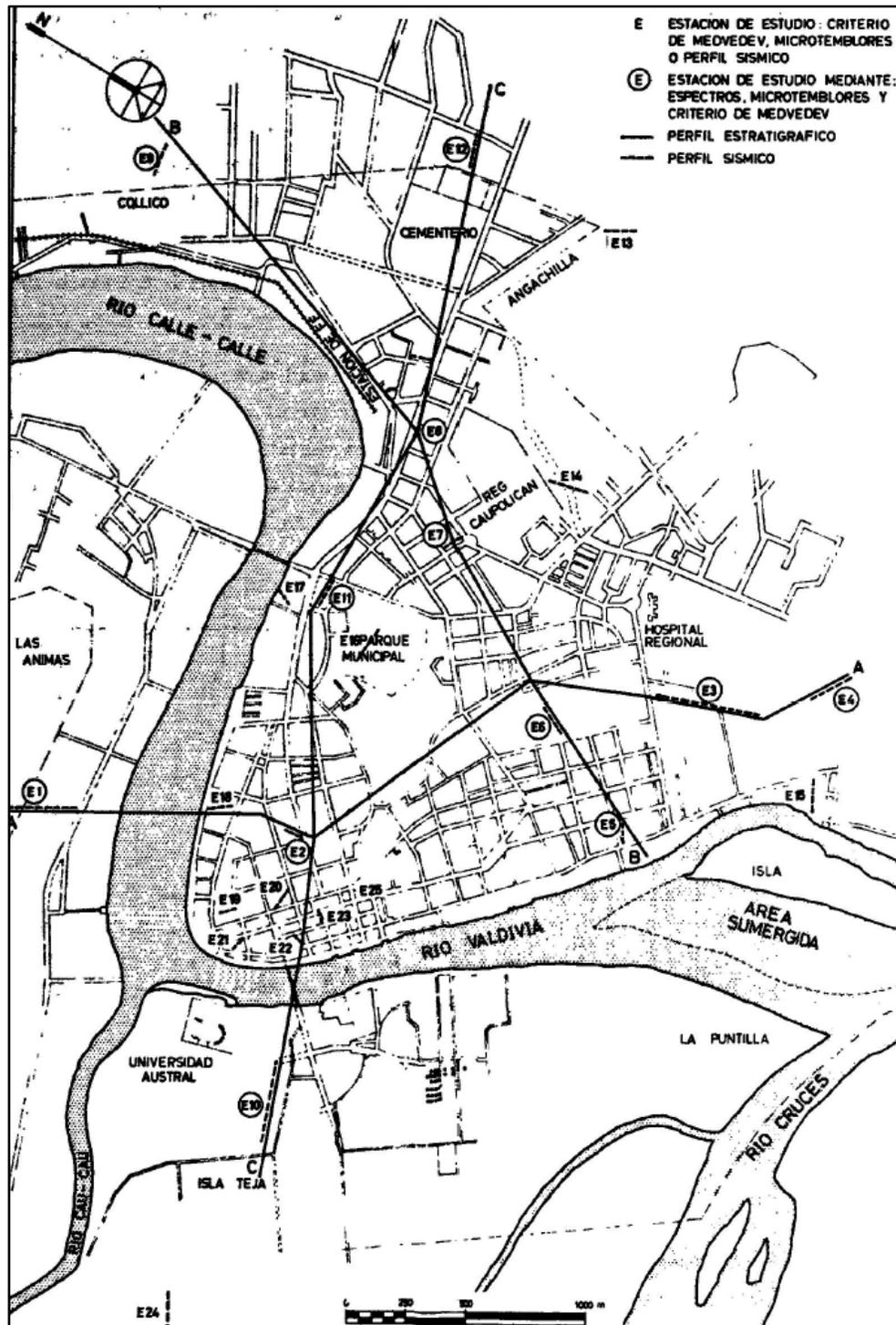


Figura 7.2: Plano de ubicación de las estaciones de medición en Valdivia (Retamales et al., 1969).

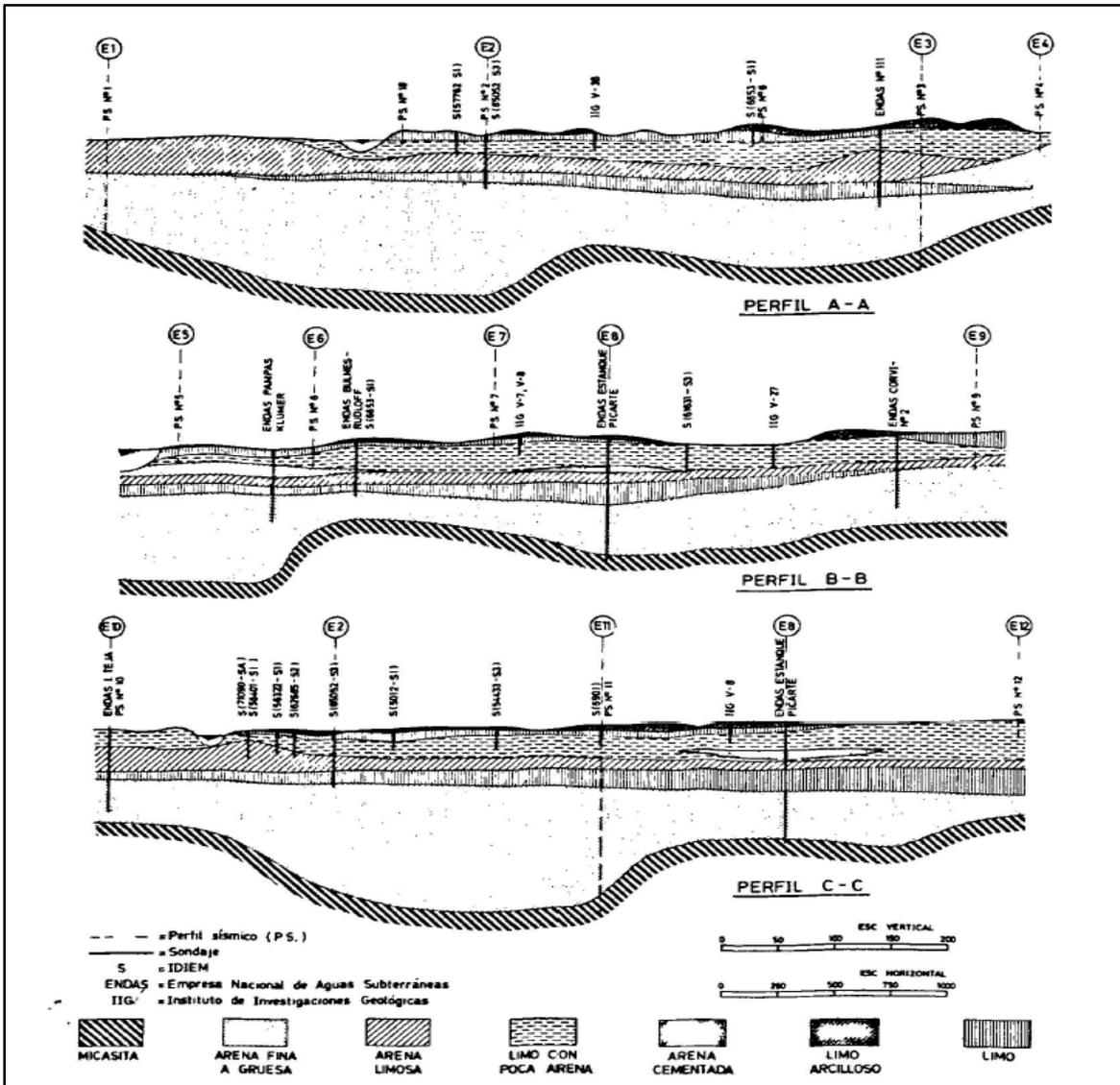


Figura 7.3: Perfiles transversales (Retamal et al., 1969).

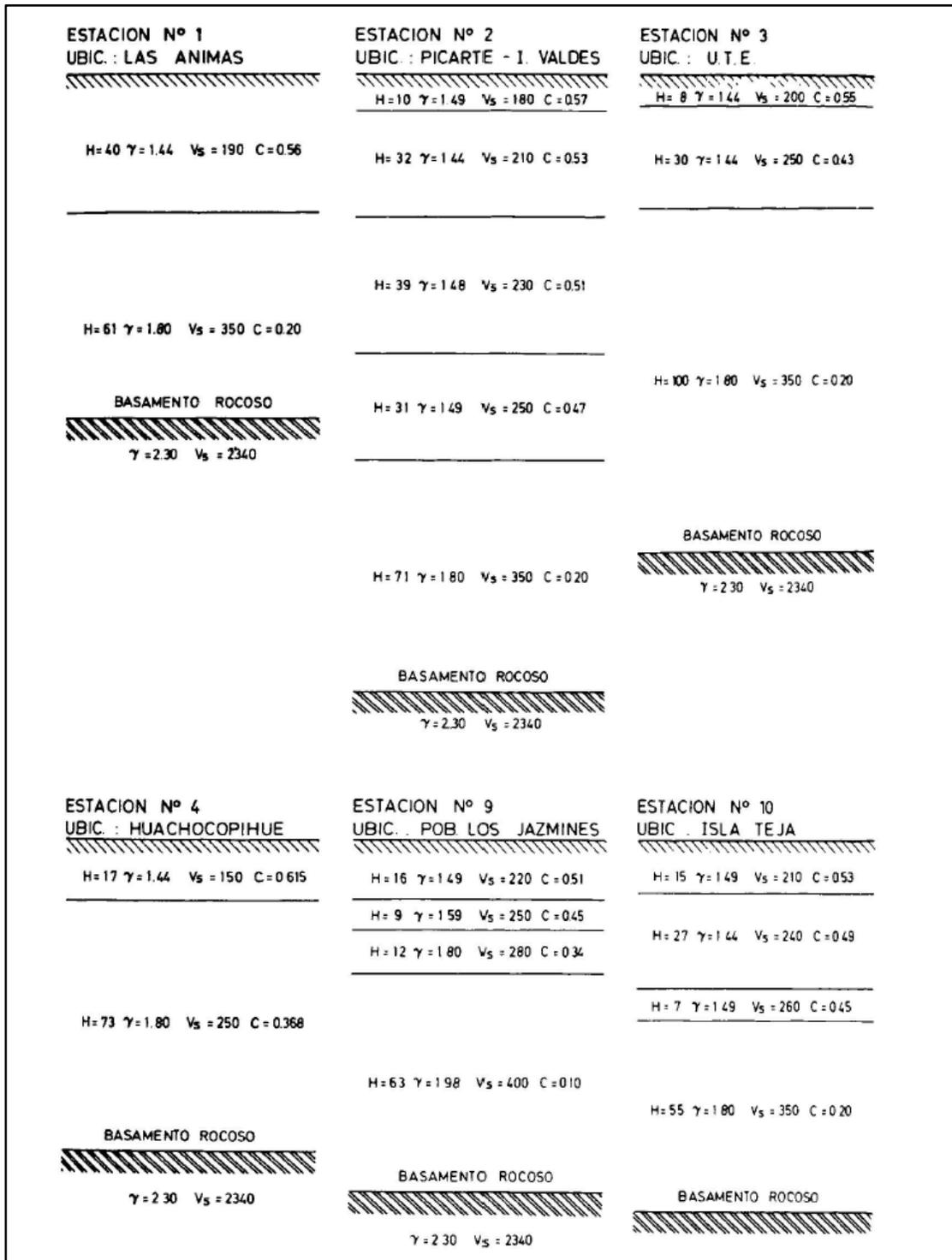


Figura 7.4: Estratigrafía de estaciones 1, 2, 3, 4, 9 y 10, junto a sus propiedades geotécnicas (Retamal et al., 1969).

7.1.3 Mapa de la geología y características geotécnicas de la ciudad de Valdivia (Arenas et al, 2004)

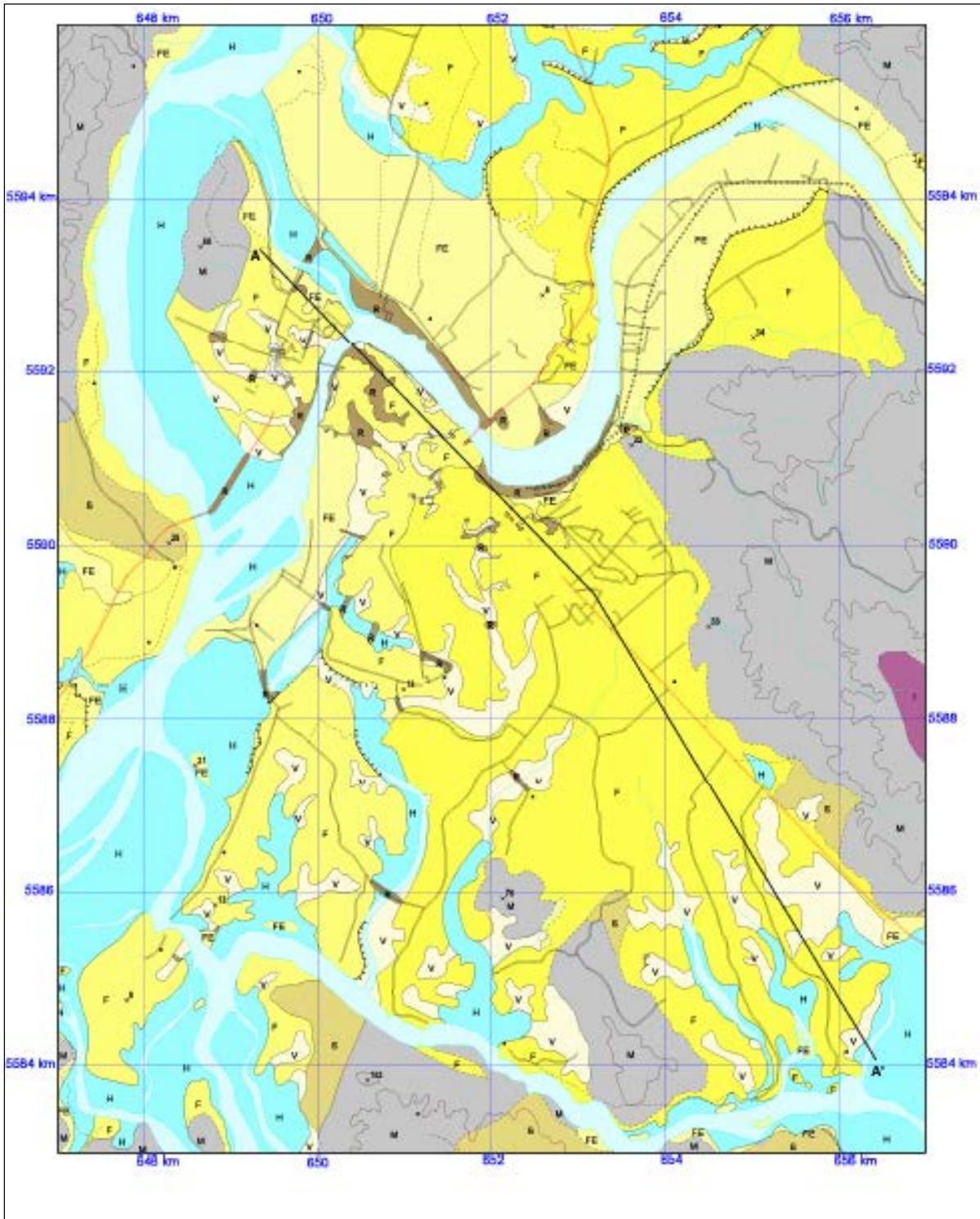


Figura 7.5: Mapa de geología y características geotécnicas (Arenas et al, 2004).

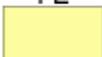
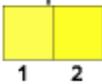
	Descripción	Características geotécnicas
R 	Relleno Artificial Composición y espesores muy variables. Contienen arcillas, limos, arenas, gravas, escombros, maderas, desechos y bloques de roca. Los espesores van desde algunos centímetros hasta 9 m en el caso de algunos terraplenes de calles.	Muy variables. En algunos sectores presenta un alto contenido de agua. En general, posee alta compresibilidad debido a la escasa compactación. Mayores daños a infraestructura y edificios durante el terremoto de 1960.
H 	Humedales Depósitos de pantano de hasta 3 m de espesor sobreyaciendo a sedimentos fluviales. Arcillas, limos y arenas finas, con alto contenido de material orgánico. Gravas y arena gruesa.	Muy alto contenido de agua. Muy alta plasticidad y baja consistencia de los sedimentos pantanosos. Terrenos inundados desde el terremoto de 1960.
V 	Vegas Depósitos de pantano y fluviales recientes (PIHf)*. Arcillas y limos con alto contenido de material orgánico y lentes de arena. Algunos sectores están urbanizados.	Alto contenido de agua. Muy alta compresibilidad de los niveles superiores. Limos de alta y baja plasticidad, de consistencia baja y compresibilidad alta. Las lentes de arena tienen compacidad media y baja compresibilidad. Suelos potencialmente agresores del hormigón y del hierro de estructuras enterradas, debido a los altos contenidos de materia orgánica y sales solubles (sulfatos).
FE 	Depósitos fluviales y estuarinos Sedimentos recientes (PIHf)* constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas con algunos lentes de alto contenido orgánico.	Medio a alto contenido de agua. Arenas de compacidad media y de baja compresibilidad. Limos y arcillas de alta a baja plasticidad, consistencia baja y compresibilidad alta. Lentes de alto contenido orgánico potencialmente agresores del hormigón y del hierro de estructuras enterradas.
F 	Depósitos fluvio-estuarinos Secuencia de sedimentos antiguos (PIfe)* compuestos de arcillas, limos, arenas y gravas. Localmente arcillas con alto contenido de material orgánico e intercalaciones de turba. 1: Estrato continuo de 0,5 – 2,0 m de arena limosa moderadamente cementada. En algunos sectores se puede encontrar más de un nivel de esta capa. 2: Localmente estrato de arena limosa moderadamente cementada.	Moderado a alto contenido de agua. En los niveles superiores se encuentran limos arcillosos de alta y baja plasticidad, altamente compresibles y consistencia baja. Arenas finas limosas de compresibilidad moderada y compacidad media a alta. Arena limosa moderadamente cementada de consistencia media a alta y compresibilidad despreciable para las tensiones habituales en construcciones de baja a mediana altura.
S 	Rocas sedimentarias Areniscas y fangolitas marinas (Msd)*.	En algunos sectores presentan un alto grado de fracturación y moderada a alta meteorización.
I 	Roca intrusiva Dacita porfírica (Kdl)*.	Moderado a alto grado de meteorización.
M 	Rocas metamórficas Esquistos, esquistos máficos, metareniscas y rocas máficas y ultramáficas (PzTrbm)*.	Pueden presentar zonas de falla y alto grado de meteorización y fracturación. Disposición de planos de esquistosidad muy variables.
	* Los códigos se refieren a las unidades descritas en el mapa temático Base Geológica	

Figura 7.6: Descripción y características geotécnicas (Arenas et al, 2004).

7.1.4 Sondajes realizados por la empresa M.A.H.S.

Los sitios 1 y 2 no se documentaron debido a que su ubicación está fuera de la zona de estudio.

1) Estación 3a

Tabla 7.1: Estratigrafía asociada a la estación 3a de la empresa M.A.H.S.

Sondaje 3a- Estratigrafía	
Profundidad [m]	Clasificación
0,00 – 0,25	Hormigón.
0,25 – 0,70	Rellenos de base granular.
0,70 – 2,15	Arenas limosas color café amarillento, de granos muy finos, compacidad media, humedad baja, de plasticidad baja con algunas raicillas.
2,15 – 5,10	Arenas color café amarillenta, con bajo porcentaje de finos limosos, compacidad media, humedad baja, sin plasticidad, con presencia de algunos trozos de arenas cementadas.
5,10 – 6,50	Arenas finas a muy finas, color gris oscuro, con muy bajo porcentaje de finos limosos, compacidad muy alta, humedad alta y sin plasticidad.
6,50 – 7,40	Limo arcilloso color café claro a oscuro, consistencia media, humedad baja, plasticidad alta, con presencia de algunos lentes cementados.
7,40 – 11,50	Arenas finas a muy finas, con bajo porcentaje de finos limosos, compacidad muy alta, humedad alta, sin plasticidad, con pequeños lentes de arenas muy cementadas.
11,50 – 13,15	Limo arcilloso color gris claro a verdoso, consistencia muy alta y plasticidad alta con lentes muy cementados.
13,15 – 30,00	Arenas finas a muy finas, con muy bajo porcentaje de finos limosos, color gris oscuro, compacidad muy alta, humedad alta y sin plasticidad.

2) Estación 3b

Tabla 7.2: Estratigrafía asociada a la estación 3b de la empresa M.A.H.S..

Sondaje 3a- Descripción Visual	
Profundidad [m]	Clasificación
0,00 – 0,30	Rellenos de base granular.
0,30 – 0,62	Limo color gris oscuro y café, con presencia de raicillas, humedad baja y plasticidad alta.
0,62 – 2,40	Arenas finas bastantes limosas, color café amarillenta, compacidad muy baja, humedad baja y plasticidad.
2,40 – 4,45	Arenas finas limosas, color gris oscuro a verdoso, con lentes de limo color gris, compacidad media, humedad baja y con plasticidad.

4,45 – 5,20	Arenas muy finas, color gris oscuro, compacidad media, humedad media, sin plasticidad y con algunos trozos de arenas cementadas.
5,20 – 6,60	Limo color gris verdoso, consistencia baja, humedad baja, plasticidad alta y con algunos grumos cementados.
6,60 – 28,10	Arenas muy fina a fina, color gris oscuro, con muy bajo porcentaje de finos limosos, compacidad muy alta, humedad alta, sin plasticidad y algunos lentes de arenas cementadas.
28,10 – 29,92	Arenas finas de color gris oscuro, con muy bajo porcentaje de finos limosos, compacidad muy alta, humedad alta, sin plasticidad, con algunos granos de cuarzo y algunas micas muy aisladas.

3) Estación 4a

Tabla 7.3: Estratigrafía asociada a la estación 4a de la empresa M.A.H.S.

Sondaje 3a- Descripción Visual	
Profundidad [m]	Clasificación
0,00 – 0,40	Capa de limo vegetal color café oscuro, humedad baja y plasticidad media a alta.
0,40 – 3,80	Limo levemente arenoso color café algo amarillento, consistencia baja, humedad baja, plasticidad alta y con bastantes raíces y raicillas.
3,80 – 5,50	Arenas limosas color café a gris verdoso, compacidad media, humedad baja, plasticidad media a alta con pequeños lentes de limo cementado.
5,50 – 7,10	Arenas limosas de grano fino, color café a gris verdoso, compacidad alta y humedad baja con algo de plasticidad.
7,10 – 12,15	Limo color gris claro algo arenoso con pequeños lentes cementados, consistencia baja, humedad baja y plasticidad media a alta.
12,15 – 14,10	Arenas muy limosas de grano fino a medio, color gris, compacidad media, humedad alta, con plasticidad y bastantes micas.
14,10 – 15,25	Limo color café oscuro con bastante madera descompuesta, consistencia muy baja, humedad alta y plasticidad alta.
15,25 – 19,50	Limo color café verdoso, consistencia media, humedad media, plasticidad alta, con presencia de madera descompuesta y bastantes micas.
19,50 – 21,50	Limo color gris verdoso, consistencia baja, humedad baja, plasticidad alta, con bastantes micas.
21,50 – 23,40	Limo color gris verdoso, consistencia media, humedad baja, plasticidad alta, con bastantes micas.
23,40 – 25,30	Arenas finas a medias, muy limosas, color gris oscuro a verdoso, compacidad media, humedad alta y con bastante plasticidad.
25,30 – 26,60	Limo color gris verdoso, consistencia baja, humedad baja y plasticidad alta.
26,60 – 29,10	Limo color gris verdoso, consistencia media, humedad baja y plasticidad alta.
29,10 – 30,40	Arenas de grano fino muy limosas, compacidad media, humedad alta, con bastante plasticidad, color gris verdoso y bastantes micas y cuarzo.

30,40 – 34,50	Arenas grano fino, muy limosas, compacidad alta, humedad alta, con bastante plasticidad, color gris verdoso y bastantes micas y cuarzo.
34,50 – 35,02	Arenas grano fino muy limosas compacidad muy alta humedad alta con bastante plasticidad color gris verdoso bastantes micas y cuarzo.

4) Estación 4b

Tabla 7.4: Estratigrafía asociada a la estación 4b de la empresa M.A.H.S.

Sondaje 3a- Descripción Visual	
Profundidad [m]	Clasificación
0,00 – 0,25	Capa de limo vegetal, de color café oscuro, humedad baja, plasticidad media a alta con bastantes presencia de raíces y raicillas.
0,25 – 3,80	Limo de color café amarillento, consistencia baja, humedad baja, plasticidad alta con bastantes raíces y raicillas.
3,80 – 5,60	Arenas finas limosas de color café a gris, compacidad media, humedad alta, con algo de plasticidad y con presencia de algunos lentes cementados.
5,60 – 6,40	Arenas finas limosas de color café a gris, compacidad alta, humedad alta, con algo de plasticidad y con algunos lentes cementados.
6,40 – 7,35	Limo de color café oscuro con bastante madera descompuesta, consistencia muy baja, humedad baja a media y plasticidad muy alta.
7,35 – 8,54	Limo color gris algo verdoso, consistencia baja, humedad media y plasticidad alta.
8,54 – 12,20	Limo color gris algo verdoso, consistencia muy baja, humedad media y plasticidad alta.
12,20 – 14,10	Arenas muy finas limosas de color gris verdoso, compacidad baja, humedad alta, con plasticidad y bastantes micas.
14,10 – 19,63	Limo color café a gris verdoso, consistencia baja, humedad baja, plasticidad alta, con algunos lentes muy delgados de arenas finas y bastantes arenas descompuesta.
19,63 – 22,50	Limo color café a gris verdoso, consistencia media, humedad baja, plasticidad alta con algunos lentes muy delgados de arenas finas y bastantes arenas descompuestas.
22,50 – 25,10	Arenas finas muy limosas de color gris verdoso, compacidad media, humedad alta con plasticidad, bastantes micas y cuarzo grano fino.
25,10 – 26,57	Limo color gris verdoso, consistencia media, humedad baja, plasticidad alta con bastantes micas.
26,57 – 28,10	Limo color gris verdoso, consistencia baja, humedad baja, plasticidad alta con bastantes micas.
28,10 – 29,15	Arenas finas limosas de color gris verdoso, compacidad muy alta, humedad alta con algo de plasticidad con lentes de arenas cementadas.

29,15 – 30,14	Arenas finas limosas de color gris verdoso, compacidad muy alta, humedad alta, con algo de plasticidad con algunas micas y cuarzo grano fino.
---------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

7.1.5 CPT realizado por la empresa LMMG Geotecnia

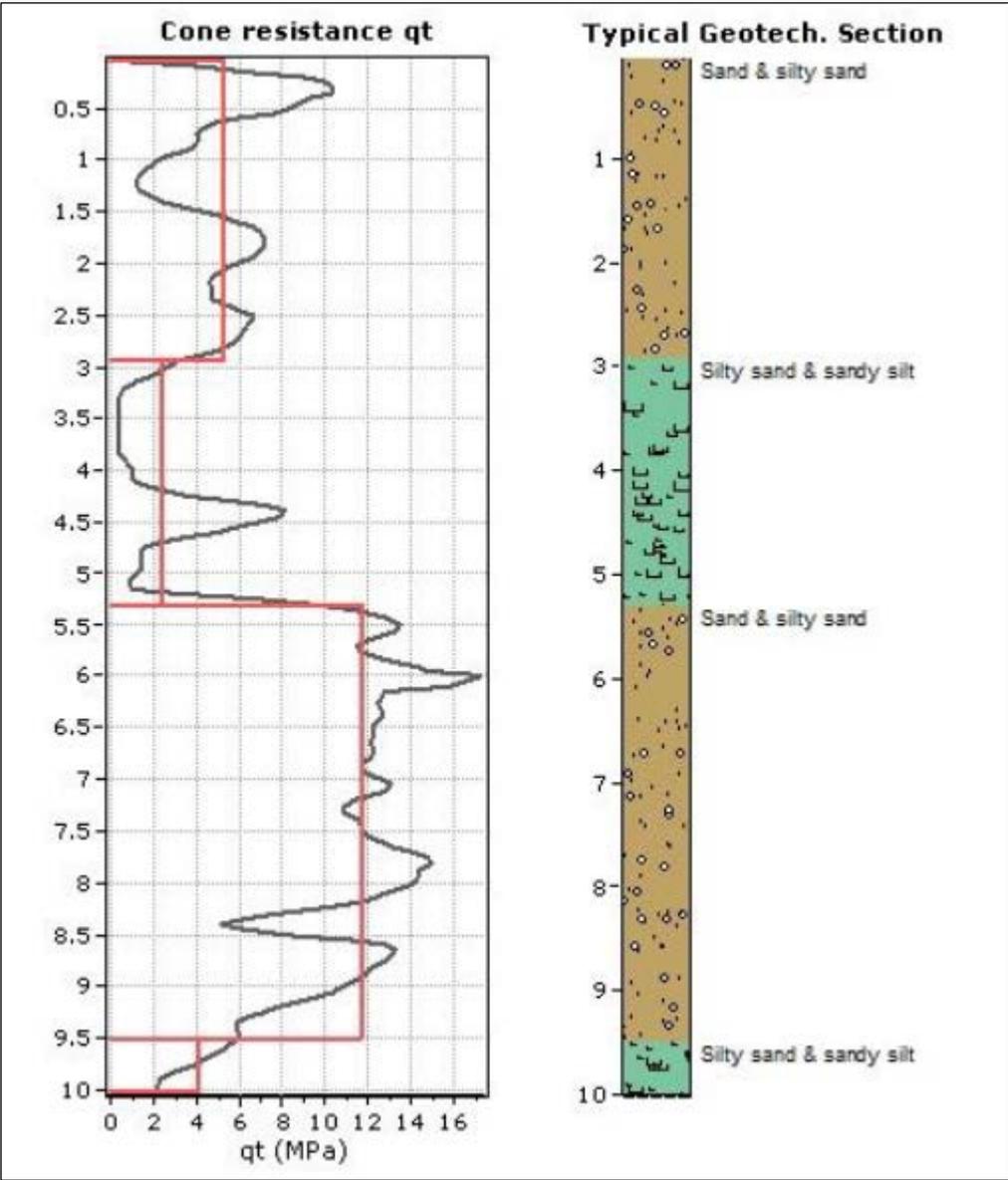


Figura 7.7: CPT 1, Resistencia de cono y clasificación típica de los estratos.

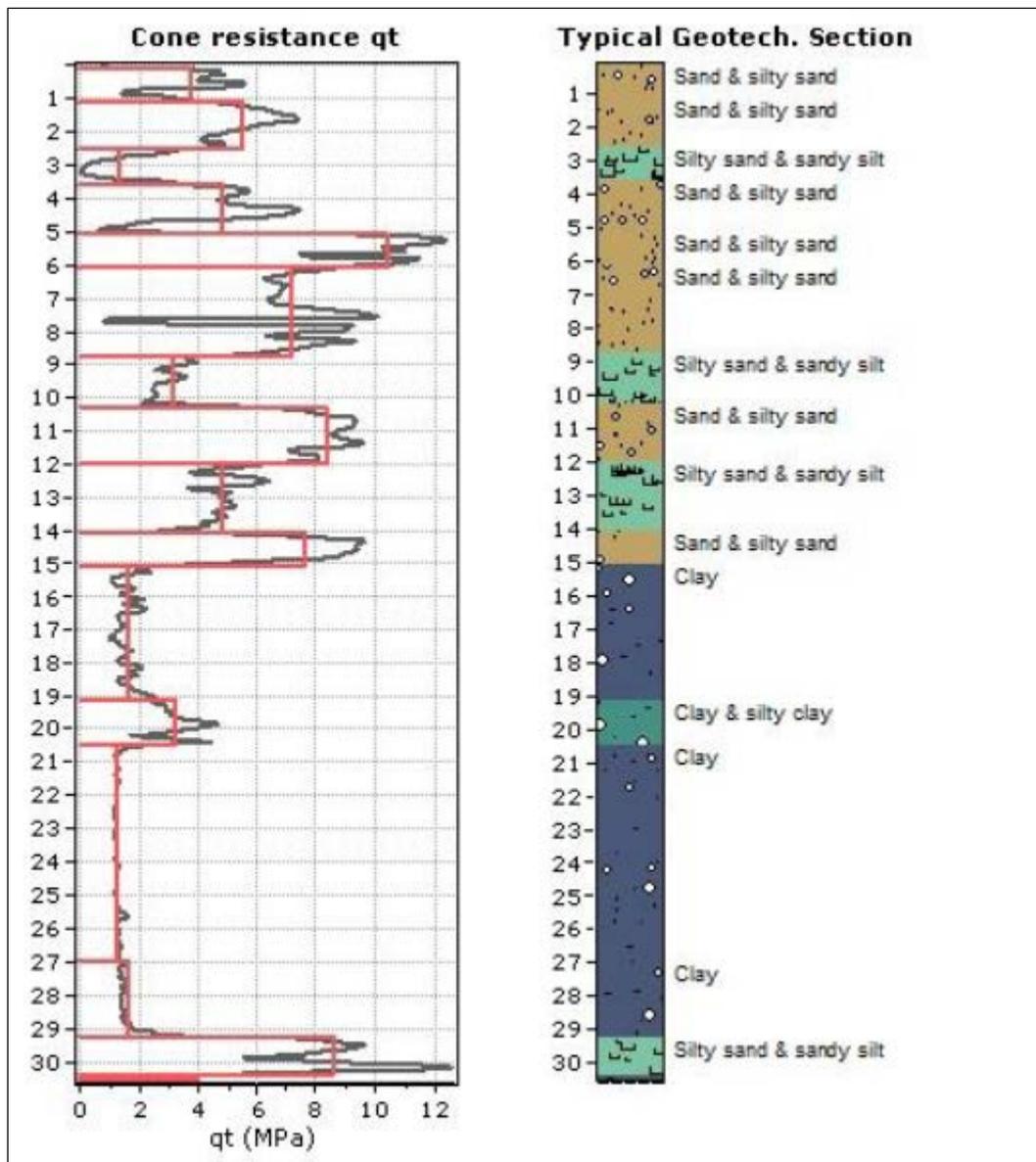


Figura 7.8: CPT 2, Resistencia de cono y clasificación típica de los estratos.

7.1.6 Sondajes y modelos de velocidad de onda de corte realizados por FUCHIGE

1) Estación 1

Tabla 7.5: Estratigrafía asociada a la estación 1 de FUCHIGE.

Sondaje 1 – Estratigrafía	
Profundidad [m]	Clasificación
0,0 - 0,20	Relleno de material integral. Los áridos color gris, tamaño máximo 1 1/2".
0,20 - 1,25	Arena limosa, color café oscuro, tamaño fino, compacidad baja, humedad baja. Los finos presentan baja plasticidad. También raíces finas en alta proporción
1,25 - 3,40	Arena, color café con matices de color verde, tamaño fino, compacidad baja, humedad baja. Presenta partículas de cuarzo en media proporción. También presenta raíces finas en forma aislada
3,40 - 4,50	Arcilla, color café con trices de color amarillo, consistencia blanda, humedad media alta, plasticidad alta
4,50 - 5,35	Arcilla, color gris oscuro, consistencia blanda, humedad alta, plasticidad media. Presenta raíces finas en estado descompuesto
5,35 - 6,55	Arena con alto contenido de limo. Color gris claro, tamaño fino, compacidad media, humedad alta. Los finos presentan plasticidad baja
6,55 - 7,40	Arena limosa, color café oscuro con matices de color verde, tamaño fino, compacidad alta, humedad media. Los finos presentan plasticidad baja. También presenta lentes de arena en estado cementado en forma aislada
7,40 - 9,10	Arena con bajo contenido de limo, color negro, tamaño fino, compacidad muy alta, humedad media. Presenta partículas de cuarzo de tamaño fino en baja proporción
9,10 - 10,45	Limo orgánico, color gris oscuro, consistencia blanda, humedad alta, plasticidad media. Presenta pequeño trozos de madera en estado descompuesto
10,45 - 14,35	Arena con bajo contenido de limo, color gris oscuro, tamaño fino, compacidad muy alta, humedad media. Partículas de cuarzo, tamaño fino en baja proporción.
14,35 - 16,25	Cancagua, color amarillo claro con matices de color café oscuro, compacidad muy alta, humedad baja. Presenta lentes de arena en estado cementado (arenisca), color gris oscuro
16,25 - 29,97	Arena con baja contenido de limo, color gris oscuro, tamaño fino, compacidad muy alta, humedad alta. Presenta partículas de cuarzo, tamaño fino en forma aislada

Tabla 7.6: Perfil de velocidad de onda de corte asociado a la estación 1 de FUCHIGE.

Perfil 1		Perfil 2	
Profundidad [m]	Vs [m/s]	Profundidad [m]	Vs [m/s]
0,0 - 3,96	193	0,0 - 3,96	154
3,96 - 12,08	374	3,96 - 12,08	763
12,08 - 19,55	705	12,08 - 19,55	1007
19,55 - 29,20	232	19,55 - 29,20	326
29,20 - 40,34	348	29,20 - 40,34	183
40,34 - 50,00	599	40,34 - 50,00	561

2) Estación 2

Tabla 7.7: Estratigrafía asociada a la estación 2 de FUCHIGE.

Sondaje 2 – Estratigrafía	
Profundidad [m]	Clasificación
0,0 - 1,0	Relleno compuesto de arena media con algo de conchuelas
1,0 - 2,45	Arcilla orgánica, color negro, humedad alta, consistencia baja, plasticidad alta
2,45 - 3,45	Arcilla orgánica, color gris verdoso, humedad alta, consistencia baja, plasticidad alta, trozos de madera descompuesto
3,45 - 10,45	Arcilla orgánica, color gris verdoso, humedad alta, consistencia baja, plasticidad alta
10,45 - 14,45	Arcilla orgánica de color gris verdoso, humedad alta, consistencia baja, plasticidad alta, trozos de conchuelas dispersas
14,45 - 15,45	Arena algo arcillosa orgánica, color gris oscuro, humedad alta, compacidad baja, plasticidad media
15,45 - 17,45	Arcilla arenosa orgánica, color gris oscuro, humedad alta, compacidad baja, plasticidad media
17,45 - 19,45	Arena fina orgánica color negro, humedad alta, compacidad media
19,45 - 22,45	Arcilla orgánica algo arenosa, color gris oscuro, humedad alta, consistencia media, plasticidad media a alta
22,45 - 23,45	Arena algo arcillosa orgánica negra, humedad alta, compacidad media, plasticidad baja
23,45 - 24,45	Arena orgánica color negro, humedad alta, compacidad media
24,45 - 25,45	Arcilla arenosa orgánica, color gris verdoso, humedad alta, consistencia baja, plasticidad media
25,45 - 26,45	Arena fina limosa, color negro, humedad alta, compacidad media a alta
26,45 - 28,45	Arcilla orgánica algo arenosa, color gris verdoso, humedad alta, consistencia media a alta, plasticidad alta
28,45 - 30,45	Arena fina orgánica algo limosa, color negro, humedad alta, compacidad meda a alta

Tabla 7.8: Perfil de velocidad de onda de corte asociado a la estación 2 de FUCHIGE.

Perfil 1		Perfil 2	
Profundidad [m]	Vs [m/s]	Profundidad [m]	Vs [m/s]
0,0 - 4,5	87	0,0 - 4,5	87
4,5 - 16,75	142	4,5 - 16,75	127
16,75 – 50	446	16,75 – 50	322

3) Estación 3

Tabla 7.9: Estratigrafía asociada a la estación 3 de FUCHIGE.

Sondaje 3 – Estratigrafía	
Profundidad [m]	Clasificación
0,00 - 1,05	Arcilla limosa, color café oscuro, consistencia muy blanda, humedad baja, plasticidad media a alta. Presenta gravas de tamaño máximo 2 1/2" aproximadamente en forma aislada
1,05 - 3,30	Arcilla limosa, color café con matices de color amarillo, consistencia muy blanda, humedad baja, plasticidad alta. Presenta raíces finas
3,30 - 5,50	Arena limosa, color café, tamaño fino, compacidad media, humedad media. Los finos de plasticidad baja. Presenta partículas de cuarzo descompuesto
5,50 - 9,40	Limo arcilloso, color café con matices de color amarillo, consistencia blanda, humedad media, plasticidad media. Presenta vetas de cuarzo descompuesto en forma aislada
9,40 - 10,20	Limo con bajo contenido de arena, color café (lentes de color rojo y gris), consistencia media, humedad media, plasticidad media. Presenta partículas de cuarzo descompuesto
10,20 - 12,50	Arena limosa, color gris (lentes de color rojo y gris), consistencia muy blanda, humedad media, plasticidad media. Presenta vetas de cuarzo descompuesto
12,50 - 14,40	Arena limosa, color gris (lentes de color café, amarillo y rojo), compacidad baja, humedad media. Los finos de plasticidad muy baja. Presenta partículas de cuarzo descompuesto
14,40 - 17,30	Limo, color gris claro, consistencia media, humedad media, plasticidad media a alta. Presenta micas y trozos de madera en estado de descomposición
17,30 - 18,15	Arena, color gris con matices de color verde, tamaño fino, compacidad baja, humedad media. Los finos de plasticidad muy baja. Presenta partículas de cuarzo y micas en forma aislada
18,15 - 22,50	Limo, color gris oscuro con matices de color verde, consistencia blanda, humedad media, plasticidad media a alta. Presenta trozos de madera en estado de descomposición. También presenta lentes de arena, tamaño fino en forma aislada
22,50 - 24,30	Limo, color gris claro, consistencia blanda, humedad media, plasticidad alta. Presenta micas en forma aislada

24,30 - 26,45	Limo, color gris oscuro, consistencia media, humedad media, plasticidad media a alta. Presenta madera en estado de descomposición. También presenta lentes de limo color verde. Micas en forma aislada
26,45 - 30,07	Arena, color gris oscuro, tamaño fino, compacidad muy alta, humedad media a alta. Presenta micas y partículas de curazo en alta proporción

Tabla 7.10: Perfil de velocidad de onda de corte asociado a la estación 3 de FUCHIGE.

Perfil 1		Perfil 2	
Profundidad [m]	Vs [m/s]	Profundidad [m]	Vs [m/s]
0,0 - 2,475	368	0,0 - 2,475	358
2,475 - 6,725	183	2,475 - 6,725	166
6,725 - 12,018	130	6,725 - 12,018	118
12,018 - 18,694	229	12,018 - 18,694	285
18,694 - 25,964	246	18,694 - 25,964	304
25,964 - 37,982	307	25,964 - 37,982	327
37,982 - 50	470	37,982 - 50	436

4) Estación 4

Tabla 7.11: Estratigrafía asociada a la estación 4 de FUCHIGE.

Sondaje 4 – Estratigrafía	
Profundidad [m]	Clasificación
0,00 - 1,00	Relleno compuesto de arena y gravas, color gris oscuro
1,00 - 1,45	Arena gruesa con gravilla, color gris oscura, humedad baja, compacidad baja, gravilla de cantos redondeados
1,45 - 3,45	Arena limosa con gravas dispersas, color gris oscura, humedad media, compacidad baja
3,45 - 6,45	Arenas medias, color gris oscuro, humedad media, compacidad baja a media
6,45 - 7,45	Arena medias algo limosas, color gris oscuro, humedad media, compacidad media
7,45 - 20,45	Arenas medias, color gris oscuro, humedad alta, compacidad media a alta

Tabla 7.12: Perfil de velocidad de onda de corte asociado a la estación 4 de FUCHIGE.

Perfil 1		Perfil 2	
Profundidad [m]	Vs [m/s]	Profundidad [m]	Vs [m/s]
0,0 - 4,4	191	0,0 - 4,4	121
4,4 - 9,0	207	4,4 - 9,0	164
9,0 - 13,8	171	9,0 - 13,8	151
13,8 - 19,8	273	13,8 - 19,8	273
19,8 - 31,6	300	19,8 - 31,6	300
31,6 - 50,0	353	31,6 - 50,0	373

7.1.7 Asignación de velocidad de onda de cortes característica a los estratos presentes en los perfiles transversales

Tabla 7.13: Velocidades de onda de corte relacionadas con el estrato de relleno artificial.

Relleno Artificial (Sitio 2)	
Perfil de velocidad	Vs[m/s]
Perfil 1 (FUCHIGE)	87
Perfil 2 (FUCHIGE)	87
Promedio	87

Tabla 7.14: Velocidades de onda de corte relacionadas con el estrato de arcilla.

Arcilla (Sitio 2)	
Perfil de velocidad	Vs[m/s]
Perfil 1 (FUCHIGE)	142
Perfil 2 (FUCHIGE)	127
Promedio	135

Tabla 7.15: Velocidades de onda de corte relacionadas con el estrato de limo arcilloso con poca arena.

Limo arcilloso con poca arena (Sitio 1)	
Perfil de velocidad	Vs[m/s]
Perfil 1 (FUCHIGE)	193
Perfil 2 (FUCHIGE)	154
Promedio	174

Limo arcilloso con poca arena (Sitio 3)	
Perfil de velocidad	Vs[m/s]
Perfil 1.1 (FUCHIGE)	183
Perfil 2.1 (FUCHIGE)	166
Perfil 1.2 (FUCHIGE)	130
Perfil 2.2 (FUCHIGE)	118
Promedio	149

Tabla 7.16: Velocidades de onda de corte relacionadas con el estrato de arena limosa.

Arena Limosa (Sitio 1)	
Perfil de velocidad	Vs[m/s]
Perfil 1 (FUCHIGE)	232
Perfil 2 (FUCHIGE)	326
Promedio	279
Arena Limosa (Sitio 3)	
Perfil de velocidad	Vs[m/s]
Perfil 1.1 (FUCHIGE)	229
Perfil 2.2 (FUCHIGE)	285
Perfil 1.2 (FUCHIGE)	246
Perfil 2.2 (FUCHIGE)	304
Perfil 1.3 (FUCHIGE)	307
Perfil 2.3 (FUCHIGE)	327
Promedio	283
Arena Limosa (Sitio 4)	
Perfil de velocidad	Vs[m/s]
Perfil 1.1 (FUCHIGE)	191
Perfil 2.1 (FUCHIGE)	121
Perfil 1.2 (FUCHIGE)	207
Perfil 2.2 (FUCHIGE)	164
Perfil 1.3 (FUCHIGE)	171
Perfil 2.3 (FUCHIGE)	151
Perfil 1.4 (FUCHIGE)	273
Perfil 2.4 (FUCHIGE)	273
Perfil 1.5 (FUCHIGE)	300
Perfil 2.5 (FUCHIGE)	300
Promedio	215

Tabla 7.17: Velocidades de onda de corte relacionadas con el estrato de arena con poco limo.

Arena con poco limo (Sitio 2)	
Perfil de velocidad	Vs[m/s]
Perfil 1.1 (FUCHIGE)	348
Perfil 2.1 (FUCHIGE)	599
Perfil 2.2 (FUCHIGE)	561
Promedio	503
Arena con poco limo (Sitio 3,4 y 5)	
Perfil de velocidad	Vs[m/s]
Estación 3, Perfil 1 (FUCHIGE)	446
Estación 3, Perfil 2 (FUCHIGE)	322
Estación 4, Perfil 1 (FUCHIGE)	470
Estación 4, Perfil 2 (FUCHIGE)	436
Estación 5, Perfil 1 (FUCHIGE)	353
Estación 5, Perfil 2 (FUCHIGE)	373
Promedio	400

7.1.8 Perfiles de velocidad de onda de corte

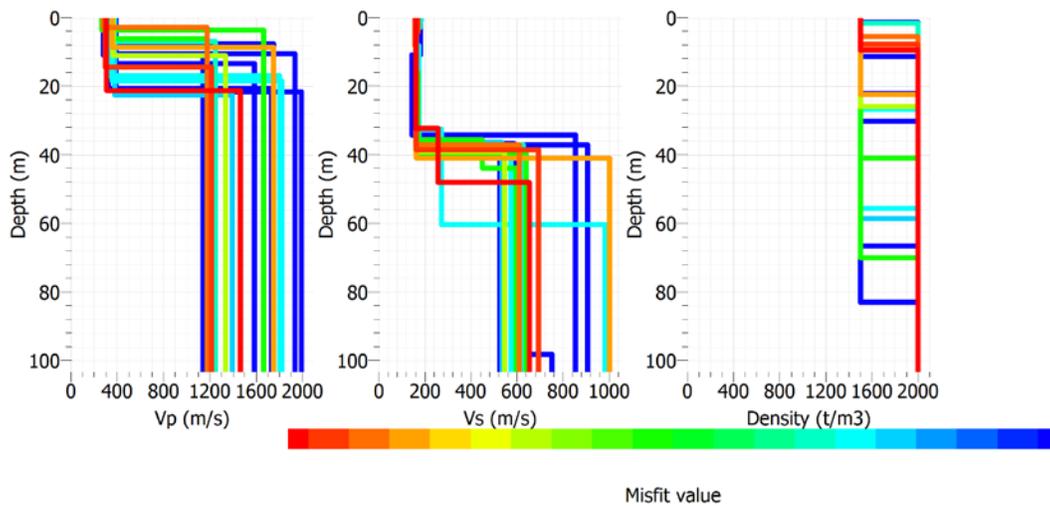


Figura 7.9: Perfil de velocidad UCHP001.

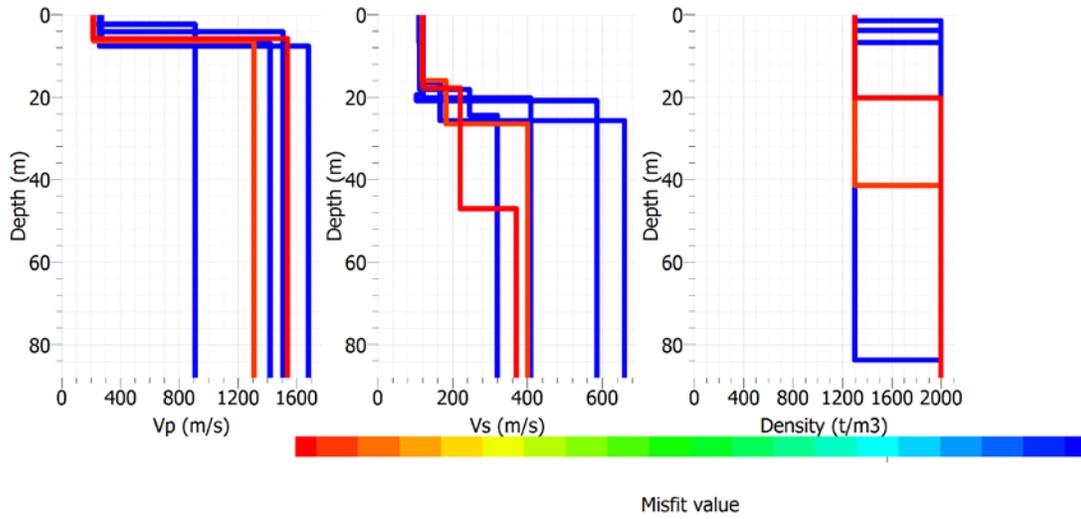


Figura 7.10: Perfil de velocidad UCHP002.

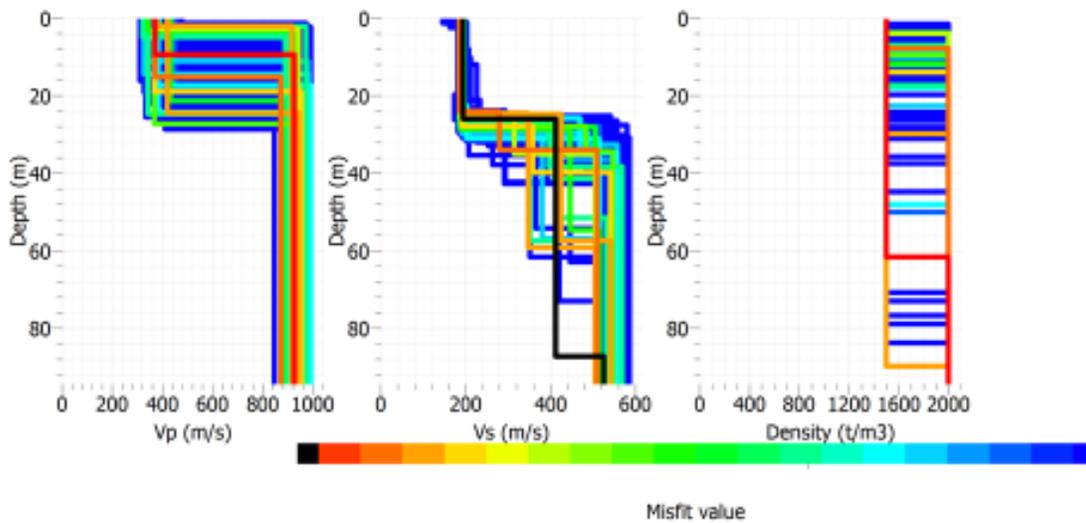


Figura 7.11: Perfil de velocidad UCHP003.

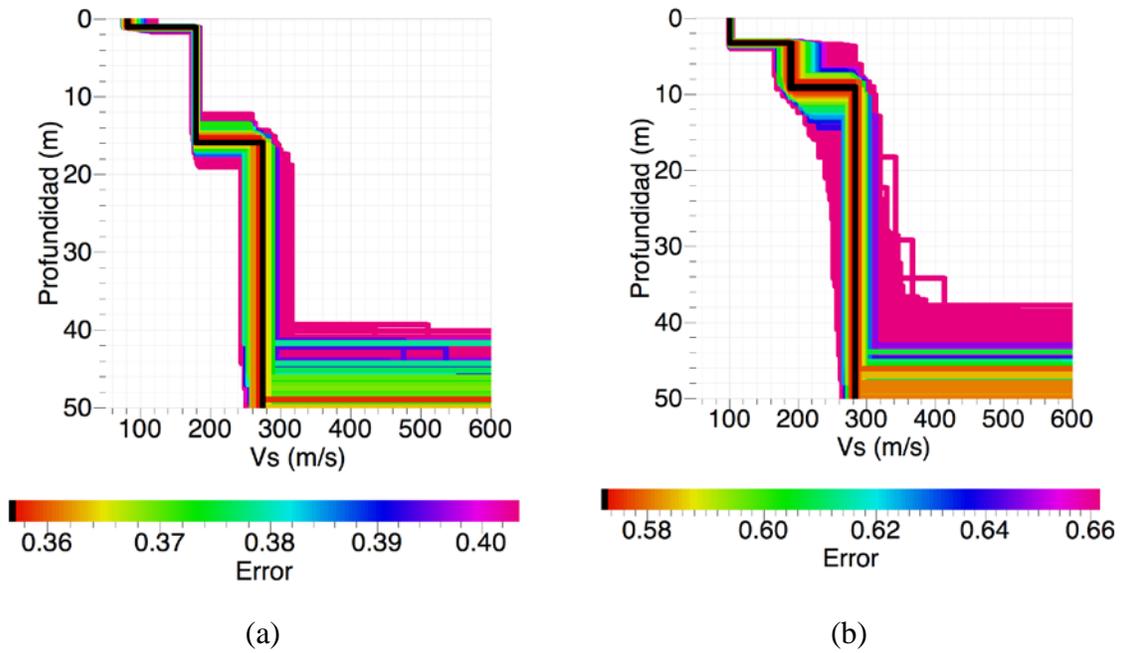


Figura 7.12: Perfil de velocidad (a) CSNP001, (b) CSNP002
(Fuente: Centro sismológico de la universidad de Chile).

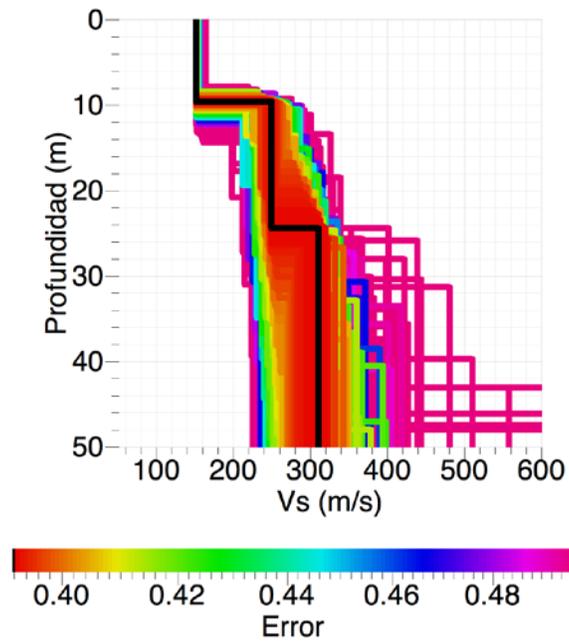


Figura 7.13: Perfil de velocidad CSNP003
(Fuente: Centro sismológico de la universidad de Chile).

7.1.9 Comparación perfiles de velocidad de onda de corte

En las tablas siguientes se presenta el detalle de los perfiles de velocidad elaborados por FUCHIGE y por el método de correlaciones cruzadas.

Tabla 7.18: Numeración estratos.

N°	Estrato
1	Relleno artificial
2	Limo arcilloso con poca arena
3	Arcilla
4	Arena limosa
5	Arena con poco limo
6	Arena

Tabla 7.19: Comparación perfiles de velocidad para el mapa geológico y el método de correlaciones cruzadas para el perfil de velocidad UCHP001.

Perfil de velocidad "UCHP001"		
Estratos asociados	Profundidad [m]	Vs [m/s]
Resultados perfil transversal		
4	0 – 15	194,0
3	15 – 36	135,0
5	36 - 48,8	400,0
6	48,8 - 95,2	-
Resultados perfil de velocidad		
4 y 3	0 – 40	160
5 y 6	40 – 100	680

Tabla 7.20: Comparación perfiles de velocidad para el mapa geológico y el método de correlaciones cruzadas para el perfil de velocidad UCHP002.

Perfil de velocidad "UCHP002"		
Estratos asociados	Profundidad [m]	Vs [m/s]
Resultados perfil transversal		
4	0 - 9,3	194,0
3	9,3 - 45,9	135,0
5	45,9 - 112,8	400,0
6	112,8 - 166,7	-
Resultados perfil de velocidad		
4	0 - 17	125
3	17 - 45	220
5	45 - 90	380

Tabla 7.21: Comparación perfiles de velocidad para el mapa geológico y el método de correlaciones cruzadas para el perfil de velocidad UCHP003.

Perfil de velocidad "UCHP003"		
Estratos asociados	Profundidad [m]	Vs [m/s]
Resultados perfil transversal		
2	0 - 11,5	157,0
4	11,5 - 32,3	282,0
5	32,3 - 98,7	410,0
6	118,7 - 170,7	-
Resultados perfil de velocidad		
2 y 4	0 - 25	200
5	25 - 85	410
5 y 6	85 - 95	530

Tabla 7.22: Comparación perfiles de velocidad para el mapa geológico y el método de correlaciones cruzadas para el perfil de velocidad CSNP001.

Perfil de velocidad "CSNP001"		
Estratos asociados	Profundidad [m]	Vs [m/s]
Resultados mapa geológico		
1	0 – 3	87
3	3 – 13	135
4	13 – 31	279
5	31 – 90	400
Resultados perfil de velocidad		
1	0 – 2	80
3	2 – 16	160
4	16 – 50	280

Tabla 7.23: Comparación perfiles de velocidad para el mapa geológico y el método de correlaciones cruzadas para el perfil de velocidad CSNP002.

Perfil de velocidad "CSNP002"		
Estratos asociados	Profundidad [m]	Vs [m/s]
Resultados mapa geológico		
2	0 – 15	174
4	15 – 38	279
5	38 - 116	400
Resultados perfil de velocidad		
2	0 – 9	180
4	9 – 50	280

Tabla 7.24: Comparación perfiles de velocidad para el mapa geológico y el método de correlaciones cruzadas para el perfil de velocidad CSNP003.

Perfil de velocidad "CSNP003"		
Estratos asociados	Profundidad [m]	Vs [m/s]
Resultados mapa geológico		
1	0 – 2	87
3	2 – 6	135
2	6 – 10	174
4	10 – 35	279
5	35 – 115	400
Resultados perfil de velocidad		
3	0 – 10	160
4	10 – 25	250
5	25 – 50	320

7.2 Anexo 2 “Análisis de daño durante el terremoto de 1960 en la ciudad de Valdivia”

7.2.1 Referencias asocias al mapa de daño de la ciudad de Valdivia

En la siguiente sección se presentan la mayor parte de las estructuras y sectores importantes de la ciudad de Valdivia pasado el terremoto de 1960, junto a las fotografías e información disponible recopilada a partir de los distintos autores que investigaron los daños asociados al terremoto y las publicaciones sobre este incidente en distintos medios, la ubicación de cada uno de estos sectores se encuentra indicada en el mapa de daño adjunto.

1) Calle García Reyes



Figura 7.14: Daños a viviendas de madera a lo largo de una zona llena de tierra de la calle García Reyes en Valdivia. Se pueden observar los cortafuegos de mampostería entre los edificios de armazón de madera (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).



Figura 7.15: Calle García Reyes antes de Beauchef (Fuente: Laso, 2008).



Figura 7.16: Calle García Reyes
(Fuente: Colección fotográfica de Karl V. Steinbrudgge y Rodolfo Schild).

2) Banco de Chile

De acuerdo a Cambiazo (1961) el Banco de Chile se clasifica como un edificio de albañilería sin reforzar de 2 pisos, el cual poseía muros interiores de ladrillo que atiesaban los muros interiores. El edificio no colapsó, pero sufrió daños irreparables luego del terremoto.

De acuerdo a Steinbrugge y Flores (1963) las fallas vistas en el Banco de Chile están asociadas a una mezcla de factores entre los cuales nombra un diseño y una construcción defectuosa, junto con una agitación excesiva durante el terremoto.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7.17: Banco de Chile,
(a) Vista lateral (Fuente: Colección fotográfica de Karl V. Steinbrugge).
(b) Vista de la azotea (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).
(c) y (d) Vista frontal (Fuente: Lazo, 2008).

3) Teatro Cervantes

Teatro Cervantes ubicado en la calle Camilo Henríquez, entre las calles O'higgins y Chacabuco. Fue reportado agrietado en el mapa de daño elaborado por Weischt (1963) y posteriormente fue nombrado entre los edificios que sufrieron daño por Lazo (2008).



Figura 7.18: Ubicación teatro Cervantes (Fuente: Barozzi y Lemke, 1966).



Figura 7.19: Teatro Cervantes (Fuente: Google Earth, 2017).

4) Hospital Ortopédico

Esta estructura de varios pisos, ubicada en la esquina noroeste de las calles Chacabuco y García Reyes. De acuerdo a los estudios realizados por Steinbrugge y Flores (1963) el hospital ortopédico poseía 5 pisos más un ático y un sótano, tanto sus fundaciones como su estructura estaba realizada con hormigón armado, sufrió daño en sus muros en las zonas donde existían juntas de construcción, los mayores daños se asociaron a las columnas de la zona norte del edificio, los cuales el autor asocia a exceso de tenciones torsionales locales debido a la falta de muros en esa zona.



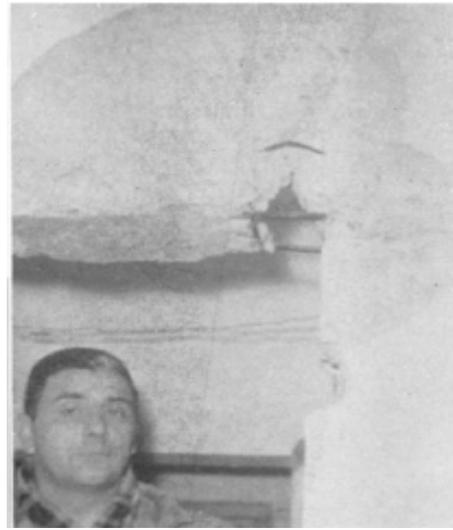
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 7.20: Hospital ortopédico (a), (b) y (c) Vista frontal de la estructura, (d), (e) y (f) Daños típicos presentes en la estructura (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).

5) Aduana

Edificio dañado producto del terremoto, el cual fue identificado en el mapa de daño de Barozzi y Lemke (1966). Se encuentra ubicado junto a la plaza de la república en la calle Paseo Peatonal Libertad.



Figura 7.21: Ubicación Aduana (Fuente: Barozzi y Lemke, 1966).

6) Banco Español

Banco Español ubicado en la calle Camilo Henríquez, entre la calle Yungai, próximo a la esquina con la calle Lautaro. Fue reportado dañado en el mapa elaborado por Barozzi y Lemke (1966) y posteriormente fue nombrado por Lazo (2008) entre los edificios que sufrieron daño.



Figura 7.22: Ubicación Banco Español (Fuente: Barozzi y Lemke, 1966).

7) Fábrica de zapatos Weiss

Fábrica de zapatos ubicada en la calle Guillermo Frick con Pérez Rosales. De acuerdo a Steinbrugge y Flores (1963) fue construida en 1906, y colapsó durante el terremoto de 1960. En la Figura 7.23, se puede ver una estructura de madera con muros de albañilería sin reforzar. El mismo autor menciona que la chimenea central, de albañilería sin refuerzo, a pesar de sufrir daños no se derrumbó. Por otra parte, el autor afirma que estructuras cercanas no dieron muestra de excesivos movimientos del suelo y que un alto macizo de hormigón que se ubicaba en las cercanías no sufrió daño.



Figura 7.23: Fábrica de zapatos Weiss (Fuente: <https://www.angelfire.com>).

8) Hospital Regional

Hospital ubicado en el sector Sur de la ciudad de Valdivia frente a la calle Havdaerbeck. En un comienzo este edificio llamó la atención de los autores Watanabe y Karzulovic (1960) debido a que fue uno de los pocos en sufrir daño en esta zona de Valdivia. Más adelante fue inspeccionado por Cambiazo (1961), el cual lo describió como un edificio de hormigón armado, constituido en su cuerpo central por 8 pisos de altura, flanqueado por dos alas laterales de 3 pisos. De acuerdo al mismo autor el edificio presentó daños en su cuerpo central y los daños aumentaban gradualmente con la altura del edificio, entre los daños importantes destacan el empalme entre las dos partes que forman el cuerpo central del edificio, como se puede ver en la Figura 7.24 (a).

En su investigación Cambiazo (1961) determinó que las fallas de este edificio eran atribuibles a una mala calidad de los concretos, una estructura débilmente armada, errores de estructuración (como se puede ver en la Figura 7.24 (b), donde una viga se apoya en el dintel de la puerta), insuficiente ligazón entre estructuras resistentes y la estructura principal entre otras causas.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 7.24: Hospital Regional (a) vista frontal, (b), (c), (d) y (e) fallas interiores (Fuente: Cambiazo, 1961).

En complemento Steinbrugge y Flores (1963) estudiaron este mismo edificio durante su investigación, donde comprobaron que había deficiencias en los aceros de refuerzo, el cual estaba pobremente colocado en los muros del edificio. Adicionalmente el espesor de los muros no correspondía a los planos del edificio y, finalmente, se evidenció en los daños de las juntas de construcción que el hormigón durante su colocación no presentaba una mezcla monolítica.

Los autores atribuyen gran parte de los daños al golpe provocado por el choque del edificio central con los edificios de 3 pisos adyacentes producto de grandes deflexiones en ambos

edificios, lo que generó un mayor daño a nivel de los pisos superiores, notando además que las fundaciones del edificio fueron las que sufrieron menos daños.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 7.25: Hospital Regional (a) vista en elevación, (b) vista lateral, (c) elevación ala este, (d) Porción de la elevación este de la torre de servicios médicos, donde se puede apreciar daño por fuerzas de corte, (e) Misma elevación del ala este en pisos inferiores. (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).

9) Estanque Elevado

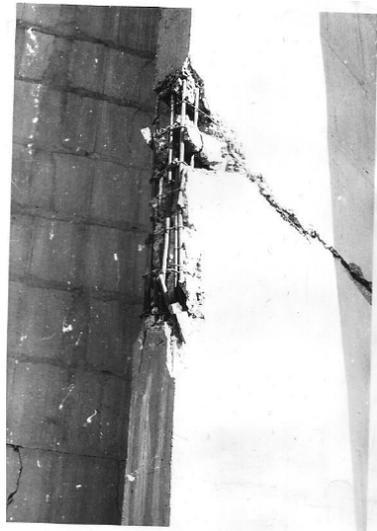
Estanque elevado ubicado en la zona Sur de Valdivia a un costado del hospital Regional. De acuerdo con Cambiazo (1961), esta era una estructura de hormigón armado la cual resultó severamente dañada durante el terremoto. Los principales daños estaban en los pilares y a aproximadamente 2 metros del suelo donde se traslapaban los fierros del pilar. Cambiazo (1961) también comenta que las grietas se iniciaron en las zonas más débiles del estanque donde se traslaparon un número excesivo de fierros, adicionalmente el manto del estanque quedó completamente agrietado. Finalmente, el autor determinó que los daños se debían a un diseño defectuoso de la estructura.



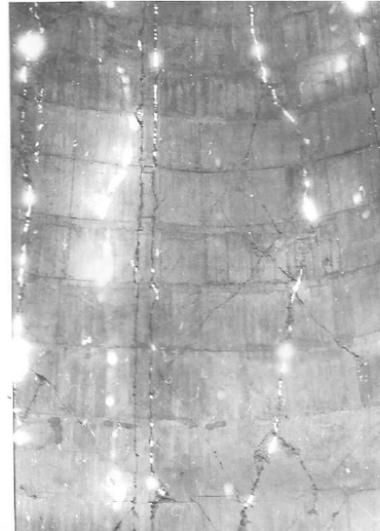
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 7.26: Estanque elevado (a) y (b) vista frontal, (c), (d), (e) y (f) grietas en el pilar y manto (Fuente: Cambiazo, 1961).

Posteriormente los autores Steinbrugge y Flores (1963) investigaron esta estructura, identificándola como un estanque de 4000 m³ de capacidad, el cual estaba vacío al momento del sismo. Los daños reportados constan de grietas verticales a lo largo del manto del estanque y adicionalmente severo daño en las zonas donde existían juntas de construcción. Los autores atribuyen el daño a una mala construcción de las juntas y a un pobre enterrado de estas, adicionalmente indican que la cantidad de daño en el estanque fue excesiva por lo que probablemente existió un mal diseño, lo cual concuerda con lo planeado por Cambaizo (1961).

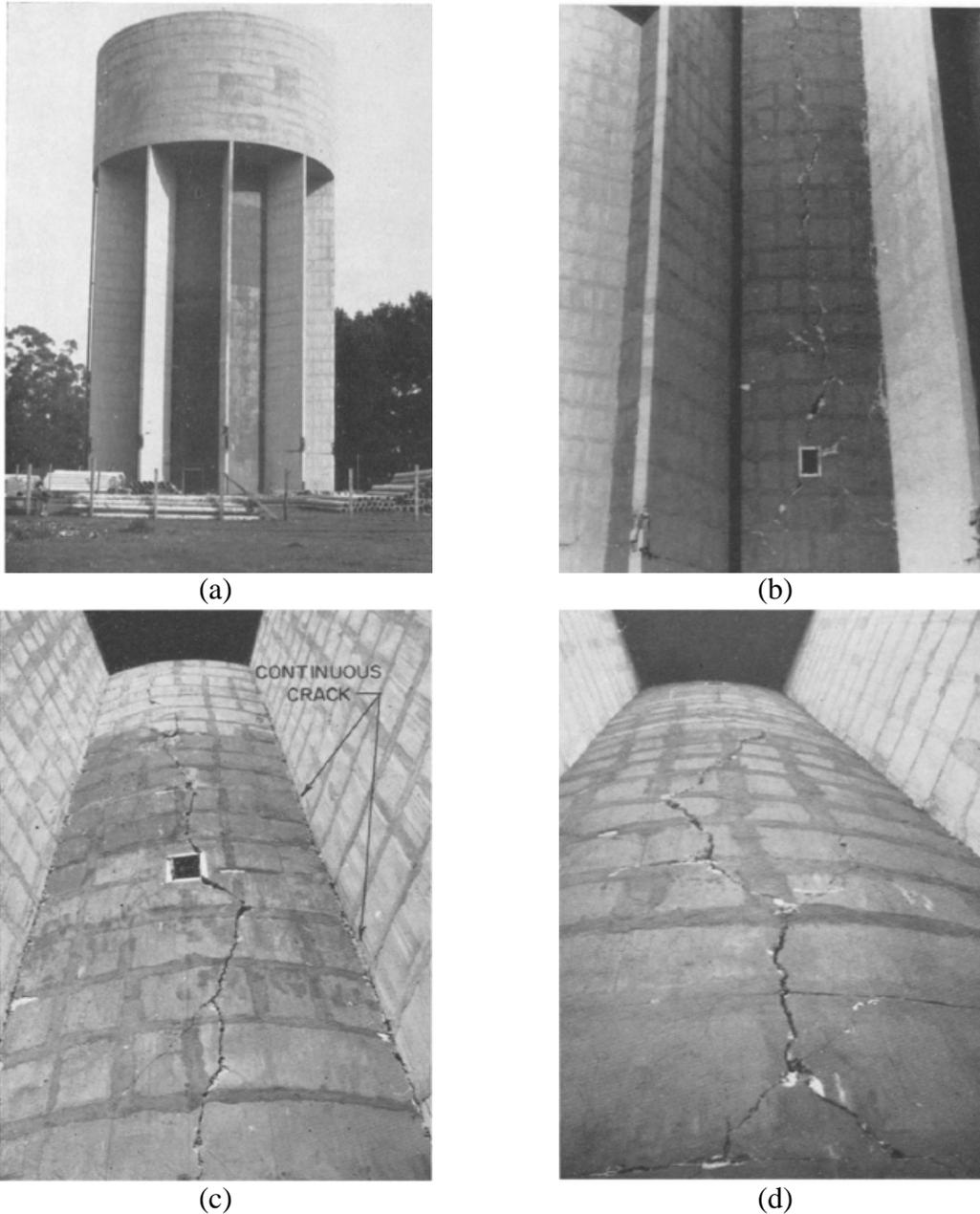


Figura 7.27: Estanque elevado (a) y (b) vista en elevación, (c) y (d) grietas continuas en elevación (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).

10) Población Nueva

La Población Nueva está ubicada en el sector Sur de Valdivia, cercana al Hospital Regional, y consiste en casas de dos pisos las cuales poseen un primer piso de albañilería confinada y un segundo piso de madera. De acuerdo con Watanabe y Karzulovic (1960), estas casas eran relativamente nuevas para esa época y no sufrieron daños durante el terremoto.



Figura 7.28: Población nueva (Fuente: Watanabe y Karzulovic, 1960).

11) Edificio Prales

El edificio Prales está ubicado en la esquina de las calles Arauco con Camilo Henríquez. Es una estructura de hormigón armado de 7 pisos. De acuerdo a los autores Cambiazo (1961) y Steinbrugge y Flores (1963), este edificio no sufrió daños durante el terremoto.



Figura 7.29: Edificio Prales (a) Después del terremoto de 1960 (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963), (b) Actualmente (Fuente: Google Earth, 2017).

12) Calle Camilo Henríquez



Figura 7.30: Calle Camilo Henríquez antes de llegar a Arauco (Fuente: Gentileza Grupo Terremoto Valdivia).



Figura 7.31: Calle Camilo Henríquez (Fuente: Colección fotográfica de Karl V. Steinbrudgge y Rodolfo Schild).

13) Hotel Pedro de Valdivia

El Hotel Pedro de Valdivia está ubicado frente a la calle Yungay en las cercanías del puente Pedro de Valdivia. Es una estructura de hormigón armado de 5 pisos. De acuerdo a los autores y Steinbrugge y Flores (1963), este edificio sufrió un daño no estructural insignificante durante el terremoto.



(a)



(b)

Figura 7.32: Hotel Pedro de Valdivia (a) Vista frontal, (b) Vista desde el Noreste (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).

14) Catedral de Valdivia

De acuerdo a Steinbrugge y Flores (1963) las fallas vistas en la Catedral están asociadas a una mezcla de factores, entre los cuales nombra un diseño y una construcción defectuosa, junto con una agitación excesiva durante el terremoto.



Figura 7.33: Catedral de Valdivia (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).

15) Cervecería

Edificio ubicado a un costado del río Valdivia, en la isla Teja. De acuerdo a Steinbrugge y Flores (1963) las fallas vistas en la Cervecería están asociadas a una mezcla de factores entre los cuales nombra un diseño y una construcción defectuosa junto con una agitación excesiva durante el terremoto.

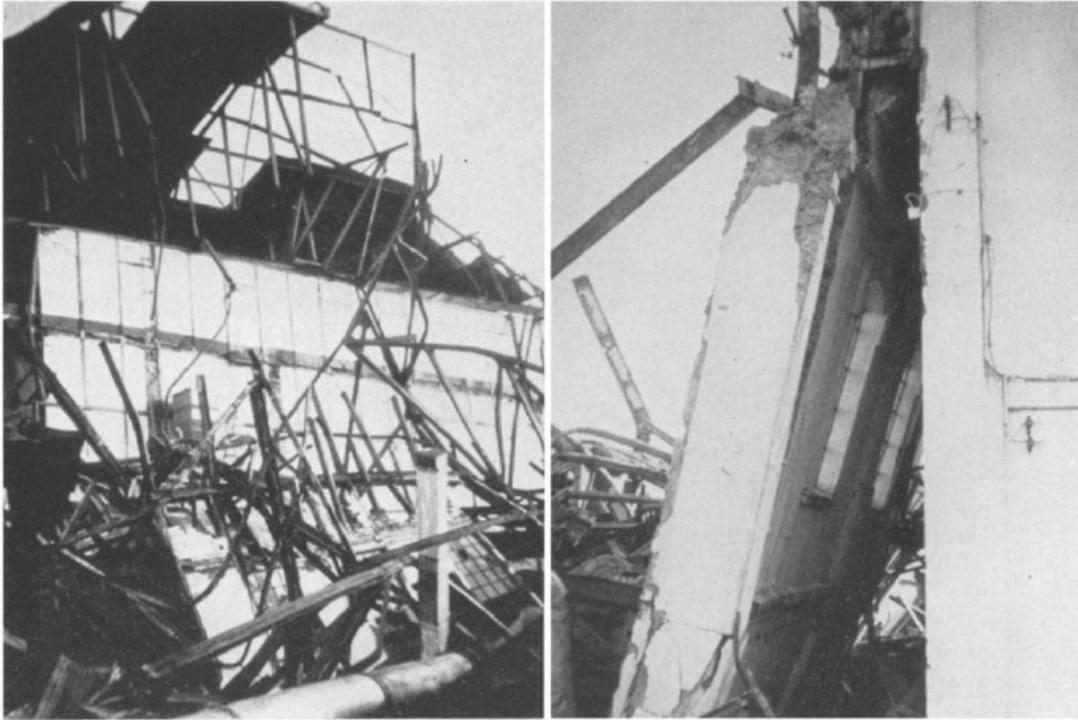


Figura 7.34: Daño a la cervecería de Valdivia (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).

16) Puente Pedro de Valdivia

De acuerdo con Steinbrugge y Flores (1963) el puente Pedro de Valdivia es una estructura de hormigón armado y los principales daños se observaron principalmente en los pilares. El daño se debió claramente al relleno de tierra que se estableció detrás de los pilares y a que el fondo de los pilares se desplazó hacia el río como se puede ver en las Figura 7.35 (a) y (b).

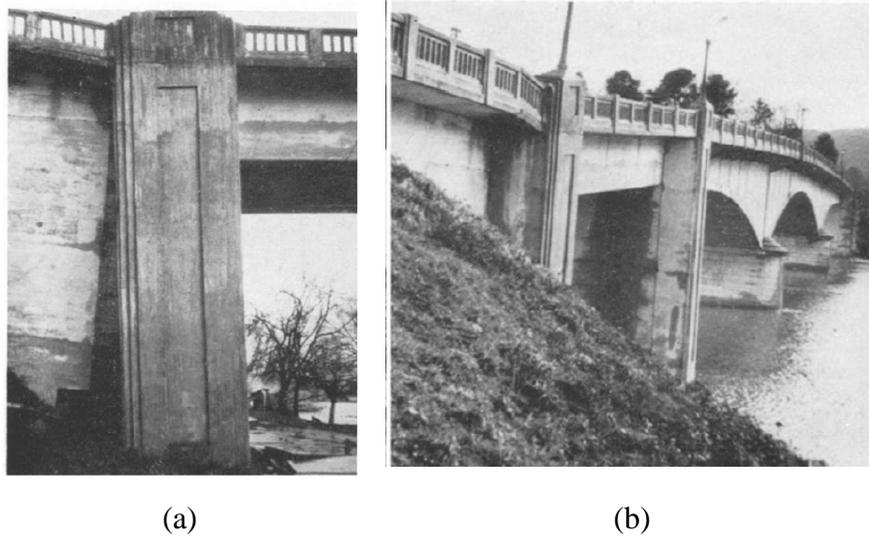


Figura 7.35: Puente Pedro de Valdivia (a) Mirando hacia el sur en un pilar del este. Parte inferior de este pilar esta desplazado hacia el río como se indica por la zona oscura triangular a la izquierda del pilar, (b) Elevación norte, Puente Pedro de Valdivia orilla este. Se aprecia una rotura en la calzada del primer pilar. Este pilar es el mismo que se muestra en la Figura 7.36 (b) (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).

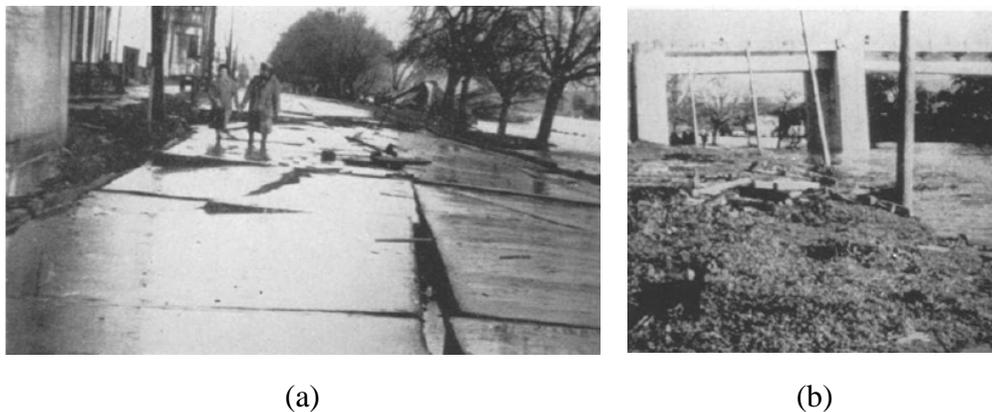


Figura 7.36: (a) Pavimento desplazado bajo el extremo este del puente Pedro de Valdivia, (b) Vista hacia el sur sobre los pilares del este del puente de Pedro de Valdivia (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).

17) Puente Las ánimas

De acuerdo con Steinbrugge y Flores (1963) el puente Las ánimas es una estructura de hormigón armado y el daño que recibió producto del terremoto fue complejo. La vibración longitudinal del puente puede haber sido un factor de daño junto al asentamiento en sus pilares.

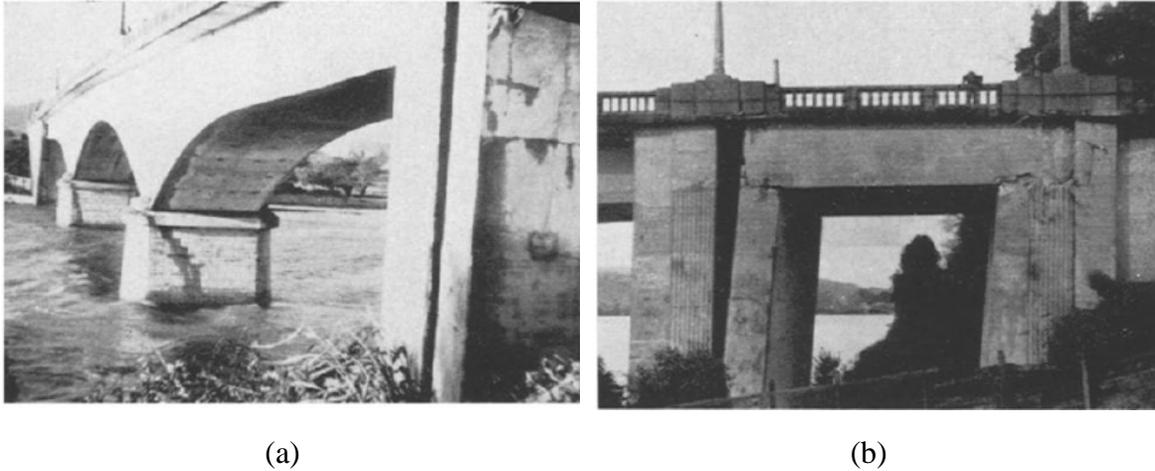


Figura 7.37: Puente “Las Animas” (a) Elevación oeste, desde la orilla sur, (b) Extremo sur, mirando hacia el este (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).

18) Costanera Arturo Prat

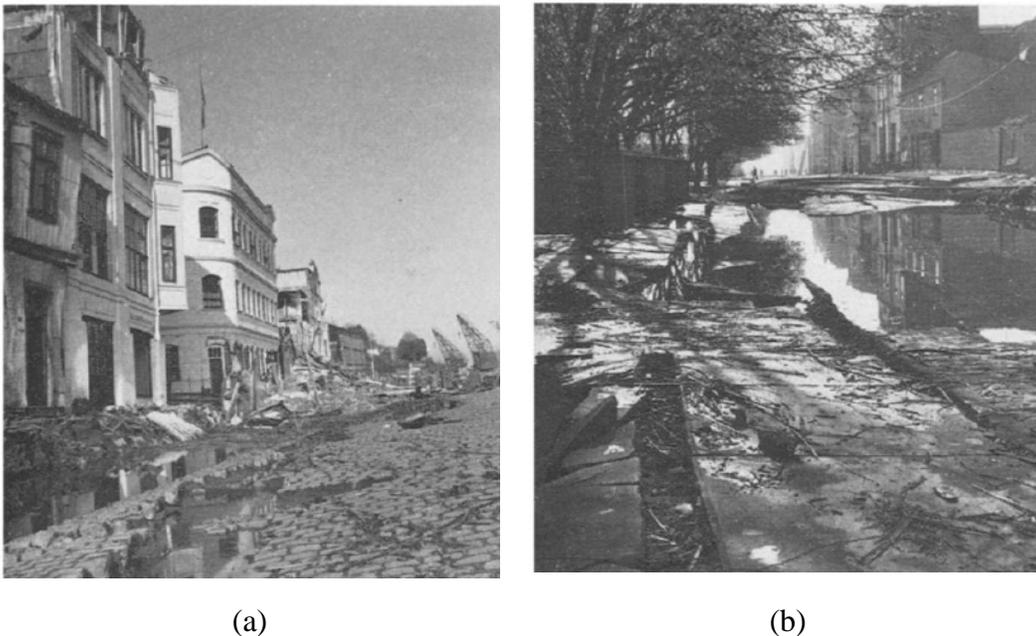


Figura 7.38: Costanera de Valdivia (a) Frente a la calle Arturo Prat, (b) Junto la calle Arturo Prat (Fuente: Steinbrugge y Flores, 1963).



Figura 7.39: Costanera de Valdivia. (Fuente: Colección fotográfica de Karl V. Steinbrugge).



Figura 7.40: Costanera de Valdivia, subida calle Libertad. (Fuente: Desconocida).

19) Calle Picarte



Figura 7.41: Calle Picarte con Condell (Fuente: Colección fotográfica de Karl V. Steinbrudgge y Rodolfo Schild).



Figura 7.42: Calle Picarte (Fuente: Gentileza Grupo Terremoto Valdivia).

20) Calle Beauchef



Figura 7.43: Calle Beauchef (Fuente: Colección fotográfica de Karl V. Steinbrudgge y Rodolfo Schild).

7.2.2 Casas históricas de madera construidas antes del terremoto de Valdivia

Antes del terremoto de Valdivia se construyeron una gran cantidad de casas de origen alemán que soportaron sin sufrir mayores daños el terremoto de Valdivia, hoy son conocidas como casas históricas y algunas son clasificadas como casas patrimoniales. La Figura 7.44 muestra el estado en el que se encuentran actualmente estas estructuras y la Tabla 7.25 presenta sus datos principales junto con su identificación con respecto al mapa de daño.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)



(k)



(l)

Figura 7.44: Casas históricas de Valdivia.

Tabla 7.25: Datos asociados a las casas históricas.

Nombre	Dirección	Año construcción	Referencia Mapa	Fuente
Casa Martens Hoffmman	Yungay N° 733	1870	(a)	Gentileza Miguel Ángel Bustos
Casa Kaheni	Yungay N° 735	1880	(b)	Gentileza Miguel Ángel Bustos
Casa Hoffmann Deppe	Yungay N° 800	1890	(c)	http://extension.uach.cl/index.php/comunicaciones/14-noticias/artistico-cultural/793-cuatro-casas-patrimoniales-uach-recipientes-placas-identificadoras
Residencia Von Stillfried	General Lagos N°911	1911	(d)	https://luavellana.wordpress.com/2015/03/17/residencia-von-stillfried-casa-patrimonial-en-valdivia/
Conjunto A. Riquelme	General Lagos N°910	1900	(e)	Gentileza Miguel Ángel Bustos

Casa Paulseberg	General Lagos N°1036	1900	(f)	Gentileza Miguel Ángel Bustos
Casa Ehrenfedl	General Lagos N°1107	1919	(g)	Gentileza Miguel Ángel Bustos
Casa Commentz Hoffmann	General Lagos N°1194	1913	(h)	http://disfrutavaldivia.info/valdivia/local/casa-commentz-hoffmann/404
Casa Anwandter	Los Laureles s/n, Isla Teja	1860	(i)	http://vinculacion.uach.cl/index.php/organizacion/casas-patrimoniales-uach/1765-casa-anwandter
Casa Villa Virginia	General Lagos N°1001	1870	(j)	http://vinculacion.uach.cl/index.php/organizacion/casas-patrimoniales-uach/1774-casa-rural-urbana-villa-virginia
Edificio 5000, Campus Miraflores	General Lagos N°2060	1915	(k)	http://vinculacion.uach.cl/index.php/organizacion/casas-patrimoniales-uach/1776-edificio-5000
Casa Schuller	Los Laureles s/n, Isla Teja	1914	(l)	http://vinculacion.uach.cl/index.php/organizacion/casas-patrimoniales-uach/1777-casa-schueler

7.3 Anexo 3 “Aplicabilidad del método H/V en la ciudad de Valdivia”

7.3.1 Tablas de resultados de las mediciones de los H/V

Tabla 7.26: Resultados de las mediciones de los registros H/V medidos por la Universidad de Chile.

Estación		Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Ventanas	Duración [min]	Comentario
UCHV001	001	1,280	0,781	37	24	No se distingue el peak
	002	0,907	1,103	38	24	No se distingue el peak
	003	1,002	0,998	40	24	Aceptado
	004	0,995	1,005	40	24	Aceptado
UCHV002	001	0,802	1,247	35	24	No se distingue el peak
	002	0,857	1,167	36	24	Aceptado
	003	0,995	1,005	41	24	Aceptado
	004	0,998	1,002	40	24	Aceptado
UCHV003	001	1,350	0,741	34	24	No se distingue el peak
	002	0,956	1,046	33	24	Aceptado
	003	1,017	0,983	42	24	Aceptado
	004	0,993	1,007	36	24	Aceptado
UCHV004	001	0,843	1,186	36	24	Aceptado
	002	0,792	1,263	33	24	Aceptado
	003	0,813	1,230	35	24	Aceptado
	004	0,773	1,294	29	24	Aceptado
UCHV005	001	0,805	1,242	35	24	Aceptado
	002	0,806	1,241	34	24	Aceptado
	003	0,821	1,218	34	24	Aceptado
	004	0,797	1,255	28	24	Aceptado
UCHV006	001	0,768	1,302	42	24	No se distingue el peak

	002	0,818	1,222	36	24	No se distingue el peak
	003	0,879	1,138	43	24	Aceptado
	004	0,834	1,199	38	24	Aceptado
UCHV007	001	0,693	1,443	39	24	No se distingue el peak
	002	0,772	1,295	41	24	Aceptado
	003	0,865	1,156	38	24	Aceptado
	004	0,820	1,220	41	24	Aceptado
UCHV009	001	0,795	1,258	20	24	Pocos datos
	002	0,831	1,203	46	24	Aceptado
	003	0,755	1,325	23	24	Pocos datos
	004	0,800	1,250	29	24	Aceptado
UCHV010	001	0,698	1,433	18	24	Pocos datos
	002	0,825	1,212	45	24	Aceptado
	003	0,806	1,241	19	24	Pocos datos
	004	0,804	1,244	32	24	No se distingue el peak
UCHV011	001	0,789	1,267	35	24	Aceptado
	002	0,820	1,220	41	24	Aceptado
	003	0,749	1,335	27	24	Aceptado
	004	0,763	1,311	28	24	Aceptado
UCHV012	001	0,806	1,241	30	24	Aceptado
	002	0,789	1,267	32	24	Aceptado
	003	0,787	1,271	34	24	Aceptado
	004	0,824	1,214	29	24	Aceptado
UCHV015	001	0,873	1,145	39	24	No se distingue el peak
	002	0,840	1,190	36	24	Aceptado
	003	0,806	1,241	39	24	Aceptado
	004	0,770	1,299	34	24	Aceptado

UCHV016	001	0,709	1,410	42	24	Aceptado
	002	0,720	1,389	35	24	Aceptado
	003	0,730	1,370	41	24	Aceptado
	004	0,775	1,290	38	24	Aceptado
UCHV017	001	1,087	0,920	50	24	No se distingue el peak
	002	1,160	0,862	38	24	Aceptado
	003	1,100	0,909	44	24	Aceptado
	004	1,420	0,704	37	24	No se ve el peak
UCHV018	001	1,114	0,898	32	24	Aceptado
	002	1,130	0,885	23	24	Pocos datos
	003	1,160	0,862	27	24	No se distingue el peak
	004	1,440	0,694	22	24	Pocos datos
UCHV020	001	0,714	1,401	58	30	No se distingue el peak
	002	0,824	1,214	57	30	No se distingue el peak
	003	0,740	1,351	28	30	No se distingue el peak
	004	1,580	0,633	59	30	No se distingue el peak
UCHV021	001	1,039	0,962	44	26	No se distingue el peak
	002	1,13	0,885	41	26	No se distingue el peak
	003	1,077	0,929	37	26	No se distingue el peak
	004	-	-	-	-	-
UCHV022	001	1,001	0,999	8	30	Pocos datos
	002	1,047	0,955	31	30	Aceptado
	003	0,889	1,125	11	30	Pocos datos
	004	-	-	-	-	-
UCHV023	001	0,75	1,333	49	30	Aceptado
	002	0,749	1,335	50	30	Aceptado
	003	0,771	1,297	44	30	Aceptado

	004	0,734	1,362	52	30	Aceptado
UCHV024	001	0,742	1,348	47	30	Aceptado
	002	0,759	1,318	51	30	Aceptado
	003	0,744	1,344	52	30	Aceptado
	004	0,755	1,325	45	30	Aceptado
UCHV025	001	0,761	1,314	50	30	Aceptado
	002	0,769	1,300	48	30	Aceptado
	003	0,754	1,326	48	30	Aceptado
	004	0,771	1,297	42	30	Aceptado
UCHV026	001	0,775	1,290	43	30	Aceptado
	002	0,762	1,312	50	30	Aceptado
	003	0,744	1,344	50	30	Aceptado
	004	0,747	1,339	47	30	Aceptado
UCHV027	001	0,759	1,318	51	30	Aceptado
	002	0,748	1,337	44	30	No se distingue el peak
	003	0,74	1,351	42	30	Aceptado
	004	0,735	1,361	36	30	Aceptado
UCHV028	001	0,751	1,332	50	30	Aceptado
	002	0,75	1,333	35	30	Aceptado
	003	0,786	1,272	42	30	Aceptado
	004	0,765	1,307	40	30	Aceptado
UCHV029	001	0,706	1,416	27	30	Pocos datos
	002	0,758	1,319	45	30	Aceptado
	003	0,741	1,350	41	30	Aceptado
	004	0,746	1,340	42	30	Aceptado

Tabla 7.27: Georreferenciación y resultados de todas las mediciones H/V.

Resultados mediciones						Georreferenciación UTM	
Sector	Medición	Frecuencia [1/s]	Periodo [s]	N° Ventanas	Comentario	M e	M s
1	101	1,011	0,989	23	No se distingue el peak	650301	5591044
1	102	0,928	1,078	25	Aceptado	650371	5591142
1	103	0,923	1,083	22	Aceptado	650467	5591005
1	104	0,789	1,267	22	Aceptado	650646	5590986
1	105	0,712	1,404	15	Aceptado	650835	5590994
1	106	1,045	0,957	21	No se distingue el peak	651488	5590888
1	107	0,990	1,010	9	Insuficientes datos	649999	5590997
1	108	1,160	0,862	14	No se distingue el peak	649894	5591099
1	109	0,992	1,008	20	Aceptado	649909	5591001
1	111	1,147	0,872	13	Aceptado	649936	5591244
1	112	1,270	0,787	28	Aceptado	649886	5591321
1	113	1,280	0,781	17	No se distingue el peak	650123	5590964
1	116	1,090	0,917	21	Aceptado	650106	5591271
1	118	1,032	0,969	19	Aceptado	650043	5591320
1	119	1,100	0,909	28	Aceptado	650051	5591428
1	120	1,220	0,820	22	Aceptado	650056	5591512
1	122	1,620	0,617	18	No se distingue el peak	649959	5591365
1	124	1,270	0,787	22	Aceptado	650258	5591180
1	126	1,070	0,935	21	Aceptado	650373	5591226
1	127	1,040	0,962	11	No se distingue el peak	650525	5591192
1	128	1,140	0,877	14	Aceptado	650642	5591146

1	129	1,015	0,985	2	Insuficientes datos	650759	5591127
1	131	0,743	1,346	11	No se distingue el peak	651018	5591034
1	132	0,817	1,224	13	Aceptado	651101	5590861
1	133	0,807	1,239	6	Insuficientes datos	651135	5591036
1	134	0,821	1,218	20	Aceptado	651305	5590939
1	135	0,867	1,153	19	Aceptado	651279	5591115
1	136	0,768	1,302	24	Aceptado	651105	5591208
1	137	0,825	1,212	17	Aceptado	651023	5591325
1	138	0,845	1,183	22	Aceptado	650911	5591447
1	141	1,070	0,935	24	Aceptado	650543	5591476
1	142	1,089	0,918	23	Aceptado	650066	5591619
1	143	1,086	0,921	20	Aceptado	650123	5591573
1	144	1,310	0,763	17	No se distingue el peak	650212	5591589
1	145	1,320	0,758	25	Aceptado	650326	5591543
1	148	0,959	1,043	22	Aceptado	650469	5591365
1	150	1,250	0,800	12	Insuficientes datos	650496	5591559
1	151	1,072	0,933	17	Aceptado	650479	5591658
1	152	1,220	0,820	10	Insuficientes datos	650603	5591623
1	153	1,077	0,929	10	Insuficientes datos	650666	5591753
1	154	0,869	1,151	17	Aceptado	650812	5591631
1	155	0,895	1,117	18	Aceptado	650707	5591528
1	156	0,820	1,220	19	Aceptado	650802	5591362
1	157	0,776	1,289	17	No se distingue el peak	650686	5591409
1	158	1,250	0,800	17	Aceptado	650361	5591728
1	159	1,110	0,901	20	Aceptado	650262	5591758
1	160	1,011	0,989	22	Aceptado	650200	5591757
1	161	1,004	0,996	25	No se distingue el peak	650161	5591628

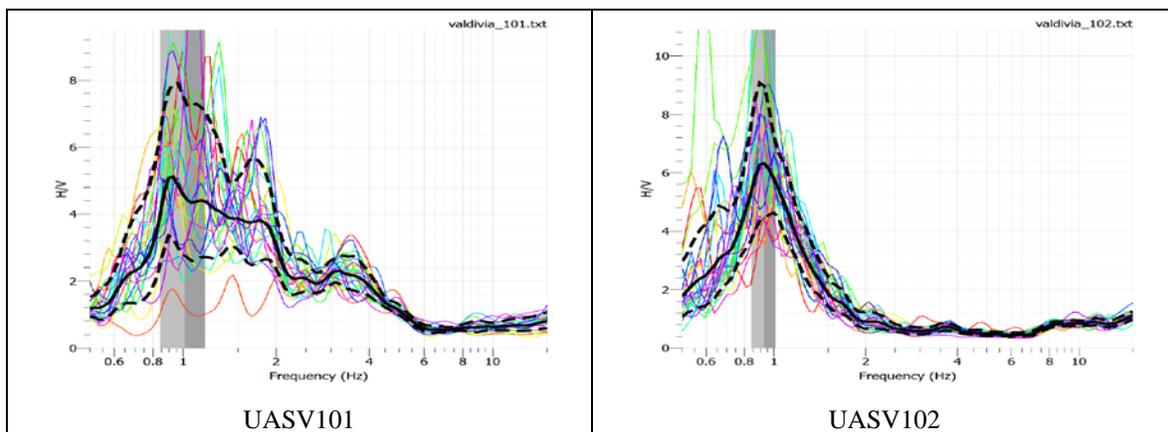
1	162	1,510	0,662	23	No se distingue el peak	649922	5591491
1	163	1,160	0,862	26	Aceptado	649976	5591591
1	164	0,971	1,030	15	No se distingue el peak	650001	5591683
1	165	1,028	0,973	7	Insuficientes datos	650101	5591796
1	166	1,190	0,840	16	No se distingue el peak	650266	5591883
1	167	1,290	0,775	14	No se distingue el peak	650393	5591846
1	168	1,170	0,855	7	Insuficientes datos	650481	5591752
1	169	1,120	0,893	23	Aceptado	650203	5591500
1	170	1,140	0,877	29	Aceptado	650149	5591441
1	171	1,070	0,935	27	Aceptado	650127	5591338
1	172	1,170	0,855	11	Insuficientes datos	650206	5591938
1	173	1,560	0,641	12	No se distingue el peak	650368	5591929
1	174	-	-	1	Insuficientes datos	650538	5591822
1	175	1,070	0,935	26	Aceptado	650563	5591498
1	176	1,080	0,926	21	Aceptado	649883	5591076
1	177	1,060	0,943	20	Ensayo cercano	649864	5591078
1	178	1,050	0,952	24	Aceptado	649856	5591047
1	179	1,090	0,917	23	Ensayo cercano	649870	5591041
1	180	1,043	0,959	21	Ensayo cercano	649881	5591060
2	201	1,150	0,870	9	Insuficientes datos	649839	5590794
2	202	1,180	0,847	24	Aceptado	650093	5590778
2	203	1,270	0,787	24	Aceptado	649967	5590672
2	204	1,390	0,719	8	Insuficientes datos	649805	5590548
2	205	0,868	1,152	23	Aceptado	650343	5590621
2	206	0,958	1,044	17	Aceptado	649868	5590255
2	207	1,161	0,861	8	Insuficientes datos	650184	5590439
2	208	0,984	1,016	23	Aceptado	650351	5590884

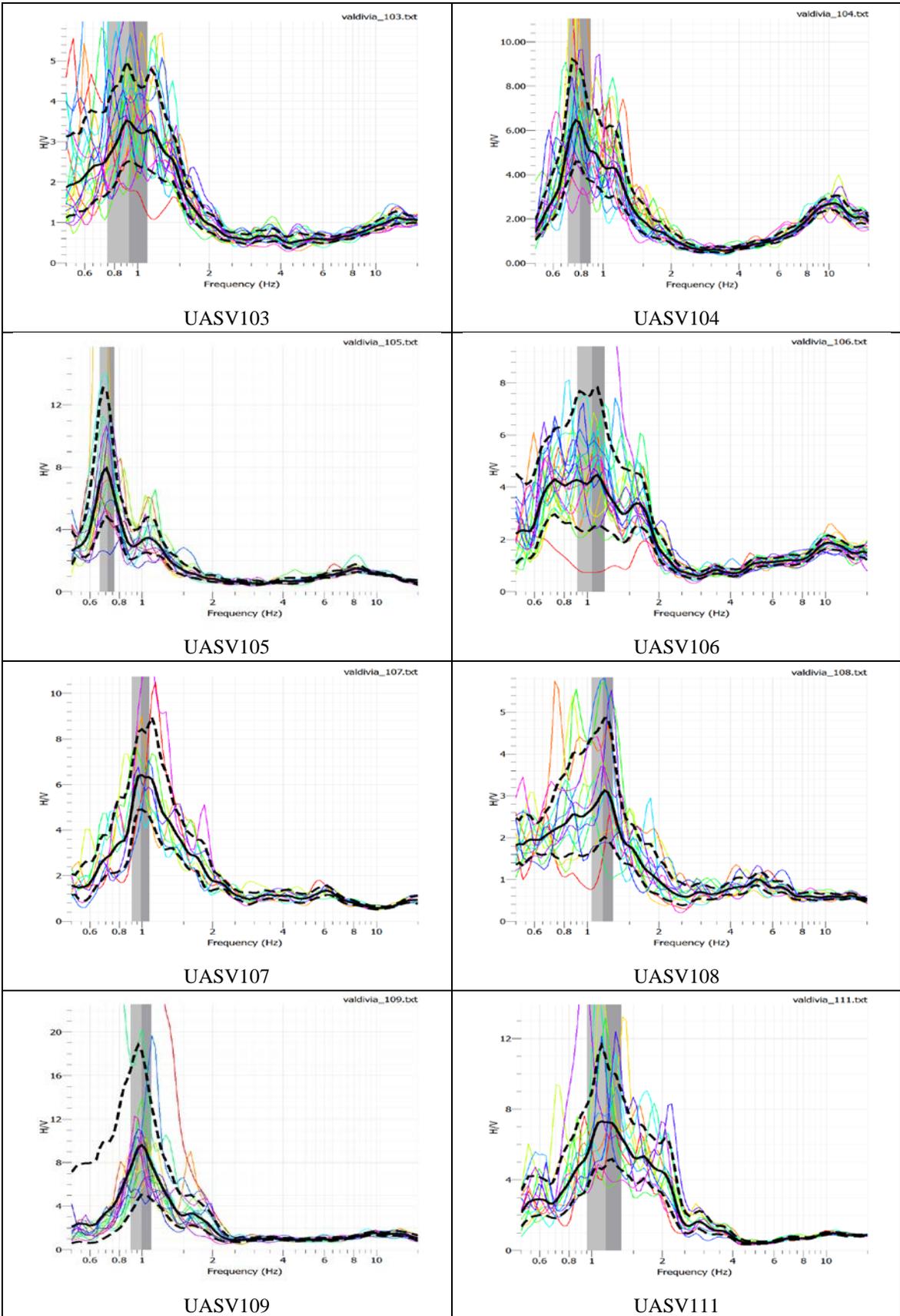
2	209	0,842	1,188	18	Aceptado	650606	5590819
2	210	0,765	1,307	27	No se distingue el peak	650884	5590799
2	211	0,821	1,218	20	Aceptado	650539	5590652
2	212	1,260	0,794	20	No se distingue el peak	650485	5590369
2	213	0,903	1,107	6	Insuficientes datos	650773	5590444
2	214	1,032	0,969	24	Aceptado	650905	5590272
2	215	1,180	0,847	16	No se distingue el peak	650607	5590179
2	216	1,280	0,781	15	No se distingue el peak	650380	5590195
2	217	1,100	0,909	17	No se distingue el peak	650779	5589875
2	218	1,840	0,543	4	Insuficientes datos	650416	5589950
2	219	1,330	0,752	14	No se distingue el peak	650466	5589712
2	220	0,803	1,245	7	Insuficientes datos	649710	5589995
2	221	0,797	1,255	24	Aceptado	650021	5589745
2	222	0,853	1,172	18	No se distingue el peak	649742	5589587
2	223	0,814	1,229	14	No se distingue el peak	649688	5589332
2	224	1,710	0,585	18	No se distingue el peak	650136	5589295
2	225	1,004	0,996	11	Insuficientes datos	649168	5589027
2	226	1,023	0,978	26	Aceptado	649175	5588641
2	227	0,895	1,117	9	Insuficientes datos	649182	5588253
2	228	0,877	1,140	24	Aceptado	650015	5590083
7	701	0,855	1,170	24	Aceptado	652648	5593706
7	702	0,858	1,166	23	No se distingue el peak	652983	5593719
7	703	0,784	1,276	14	Aceptado	652934	5593352
7	704	0,853	1,172	20	Aceptado	652827	5592916
7	705	0,814	1,229	15	Aceptado	652862	5592503
7	706	0,708	1,412	27	Aceptado	652596	5592499
7	707	0,781	1,280	26	Aceptado	651523	5591251

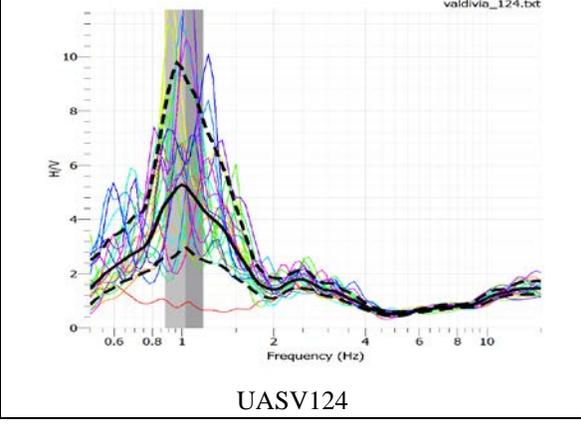
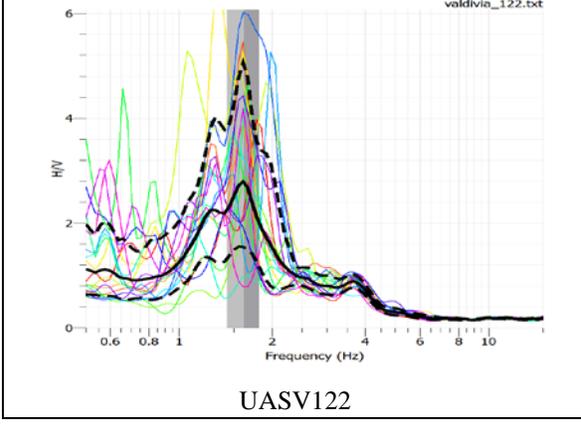
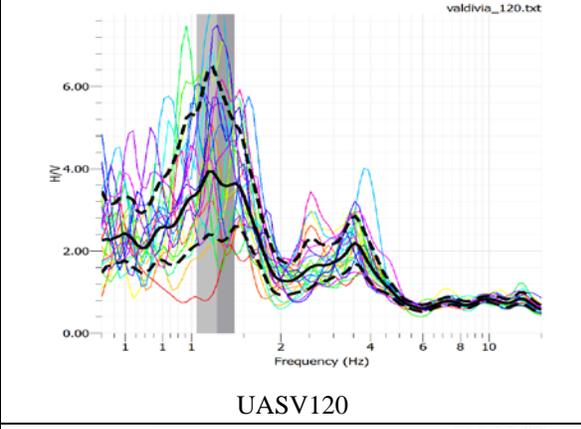
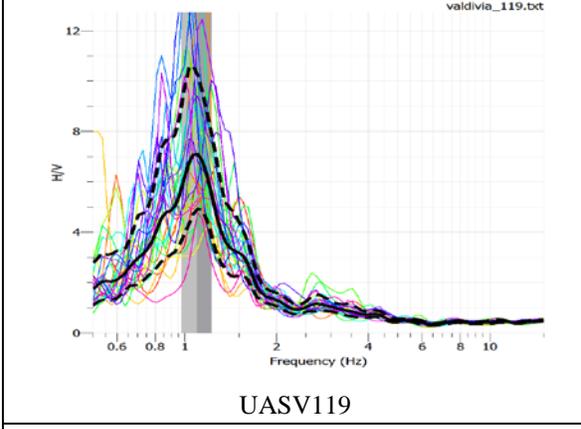
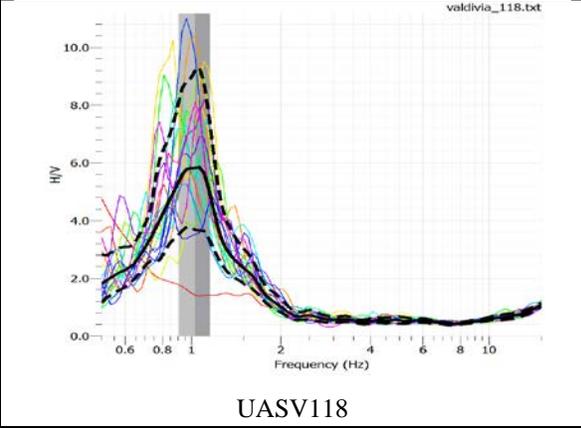
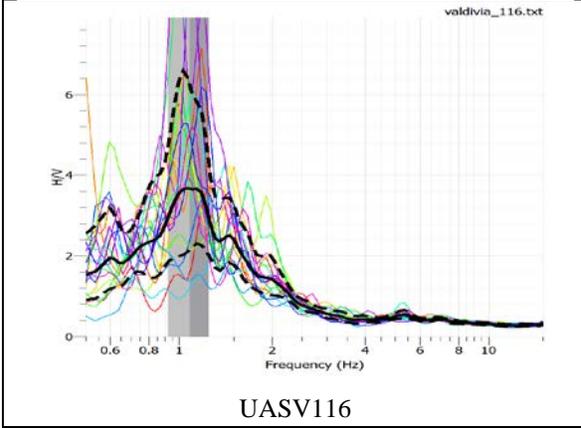
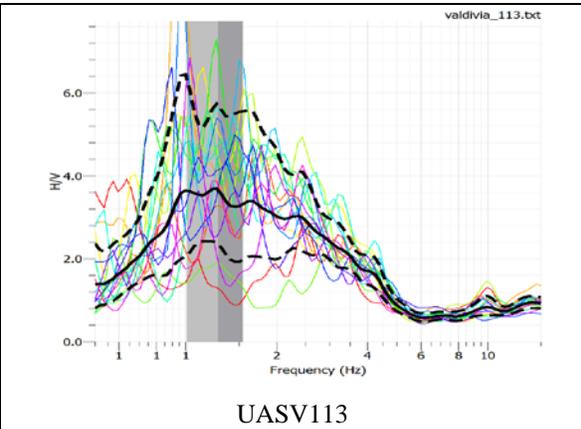
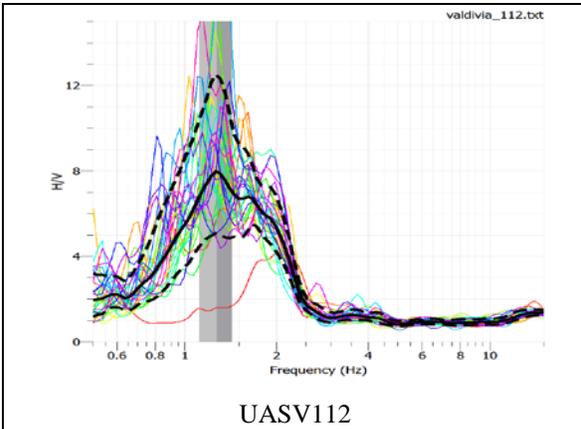
7	708	0,813	1,230	13	No se distingue el peak	651248	5591841
7	709	0,744	1,344	25	No se distingue el peak	651983	5591951
7	710	0,723	1,383	25	No se distingue el peak	652274	5592228
7	711	0,729	1,372	27	Aceptado	652608	5591980
7	712	0,835	1,198	26	No se distingue el peak	652280	5591940
7	713	1,613	0,620	7	Insuficientes datos	652316	5591682
7	714	1,126	0,888	13	No se distingue el peak	652066	5591589
7	715	1,006	0,994	19	No se distingue el peak	651726	5590951
7	716	1,140	0,877	27	Aceptado	652619	5591378
7	717	1,320	0,758	26	Aceptado	652458	5591036
7	718	0,994	1,006	20	Aceptado	652389	5591400
7	719	1,140	0,877	23	Aceptado	652053	5591387
7	720	1,090	0,917	26	Aceptado	652128	5591094
7	721	1,110	0,901	23	No se distingue el peak	651955	5591225
7	722	1,270	0,787	9	Insuficientes datos	651611	5591455
7	723	0,795	1,258	19	No se distingue el peak	651719	5591747
7	724	0,986	1,014	15	Aceptado	650922	5592248
-	UCHV001	0,998	1,002	40	Aceptado	653291	5588252
-	UCHV002	0,945	1,058	39	Aceptado	653290	5588254
-	UCHV003	0,988	1,012	37	Aceptado	653294	5588285
-	UCHV004	0,804	1,243	33	Aceptado	649689	5589448
-	UCHV005	0,807	1,239	33	Aceptado	649757	5589369
-	UCHV006	0,856	1,168	41	Aceptado	649948	5592129
-	UCHV007	0,817	1,224	40	Aceptado	649948	5592127
-	UCHV009	0,815	1,227	38	Aceptado	649841	5592255
-	UCHV010	0,825	1,212	45	Aceptado	649822	5592262
-	UCHV011	0,779	1,283	33	Aceptado	649767	5592136

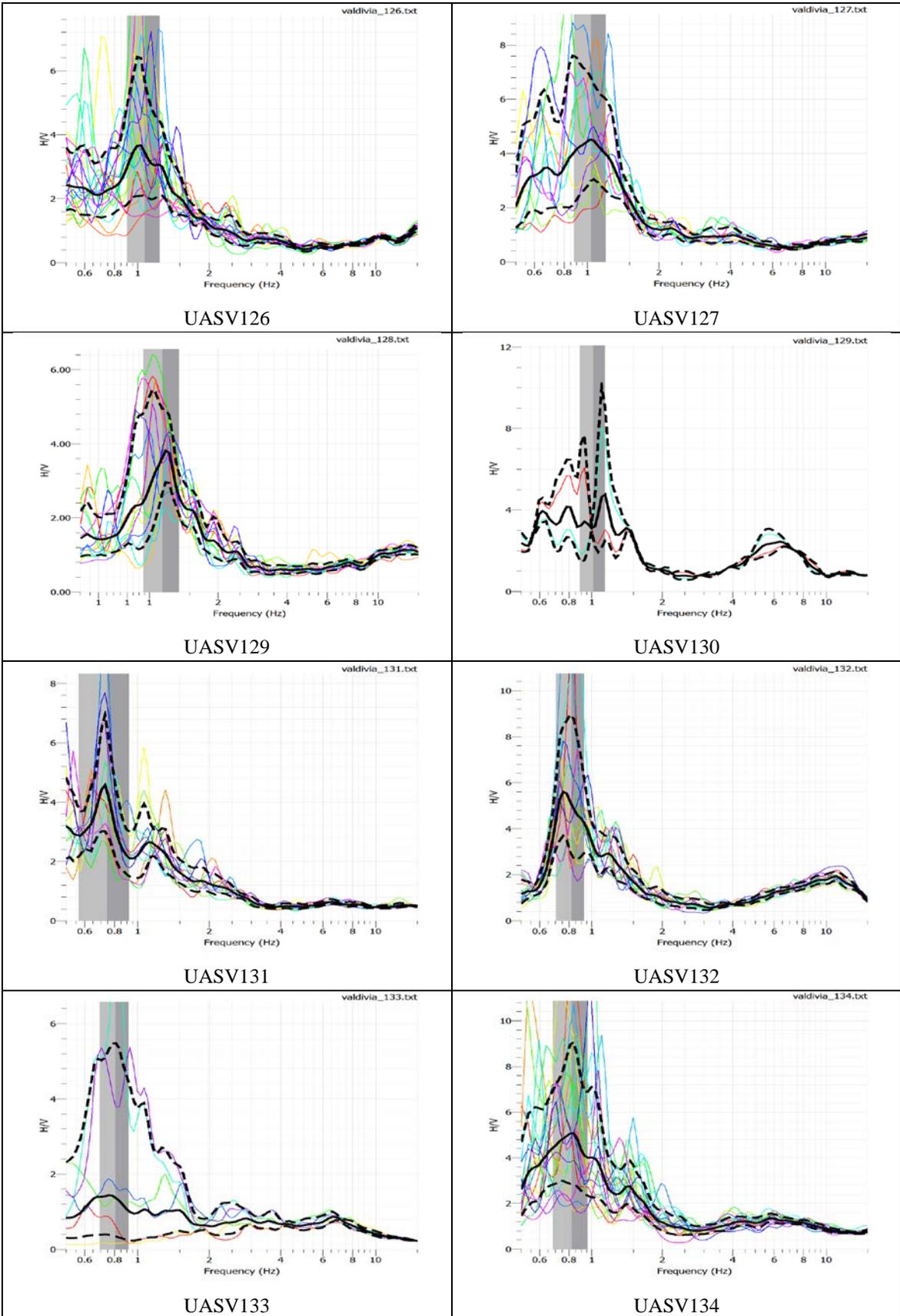
-	UCHV012	0,801	1,248	31	Aceptado	649757	5592147
-	UCHV015	0,804	1,243	36	Aceptado	649946	5592449
-	UCHV016	0,733	1,365	39	Aceptado	649656	5592372
-	UCHV017	1,129	0,886	41	Aceptado	650028	5590326
-	UCHV018	1,114	0,898	32	Aceptado	650012	5590371
-	UCHV020	0,780	1,282	43	Aceptado	650622	5589460
-	UCHV021	-	-	-	Rechazado	650051	5591595
-	UCHV022	1,047	0,955	31	Aceptado	650596	5591525
-	UCHV023	0,751	1,332	49	Repetido	651722	5591610
-	UCHV024	0,750	1,333	49	Aceptado	651725	5591577
-	UCHV025	0,764	1,309	47	Aceptado	651752	5591595
-	UCHV026	0,757	1,321	48	Repetido	651729	5591596
-	UCHV027	0,745	1,342	43	Repetido	651730	5591605
-	UCHV028	0,763	1,311	42	Repetido	651733	5591608
-	UCHV029	0,737	1,356	39	Aceptado	651608	5591499

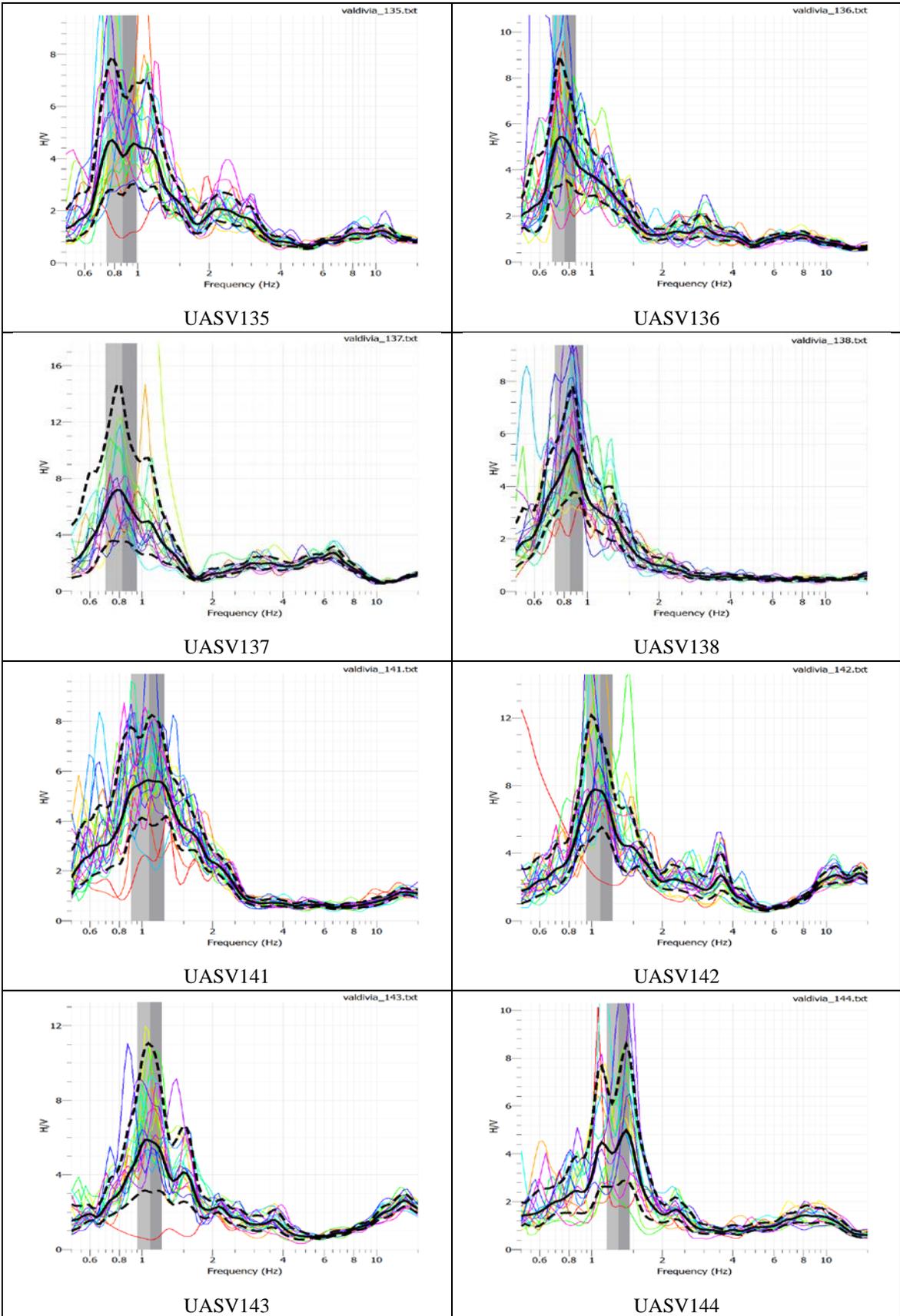
7.3.2 Gráficos de razón espectral H/V, mediciones Alvarado (2012)

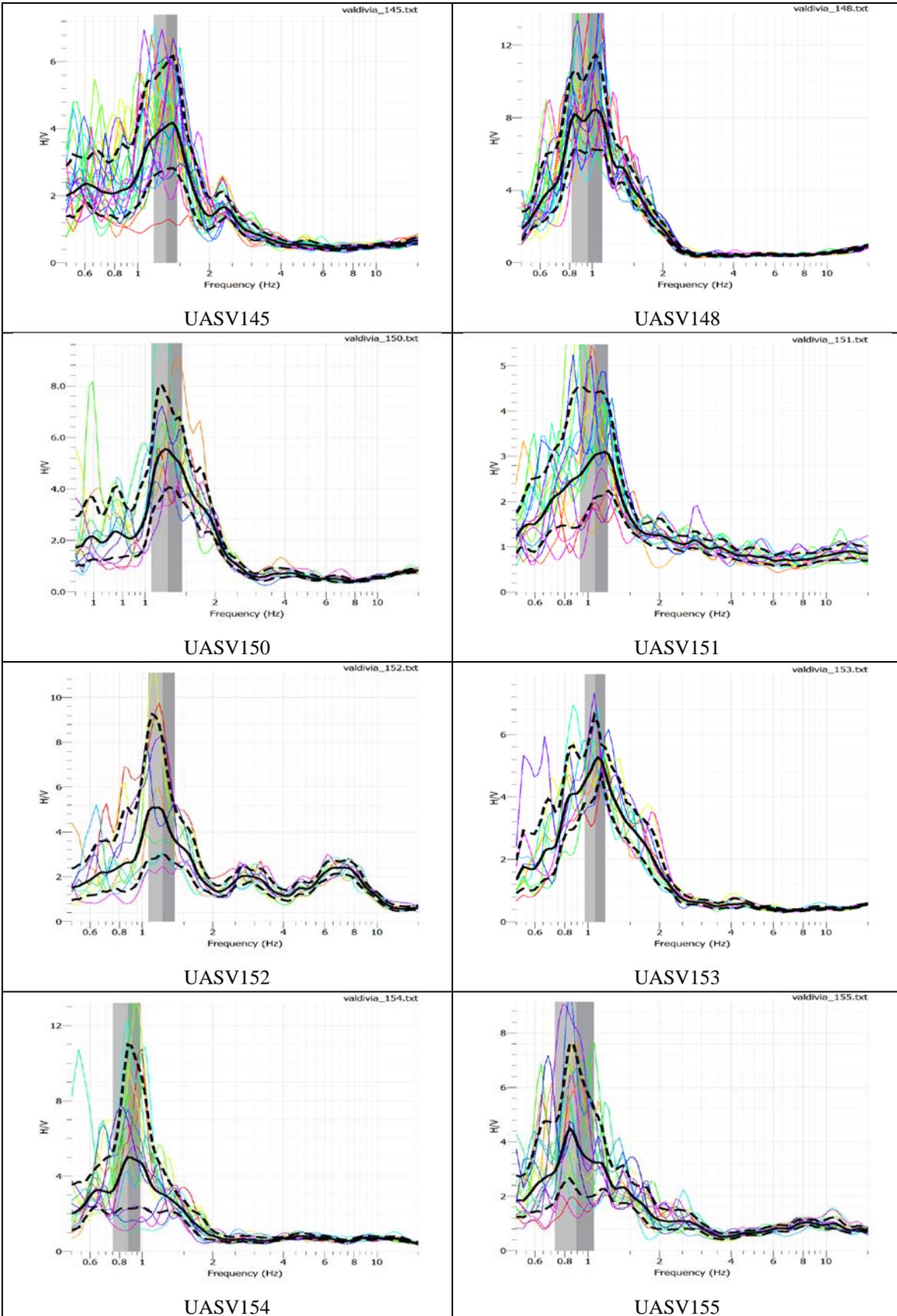


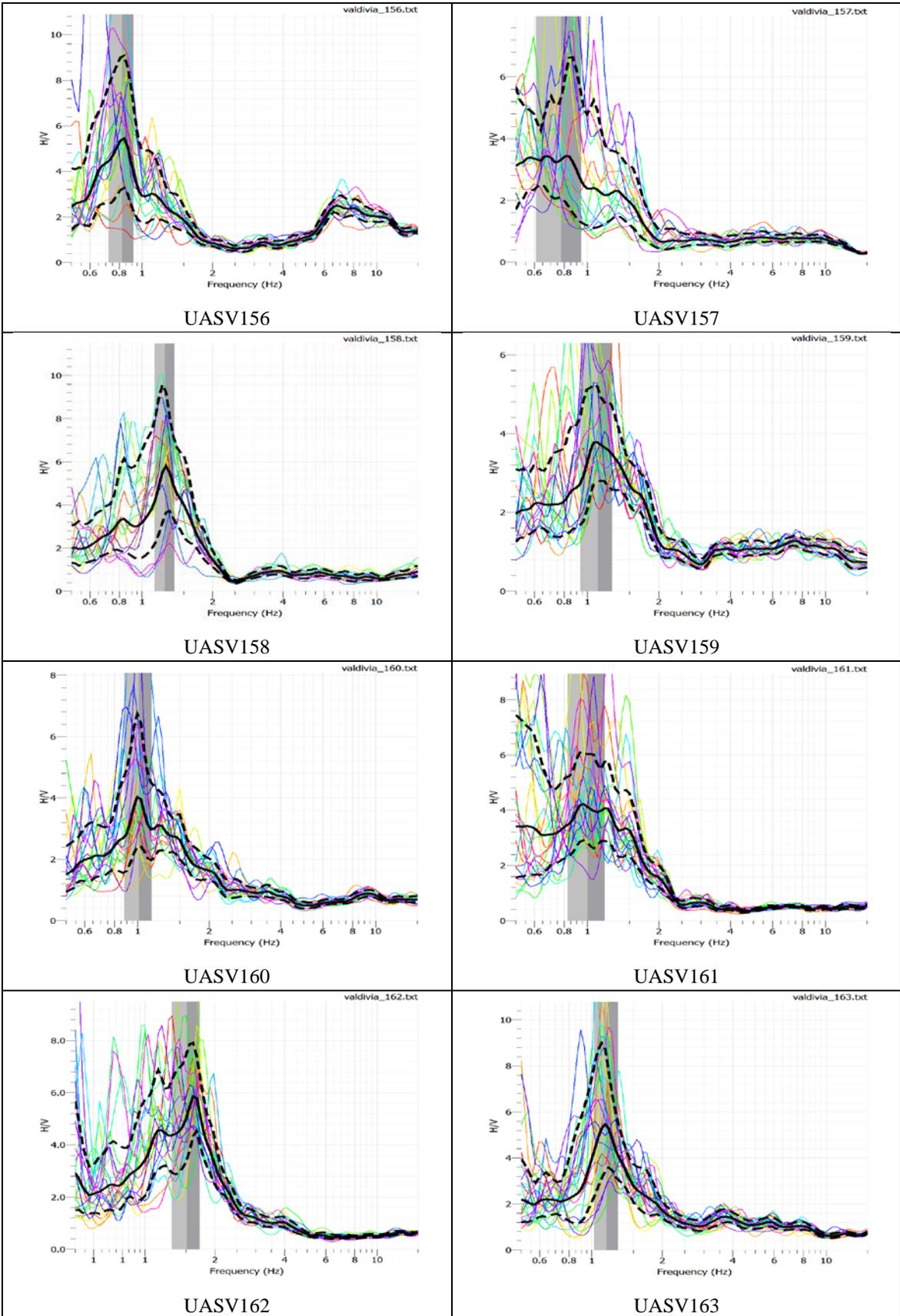


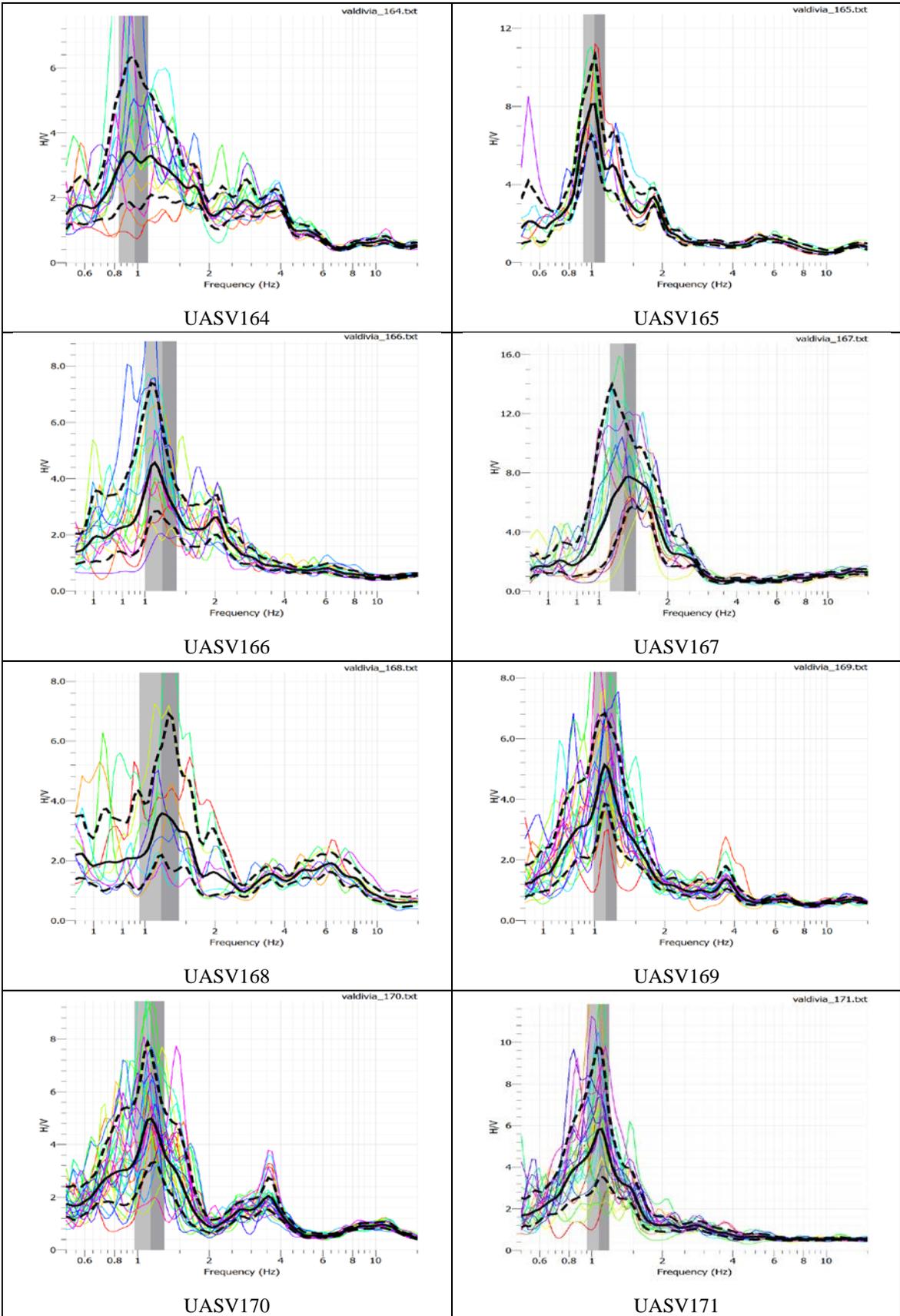


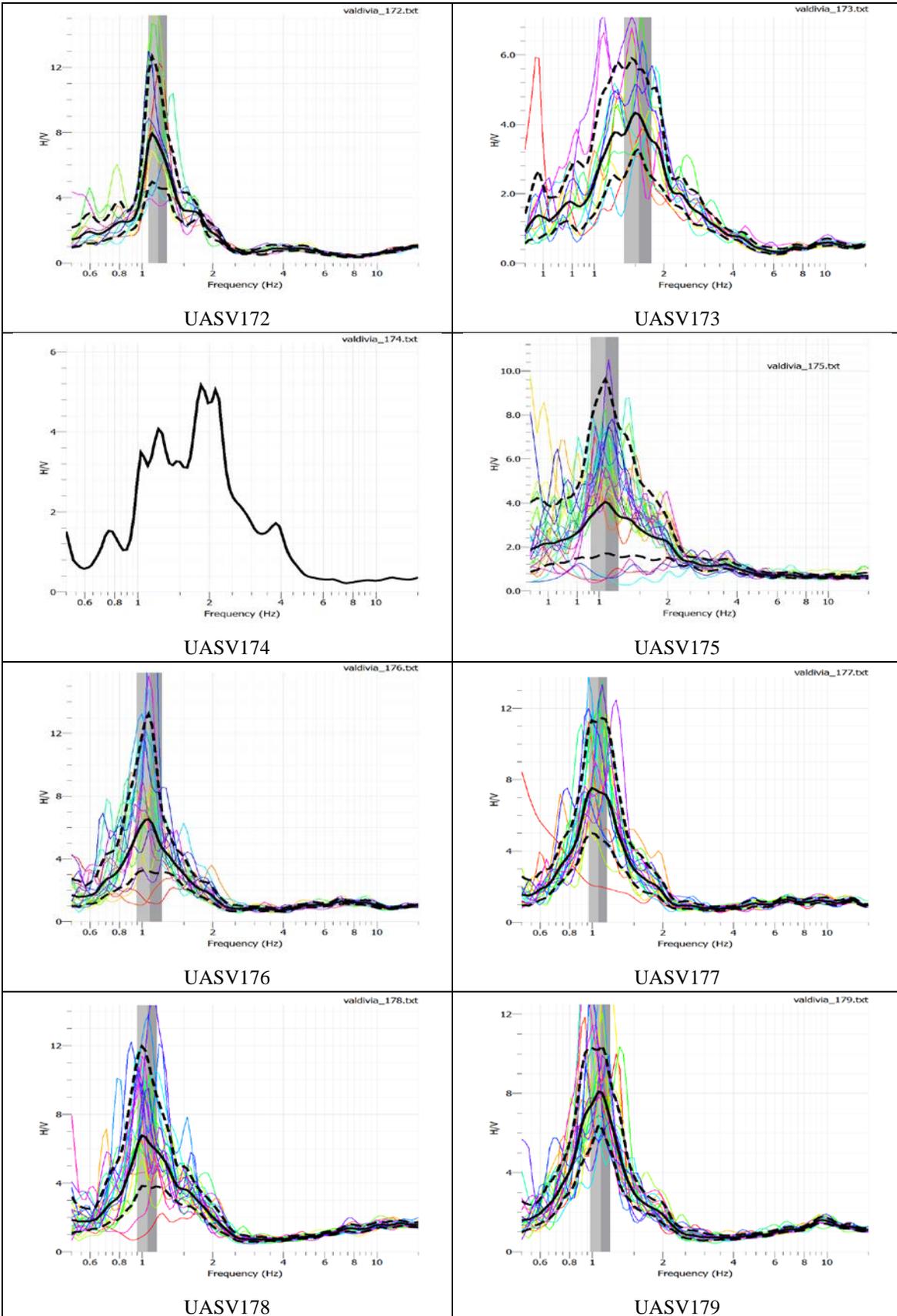


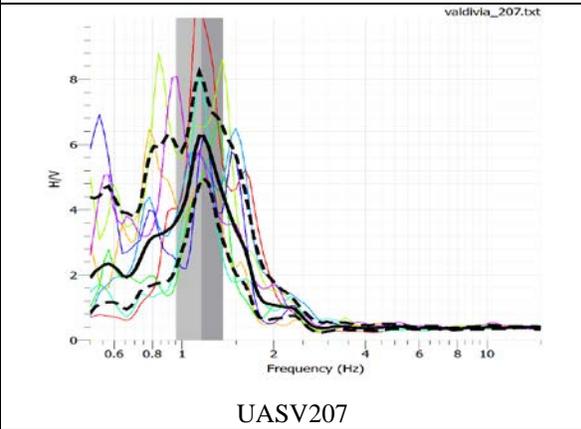
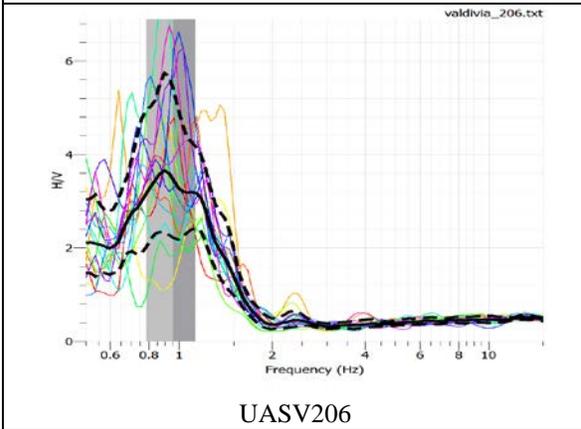
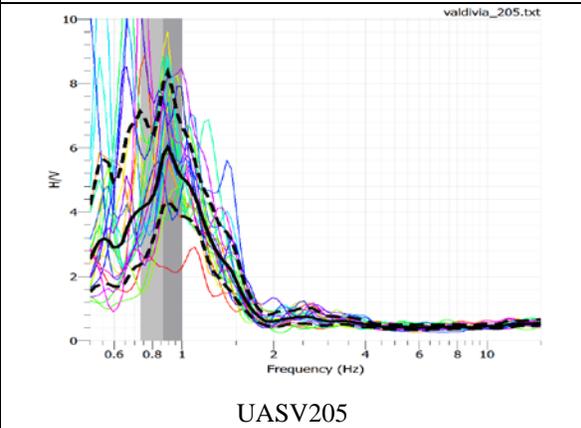
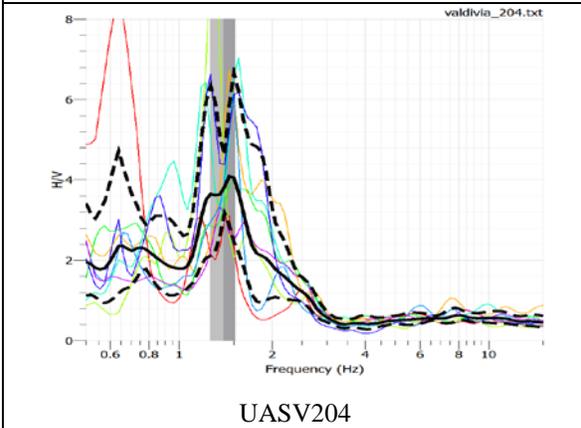
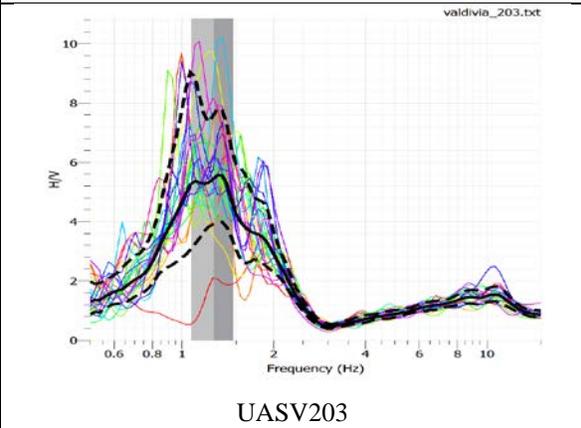
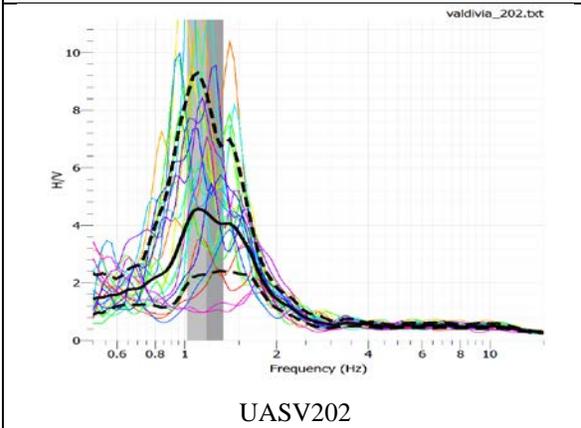
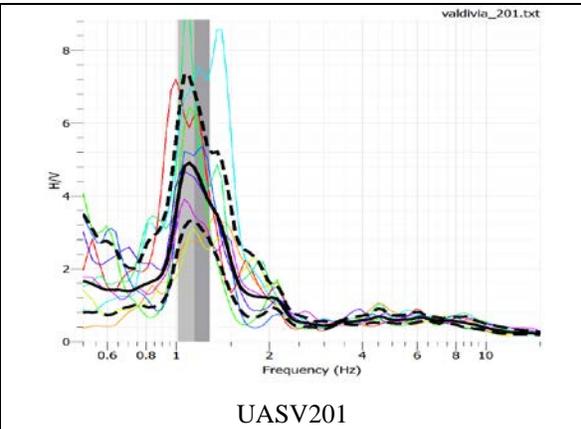
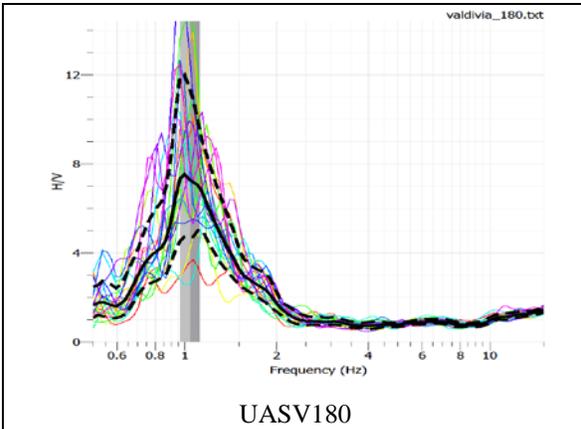


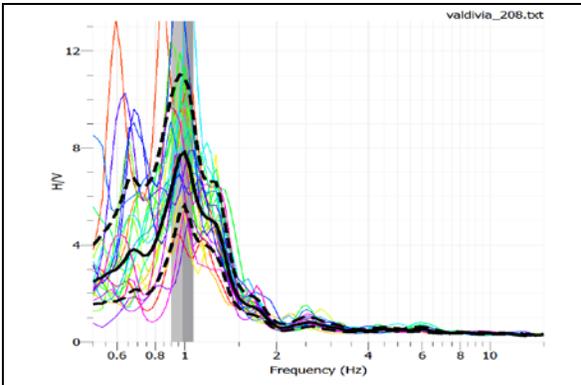




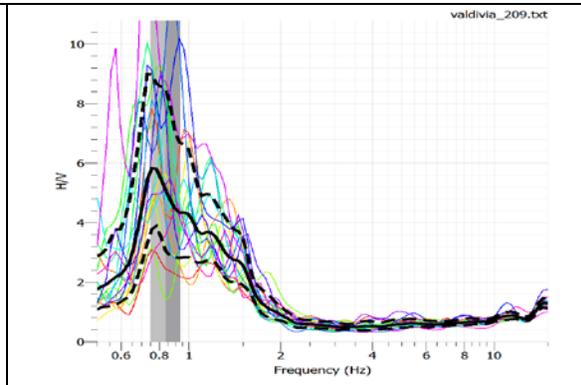




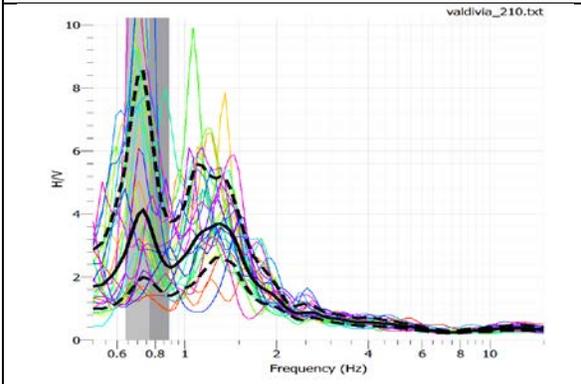




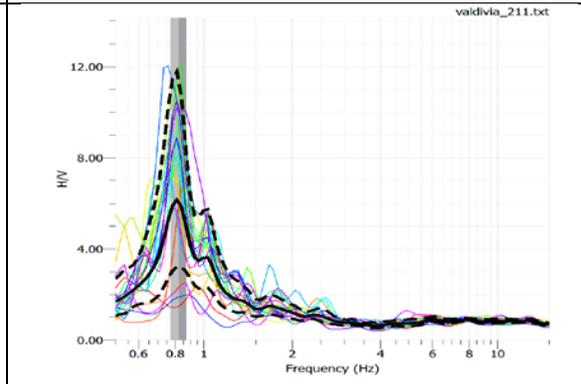
UASV208



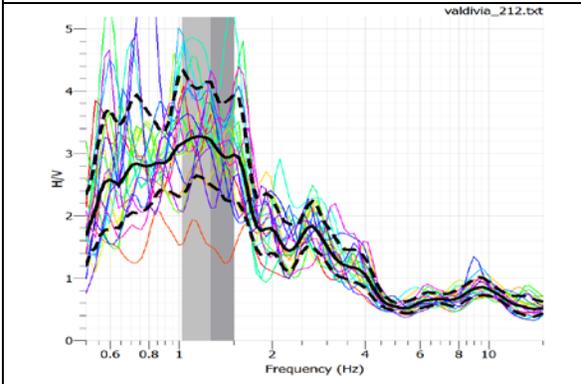
UASV209



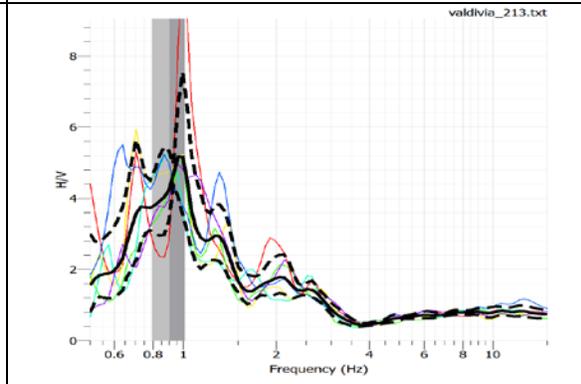
UASV210



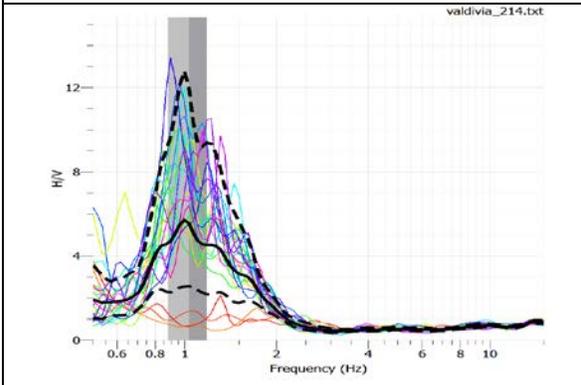
UASV211



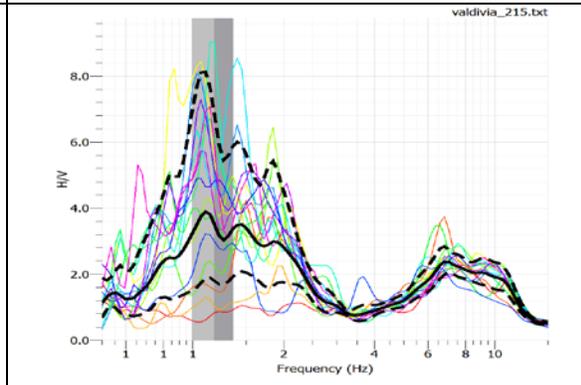
UASV212



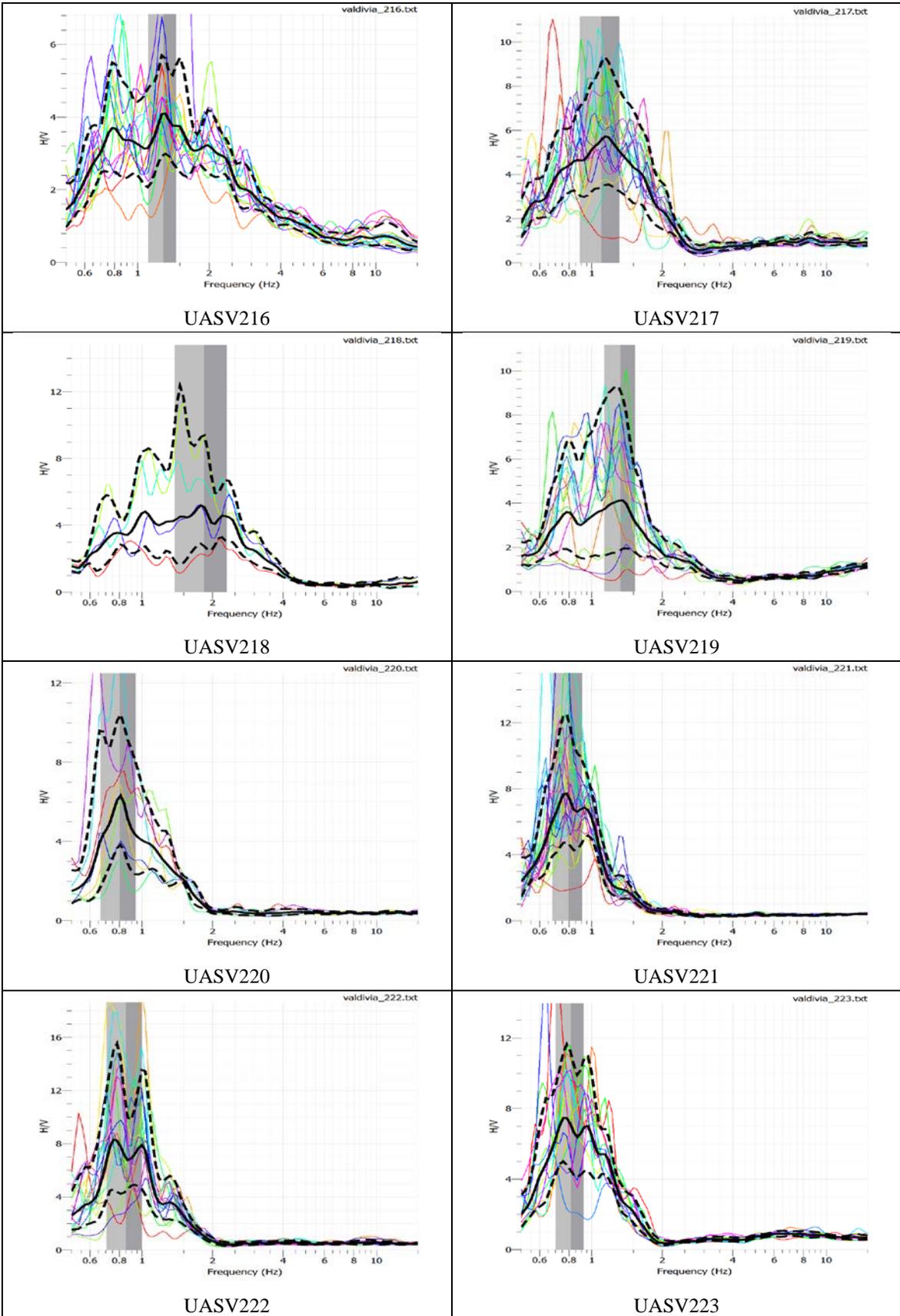
UASV213

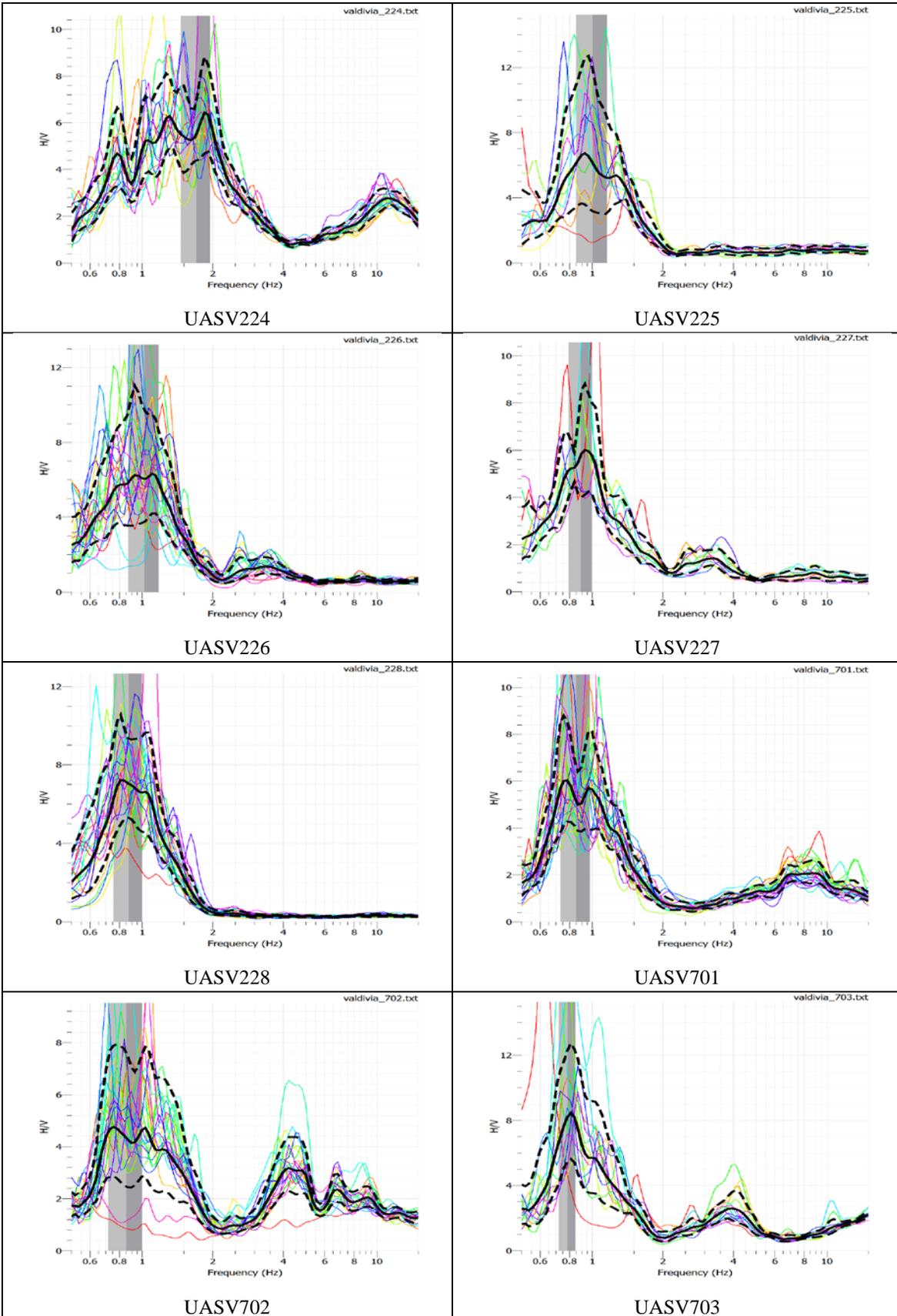


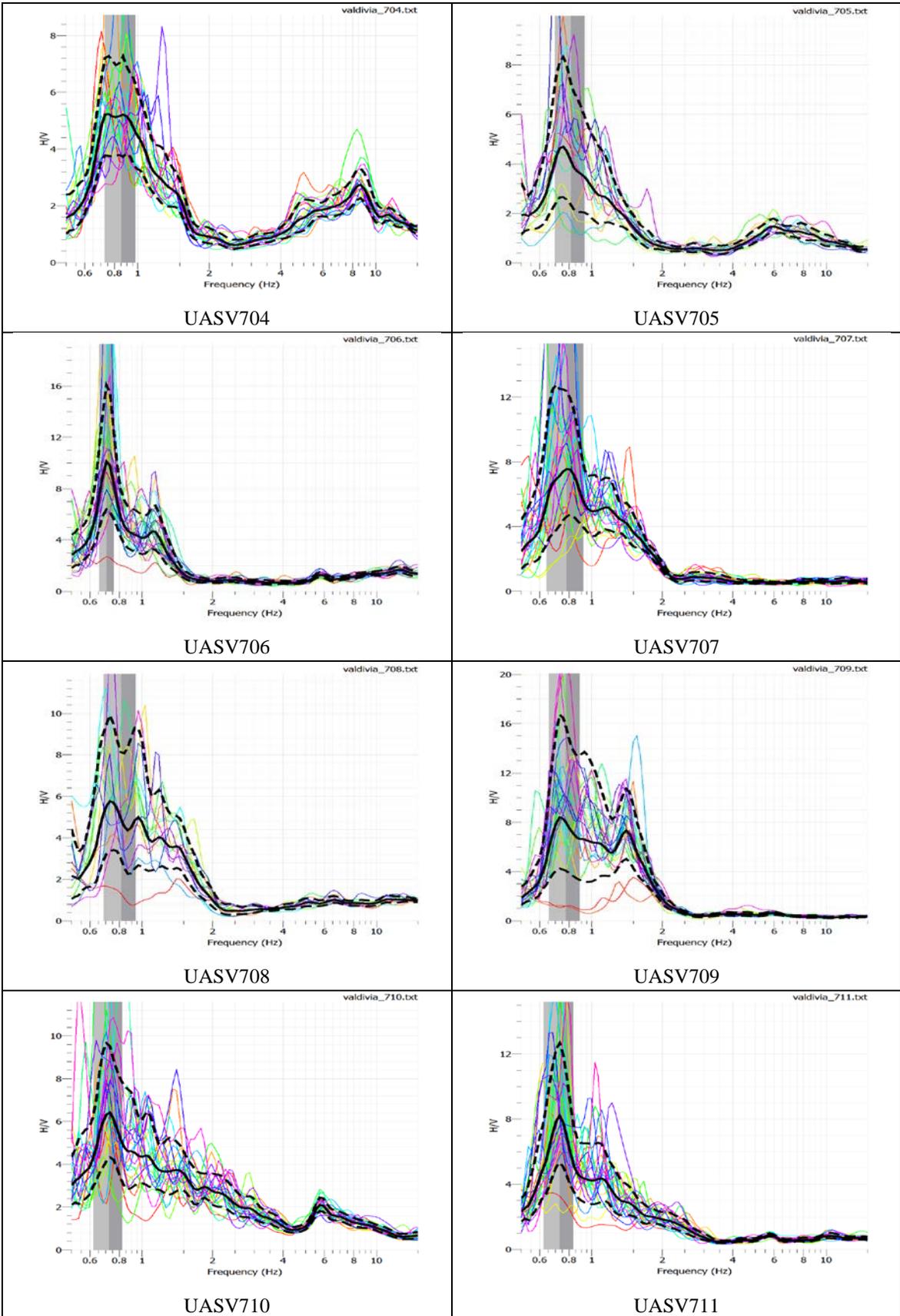
UASV214

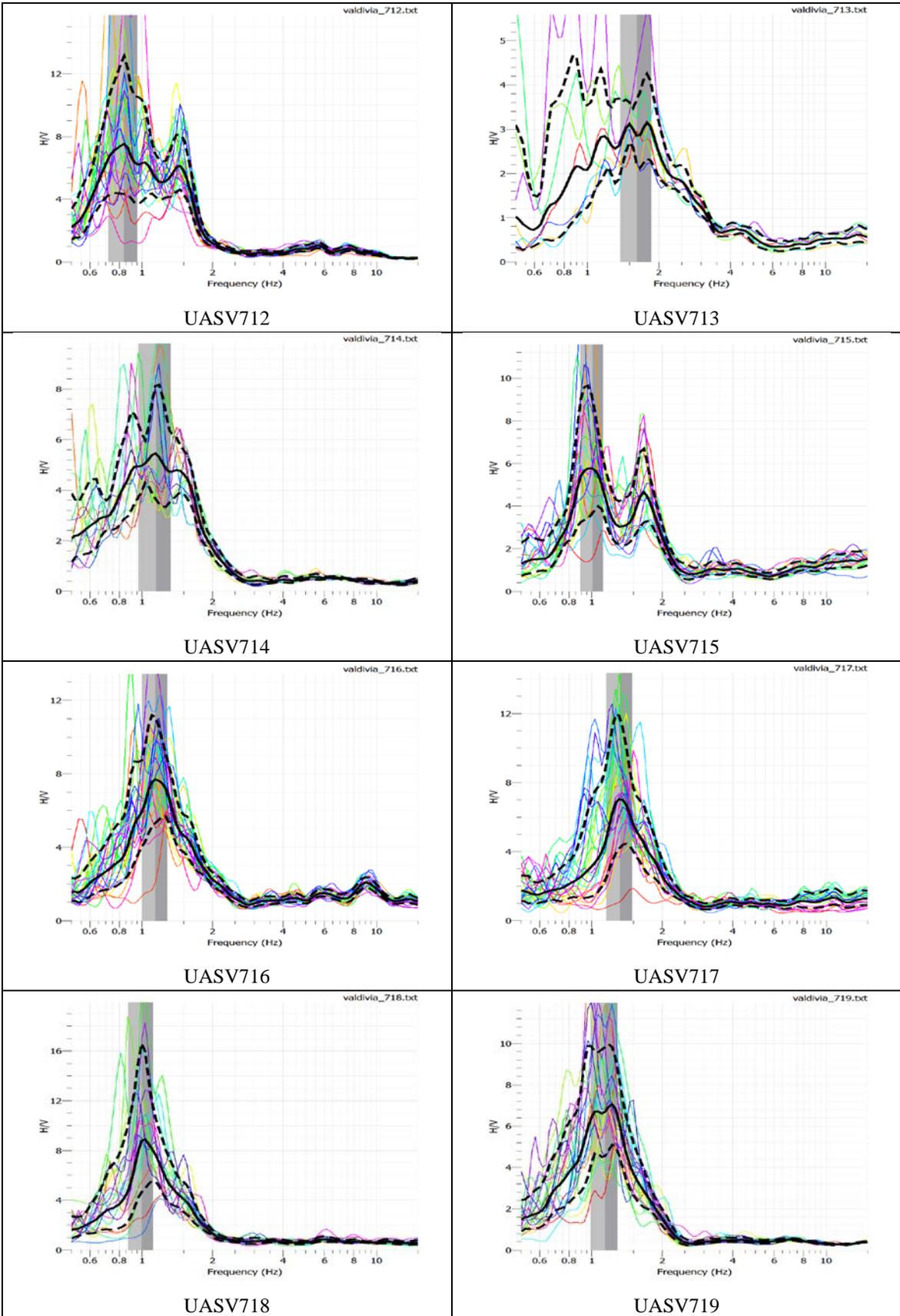


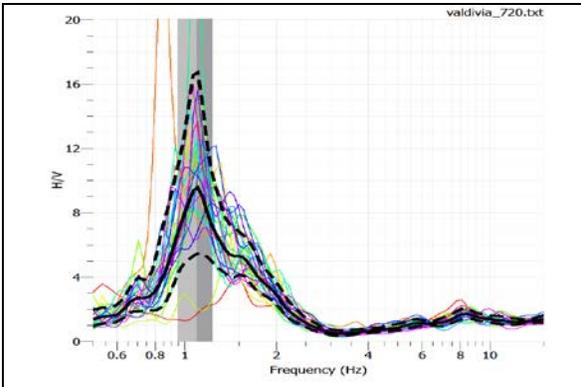
UASV215



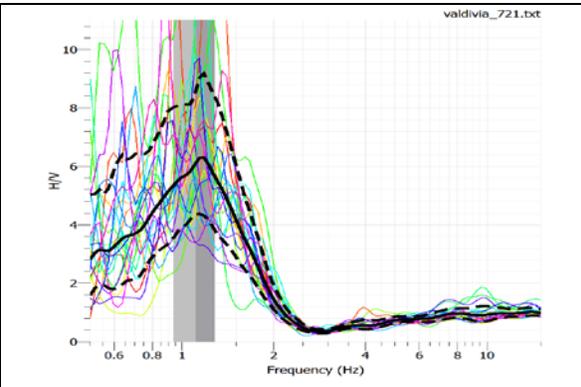




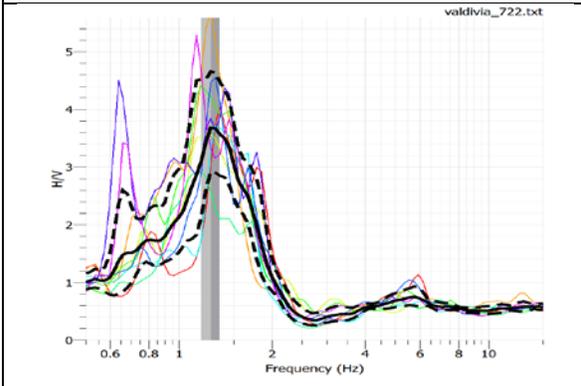




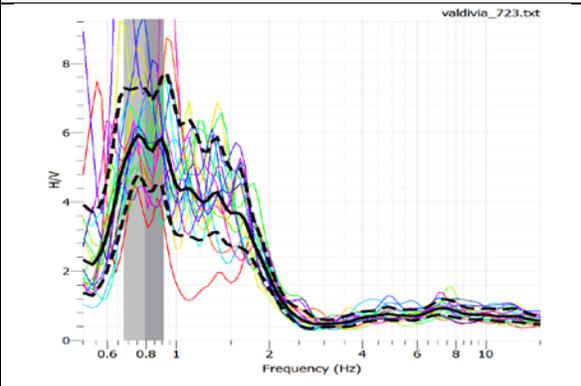
UASV720



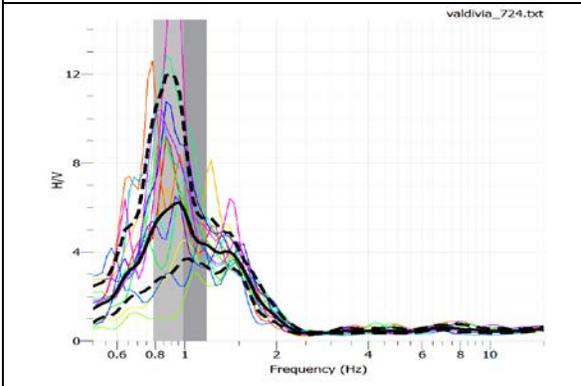
UASV721



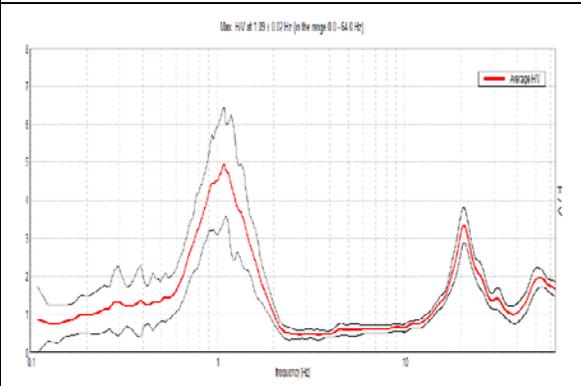
UASV722



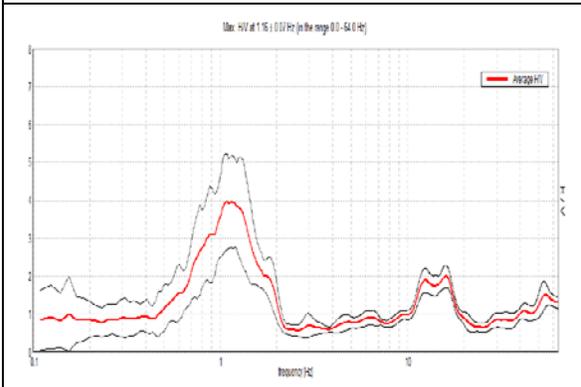
UASV723



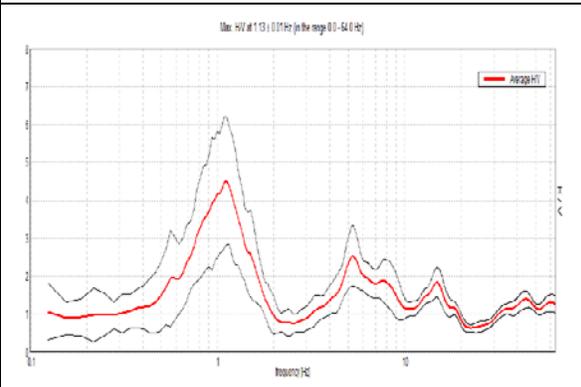
UASV724



Medición complementaria - UASV301

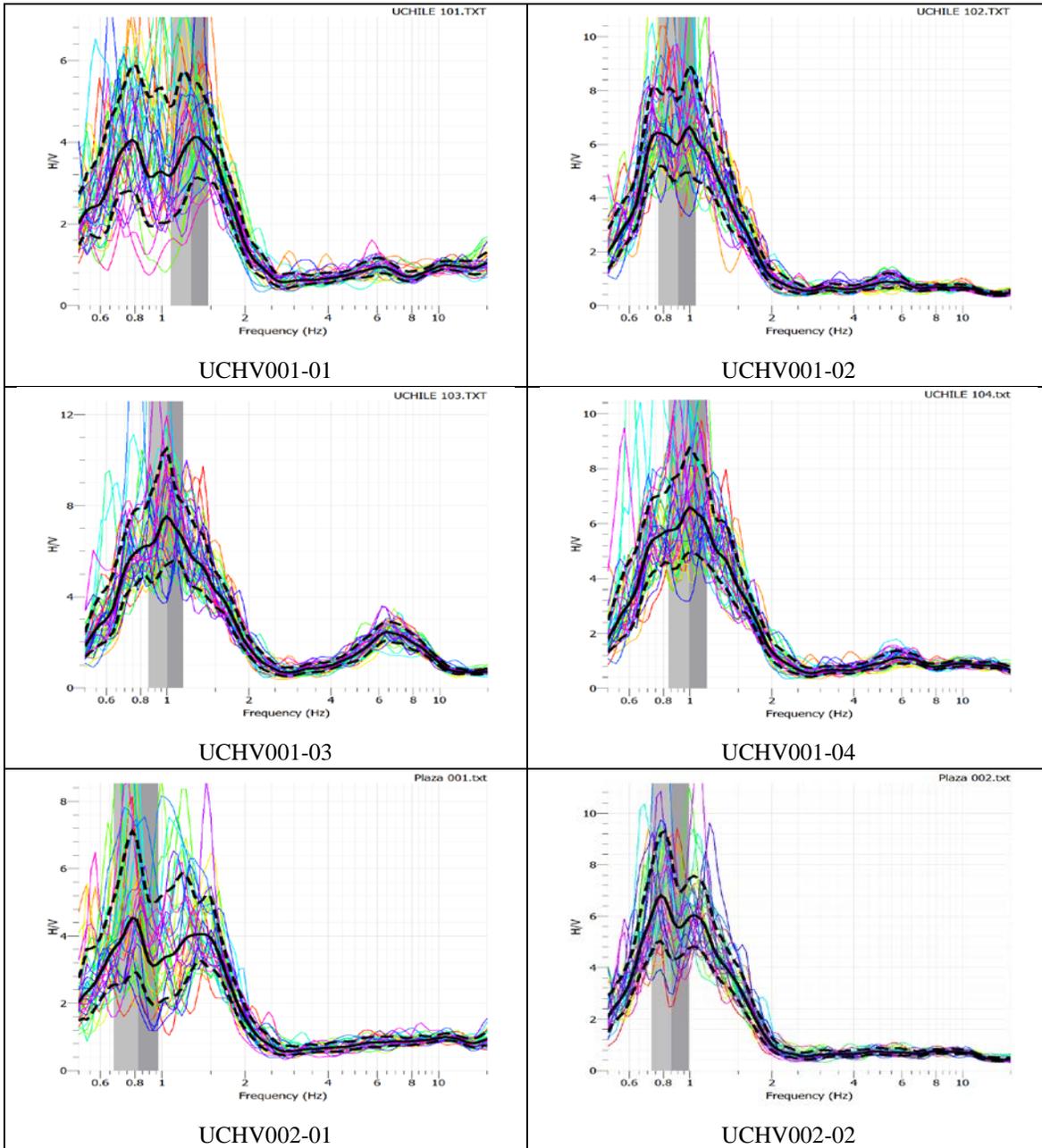


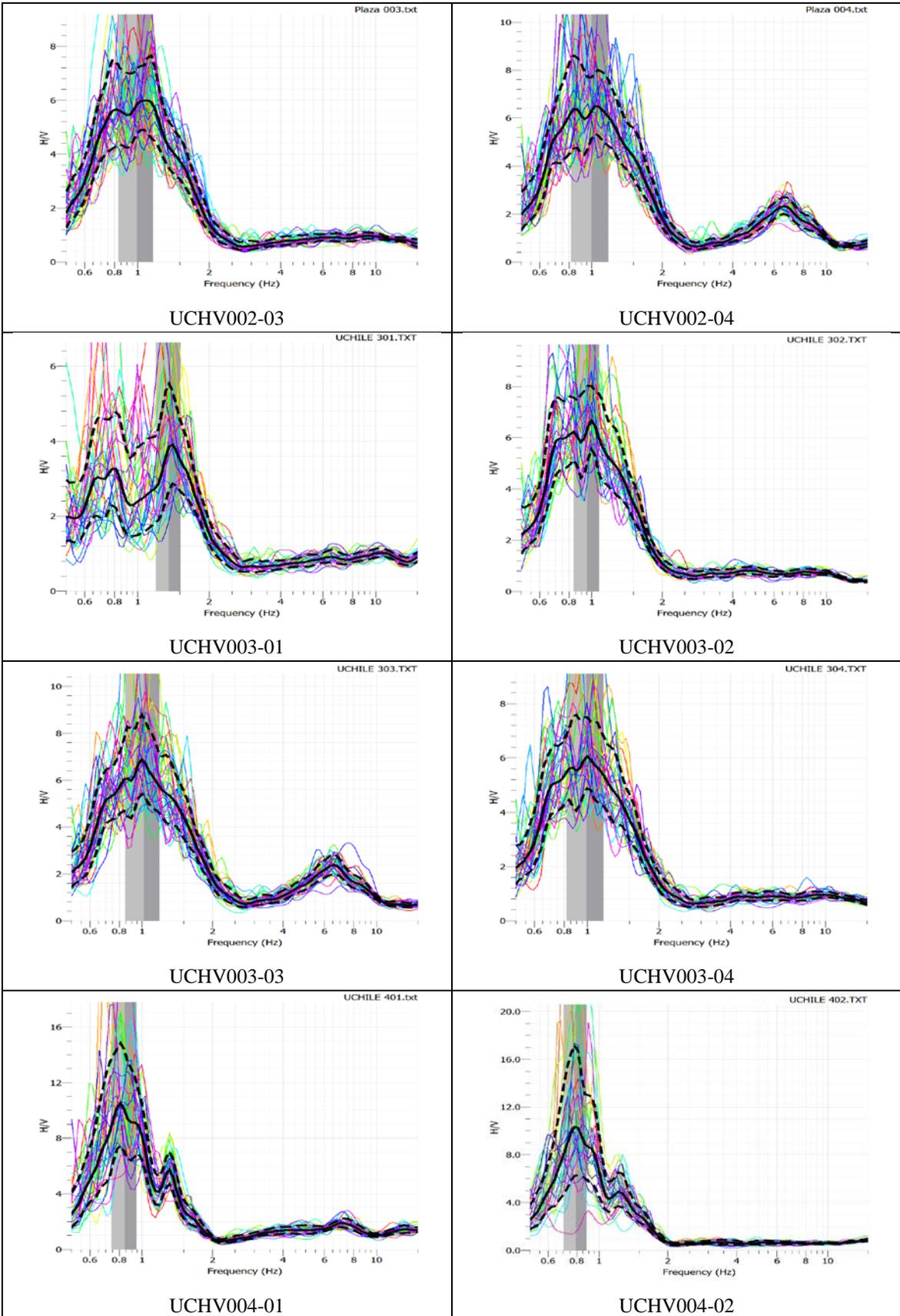
Medición complementaria - UASV302

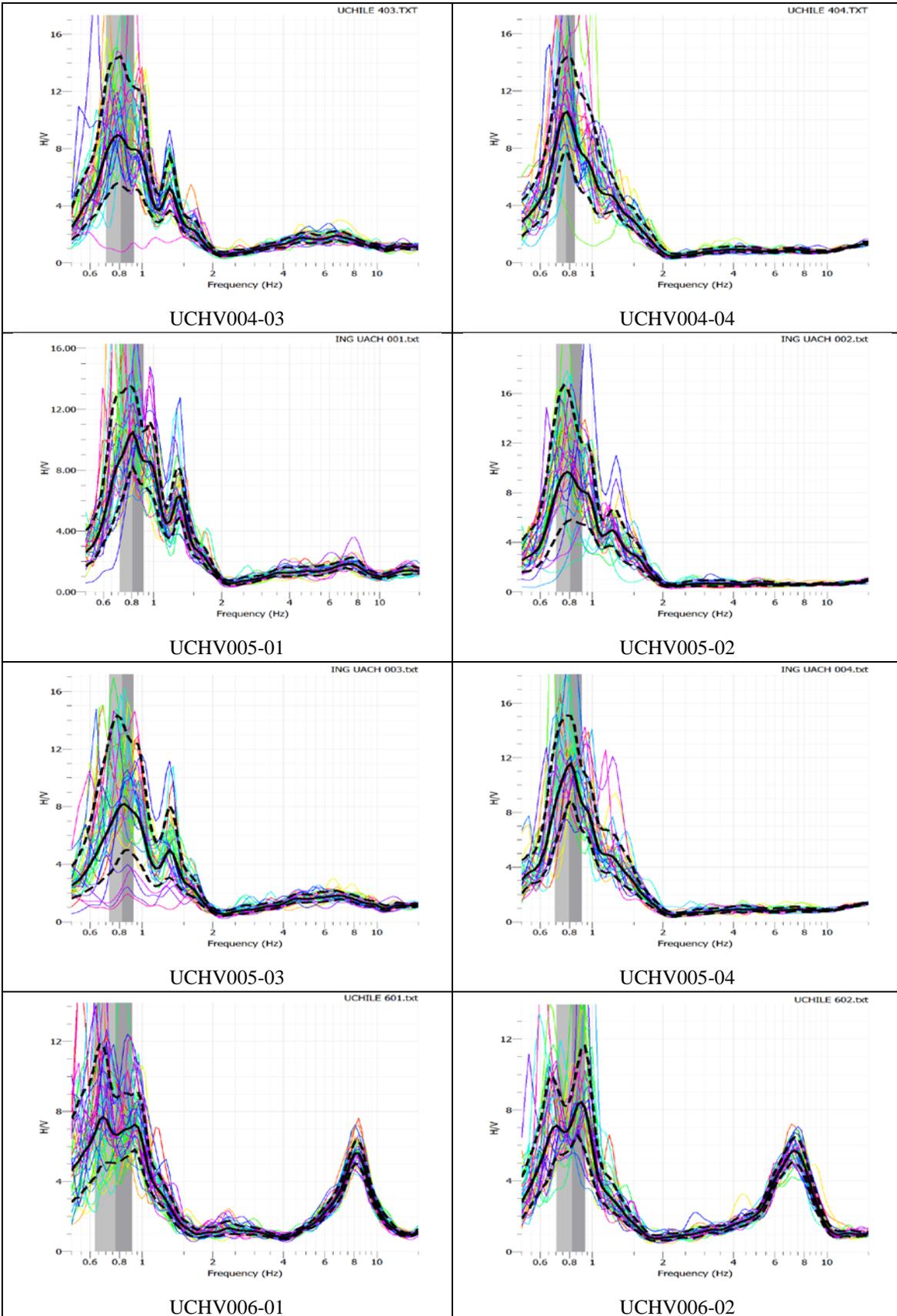


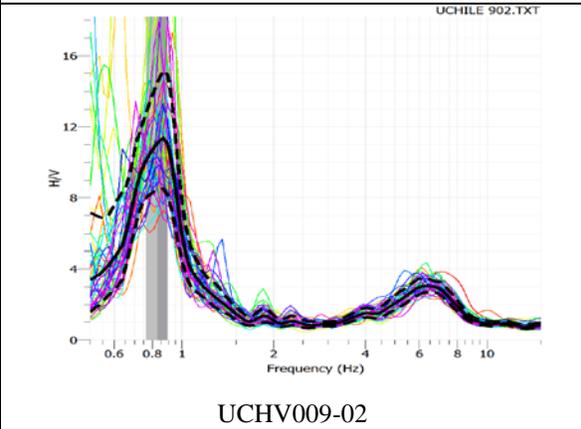
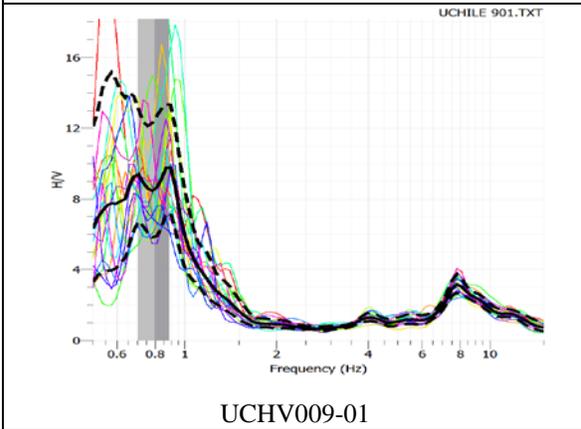
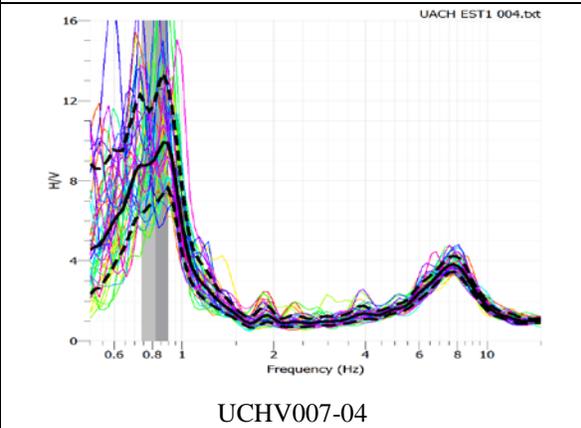
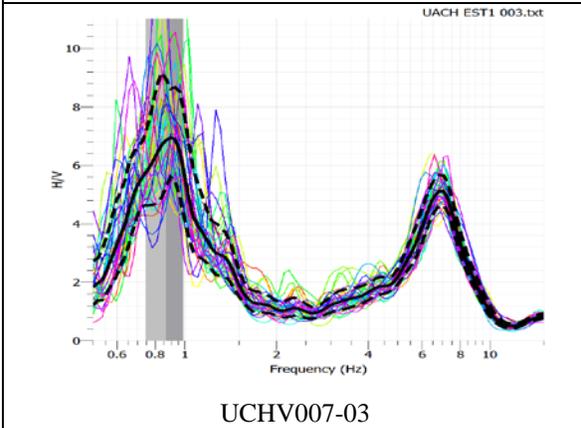
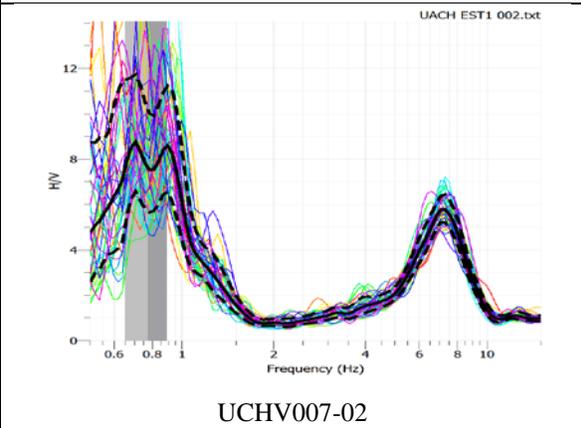
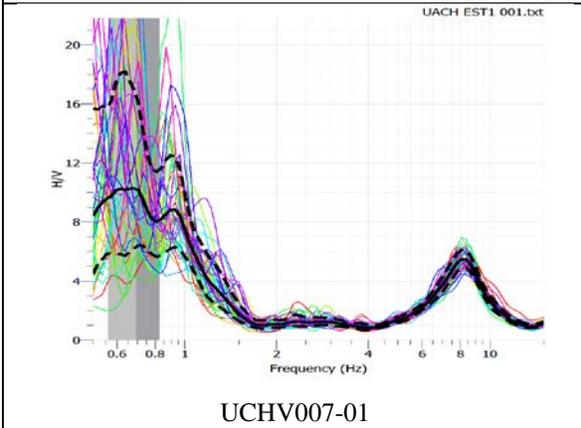
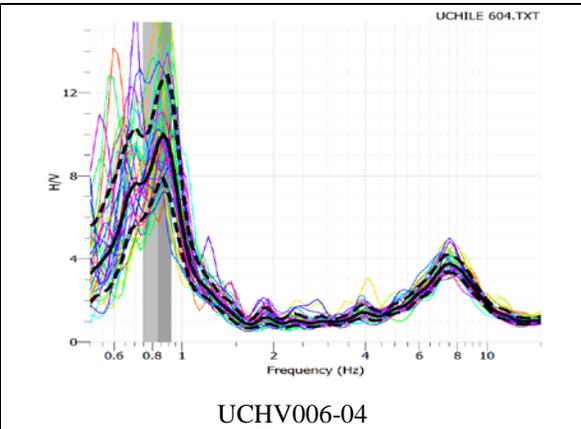
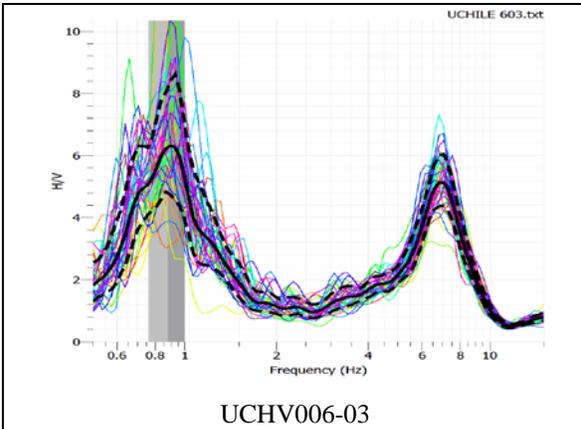
Medición complementaria - UASV304

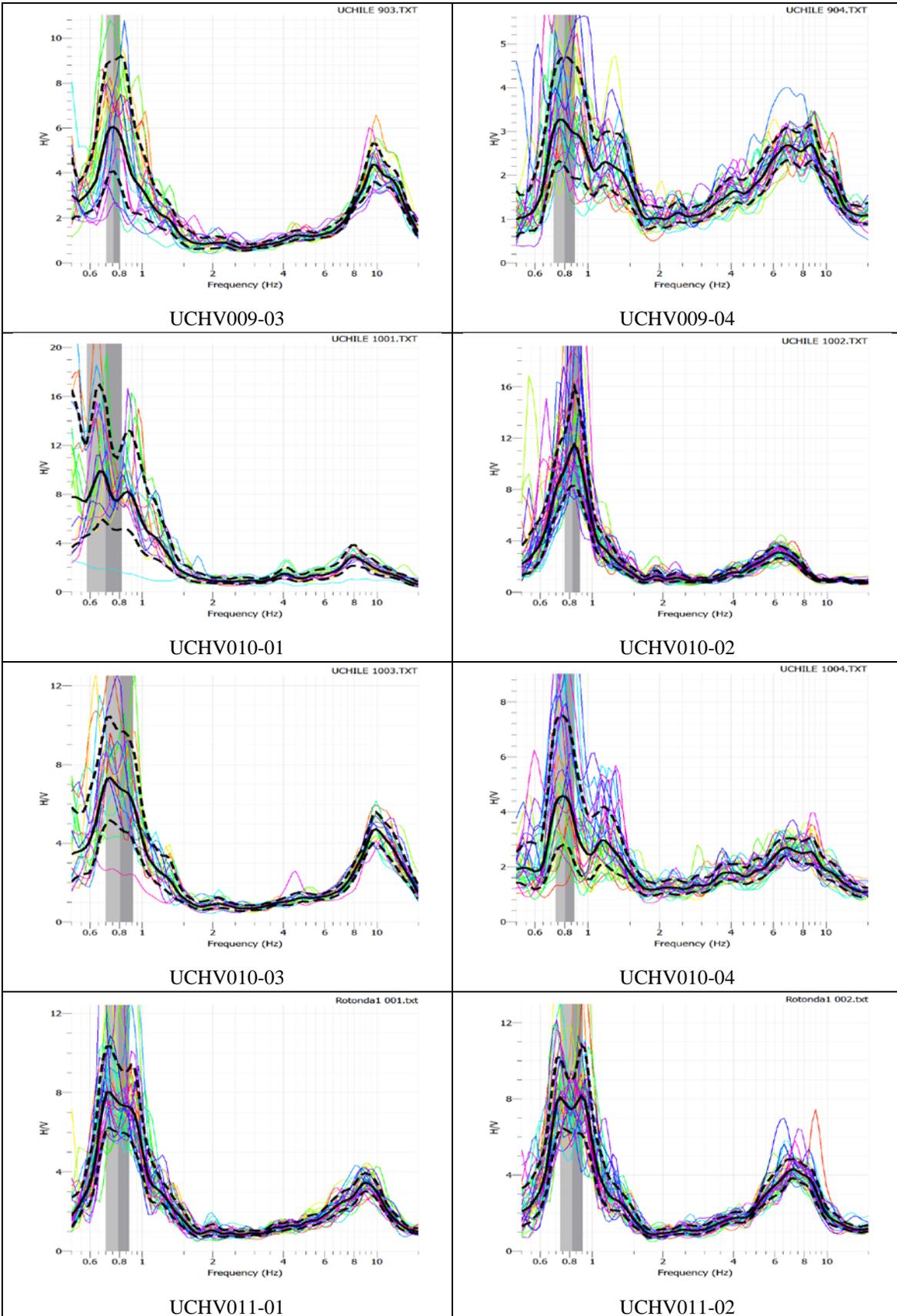
7.3.3 Gráficos de razón espectral H/V, mediciones Universidad de Chile (2016)

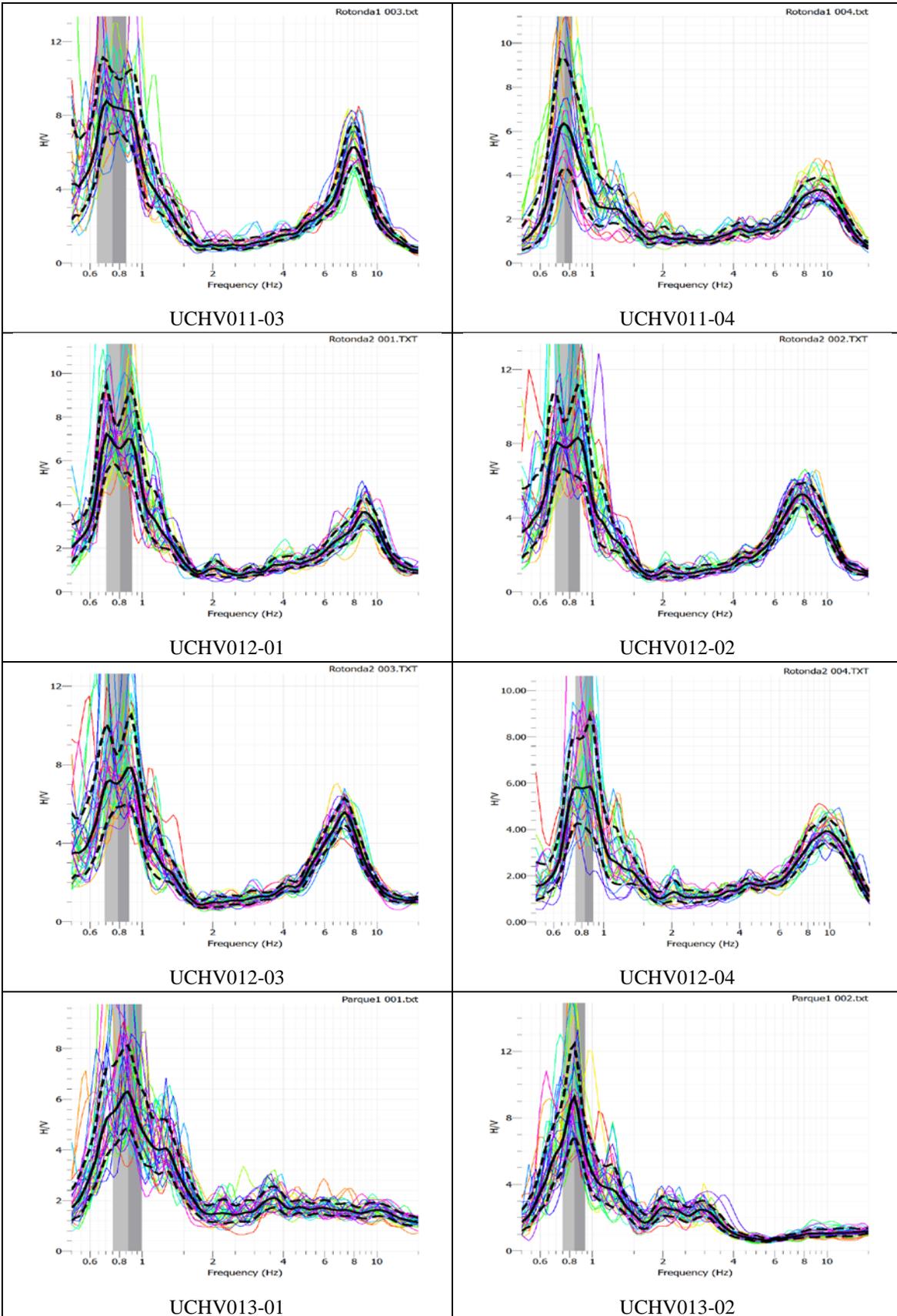


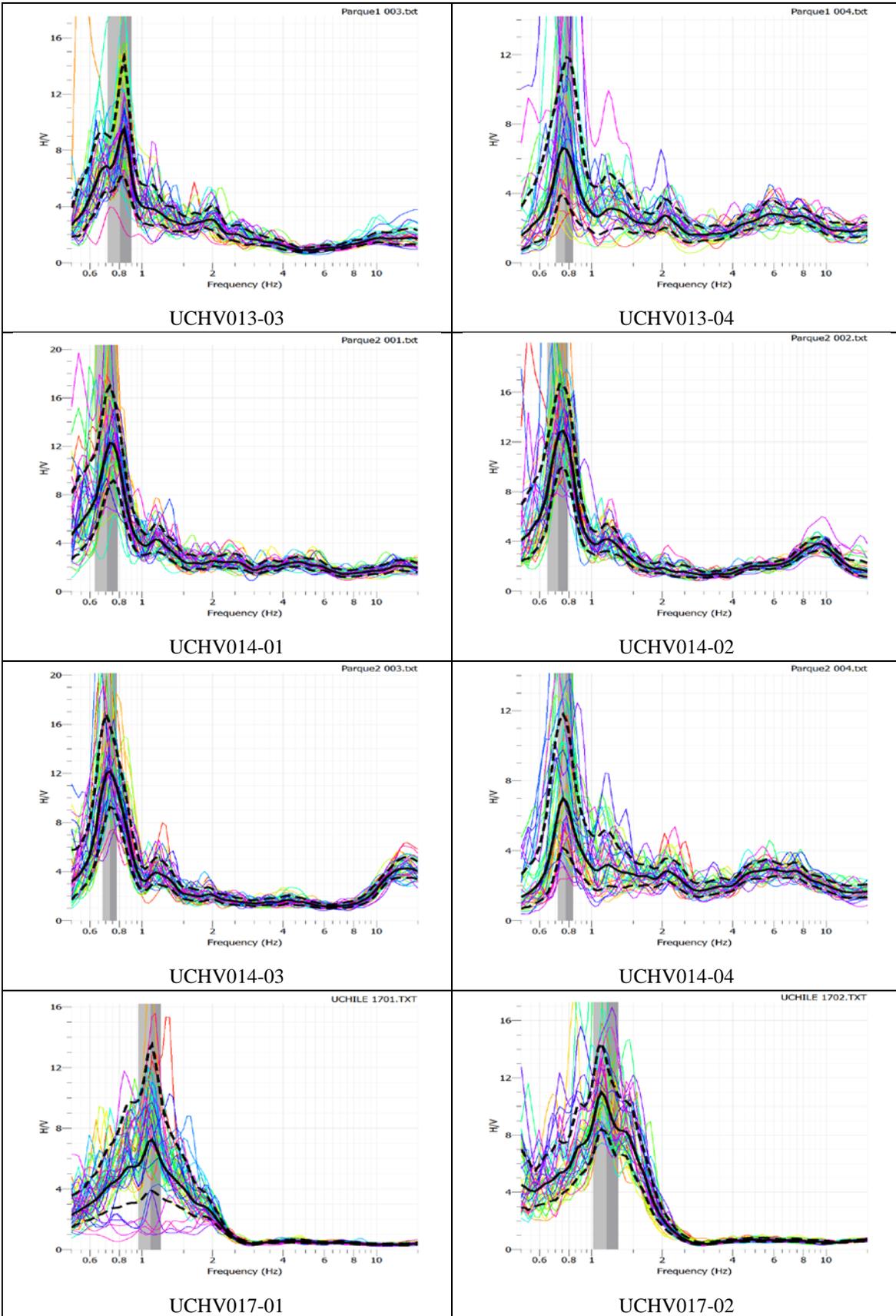


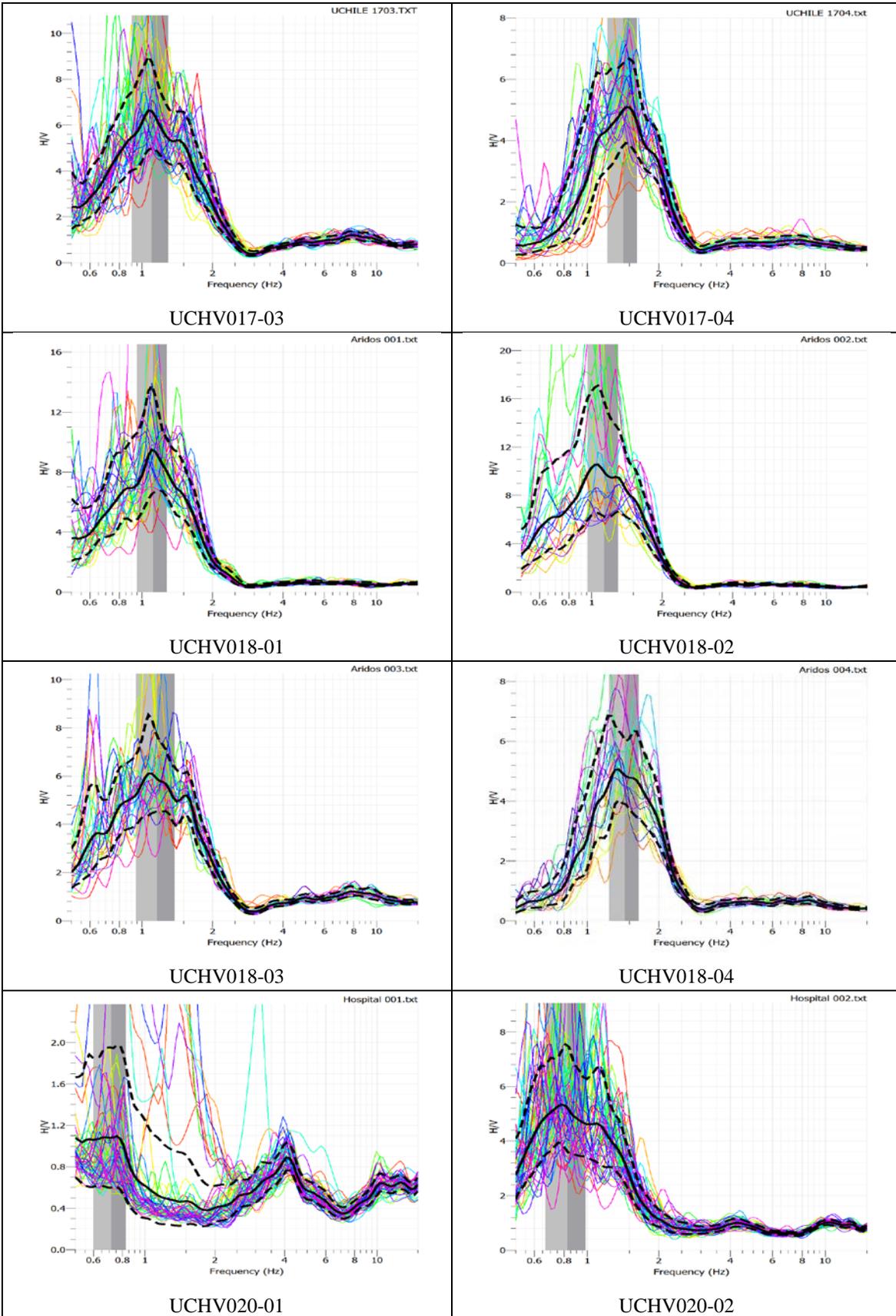


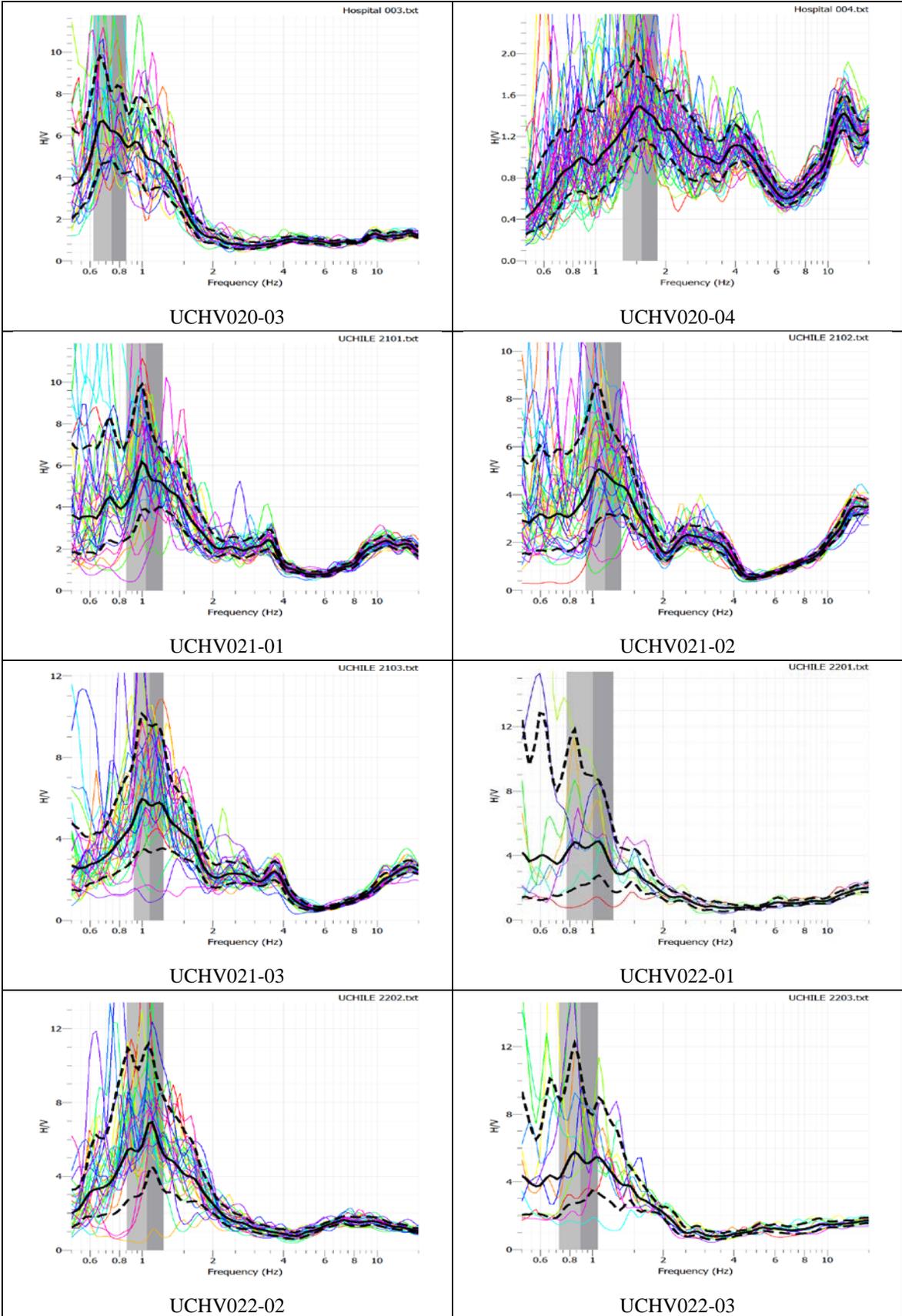


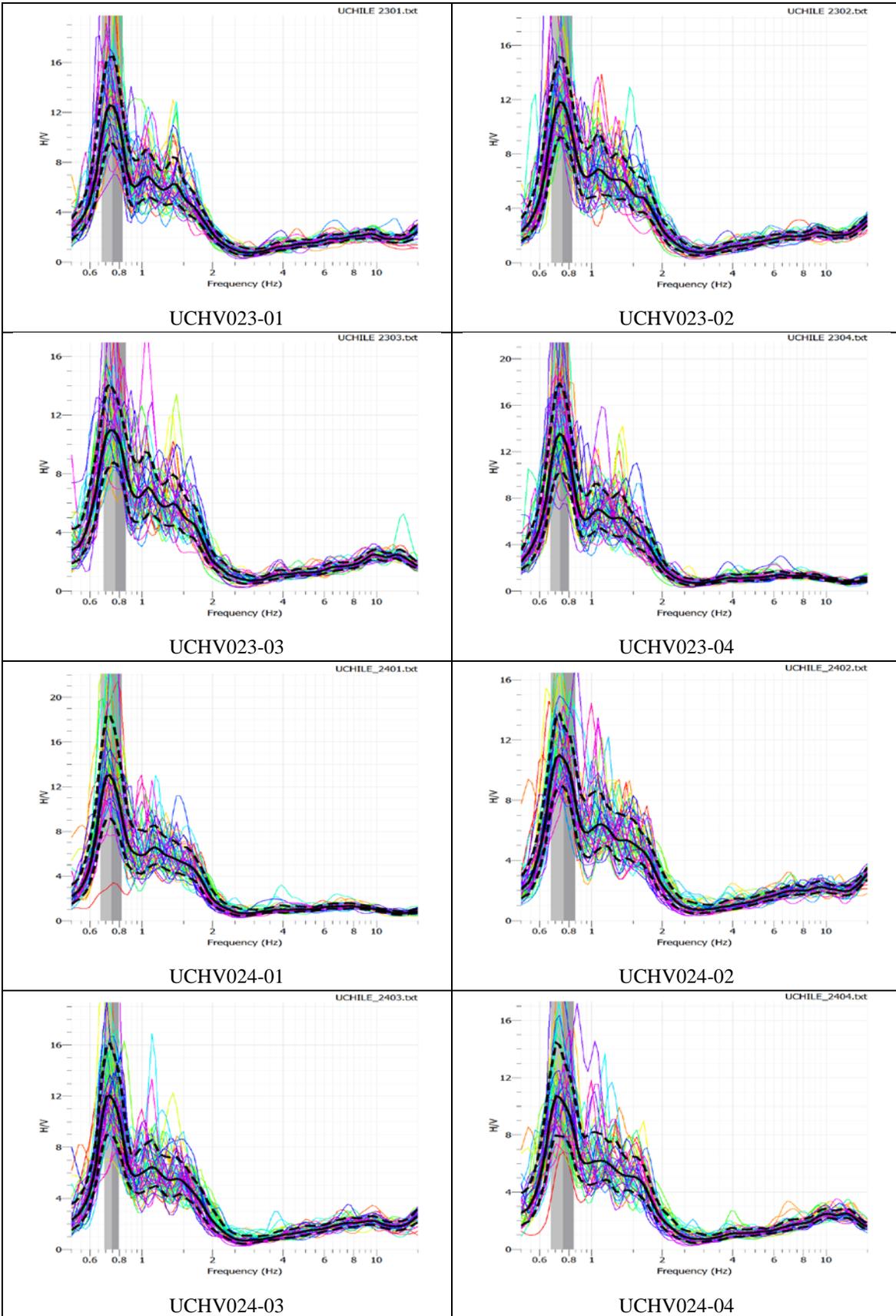


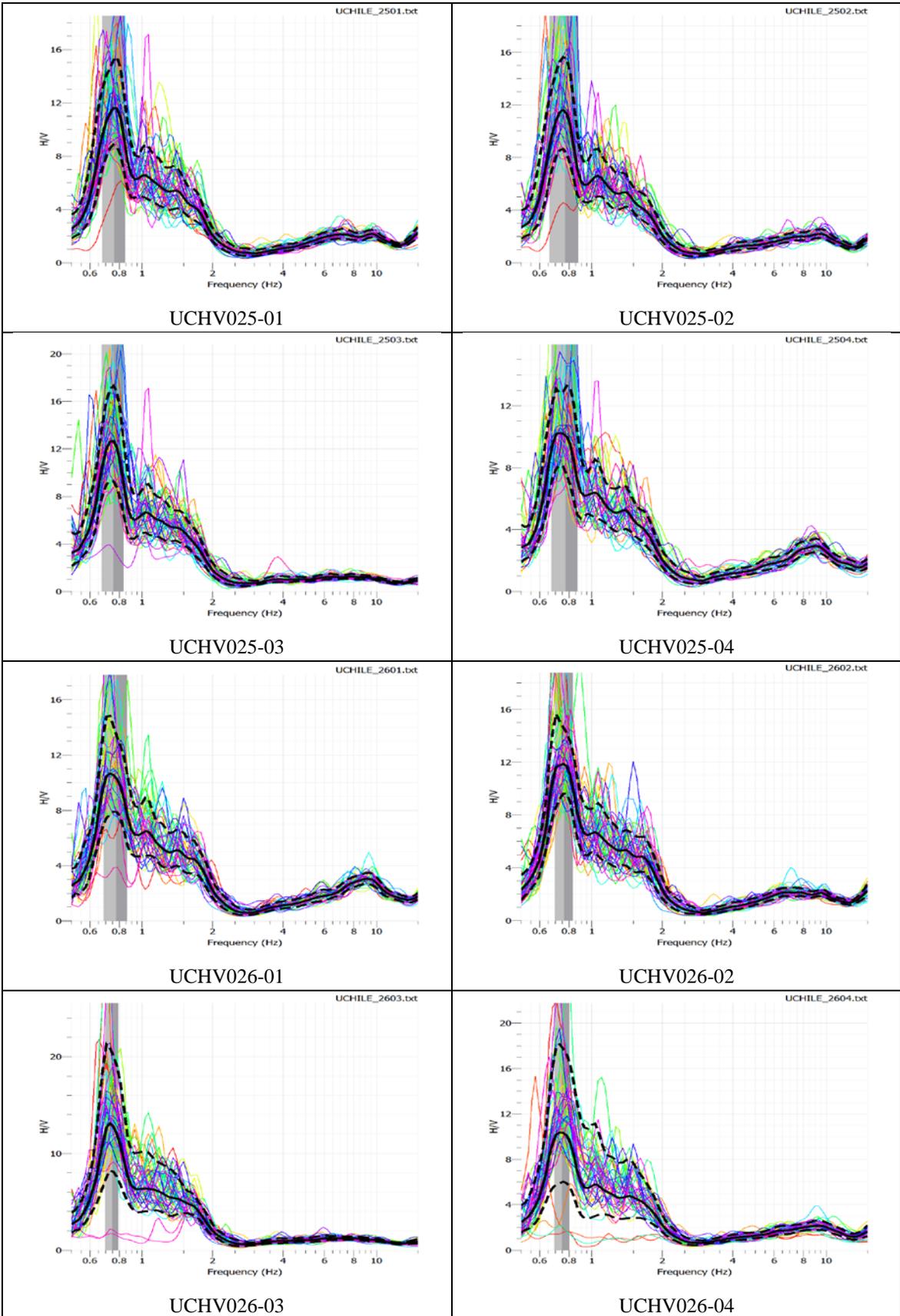


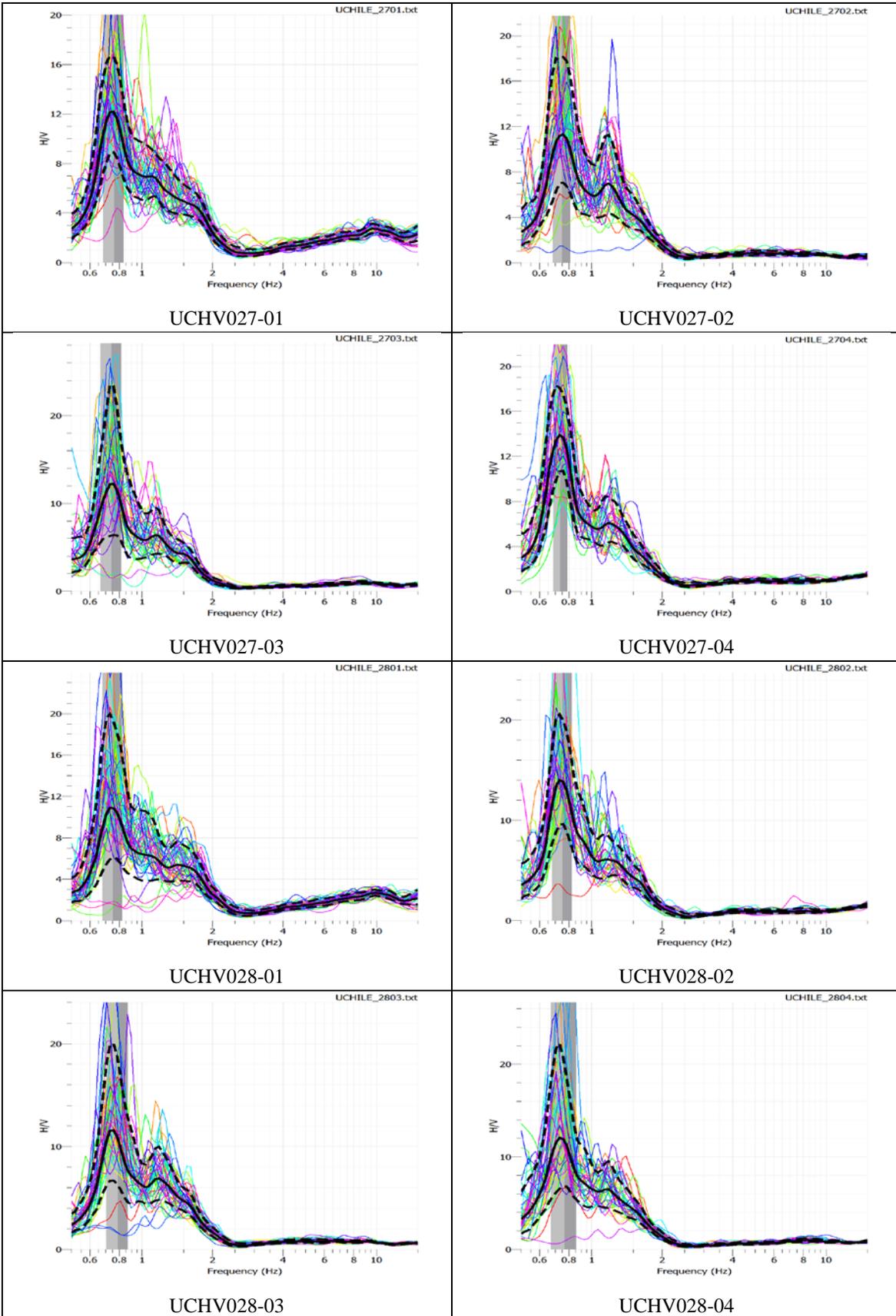


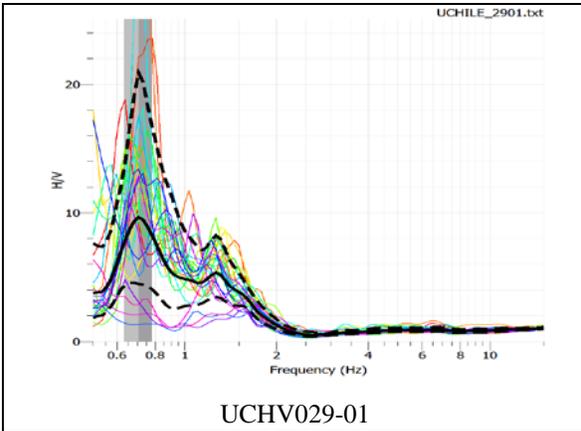




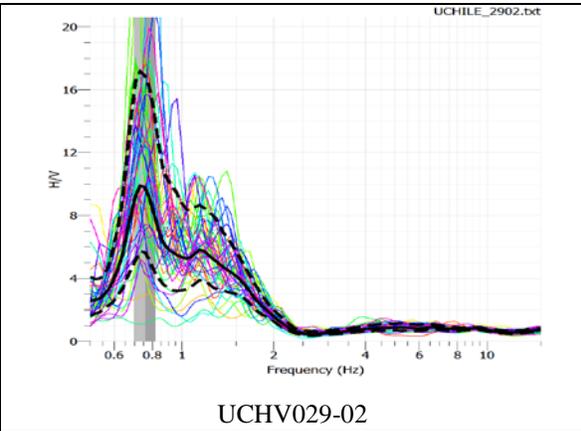




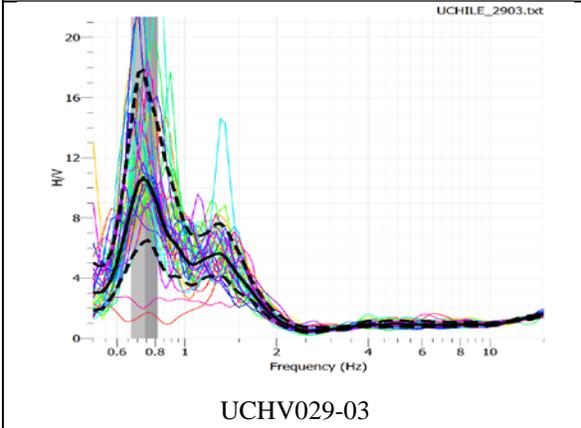




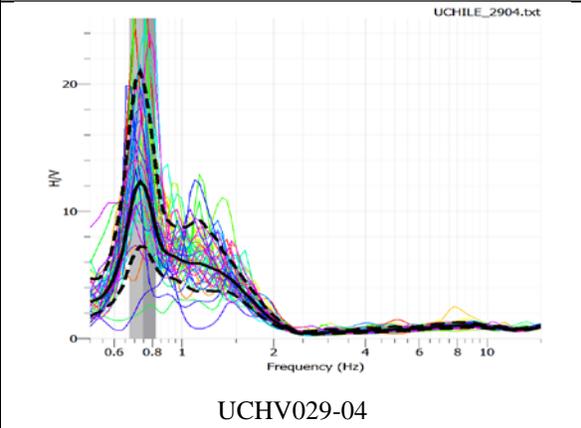
UCHV029-01



UCHV029-02



UCHV029-03



UCHV029-04

7.4 Anexo 4 “Mapas de la ciudad de Valdivia”

7.4.1 Mapa geológico de la ciudad de Valdivia

Escala 1:10000, formato de impresión A0.

7.4.2 Mapa de daño de la ciudad de Valdivia

Escala 1:5000, formato de impresión A0.

7.4.3 Mapa de mediciones H/V de la ciudad de Valdivia

Escala 1:5000, formato de impresión A0.

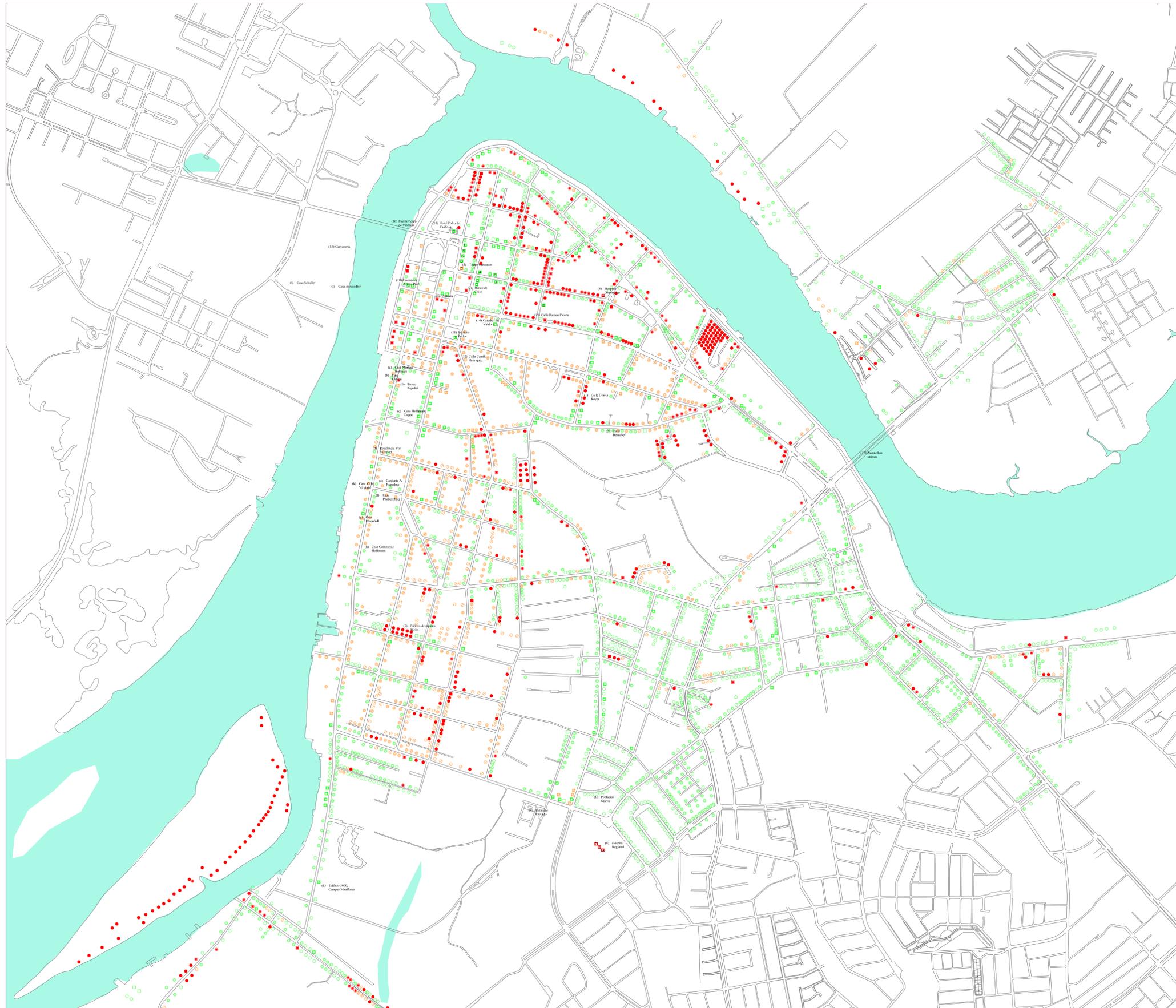
7.4.4 Mapa general de la ciudad de Valdivia

Escala 1:10000, formato de impresión A0.



MAPA DE DAÑO DE LA CIUDAD DE VALDIVIA

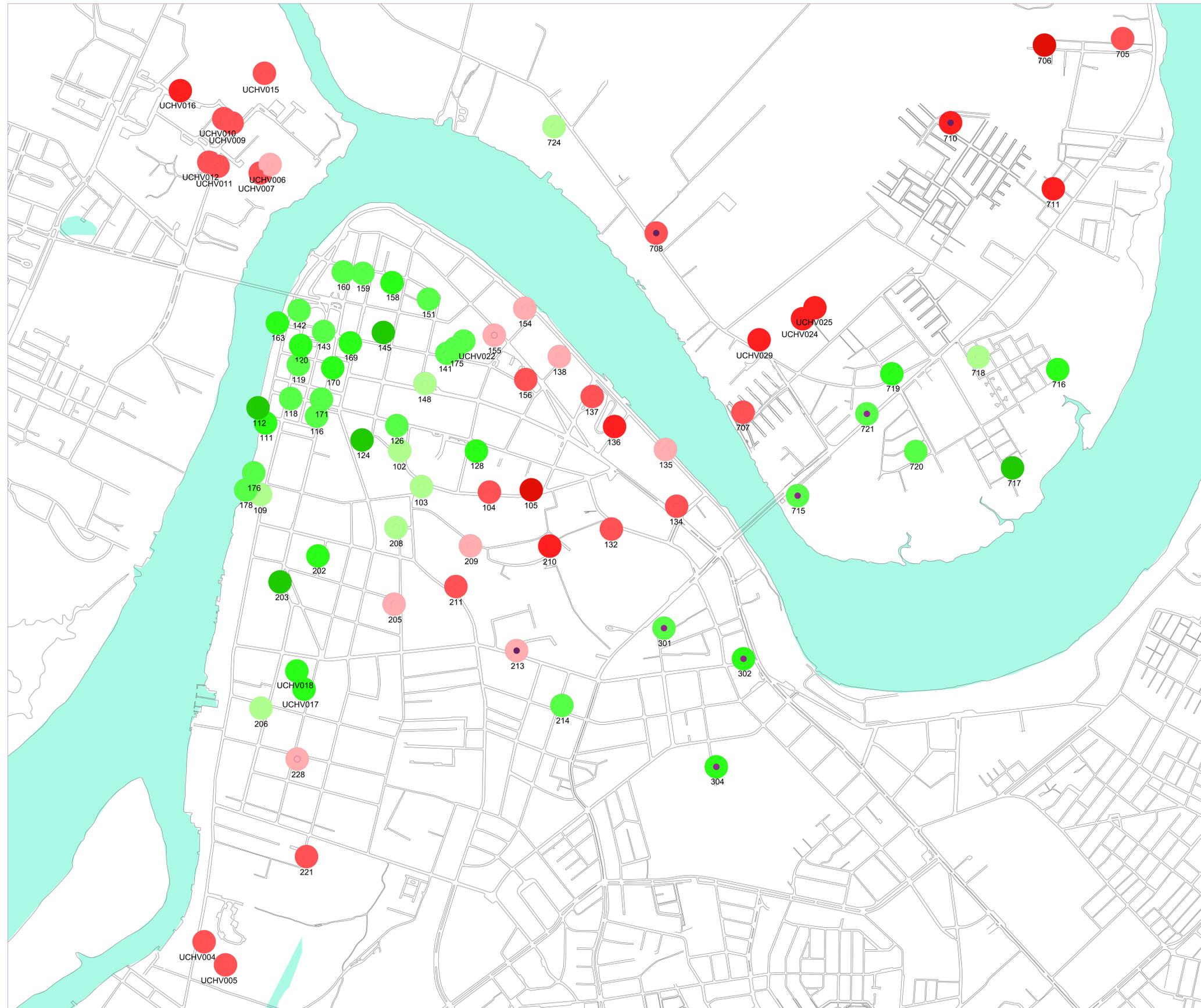
Se registran gráficamente los daños ocurridos por el terremoto de 1960



Simbología Estructuras

- Casas de 1 piso de madera, Sin daño
- Casas de 2 piso de madera, Sin daño
- Casas de 1 piso de madera, Inclínadas
- Casas de 1 piso de madera, Destruídas
- Casas de 2 piso de madera, Destruídas
- Casas de 1 piso de albañilería, Sin daño
- Casas de 2 piso de albañilería, Sin daño
- Casas de 1 piso de albañilería, Agrietadas
- Casas de 2 piso de albañilería, Agrietadas
- Casas de 1 piso de albañilería, Destruídas
- Casas de 2 piso de albañilería, Destruídas
- ⊠ Edificios de n pisos de hormigón armado, Sin daño
- ⊠ Edificios de n pisos de hormigón armado, Agrietados
- ⊠ Edificios de n pisos de hormigón armado, Destruídos
- (n) Referencia de información del estado del sector o estructura post terremoto

MAPA DE MEDICIONES H/V EN LA CIUDAD DE VALDIVIA

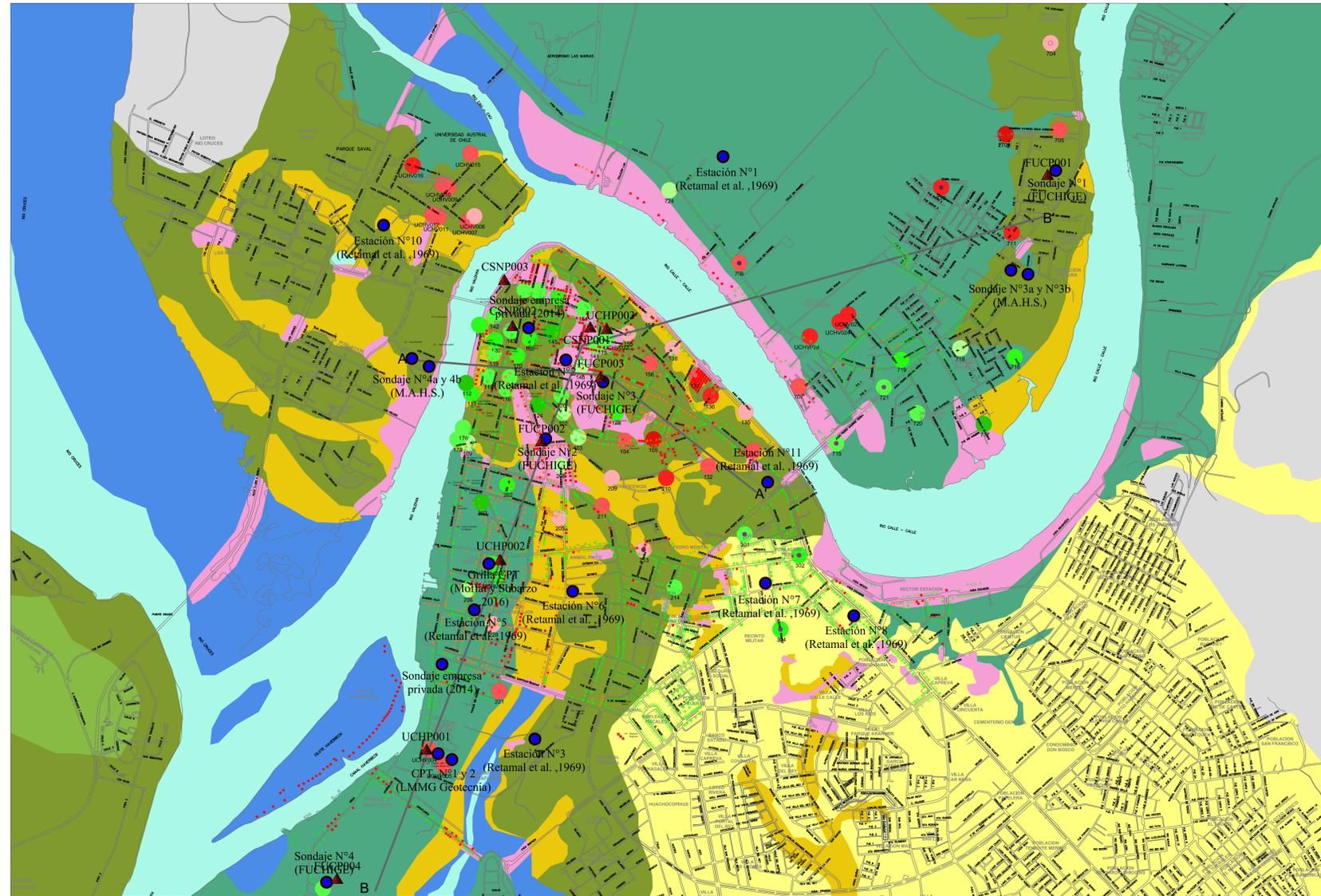


**Simbología Mediciones H/V,
Periodo predominante**

- 0,7 - 0,8 segundos
- 0,8 - 0,9 segundos
- 0,9 - 1,0 segundos
- 1,0 - 1,1 segundos
- 1,1 - 1,2 segundos
- 1,2 - 1,3 segundos
- 1,3 - 1,4 segundos
- 1,4 - 1,5 segundos
- Mediciones complementarias



MAPA GENERAL DE LA CIUDAD DE VALDIVIA



Simbología	
	Relleno Artificial
	Depositos limo arcilloso con poca arena
	Humedales
	Depositos de arena y ripio bien graduados
	Depositos de arena limosa
	Depositos arcillosos
	Roca sedimentaria
	Roca metamórfica
	Ríos
	Modelo de velocidad de onda de corte
	Sondajes, CTP y estaciones de estudio

Descripción unidades geológicas

Relleno Artificial: El relleno artificial fue colocado antes de los sismos de 1960, consisten en una mezcla heterogenea de espesor variable conformada principalmente por arcillas, limos y arenas mezcladas con escombros, trozos de madera y desechos.

Humedales: Los humedales son depósitos de pantano de hasta 3 m de espesor. Están principalmente compuestos por arcillas, limos y arenas finas, con alto contenido de material orgánico.

Deposito Arcilloso: Depósitos pantanosos de espesores variables compuesto principalmente por arcillas y limos con alto contenido de material orgánico y lentes de arena.

Arena Limosa: Sedimentos recientes constituidos arenas, limos y arcillas con algunos lentes de alto contenido orgánico.

Arena y ripio bien graduados: Estrato constituido por lentes de arena fina a gruesa con algo de grava y limo arcilloso. La grava representa de 5 a 10% del total de la unidad.

Limo arcilloso con poca arena: En este estrato se pueden distinguir algunas zonas que corresponden a suelos de cultivo. Esta unidad consiste en una parte superior constituida por lentes de arenisca y algunos de limo, además contiene un leve porcentaje de materia orgánica. La parte media tiene aproximadamente 10% de arena fina y 5% de arcilla. La parte inferior contiene hasta un 40% de arcilla y también presenta lentes de limos y algunos de arenisca. Se considera que la unidad en general es producto de depositación eólica.

Adicionalmente en esta unidad geológica se reconoce un estrato de arenisca en su base el cual fue incluido como parte de este estrato. Esta unidad consiste en una capa de arenisca volcánica muy fina a fina. En la zona esta unidad es conocida con el nombre de "cancagua". Este depósito contiene numerosas inclusiones de material arcilloso. Se estima que el origen de este depósito estaría relacionado con una fase de actividad volcánica ocurrida en la parte superior de la cuenca hidrográfica del río Calle-Calle. La actividad volcánica habría provocado el derretimiento de hielo y nieve produciéndose lahares e inundaciones. Los materiales de estos lahares, todavía en movimiento fueron recogidos por los ríos y transportados hasta el área de depositación. Dichos materiales habrían llegado al área de Valdivia en forma de un flujo de alta densidad que, al desbordarse sobre las planicies de inundación del río, habría depositado su contenido en forma de una capa aproximada horizontal y continua. Debido al transporte fluvial, este material adquirió una selección de tamaño de sus clastos.

Rocas sedimentarias: Estrato compuesto por areniscas y fangolitas marinas.

Rocas metamórficas: Roca compuesta por esquistos, esquistos máficos, melareniscas y rocas máficas y ultramáficas, que forma parte de la cordillera de la costa en la región de Valdivia. Localmente estas rocas se conocen como "piedra laja".

Simbología Mediciones H/V

- 0,7 - 0,8 segundos
- 0,8 - 0,9 segundos
- 0,9 - 1,0 segundos
- 1,0 - 1,1 segundos
- 1,1 - 1,2 segundos
- 1,2 - 1,3 segundos
- 1,3 - 1,4 segundos
- 1,4 - 1,5 segundos
- Mediciones complementarias

Simbología Estructuras

- Casas de 1 piso de madera, Sin daño
 - Casas de 2 piso de madera, Sin daño
 - Casas de 1 piso de madera, Inclínadas
 - Casas de 1 piso de madera, Inclínadas
 - Casas de 1 piso de madera, Destruídas
 - Casas de 2 piso de madera, Destruídas
 - Casas de 1 piso de albañilería, Sin daño
 - Casas de 2 piso de albañilería, Sin daño
 - Casas de 1 piso de albañilería, Agrietadas
 - Casas de 2 piso de albañilería, Agrietadas
 - Casas de 1 piso de albañilería, Destruídas
 - Casas de 2 piso de albañilería, Destruídas
 - Edificios de n pisos de hormigón armado, Sin daño
 - Edificios de n pisos de hormigón armado, Agrietados
 - Edificios de n pisos de hormigón armado, Destruídos
- (n) Referencia de información del estado del sector o estructura post terremoto