



**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

**“MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL PERIODO NATURAL DEL SUBSUELO DEL SECTOR
PONIENTE DE LA CIUDAD DE TEMUCO, UTILIZANDO EL MÉTODO NAKAMURA”**

**INFORME DE ACTIVIDAD DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL**

PROFESOR GUÍA: SR. MAURICIO HERMOSILLA SOTOMAYOR

HANSEN SVEN KRUUSE CRAUCHUK

- 2019 -



**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

**“MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL PERIODO NATURAL DEL SUBSUELO DEL SECTOR
PONIENTE DE LA CIUDAD DE TEMUCO, UTILIZANDO EL MÉTODO NAKAMURA”**

HANSEN SVEN KRUUSE CRAUCHUK

- 2019 -

**“MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL PERIODO NATURAL DEL SUBSUELO DEL SECTOR
PONIENTE DE LA CIUDAD DE TEMUCO, UTILIZANDO EL MÉTODO NAKAMURA”**

HANSEN SVEN KRUUSE CRAUCHUK

COMISIÓN EXAMINADORA

MAURICIO HERMOSILLA SOTOMAYOR
Profesor Guía

PABLO VERGARA PALMA
Académico Evaluador

CAMILA PARODI FIGUEROA
Académico Evaluador

Calificación Plan de Trabajo :
Calificación Supervisor :
Calificación Informe Escrito :
Calificación Presentación Oral:
Calificación Final :

Resumen

Este trabajo expone el estudio y resultado del cálculo del periodo natural del suelo a partir de vibraciones ambientales utilizando el método de Nakamura, el cual basa su teoría en la razón espectral H/V en el sector poniente de Temuco y puntos específicos donde hay más información acerca de la estratigráfica del suelo (Saavedra, 2004).

La zona de interés donde se realizan las mediciones corresponde a un sector con alta proyección para el rubro inmobiliario ya que son en su mayoría barrios residenciales y terrenos baldíos, donde se encuentran en desarrollo gran cantidad de proyectos habitacionales.

En este sector se midieron registros de vibración ambiental, obteniendo así, una malla de 25 puntos separados aproximadamente a 500.00 [m] que abarca una superficie de 283.00 [ha].

Como suelos de fundación de Temuco se pueden detectar dos macro zonas en las cuales predominan los finos y gravas depositadas por el río Cautín (Gottschalk, 2000).

La adquisición, procesamiento e interpretación de las vibraciones ambientales son realizadas de acuerdo a las recomendaciones emanadas del programa europeo Evaluación de los Efectos del Sitio utilizando Excitaciones Ambientales (SESAME, 2004) y los softwares e instrumentos corresponden a "SARA Electronic Instrument".

La clasificación en función de ciertos parámetros de los resultados se basa en estudios previos realizados en la cuenca de Santiago (F. L. G. Lezana, 2014) que presenta suelos similares a los de Temuco y en base a la clasificación de la normativa chilena a partir de la frecuencia fundamental determinada para cada uno de los suelos clasificados en la norma actual.

En este estudio se logra identificar los sitios donde la respuesta sísmica en superficie es buena, es decir donde no hay mayor amplificación del movimiento a causa de las ondas sísmicas, esto en base a que una gran parte de las curvas obtenidas corresponde a curvas planas, es decir que no hay predominancia del movimiento horizontal por sobre el vertical, y curvas cuya frecuencia es alta, la cual se determina que también es una característica de suelos rígidos.

Los puntos que arrojaron curvas con peaks marcados y frecuencias más bajas corresponde justamente a zonas que geológicamente se caracterizan por contener mayor cantidad de finos (limos) o arenas sueltas y puntos particulares donde la estratigrafía de pozos profundos indica la presencia de finos y arenas sueltas similares al contenido de gravas, lo que es un indicativo de la peor calidad del suelo.

Si bien, el método Nakamura puede ser representativo del suelo y además una herramienta fácil y económica de utilizar, se recomienda realizar estudios futuros donde se comparen los resultados obtenidos con este método y otro método utilizado actualmente como la velocidad de onda de corte.

Índice de Contenidos

1. Introducción.....	1
1.1 Origen del Problema	1
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
2. Antecedentes Generales.....	6
2.1 Sismicidad en Chile.....	6
2.2 Tipos de Sismos	7
2.2.1 Sismos Interplaca (Thrust)	8
2.2.2 Sismos Intraplaca de Profundidad Intermedia	8
2.2.3 Sismos Superficiales o Corticales.	9
2.2.4 Sismos Outer-Rise	9
2.2.5 Sismos por Falla Transformante.....	9
2.3 Ondas Sísmicas	10
2.3.1 Ondas de Cuerpo.....	10
2.3.2 Ondas Superficiales	11
2.4 Normativa Sísmica Chilena	13
2.5 Vibraciones Ambientales.....	17
2.5.1 Origen Artificial.....	17
2.5.2 Origen Natural y Efecto de Sitio	18
2.6 Método Nakamura y Transformada de Fourier.....	19
2.6.1 Transformada de Fourier.....	19
2.6.2 Método Nakamura.....	20
2.7 Evaluación de los Efectos del Sitio utilizando Excitaciones Ambientales (SESAME).....	23
2.7.1 Condiciones Experimentales	23
2.7.2 Condiciones para el Análisis de Resultados	27
2.7.3 Clasificación de las Curvas	30
3. Marco Geológico y Geográfico	33
3.1 Geología Regional	33
3.2 Geografía y Geología de la Comuna de Temuco	38
4. Metodología	44
4.1 Zona de Estudio y Puntos de Medición	44
4.2 Herramientas de Adquisición y Procesamiento de Datos	45
4.2.1 Equipo de Medición.....	45
4.2.2 Software SeismoWIN - SEISMOLOG-MT.....	46
4.2.3 Software GeoExplorer HVSr	47
4.3 Toma de Datos en Terreno	48
4.3.1 Tiempo de Medición	48
4.3.2 Condiciones Durante los Registros	49
4.3.3 Acoplamiento in Situ del Sensor.....	49
4.4 Procesamiento y Análisis de Datos	50

4.4.1 Visualización de los Registros y Selección de Ventanas	50
4.4.2 Obtención de Curva H/V	51
4.5 Clasificación Según D.S. 61 y NCh 433 Of 1996 Modificada 2009	53
4.5.1 Criterio Utilizado para Clasificación según NCh 433 Of 1996 Modificada 2009	53
5. Análisis de Resultados y Comentarios	57
5.1 Clasificación de Curvas.....	57
5.2 Relación entre las Curvas Obtenidas y Geología Local.....	58
5.3 Relación de Curvas Obtenidas con Pozos Profundos y Estudios Previos	60
5.3.1 Curvas 8, 12 y Pozo 169	61
5.3.2 Curva 26 y Pozos 150 y 151	63
5.3.3 Curva 7 y Pozos 148 y 149	67
5.4 Clasificación de las Curvas de Acuerdo a NCh433 Of 1996 y Decreto Supremo N°61	70
5.5 Comparación de Curva Obtenida con Velocidad de Onda de Corte.....	71
5.6 Comentarios.....	73
6. Conclusiones y Recomendaciones	76
Glosario.....	78
Bibliografía.....	81
Anexos	86
Anexo A	86
Anexo B	94
Anexo C.....	103

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Clasificación Sísmica del Terreno de Fundación.	14
Tabla 2.2: Parámetros de Cada Tipo de Suelo.....	15
Tabla 2.3: Longitudes Mínimas de Grabación Recomendadas.....	25
Tabla 2.4: Valores Umbrales para θ_{fo} y ε (f_o).	29
Tabla 3.1: Leyenda Geológica de la Novena Región.....	36
Tabla 4.1: Frecuencias y Periodos Fundamentales de los Suelos.....	55
Tabla 5.1: Clasificación de Curvas.	58
Tabla 5.2: Estratigrafía Pozo N°150.	64
Tabla 5.3: Estratigrafía Pozo N°151.	65
Tabla 5.4: Estratigrafía Pozo N°148	68
Tabla 5.5: Estratigrafía Pozo N°149	69
Tabla 5.6: Clasificación de Curvas de Acuerdo a Norma.....	71
Tabla 5.7: Descripción Visual de Sondaje	72
Tabla A.1: Valores de Aceleración, Factor Alpha y Periodo de Cada Suelo.	86
Tabla A.2: Coordenadas de cada uno de los Puntos Medidos.	89

Índice de figuras

Figura 2.1 Placas Tectónicas en Sudamérica	6
Figura 2.2 Perfil Esquemático con la Sismicidad.....	8
Figura 2.3 Ondas de Cuerpo.....	10
Figura 2.4 Ondas Superficiales.....	12
Figura 2.5 Registro Sísmico de Ondas.....	12
Figura 2.6 Espectros de Aceleración de Cada Suelo.	16
Figura 2.7 Diagrama de Flujo para Obtener la Relación Espectral H/V	20
Figura 2.8 Curva Plana.	30
Figura 2.9 Peak Somero.	30
Figura 2.10 Peak Marcado.....	31
Figura 2.11 Peak muy Marcado	31
Figura 3.1 Mapa Geológico de la Novena Región.....	35
Figura 3.2 Geografía de Temuco.....	39
Figura 3.3 Geología del Área Urbana de Temuco.	41
Figura 4.1 Zona de Estudio.	44
Figura 4.2 Equipo GeoBox SR04.	46
Figura 4.3 Interfaz SeismoWIN.	46
Figura 4.4 Registro de Vibración Ambiental Filtrado y con Selección de Ventanas.	51
Figura 4.5 Curva Obtenida con GeoExplorer HVSR.....	52
Figura 4.6 Selección del Rango de Periodos para el Suelo E.	54
Figura 5.1 Ubicación de los Puntos sobre Mapa geológico.	59
Figura 5.2 Ubicación de Pozo Profundo y Puntos Cercanos.	61
Figura 5.3: Curva 8	61
Figura 5.4: Curva 12	61
Figura 5.5 Ubicación de Pozos Profundos y Punto Cercano.	63
Figura 5.6 Curva 26	63
Figura 5.7 Ubicación de Pozos Profundos y Punto Cercano.	67
Figura 5.8 Curva 7.	67
Figura 5.9 Ubicación de Sondaje y Ensayos ReMi.....	71
Figura A.1 Perfiles ReMi 1	90
Figura A.2 Perfiles ReMi 2	90
Figura A.3 Perfiles ReMi 3	91
Figura A.4 Perfiles ReMi 4	91
Figura A.5 Perfiles ReMi 5	92
Figura A.6 Perfiles ReMi 6	92
Figura A.7 Número de Golpes Ensayo SPT	93
Figura B.1 Curva H/V 1	94
Figura B.2 Curva H/V 2.....	94
Figura B.3 Curva H/V 3.....	94

Figura B.4 Curva H/V 4.....	95
Figura B.5 Curva H/V 5.....	95
Figura B.6 Curva H/V 6.....	95
Figura B.7 Curva H/V 7.....	96
Figura B.8 Curva H/V 8.....	96
Figura B.9 Curva H/V 9.....	96
Figura B.10 Curva H/V 10.....	97
Figura B.11 Curva H/V 11.....	97
Figura B.12 Curva H/V 12.....	97
Figura B.13 Curva H/V 13.....	98
Figura B.14 Curva H/V 14.....	98
Figura B.15 Curva H/V 15.....	98
Figura B.16 Curva H/V 16.....	99
Figura B.17 Curva H/V 17.....	99
Figura B.18 Curva H/V 18.....	99
Figura B.19 Curva H/V 19.....	100
Figura B.20 Curva H/V 20.....	100
Figura B.21 Curva H/V 21.....	100
Figura B.22 Curva H/V 22.....	101
Figura B.23 Curva H/V 23.....	101
Figura B.24 Curva H/V 24.....	101
Figura B.25 Curva H/V 26.....	102
Figura B.26 Curva H/V 27.....	102

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1. Introducción

1.1 Origen del Problema

Chile es el país más sísmico del mundo (Cisternas y Vera, 2008), su geografía y sus altas cumbres han sido construidas a partir de terremotos, lo cual representa una realidad con la que los chilenos deben aprender a vivir.

Desde el año 1570 hasta 2017 se tiene registro de la ocurrencia de 113 terremotos con magnitud de ondas superficiales (Ms) superior o igual a 7 grados según el Centro Sismológico Nacional (CSN, 2019), lo cual indica la ocurrencia de un terremoto de esta magnitud o superior cada cuatro años aproximadamente.

Chile forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico y su alta sismicidad es debido a la subducción de la Placa Oceánica de Nazca bajo la Placa Sudamericana. Como la corteza marina (basalto) es más densa que la continental (granito), la Placa de Nazca se sumerge por debajo de la Sudamericana, desde Aysén hasta Colombia, este proceso se llama subducción de placas y para el caso de Chile la velocidad entre las placas es del orden de 8.00 a 10.00 [cm/año] (Cisternas, 2011). Es debido a este fenómeno que el desarrollo de sistemas antisísmicos en el diseño de estructuras y la implementación de nuevos sistemas de evaluación del efecto de sitio en lugares de interés para la mecánica de suelos está en constante desarrollo con el fin de lograr diseños cuya base teórica esté respaldada, este avance viene de la mano con la implementación de tecnología en las nuevas investigaciones que permiten determinar con mayor seguridad el comportamiento de una estructura en función del suelo frente a un evento telúrico.

Posterior al terremoto de 2010 se modifica la normativa chilena y se aprueba el Decreto Supremo N°60 “Diseño y Cálculo de Hormigón Armado” y Decreto Supremo N°61 “Diseño Sísmico de Edificios”, que actualmente complementan la norma Nch433 Of1996 modificada 2009 “Diseño Sísmico de Edificios” (Guendelman, 2012).

Los principales cambios de este decreto son los siguientes:

- Se crea un nuevo tipo de suelo entre los suelos II y III, ahora definidos como B y D respectivamente. Con esto se busca aminorar la diferencia que entregan los diseños basados en los suelos tipo II o tipo III, los que a veces presentan hasta un 50% de diferencia en la armadura de una estructura.

- Se elimina el espectro del decreto N°117 y se vuelve al espectro original de la NCh433.Of96. Esta conclusión se toma con los resultados obtenidos del 27F, donde la mayoría de los edificios que sufrieron daños de importancia, fueron víctimas de la clasificación de los suelos contenida en las normas anteriores al sismo.
- Sin embargo, se calibra el espectro de la norma del 96 por un factor “s”, factor que depende del tipo de suelos y que varía entre 0.9 para suelos Tipo A y 1.3 para suelos Tipo E (Cargaz, 2012).

En el actual Decreto Supremo N°61, la tabla de clasificación sísmica de los suelos está distribuida de acorde a la velocidad de onda de corte equivalente, éste se define como el parámetro que se estima más relevante en una primera aproximación el cual corresponde a la rigidez a bajas deformaciones de los estratos superiores, correspondiente a la velocidad de onda de corte promedio de los 30.00 [m] superiores del terreno, V_{s30} . Este parámetro se determina de acuerdo a la ecuación (1.1) obtenida del Instituto Nacional de Normalización (INN, 2011).

$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s-i}}} \quad (1.1)$$

Dónde:

V_{s-i} : Velocidad de ondas de corte del estrato i [m/s].

h_i : Espesor del estrato i [m].

n : Número de estratos en los primeros 30.00 [m] superiores del terreno.

En un evento sísmico, las ondas generadas en la fuente son modificadas durante su propagación hasta la superficie debido a heterogeneidades y discontinuidades presentes en la litosfera y por su paso a través de los depósitos de suelo. Es por esta razón que a partir de evidencias empíricas y teóricas se ha establecido que la respuesta sísmica en la superficie depende de las propiedades geomecánicas y espesores de los estratos además de la profundidad a la que se encuentra el basamento rocoso (Pasten, 2007).

Para lograr evaluar el efecto de sitio que se produce a raíz de un terremoto en un lugar determinado, se han desarrollado metodologías cuyo objetivo principal es determinar la

frecuencia fundamental de vibración, es decir, obtener un espectro de respuesta representativo del lugar de interés tal y como lo indica el DS 61 pero con la diferencia de que el espectro no sea una generalidad de acuerdo a la clasificación del suelo en base a la velocidad de onda de corte equivalente, si no en base a la respuesta real del suelo en el lugar seleccionado.

Uno de los métodos utilizados para lograr es la técnica H/V, alias espectros de cuasi transferencia (QTS), la cual se ajusta muy bien en esta descripción y ha recibido una gran acogida de todo el mundo debido a su simplicidad, junto con una rápida información sobre la característica dinámica del suelo y de las estructuras. Aunque varios investigadores afirmaron que los antecedentes teóricos de esta técnica no están claros, ha habido muchos estudios experimentales exitosos realizados. Este método es atractivo ya que facilita la recolección de datos y puede ser aplicado en áreas de baja o incluso nula sismicidad (Yutaka Nakamura, 2008).

Las mediciones se realizaron utilizando un sismógrafo Geobox SR04 de la empresa SARA Electronic Instrument (empresa fabricante de tecnología para el campo de la geofísica) y en conjunto con el programa Log-MT se logró adquirir y grabar vibraciones ambientales las cuales posteriormente son procesadas con el software GeoExplorer para obtener una curva de respuesta de cada lugar medido y así determinar la frecuencia fundamental.

A partir de los resultados obtenidos con el método anteriormente mencionado, se realiza una clasificación de los espectros en base al criterio SESAME para identificar el tipo de curvas obtenidas, y a partir de estas, realizar una clasificación del suelo en base a estudios previos de pozos profundos y aplicación del método Nakamura en sectores cercanos.

Con estos resultados se busca relacionar los espectros de respuesta de los lugares de interés con los espectros de respuesta que entrega el D.S. N°61 para así realizar una clasificación de suelo de acuerdo a la normativa vigente y compararla con la información geológica del sector y así determinar si las curvas son representativas de la capa sedimentaria superficial.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Determinar la frecuencia fundamental y el espectro de respuesta del sector poniente de la ciudad de Temuco utilizando el método Nakamura o razones espectrales H/V.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar el nivel de respuesta sísmica del estrato sedimentario superior de los distintos puntos de interés.
- Comparar resultados obtenidos con estudios previos realizados en la ciudad de Temuco y complementar con ellos el presente estudio.
- Realizar una clasificación del suelo de acuerdo a la norma chilena “Diseño sísmico de edificios y el Decreto supremo N°61 “Diseño Sísmico de Edificios” aprobado en Diciembre de 2011 con respecto a los resultados de frecuencias naturales del subsuelo obtenidos con el método Nakamura.
- Comparar y analizar resultados obtenidos a través del método Nakamura con la información geológica del sector.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES GENERALES

2. Antecedentes Generales

2.1 Sismicidad en Chile

La característica sísmica del país se debe a la convergencia de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana a razón de 6.50 [cm/año], esto ocurre entre el límite fronterizo con Perú por el norte hasta la Península de Taitao por el sur, en la Región de Aysén. Sin embargo, hacia el sur de este punto, es la placa Antártica la que penetra bajo la placa Sudamericana a una tasa equivalente anual de 1.80 [cm/año] y es responsable de la sismicidad que se observa entre la Península de Taitao, por el norte, y la boca occidental del Estrecho de Magallanes por el sur. Luego, más al sur, es la Falla de Magallanes-Fagnano la causante de la sismicidad observada en el extremo austral del continente. El desplazamiento equivalente anual es de 7.00 [mm/año] entre ambas placas, es decir, alrededor de un décimo de la convergencia entre la placa de Nazca y Sudamericana según documento de la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (Onemi, 2019). Según el Centro Sismológico Nacional (CSN), a diferencia de la situación tectónica anterior de una placa, ya sea la de Nazca o Antártica la que subducta bajo la placa Sudamericana, la zona de contacto es principalmente vertical, de modo que las placas Sudamericana y de Scotia se deslizan horizontalmente una con respecto a otra (Figura 2.1) (CSN, 2014).

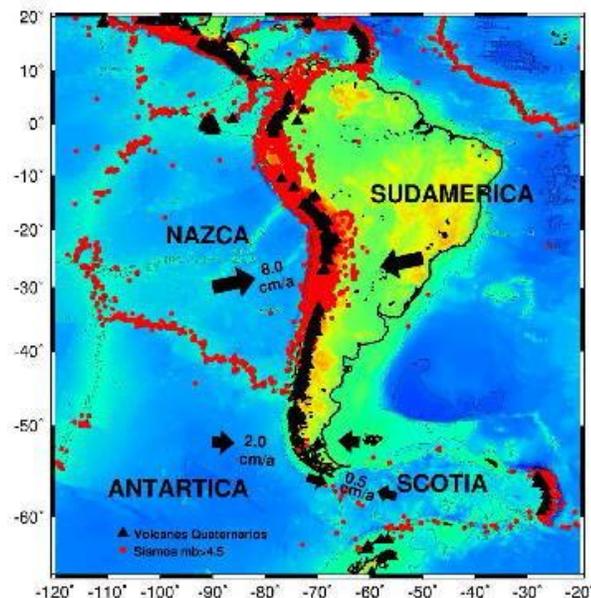


Figura 2.1 Placas Tectónicas en Sudamérica

Fuente: Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN, 2015).

Durante los últimos 151 años han ocurrido los nueve terremotos de magnitud superior a 8 grados Richter de lo que se tiene registro. De estos nueve eventos sísmicos, tres han ocurrido durante los últimos 10 años, estos tuvieron su epicentro en Cobquecura 2010, Arica e Iquique 2014 e Illapel 2015 cuyos grados son medidos magnitud de momento (M_w) fueron de 8.8; 8.2 y 8.4 respectivamente.

En base a los antecedentes mencionados anteriormente se demuestra que Chile es un país donde la ocurrencia de un terremoto es segura y es por ello que se cuenta con una amplia red sismológica en todo el territorio nacional para monitorear en tiempo real la ocurrencia de un evento sísmico de intensidad fuerte o superior para dar alerta temprana a los ciudadanos. Si bien es de gran prioridad alertar a tiempo a la ciudadanía, por otro lado, está la necesidad de contar con infraestructura habitacional que sea capaz de resistir sollicitaciones sísmicas sin sufrir daños que pongan en riesgo la vida de las personas para lo cual debe existir una constante investigación para lograr el objetivo de mitigar pérdida de vidas y costos de reconstrucción.

2.2 Tipos de Sismos

Debido a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana y a su alta velocidad de convergencia, la acumulación de esfuerzo debido a la compresión genera que en algún momento esta energía sea liberada y den origen a los sismos presentes a lo largo del territorio nacional. Se presenta un perfil de este a oeste (Figura 2.2), mostrando la sismicidad reportada por el catálogo National Earthquake Information Center (NEIC) en la latitud 33,5°S (Ver detalles en Nota (1)) y una representación esquemática de ambas placas; también se muestran las principales fuentes sismogénicas presentes en la zona (Leyton, Ruiz, y Sepulveda, 2010):

(1) Registrada entre 1973 y 2007 de la zona en la latitud 33,5°S (considerando 0,5° en dirección norte y sur), cada punto representa un sismo, independiente de su magnitud o fecha de ocurrencia. El color azulado representa la posición esquemática de la placa de Nazca y verde, la placa Sudamericana. Las líneas punteadas indican la posición de las principales fuentes sismogénicas (ver detalles en el texto): **a.** interplaca tipo 'thrust'; **b.** intraplaca de profundidad intermedia; **c.** corticales y **d.** 'outer-rise'

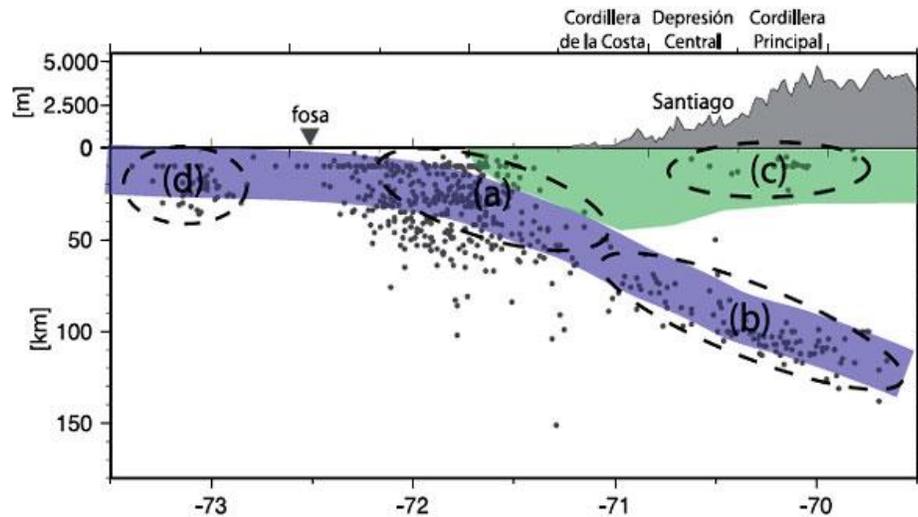


Figura 2.2 Perfil Esquemático con la Sismicidad
Fuente : National Earthquake Information Center (NEIC, 2010).

2.2.1 Sismos Interplaca (Thrust)

En Chile se producen cuando el esfuerzo compresivo horizontal neto en la zona de contacto, también llamada zona de acoplamiento, entre la placa de Nazca y la Sudamericana supera al acoplamiento mecánico que traba el movimiento de éstas, produciéndose el movimiento relativo de las placas. También se conocen como terremotos de subducción. Corresponden a sismos compresionales con mecanismos de falla inversa y su magnitud es proporcional al desplazamiento y al área de la zona de desplazamiento (CSN, 2016) con epicentros a lo largo de la costa a profundidades focales entre 15.00 y 50.00 [Km] (Astroza y Sanhueza, 2002). Cuando ocurren eventos de este tipo de gran magnitud y hay desplazamiento vertical del fondo oceánico, hay altas probabilidades de ocurrencia de tsunamis.

2.2.2 Sismos Intraplaca de Profundidad Intermedia

Ocurren al interior de la placa oceánica a profundidades superiores a los 50.00 [km] hasta profundidades a las cuales se cree la placa pierde su comportamiento frágil (~700.00 [km]); sin embargo, en Chile las profundidades de estos sismos van entre los 50.00 [km] y los 250.00 [km].

Se ha observado que el potencial de daños de estos sismos es mayor que el de los sismos interplaca de similar magnitud (CSN, 2016). Entre los eventos del tipo intraplaca de profundidad intermedia se destacan: el terremoto de Chillán de 1939 ($M_s = 7.80$), el

sismo de Santiago de 1945 ($M_s=7.10$) evento del que se obtuvo el primer registro y espectro de aceleraciones en Chile, el terremoto de la frontera chileno-boliviano de 1950 ($M_s = 8.00$), el terremoto de La Ligua de 1965 ($M_s = 7.10$) y el terremoto de Punitaqui de 1997 ($M_w = 7.10$) (Astroza y Sanhueza, 2002).

2.2.3 Sismos Superficiales o Corticales.

Ocurren dentro de la placa continental en la corteza a profundidades inferiores a los 60 km. Se deben principalmente a las deformaciones generadas por la convergencia entre la placa de Nazca y la placa continental. Estas deformaciones son las que dieron origen al alzamiento de la Cordillera de los Andes y en general, son máximas en torno a ésta, tanto en Chile como en Argentina (CSN, 2016).

Las fallas intraplaca corticales en Chile son capaces de generar terremotos de magnitud al menos ($M_w=7.00$), según los registros instrumentales y estudios paleosismológicos. No obstante, la baja tasa de recurrencia de estos sismos, de miles a decenas de miles de años, un sismo cortical puede causar importantes Aceleraciones Locales del Suelo (PGA) y ruptura superficial. Es, por lo tanto, esencial para evaluar el peligro sísmico, considerar el potencial sismogénico de las fallas corticales y la naturaleza de su relación con el ciclo sísmico de subducción (Santibáñez *et al.*, 2015).

2.2.4 Sismos Outer-Rise

Ocurren costa afuera de la fosa oceánica. Se deben a la deformación de la placa de Nazca y a los esfuerzos de flexión sobre ella antes de subductar, ubicándose en la zona de outer-rise o de máxima curvatura. Son sismos de baja profundidad y en general poseen magnitudes M_w inferiores a 7.00, razón por la cual generalmente no generan tsunamis (CSN, 2016).

2.2.5 Sismos por Falla Transformante

Corresponden a sismos producidos por el desplazamiento lateral de una placa tectónica respecto a la placa vecina. Un ejemplo de este tipo de fallas es la Falla Fagnano-Magallanes que separa las placas Sudamericana y Scotia. Algunos de estos tipos de sismos son los ocurridos en Punta Arenas en 1949 y 1975 ($M_w = 7.8$) (CSN, 2016).

2.3 Ondas Sísmicas

Las ondas sísmicas son un tipo de onda elástica fuerte que se propagan a través de un medio elástico en este caso los depósitos de suelo. Su origen se debe a un movimiento sísmico de alguno de los mencionados anteriormente y su emisión parte desde un punto llamado hipocentro que corresponde al lugar donde se genera la ruptura o falla de placas.

Existen dos tipos de ondas, las ondas internas y las ondas superficiales. Las ondas internas son llamadas de esta forma ya que viajan por el interior del medio de propagación, el cual corresponde en este caso a los estratos de suelo. En cambio, las ondas superficiales tienden a viajar a lo largo de los estratos superiores. Son las causantes de los daños producidos por los sismos en las construcciones.

2.3.1 Ondas de Cuerpo

Las ondas de cuerpo se dividen en dos tipos las ondas compresionales, “P”, y las ondas de corte, “S” (Figura 2.3). Las ondas “P” (primarias,) se propagan produciendo un cambio volumétrico del medio elástico, en este caso los estratos de suelo, en la dirección de propagación.

Las ondas “S” (secundarias) son ondas transversales o de corte, que se caracterizan por desplazar el suelo perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda, a su vez las ondas S se dividen en dos tipos: las ondas SH con desplazamiento en el plano horizontal, y las ondas SV con desplazamientos en el plano vertical.

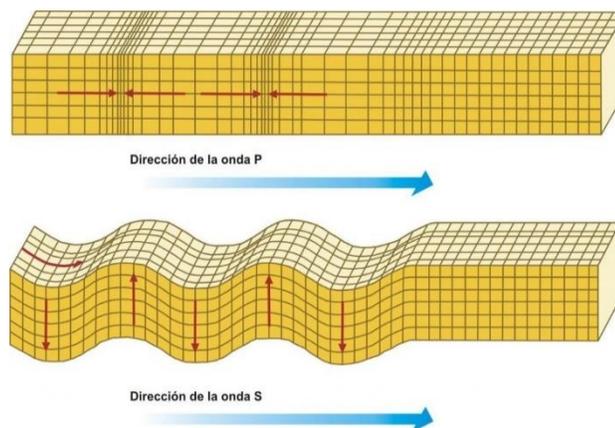


Figura 2.3 Ondas de Cuerpo.
Fuente : *Arquitecture, 2015*

Las ondas P viajan a una velocidad entre 70% y 140% mayor que las ondas S, para valores de la relación de Poisson de entre 0.25 y 0.40 el cual corresponde a rango frecuente en suelos y roca (Fuentes, 2015), la velocidad de propagación de las ondas P se determina con la Ecuación (2.1) Mientras que la velocidad de propagación de las ondas S se determina con la Ecuación (2.2).

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

Donde:

V_p : Velocidad de Ondas P [m/s].

V_s : Velocidad de Ondas S [m/s].

k : Modulo de Compresibilidad [Pa].

μ : Modulo de Corte o Rigidez [Pa].

ρ : Densidad del Medio a través del cual se Propaga [Kg/m³].

2.3.2 Ondas Superficiales

Las Ondas superficiales al igual que las de cuerpo presentan dos tipos, las ondas Love (L) y las ondas Rayleigh (R) (Figura 2.4.), estas se generan cuando las ondas de cuerpo interactúan con un medio libre. El movimiento de partícula para la onda de Love es paralelo a la superficie, pero perpendicular a la dirección de propagación y se encuentra en la componente horizontal del sismograma. Las ondas de Love también son dispersivas, esto es, la velocidad de propagación de la onda depende de su frecuencia, siendo; mayor para frecuencias menores, además se forman por la interferencia constructiva de múltiples reflexiones de las ondas SH en la interface de dos medios con propiedades mecánicas diferentes como el suelo y el aire.

Las Ondas Rayleigh son la combinación de ondas P y SV (ondas S verticales), el movimiento de partícula que produce es de compresión y corte, y está contenido en el plano de propagación de la onda como un movimiento elíptico. En su modo fundamental, la trayectoria de la onda Rayleigh es retrógrada, es decir, las partículas del material se

mueven describiendo una elipse en dirección opuesta a la dirección de propagación de la energía y su eje mayor es vertical (Pasten, 2007). Dicho movimiento cambia a prógrado con la profundidad pasando por un nodo en el cual no existe movimiento alguno de partícula (Galvez, 2013).

Al ser V_p superior a V_s , en un movimiento sísmico los registros muestran primero la llegada de las ondas P, las cuales se asocian al primer pulso de energía en el cual la amplitud supera el nivel de ruido, luego comienza la llegada de las ondas S para las cuales se asocia a la zona del movimiento más fuerte donde la amplitud del registro se maximiza; y por ultimo las ondas superficiales en la zona de decaimiento de la amplitud del registro. Se muestra un registro sísmico (Figura 2.5) donde se indican la amplitud de aceleración en un y se aprecian las zonas de arribo de las ondas en la posición que se indicó anteriormente.

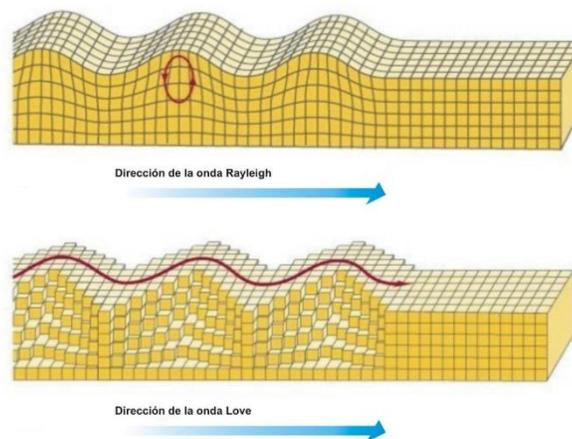


Figura 2.4 Ondas Superficiales
Fuente: Architecture, 2015

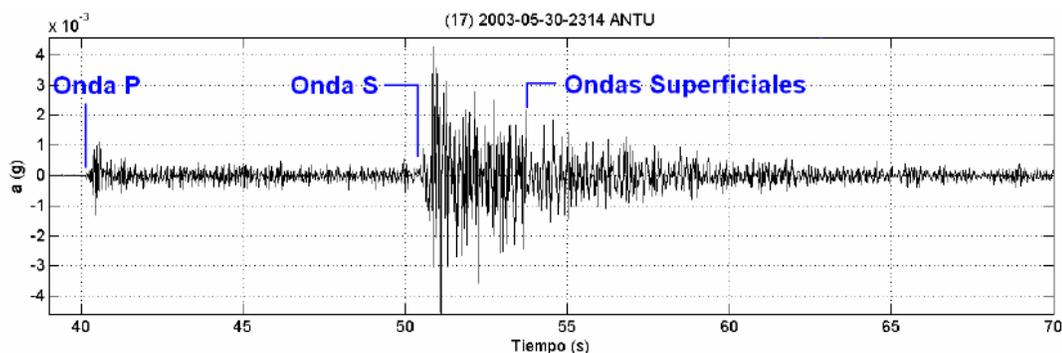


Figura 2.5 Registro Sísmico de Ondas.
Fuente: Ercilla, 2012

2.4 Normativa Sísmica Chilena

La normativa de diseño sísmico de edificios actual ha sido aprobada por el Consejo del Instituto Nacional de Normalización (INN), en sesión efectuada el 26 de junio de 1996 y ha sido declarada Oficial de la República de Chile por Decreto N°172, de fecha 05 de Diciembre de 1996, del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), publicado en el Diario Oficial del 23 de Diciembre de 1996 (INN, 2011).

Finalmente la norma fue aprobada por el Consejo del Instituto Nacional de Normalización, en sesión efectuada el 27 de Noviembre de 2009 (INN, 2009).

Debido al terremoto ocurrido el 27 de Febrero de 2010, el cual fue considerado un sismo de intensidad excepcionalmente severa que causó un nivel de daño por sobre lo aceptable, se estimó necesaria la revisión del D.S. N°117 “Diseño Sísmico de Edificios” dado que a la época de su formulación se contaba con información parcial de las causas y consecuencias de los daños que una catástrofe de la magnitud del terremoto del 2010 podía provocar, estableciéndose en tal reglamento factores de seguridad y estándares que debían ser ajustados, por tal razón se convocó a un grupo de expertos en la materia para que efectuaran las recomendaciones que estimaran convenientes (INN, 2011).

Entonces se crea el D.S. N°61 el cual adiciona algunos aspectos a la NCh433.Of 1996 modificada 2009 tales como la exploración geotécnica asociada a la clasificación sísmica para la cual se establece un método que lograra medir el parámetro de rigidez a bajas deformaciones a través de la obtención de un promedio de velocidades de ondas de corte en los 30 [m] superiores de estrato de suelo de acuerdo a la expresión descrita en el punto 1.1 del presente informe. A partir de este método se establece una clasificación sísmica de suelo de acuerdo a algunos parámetros como se muestra en la Tabla 2.1 obtenida del D.S. N°61 del Instituto Nacional de Normalización (INN) donde la principal característica es la velocidad de onda promedio y el ensayo de penetración estándar SPT.

Tabla 2.1: Clasificación Sísmica del Terreno de Fundación.

Suelo Tipo		V_{s30} [m/s]	RQD	q_u [MPa]	N_1	S_u [MPa]
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	$\geq 50\%$	≥ 10 ($\varepsilon \leq 2\%$)	-	-
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500	-	≥ 0.40 ($\varepsilon \leq 2\%$)	≥ 50	-
C	Suelo denso o firme	≥ 350	-	≥ 0.30 ($\varepsilon \leq 2\%$)	≥ 40	-
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180	-	-	≥ 30	≥ 0.05
E	Suelo de compactidad, o consistencia mediana	< 180	-	-	≥ 20	< 0.05
F	Suelos especiales	-	-	-	-	-

Fuente : D.S. N°61 INN, 2011.

Donde:

V_{s30} : Velocidad de onda de corte equivalente [m/s].

RQD : Rock Quality Designation, según Norma ASTM D 6032 [%].

q_u : Resistencia a la compresión simple del suelo [MPa].

ε_{qu} : Deformación unitaria desarrollada cuando se alcanza la resistencia máxima en el ensayo de compresión simple [-].

N_1 : Índice de penetración estándar normalizado por presión de confinamiento de 0,10 [MPa] (Aplicable solo a suelos que clasifican como arenas), en número de golpes.

S_u : Resistencia al corte no drenado del suelo [MPa].

La ecuación (1.1) mostrada anteriormente en el capítulo introducción representa el cálculo de V_{s30} la cual corresponde al promedio de velocidades de onda de corte en los primeros 30 [m].

Otro punto importante que fue modificado con respecto a la NCh433.Of 1996, es el que se refiere al espectro de diseño, el cual corresponde a determinar una aceleración propia del tipo de suelo y aplicarle factores relativos a la estructura para obtener un espectro

representativo de la situación que se desea analizar teniendo en consideración el tipo de suelo y el tipo de estructura.

La clasificación del suelo es de A, a F, donde la clasificación F es para suelos especiales y el valor de los parámetros de cada suelo se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Parámetros de Cada Tipo de Suelo.

Tipo de Suelo	S	To [s]	T' [s]	n	p
A	0.90	0.15	0.20	1.00	2.00
B	1.00	0.30	0.35	1.33	1.50
C	1.05	0.40	0.45	1.40	1.60
D	1.20	0.75	0.85	1.80	1.00
E	1.30	1.20	1.35	1.80	1.00
F	-	-	-	-	-

Fuente: D.S. N°61 (INN, 2011)

Como se muestra en la ecuación (2.3) que representan la función que describe el espectro de diseño según D.S. N°61.

$$S_a = \frac{SA_0\alpha}{\frac{R^*}{T}} \quad (2.3)$$

Donde:

S_a : Aceleración Máxima Efectiva según la zonificación sísmica de la NCh433.Of 1996 [m/s²].

S : Factor Propio del Tipo de Suelos según D.S. N°61 [-].

A_0 : Aceleración Espectral de Diseño [m/s²]

α : Factor de Amplificación que se determina para cada modo de vibrar n [-].

R^* : Factor de Reducción dependiente del periodo fundamental de la estructura y del tipo de estructura según NCh433.Of1996 y D.S. 61.

I : Factor que depende de la categoría del edificio según NCh433.0f1996 y D.S. 61.

n : Parámetro que depende del Tipo de Suelo; Índice asociado al Modo de Vibración.

T' : Parámetro que depende del Tipo de Suelo [s].

El factor α el variable en función del modo de vibrar donde varía el periodo de vibración de cada modo, en la ecuación (2.4) se muestra cómo se calcula este factor.

$$\alpha = \frac{1 + 4,5 \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^P}{1 + \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^3} \quad (2.4)$$

Donde:

T_n : Periodo de Vibración del Modo n [s].

T_0 : Parámetros Relativo al tipo de suelo de fundación [s].

P : Parámetros Relativo al tipo de suelo de fundación [-].

En la Figura 2.6 se muestran los 5 espectros de diseño relativos a cada uno de los suelos según el D.S. N°61 para la zona sísmica 2 donde se determina el valor de S_a [m/s^2] en función de T [s] utilizando la ecuación (2.3) sin considerar los factores de reducción propios de la estructura R^* e I ya que los espectros no son determinados para una edificación en particular.

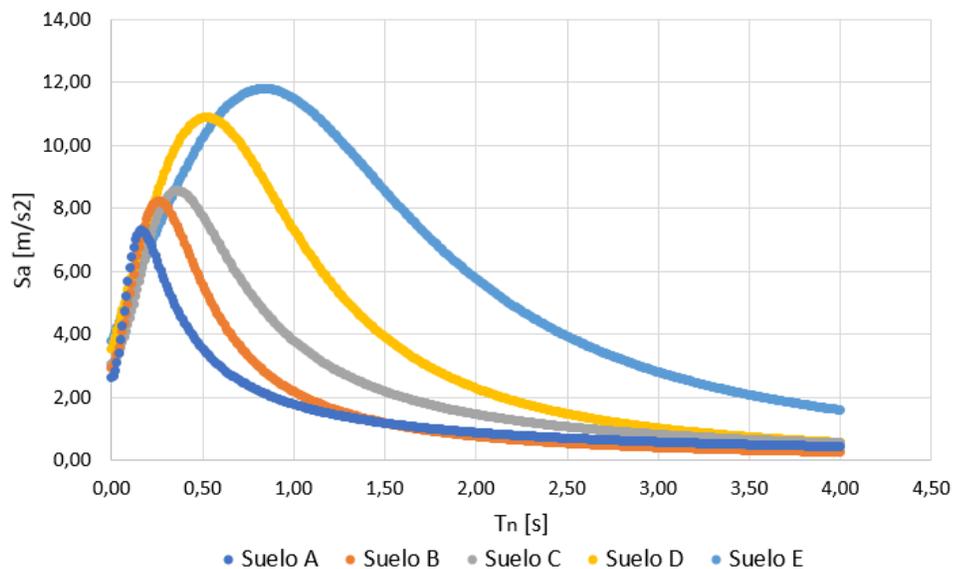


Figura 2.6 Espectros de Aceleración de Cada Suelo.

Fuente: Elaboración propia.

Para suelos especiales tipo F cuya característica es aquellos que presentan singularidades en su comportamiento mecánico, como por ejemplo, suelos licuables, suelos colapsables, suelos orgánicos, suelos sensitivos turbas, para estos casos el D.S. N°61 indica que requieren ser analizados con estudios geotécnicos especiales dentro de los cuales se utiliza el método Nakamura, si bien no indica que tipo de estudios especiales utilizar, queda a criterio del profesional responsable utilizar los ensayos que estime conveniente.

2.5 Vibraciones Ambientales

La vibración ambiental es la vibración que presenta la tierra producto de su dinámica externa e interna (corrientes de convección, oleaje, viento, etc.) además de la vibración producto de la actividad humana. Estas microvibraciones afectan a todas las superficies ya sean estructuras o el propio suelo de manera diferente dependiendo de las propiedades del material del cual se componen. Fundamentalmente, estas vibraciones son de muy pequeña amplitud y períodos comprendidos entre 0.10 [s] y 10.00 [s] (Vizconde Campos, 2017).

Básicamente este tipo de vibraciones se dividen en dos grandes categorías: de origen natural y artificial, cuya diferencia básica es el rango de frecuencia que generan.

2.5.1 Origen Artificial

Se caracterizan fundamentalmente por ser de frecuencias superiores a 1.00 [Hz] y su origen está relacionado predominantemente a actividad humana cercana pudiendo ser el tráfico vehicular, funcionamiento de maquinarias, paso de peatones, etc. Una de las características es su estabilidad, debido a que presenta frecuencias entre 1.00 y 10.00 [Hz] y están compuestos principalmente por ondas S y Rayleigh. Sin embargo, a medida se la fuente se encuentre más lejana las ondas superficiales se vuelven predominantes.

Hay ocasiones en que la frecuencia puede ser menor a 1.00 [Hz] y sin embargo ser de origen artificial como por ejemplo grandes motores o camiones, también se ve afectado localmente por la actividad durante el día y la noche o por el día de la semana (Fuentes, 2015).

2.5.2 Origen Natural y Efecto de Sitio

Son oscilaciones inducidas por fuentes naturales internas y externas como las olas oceánicas, tormentas, vientos, presión atmosférica, lluvias, géiser, actividad volcánica, etc. Los microsismos se caracterizan principalmente por su inestabilidad debido al tipo de fuente que los genera y son afectadas principalmente por las condiciones climáticas, llegando a presentar periodos que varían entre 2 a 3 o más segundos (microtremores de periodo largo). Este tipo de vibraciones está compuesto principalmente por ondas Rayleigh (Galvez, 2013).

En el año 1961 Kanai y Tanaka fueron pioneros en dar uso a este tipo de vibraciones para caracterizar el llamado efecto de sitio. Su investigación se basó en observaciones simultáneas de microtremores a diferentes profundidades en varios tipos de suelo y concluyeron que la distribución de períodos varia con la profundidad, que la curva de distribución de periodos muestra una forma definida que depende del tipo de suelo y que la variación de la distribución de amplitudes con la profundidad no es simple ni formulable (Fuentes, 2015).

Se ha demostrado empíricamente que cada suelo se ve afectado por diferentes fuentes de emisoras de vibraciones ambientales, estas pueden ser internas o superficiales tales como las mencionadas anteriormente, sin embargo se puede considerar que las vibraciones originadas por fuentes tales como mareas y vientos tienen una frecuencia menor pero una magnitud superior y son percibidas a grandes distancias lo que genera una sollicitación dinámica aleatoria en su trayecto lo cual permite que los depósitos de suelo vibren bajo distintas frecuencias. En función de esto, se determina que el suelo tiende a vibrar preponderantemente frente a frecuencias cercanas a su frecuencia natural lo cual genera un evento conocido como efecto de sitio el cual se genera debido a la amplificación del movimiento en superficie característico de suelos blandos.

El origen de la amplificación debida a contrastes de impedancia (el producto de la densidad por la velocidad de propagación) en el subsuelo es claro. La conservación del flujo de energía requiere que una onda sísmica que pasa de un medio con velocidad de propagación rápida a uno con velocidad más baja aumente su amplitud. Es común que los materiales más superficiales tengan velocidades de propagación más lentas. Por ello, los efectos de sitio no pueden despreciarse, especialmente en sitios sobre sedimentos

blandos tales como valles aluviales. Las densidades de los materiales del subsuelo no cambian mucho cerca de la superficie. En contraste, las velocidades de propagación de ondas de corte pueden fácilmente cambiar por un factor mayor de 5 entre un depósito de suelo blando y su substrato. Por tanto, son las variaciones en las velocidades de propagación las principales responsables de la amplificación del movimiento sísmico, que frecuentemente alcanza valores de 10 o más en frecuencias relevantes para estructuras comunes (Chávez-García y Montalva, 2014).

2.6 Método Nakamura y Transformada de Fourier

2.6.1 Transformada de Fourier

La Transformada de Fourier o Espectro de Fourier, $S(\omega)$, de una señal, $s(t)$, continua, periódica, estacionaria y de energía finita se define como la ecuación (2.5):

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.5)$$

Como algunos procesos no se pueden muestrear en forma continua, se define la Transformada Discreta de Fourier de la señal discreta, s , como la ecuación (2.6):

$$S_k = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^n s_i e^{-j\omega_k(i\Delta t)} \quad (2.6)$$

Donde Δt es el intervalo de muestreo.

En este caso las frecuencias también son discretas y se describen de acuerdo a las ecuaciones 2.7 y 2.8:

$$\omega_k = k \cdot \Delta\omega \quad k = 0 \dots (n - 1) \quad (2.7)$$

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} \quad T = (n - 1) \cdot \Delta t \quad (2.8)$$

Con n , el número total de puntos de la señal s .

La implementación computacional de la Transformada Discreta de Fourier es la Fast Fourier Transform, (FFT) (Vetterling, Teukolsky, Press, y Flannery, 1992), la que es utilizada por los programas usados en este trabajo para fines prácticos.

2.6.2 Método Nakamura

EL método Nakamura se basa en estimar el factor de amplificación o la función de transferencia de un depósito de suelos sedimentario por sobre el suelo rocoso, solicitado por un frente de ondas SH que se propaga verticalmente hasta la superficie, a partir de mediciones en superficie de vibraciones ambientales verticales y horizontales como las anteriormente definidas en el punto 2.5 del presente capítulo.

En base a la razón espectral H/V obtenida a partir de la medición de microtremores verticales y horizontales se determinó que es posible estimar la frecuencia predominante y el factor de amplificación, siendo esta estimación estable durante el tiempo y estaciones del año donde se adquieran estos registros (Yukata Nakamura, 1989).

Esto se logra empleando la Transformada de Fourier la cual reúne todas las frecuencias y amplitudes presentes en ventanas seleccionadas de un registro sísmico o de microtremores que contiene mediciones desde direcciones Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical y calcula un único espectro representativo del lugar donde se está midiendo promediando cada uno de los espectros transformados. En la Figura 2.7 se muestra gráficamente como actúa el método a partir de un registro sísmico.

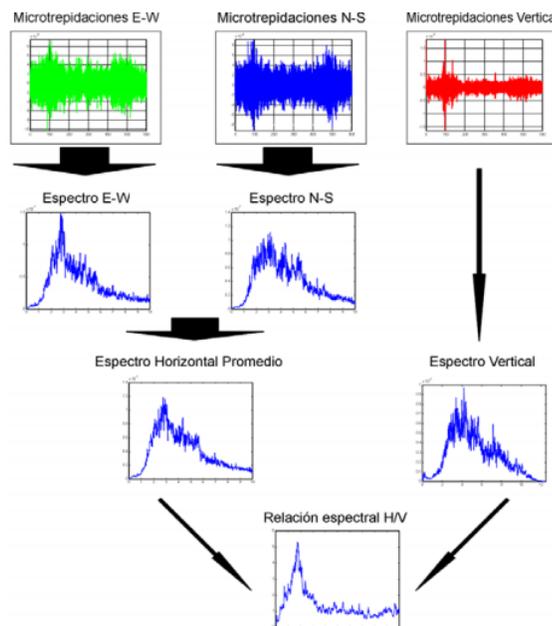


Figura 2.7 Diagrama de Flujo para Obtener la Relación Espectral H/V

Fuente : Rosales, 2001.

Las solicitaciones naturales, por ser de mayor envergadura, en suma producen una solicitación dinámica aleatoria, la cual permite que un depósito de suelos tienda a vibrar preponderantemente de acuerdo a su frecuencia fundamental denominada f_0 , en cambio, solicitaciones de menor energía como las que generan vibraciones artificiales tienden a excitar capas de suelo más superficiales, las que responden a frecuencias relativamente más altas y según el método este tipo de vibraciones ambientales registradas en superficie tendrían un contenido de frecuencias distorsionado por fuentes no estacionarias o artificiales de energía (Pasten, 2007).

Según lo anterior, el método recomienda realizar mediciones en períodos de tiempo en que las actividades urbanas disminuyen, esto significa realizar mediciones durante la noche o la madrugada. Según el método original propuesto por Nakamura, es posible estimar frecuencias fundamentales y factores de amplificación estables y confiables incluso en presencia de cierto nivel de vibraciones artificiales sin restricciones horarias, sin embargo, se aconseja ampliar el tiempo de medición en caso que se presente ruido artificial cercano.

El método además parte de la base que el suelo rocoso al estar sometido a vibraciones ambientales, no presentará una dirección de movimiento superior a la otra, es decir la razón H/V será cercana a 1. Por lo tanto, cualquier amplificación de la razón H/V en superficie será generado debido a depósitos de suelos sedimentarios con rigidez menor a la de la roca y esta irá aumentando a medida que el promedio de los estratos de suelo presente menos rigidez.

Esta amplificación de la razón H/V se debe a que, según la propuesta teórica de Nakamura, se acepta que las componentes horizontales del movimiento son amplificadas por la multi-reflexión de las ondas S que atraviesan los depósitos de suelos, mientras que la componente vertical es amplificada por la multi reflexión de las ondas P. Por otro lado, se acepta que el efecto de las ondas Rayleigh aparece más marcadamente en la componente vertical de movimiento, por lo que su efecto puede ser cuantificado calculando la razón entre la componente vertical del movimiento en superficie y vertical en la base del depósito (Pasten, 2007).

Principalmente la metodología de la técnica se enfoca en la eliminación del efecto de las ondas Rayleigh para describir la función de transferencia debida a las ondas corporales, específicamente las ondas S.

La teoría del método Nakamura se basa en determinar la razón de movimiento horizontal por sobre el vertical basándose en la eliminación del efecto de las ondas Rayleigh y basarse en las ondas de cuerpo S las cuales en su dirección horizontal pueden ser representadas según la función de transferencia de la ecuación (2.9).

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (2.9)$$

Donde:

S_{HS} : Función de Espectro de Amplitud de Fourier Horizontal en superficie [-].

S_{HB} : Función de Espectro de Amplitud de Fourier Horizontal en el basamento rocoso [-].

La razón de las componentes verticales del movimiento la cual representa principalmente las ondas Rayleigh y no se ve afectado por amplificaciones al cambiar de estratos se define en la ecuación 2.10.

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (2.10)$$

Donde:

S_{VS} : Espectro de amplitud de Fourier Vertical en superficie [-].

S_{VB} : Espectro de amplitud de Fourier Vertical en el basamento rocoso [-].

Como se mencionó anteriormente, la componente vertical del movimiento no sufre amplificaciones por lo tanto se puede definir una nueva función de transferencia definida por la ecuación 2.11 que elimina el efecto de las Ondas Rayleigh.

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_S} = \frac{\frac{S_{HS}}{S_{HB}}}{\frac{S_{VS}}{S_{VB}}} = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \frac{S_{VB}}{S_{VS}} \quad (2.11)$$

Luego, considerando que en el basamento rocoso el movimiento es igual en todas las direcciones la razón H/V en basamento alcanza valores en torno 1 para un amplio rango de frecuencias, por lo tanto, la función de transferencia final queda representada por la ecuación 2.12:

$$S_{TT} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (2.12)$$

Esto significa que la función de transferencia asociada a la propagación vertical de ondas de corte de un depósito de suelos, puede ser estimada simplemente a partir de movimientos medidos en superficie ya que la componente vertical en superficie conserva las características de la componente horizontal en el basamento y así, el método de Nakamura permitiría obtener la función de transferencia completa del depósito de suelos tanto en frecuencia como en amplificación.

2.7 Evaluación de los Efectos del Sitio utilizando Excitaciones Ambientales (SESAME)

Se trata de un proyecto que establece directrices prácticas y recomendaciones sobre procedimientos para experimentos de campo, procesamiento de datos e interpretación de los resultados obtenidos de la implementación de la relación espectral H/V mediante vibraciones ambientales. Las recomendaciones que se dan en el documento son el resultado de un consenso alcanzado por los participantes en el proyecto europeo de investigación Site Effects Assessment Using Ambient Excitations (SESAME), y se basan en un trabajo de investigación exhaustivo y detallado durante tres años (SESAME, 2004).

2.7.1 Condiciones Experimentales

Las condiciones externas son de vital importancia al momento de realizar mediciones en terreno, ya que son determinantes con respecto a la calidad de los resultados ya que pueden producir distorsiones en los resultados obtenidos debido a condiciones de ruido artificial el cual tiende a excitar las capas superficiales y generan vibraciones de alta frecuencia, es por ello que el criterio SESAME recomienda ciertas condiciones experimentales las cuales se dividen en distintas categorías.

Los parámetros relativos a la frecuencia de muestreo se relacionan a la máxima frecuencia que se desea medir, para el caso de frecuencia fundamental del suelo como la frecuencia máxima de interés no es mayor a 10.00 [Hz], se recomienda establecer en el sismógrafo una frecuencia de muestreo máxima de 25.00 a 50.00 [Hz], aunque si estas fuesen superiores no influirían en los resultados H/V.

Para que una medición sea fiable, la duración de la medición debe cumplir con la condición de la ecuación (2.13) la cual sirve para obtener una medición fiable y que haya al menos diez ciclos significativos por ventana.

$$f_0 > \frac{10}{l_w} \quad (2.13)$$

Donde:

f_0 : frecuencia fundamental esperada [Hz].

l_w : Largo de la ventana [s].

Además, se requiere que el total de ciclos significativos definidos por n_c sea al menos igual a 200. A modo de ejemplo se establecen las siguientes combinaciones de número de ventanas y tiempo de cada una dependiendo de la frecuencia esperada:

- Para un peak de 1 [Hz]
 - Seleccionar 20 ventanas de 10 [s] cada una.
 - Seleccionar 10 ventanas de 20 [s] cada una.
- Para un Peak de 0,5 [Hz]
 - Seleccionar 10 ventanas de 40 [s] cada una.
 - Seleccionar 20 ventanas de 20 [s] cada una.

Esta combinación está sujeta a que el cálculo del número de ciclos significativos queda establecido por la ecuación (2.14) y la Tabla 2.3 se muestran los parámetros mínimos que se debe cumplir dependiendo de la frecuencia.

$$n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_o \quad (2.14)$$

Donde:

n_c : Número total de ciclos significativos [-].

n_w : número de ventanas seleccionadas [-].

Tabla 2.3: Longitudes Mínimas de Grabación Recomendadas.

f_o [Hz]	l_w [s]	N° mínimo de ventanas n_w	n_c	Duración mínima de la señal [s]	Duración mínima del registro [min]
0.20	50.00	10.00	200.00	1000.00	30.00
0.50	20.00	10.00	200.00	400.00	20.00
1.00	10.00	10.00	200.00	200.00	10.00
2.00	5.00	10.00	200.00	100.00	5.00
5.00	5.00	10.00	200.00	40.00	3.00
10.00	5.00	10.00	200.00	20.00	2.00

Fuente: SESAME, 2004

Con respecto a la distancia de medición entre un punto y otro se recomienda adoptar inicialmente un gran espaciamiento (por ejemplo, una cuadrícula de 500.00 [m] y, en caso de variación lateral de los resultados, densificar el espaciamiento de los puntos de cuadrícula, hasta 250.00 [m], por ejemplo.

El acoplamiento suelo/sensor in situ debe manejarse con cuidado. El hormigón y el asfalto proporcionan buenos resultados, mientras que la medición en suelos blandos e irregulares como barro, hierba, tierra labrada, hielo, grava, nieve no compactada, etc., debe manejarse con más atención.

Para garantizar un buen acoplamiento suelo/sensor, el sensor debe instalarse directamente en el suelo, excepto en situaciones muy especiales (por ejemplo, en pendientes pronunciadas) para las que puede ser necesaria una base de soporte para

lograr una estabilidad del sensor. Se recomienda que sea un material rígido como una placa metálica o por ejemplo un contenedor con arena. Se debe evitar usar materiales blandos como goma o cartón ya que alteran los resultados.

Se aconseja no medir cerca de edificios o arboles ya que hay pruebas claras de que los movimientos de las estructuras debidos al viento pueden introducir fuertes perturbaciones de baja frecuencia en el suelo. Desafortunadamente, no es posible cuantificar la distancia mínima desde la estructura donde se produce la influencia insignificante, ya que esta distancia depende de demasiados factores externos (tipo de estructura, fuerza del viento, tipo de suelo, etc.), también se aconseja no medir cerca de estructuras subterráneas como alcantarillados, subterráneos, tuberías etc. ya que pueden alterar significativamente la amplitud vertical del movimiento.

El viento es probablemente la influencia más frecuente y se sugiere evitar las mediciones durante los días ventosos. Incluso un ligero viento (aprox. >5.00 [m/s]) puede influir fuertemente en el resultado H/V mediante la introducción de grandes perturbaciones a bajas frecuencias (por debajo de 1.00 [Hz]) que no son relacionados con los efectos del sitio.

Se deben evitar las mediciones durante las lluvias intensas, mientras que las lluvias leves no influyen los resultados de H/V.

Todo tipo de fuentes locales de corta duración (pasos, coche, tren) pueden perturbar los resultados. La distancia de influencia depende de la energía de la fuente, las condiciones del suelo, etc., por lo que no es posible dar valores mínimos generales de distancia. Sin embargo, se ha observado en general, por ejemplo, que las fuentes de vibración ambiental de cortos períodos y gran amplitud (por ejemplo, el tráfico rápido en autopistas) influyen en las relaciones H/V si se encuentran dentro de los límites de $15.00 - 20.00$ [m] y las fuentes más continuas (por ejemplo, el tráfico lento en el centro de la ciudad) sólo influyen en las relaciones H/V cuando están mucho más cerca (SESAME, 2004).

2.7.2 Condiciones para el Análisis de Resultados

Dentro de los puntos desarrollados durante el proyecto SESAME se elaboraron algunos criterios y recomendaciones para ayudar en la interpretación de los resultados y verificar que estos sean representativos del lugar de interés. Básicamente se basan en condiciones matemáticas para que la curva H/V sea clasificada como clara y fiable.

- Curva H/V Confiable

La condición número uno condiciona la cantidad mínima de ciclos significativos por ventana seleccionada, es decir debe haber al menos diez ciclos significativos como se indicó anteriormente en la ecuación 2.13 del capítulo 2.7.1.

La segunda condición corresponde a la cantidad mínima de ciclos significativos totales la cual se representa según la ecuación 2.14 del capítulo 2.7.1.

La tercera condición exige que la desviación estándar de amplitudes para frecuencias entre 0.50 y 2.00 [Hz] sea menor a un valor máximo para las componentes horizontales y la vertical como se indica en la ecuación 2.15 y 2.16, asegurando con esto que la señal analizada es proveniente de una fuente lejana y no local.

$$\sigma_A(f) < 2 \quad \text{para} \quad 0.5f_0 < f < 2f_0, \quad \text{si } f_0 > 0.50 \text{ [Hz]} \quad (2.15)$$

$$\sigma_A(f) < 3 \quad \text{para} \quad 0.5f_0 < f < 2f_0, \quad \text{si } f_0 < 0.50 \text{ [Hz]} \quad (2.16)$$

Si alguno de estos tres requisitos no se cumple la medición en el punto se considerará no fiable y por lo tanto la curva automáticamente debe ser desechada. Para cumplir con estos criterios la recomendación es extender el largo de las ventanas seleccionadas, extender el tiempo de medición y evitar medir en lugares cercanos a perturbaciones artificiales.

- Peak claro de la curva H/V

Luego de verificar la fiabilidad de la curva se deben verificar los casos donde se encuentre un peak y verificar que este mismo califique como peak claro. Para ello, el criterio SESAME se basa en seis condiciones de las cuales se está obligado a cumplir al menos con cinco de ellas para que sea aceptado como un peak claro. De cumplirse esto, se

podrá decir que el peak encontrado puede representar la frecuencia fundamental de los estratos de suelo.

La primera y segunda que se debe cumplir hace referencia a la velocidad con la que decae la curva antes y después de alcanzar su amplitud máxima, es decir, existe una frecuencia entre dos valores tal que la amplitud de esa frecuencia es menor a la mitad de la amplitud de la frecuencia fundamental. En la ecuación 2.17 y 2.18 se muestran ambas restricciones.

$$f^- = \left\{ \exists f^- \in \left[\frac{f_0}{4}, f_0 \right] / A_{\frac{H}{V}}(f^-) < \frac{A_0}{2} \right\} \quad (2.17)$$

$$f^+ = \left\{ \exists f^+ \in [f_0, 4f_0] / A_{\frac{H}{V}}(f^+) < \frac{A_0}{2} \right\} \quad (2.18)$$

La tercera condición es que la amplitud del peak sea superior a 2.

$$A_0 > 2 \quad (2.19)$$

La cuarta condición establece la existencia de la frecuencia fundamental de una curva cuya amplitud peak con el margen de la desviación estándar, sea igual a la frecuencia fundamental de la curva total con una tolerancia del 5%.

$$f_{\text{peak}} = \left\{ f_{\text{peak}} \left[A_{\frac{H}{V}}(f) \pm \sigma_A(f) \right] = f_0 \pm 5\% \right\} \quad (2.20)$$

La quinta condición es que la desviación estándar del peak frecuencial debe ser menor a un valor umbral condicionado por la misma frecuencia fundamental.

$$\sigma_f < \mathcal{E}(f_0) \quad (2.21)$$

Al igual que en la quinta condición, en la sexta restricción se establece que la desviación estándar de la amplitud del peak frecuencial debe ser menor a un valor umbral condicionado por la misma frecuencia fundamental.

$$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0) \quad (2.22)$$

Donde:

f: Frecuencia Actual [Hz].

f_0 : Peak Frecuencia de la Curva H/V [Hz].

σ_f : Desviación Estándar de la Frecuencia Peak de H/V ($f_0 \pm \sigma_f$) [-].

$\varepsilon(f_0)$: Valor Umbral (ver Tabla 2.2) para la condición de estabilidad de $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ [-].

A_0 : Peak de amplitud H/V a la Frecuencia f_0 [-].

$A_{\frac{H}{V}}(f)$: Peak de Amplitud de curva H/V a la Frecuencia f [-].

f^- : Frecuencia entre $f_0/4$ y f_0 para que $A_{\frac{H}{V}}(f^-) < \frac{A_0}{2}$ [Hz].

f^+ : Frecuencia entre f_0 y $4f_0$ para que $A_{\frac{H}{V}}(f^+) < \frac{A_0}{2}$ [Hz].

$\sigma_A(f)$: Desviación Estándar de $A_{\frac{H}{V}}(f)$ [-].

$\theta(f_0)$: Valor Umbral (Tabla 2.2) para la Condición de Estabilidad $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ [-].

Tabla 2.4 Valores Umbrales para $\theta(f_0)$ y $\varepsilon(f_0)$.

Rango de frecuencia [Hz]	<0.2	0.2-0.5	0.5-1.0	1.0-2.0	>2.0
$\varepsilon(f_0)$ (Hz)	$0.25f_0$	$0.20f_0$	$0.15f_0$	$0.10f_0$	$0.05f_0$
$\theta(f_0)$ de $\sigma_A(f_0)$	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58

Fuente: SESAME, 2004.

2.7.3 Clasificación de las Curvas

A las curvas H/V resultantes se las clasifica visualmente en función de las características del peak que presentan, esta clasificación de acuerdo a estudio realizado en la cuenca de Santiago. En él se caracterizan las siguientes curvas (F. L. G. Lezana, 2014).

- H/V Planas: razones espectrales con amplitudes menores a 2 y sin la presencia de un peak predominante. (Figura 2.8).

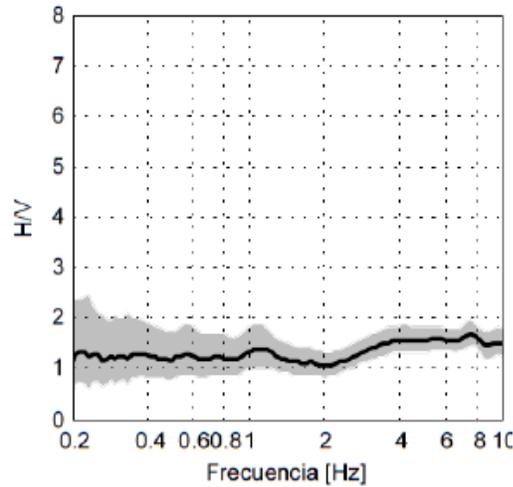


Figura 2.8 Curva Plana.
Fuente: F. L. G. Lezana, 2014

- H/V con Peak Somero: razones espectrales con presencia de un peak predominante de amplitud cercana a 2. (Figura 2.9).

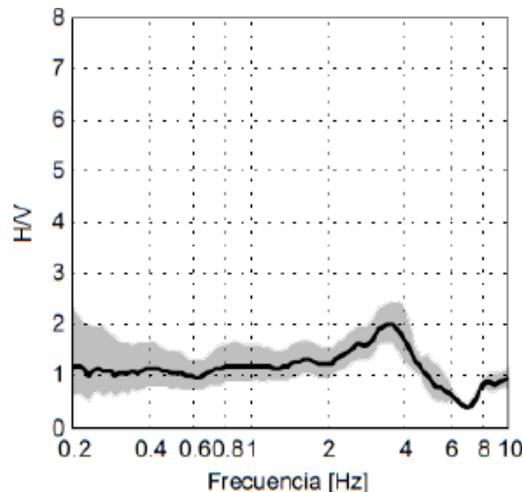


Figura 2.9 Peak Somero.
Fuente: F. L. G. Lezana, 2014

- H/V con Peak Marcado: razones espectrales con uno o más peaks predominantes de amplitud superior a 2. (Figura 2.10).

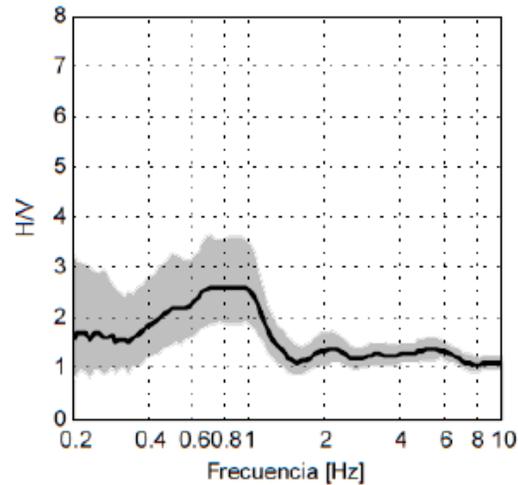


Figura 2.10 Peak Marcado
Fuente: F. L. G. Lezana, 2014

- H/V con Peak muy Marcado: razones espectrales con uno o más peaks predominantes de amplitud superior a 3. (Figura 2.11).

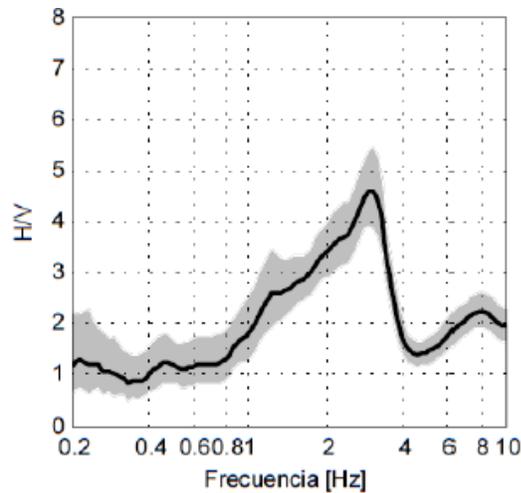


Figura 2.11 Peak muy Marcado
Fuente: F. L. G. Lezana, 2014

CAPÍTULO 3
MARCO GEOLÓGICO Y GEOGRÁFICO

3. Marco Geológico y Geográfico

3.1 Geología Regional

Al sur del paralelo 38° el perfil geológico de la región de la Araucanía presenta una cobertura caracterizada por sedimentos marinos y continentales del periodo Terciario, Época Miocena (hace 26 millones de años) que sobreyacen a depósitos carboníferos sobre el complejo metamórfico, conocido como la Cordillera de la Costa, que se extiende desde el Océano Pacífico (73° 25' Long. W) y hasta los valles de la Depresión Intermedia, situados antes del piedmont Andino (72° 30' Long. W). Los valles centrales, de origen tectónico presentan un relleno sedimentario continental, de origen fluvio-glaciar y glaciolacustre, con registros de corrientes de barro y lahares del periodo Cuaternario, Época holocena (hace 1 a 2 millones de años).

Desde la longitud 72° 30' W, y hasta el límite geográfico internacional o Divortium Andino, el área se caracteriza por depósitos volcánicos recientes, conocidos como la serie efusiva máfica, que sobreyacen a rocas intrusivas graníticas y migmatitas de edad Terciaria. Hacia el Oriente, el mismo intrusivo ha cortado depósitos continentales de lavas andesíticas, tobas, areniscas, brechas y conglomerados andesíticos, definidos como la Formación Curarrehue, de edad Cretácico Superior.

La Región evidencia procesos tectónicos de magnitud catastrófica, con plegamiento y distensión de la cobertura, caracterizados por fallas regionales de rumbo Norte-Sur (N-S) y sus respectivas ortogonales, las cuales en la mayoría de los casos han dado origen estructural a las formas que contienen agua.

Un estado de acomodación reciente dio origen a procesos volcánicos alineados Norte-Sur, con generación de magma fisural que fundió grandes cantidades de hielo, contemporáneamente con la formación de lagos tectónicos (Lago Caburgua).

Estos procesos son notables y actuales al sur de la Cordillera de Nahuelbuta, como es el caso de los volcanes Villarrica, Llaima y Lonquimay, entre otros.

Como evidencias que fundamentan la hipótesis de trabajo, los cerros Ñielol y Conun Hueno en Temuco, fueron testigos del paso de grandes glaciares con superficies continuas hasta el Océano Pacífico. La interacción de lavas produjo grandes inundaciones con depósitos rítmicos de carbones. Registro de estos fenómenos son el

rescate de carbones mediante cuchara plana, a una profundidad de 60.00 [m]. en la terraza derecha del río Cautín, durante faenas de perforación, y el hallazgo, en las cumbres, 343.00 [m], de los cerros mencionados, de restos de carbones a una profundidad de 40.00 [cm]. de la superficie del suelo. Ambos eventos son importantes para imaginar la escala de los fenómenos ocurridos.

Eventos volcánicos posteriores y reiterativos, cuya génesis ha de estar asociada al vector derivado del Efecto Coriolis (fenómeno que hace que un objeto que se mueve sobre el radio de un disco en rotación tienda a acelerarse con respecto a ese disco según si el movimiento es hacia el eje de giro o alejándose de éste) y la acomodación de Placas Geológicas frente a nuestras costas con alzamiento y descenso de bloques, aportaron la energía calórica suficiente para fundir en parcialidades los hielos regionales. El agua generada, colmató las cuencas tectónicas formando áreas lacustres. Reacomodaciones tectónicas agitaron los planos deposicionales de los sedimentos lacustres y de la capa de óxido ferroso férrico (Hoya Río Toltén).

El complejo metamórfico, reconocido como Cordillera de la Costa, de edad Paleozoico, se caracteriza por la presencia de anfibolitas, pizarras y micacitas. Consideraciones que permiten inferir probables discordancias estructurales y temporales, a lo menos en sus puntos terminales de afloramiento, como es el caso de las localidades de Puerto Saavedra y Temuco, por cuanto infrayacen a depósitos de origen marino de edad Terciaria y a sedimentos continentales de edad Cuaternaria.

Rocas metamórficas se reconocieron en Carahue, Nueva Imperial, en el cordón de los Cerros Quelén-Quellén, alrededor de 10.00 [km]. al oriente de la ciudad de Pitrufquén y en Mininco.

Las rocas metamórficas, de color café-plomo nacarado y sedosas al tacto, corresponden a esquistos de foliación densa, con presencia de capas de cuarzo oxidado, que en otros lugares presentan el aspecto de módulos de cuarzo lenticulares, con alternancia de capas de micas. El paquete en superficie por reacción de la alteración por agua, adquiere un color rojo peculiar, el cual ha dado lugar a los suelos rojos con nódulos de cuarzo. Las rocas graníticas, de acuerdo con el perfil Este-Oeste (E-W). Alcanzan amplia distribución en el área de los Lagos Villarrica y Colico, además de contener tectónicamente al Lago Caburgua, el cual es Producto del fallamiento de rumbo Norte-Sur (N-S), que cortó las

faldas del volcán Villarrica, provocando distensión con fractura en forma de abanico de los macizos graníticos que constituyen el área según Valdivia (como se citó en (Gottschalk, 2000))

Se muestra un mapa elaborado por el de la novena región donde se identifica la geología básica elaborado por Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN, 2003) (Figura 3.1).

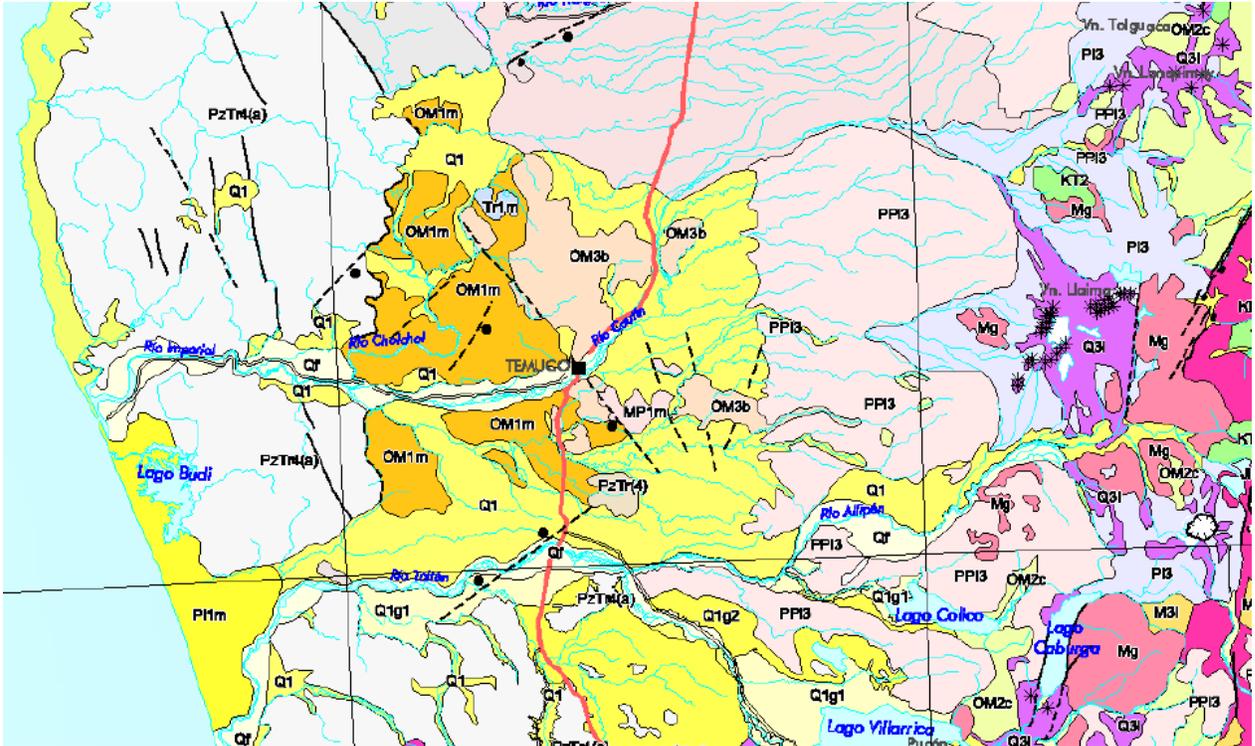
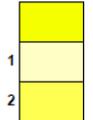
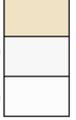


Figura 3.1 Mapa Geológico de la Novena Región.
Fuente: SERNAGEOMIN, 2003.

En la Tabla 3.1 se define la leyenda de los elementos geológicos presentes en la región y a la época geológica a la que pertenece cada uno.

Tabla 3.1: Leyenda Geológica de la Novena Región.

Secuencias			Rocas	
sedimentarias	volcanosedimentarias	volcánicas	intrusivas	metamórficas
 Q1		 Q3i		
 Qf				
 Q1g	 OM2c	 PPI3	 Mg	 PzTr4 (a) (b)
 PI1m				
 MP1m				
 OM1m		 OM3b		

Fuente: SERNAGEOMIN, 2003.

Q1 Pleistoceno-Holoceno: Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa en menor proporción fluvio-glaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. En la Depresión Central, regiones Metropolitana a La Araucanía: abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvio-glaciales con intercalación de depósitos volcanoclásticos.

Qf Pleistoceno-Holoceno: Depósitos fluviales gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación.

Q1g Pleistoceno-Holoceno: Depósitos morrénicos, fluvio-glaciales y glacialacustres diamictos de bloques y matriz de limo-arcilla, gravas, arenas y limos. En la Cordillera Principal, Región de Arica y Parinacota a Región de Valparaíso. En la Depresión Central, Región de La Araucanía a Región de Los Lagos; en La Región de Aysén y Región de Magallanes: lóbulos morrénicos en el frente de los lagos proglaciales, abanicos fluvio-glaciales frontales o varves en la ribera de lagos o cursos fluviales, asociados a las

principales glaciaciones del Pleistoceno donde son indiferenciados o relativos a las glaciaciones Llanquihue, Santa María, Río Llico o Caracol.

PI1m Pleistoceno: Secuencias sedimentarias marinas litorales o fluviales estuarinas coquinas, conglomerados coquínáceos, areniscas y conglomerados dispuestos en niveles aterrazados emergidos.

MP1m Mioceno Superior-Plioceno: Secuencias sedimentarias marinas transgresivas areniscas, limolitas, coquinas, conglomerados, calizas y fangolitas.

OM1m Oligoceno-Mioceno: Secuencias sedimentarias marinas: areniscas y coquinas.

OM2c Oligoceno-Mioceno: Secuencias volcanosedimentarias lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas. En la Cordillera Principal, desde la Región de Arica y Parinacota a Región de La Araucanía: formaciones Lúpica, Escabroso, Abanico, Coya-Machalí, Cura-Mallín (inferior).

Q3i Cuaternario: Estratovolcanes y complejos volcánicos lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos a dacíticos; Principalmente holocenos en la Cordillera Principal, desde Región Metropolitana a Región de Los Lagos: volcanes San José, Peteroa, Antuco, Llaima, Villarrica, Osorno y Calbuco, entre otros.

PPI3 Plioceno-Pleistoceno: Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados. En la Cordillera Principal, desde Región de Ñuble y Bio-Bio a Región de Los Lagos: formaciones Cola de Zorro y Malleco.

OM3b Oligoceno-Mioceno: Secuencias y centros volcánicos básicos: lavas, brechas y rocas piroclásticas. En la Cordillera de la Costa, la Región de La Araucanía a la Región de Los Lagos: complejos volcánicos de Ancud, Pargua y Capitanes.

Mg: Mioceno (18-6 Ma): Granodioritas, dioritas y tonalitas en la Cordillera Principal, desde Región de Ñuble y Bio-Bio a Región de Los Lagos.

PzTr4 Paleozoico-Triásico: Metapelitas, metacherts, metabasitas y, en menor proporción, neises y rocas ultramáficas con protolitos de edades desde el Devónico al Triásico y metamorfismo del Pérmico al Jurásico. En la Cordillera de la Costa, Región de La Araucanía a Región de Los Lagos: Complejo Metamórfico Bahía Mansa; en la Cordillera

Principal, región X: Complejo Metamórfico Liquiñe. Se distinguen esquistos pelíticos (a) y esquistos y anfibolitas, en menor proporción, rocas metamórficas ultramáficas (b) (SERNAGEOMIN, 2003).

3.2 Geografía y Geología de la Comuna de Temuco

Temuco, capital de la Novena Región de la Araucanía, se ubica en las coordenadas 38° 45' Latitud sur y 72° 35' Longitud Oeste. Geopolíticamente emplazado en la comuna de Cautín, que limita al Norte con las comunas de Galvarino y Lautaro, al Sur con la comuna de Freire, al Este con parte de la comuna de Lautaro y Vilcún y finalmente al Oeste con la comuna de Nueva Imperial.

Geomorfológicamente la comuna de Temuco se encuentra dentro de la unidad del Llano Central con morrenas de Ablación (aquellas que han sido sedimentadas sobre el lecho del glaciar) y conos de solidiflucción periglacial. El llano central o Depresión Intermedia comienza a adoptar en esta zona características representadas por una topografía fuertemente ondulada, en la cual los ríos se profundizan con gran energía (Fuentes, 2015).

La geología superficial de la ciudad puede definirse en unidades de edad Cuaternaria y en parte de probable edad Terciaria Superior, las cuales están representadas por Sedimentos Continentales y Lavas Andesíticas y/o Andesíticas Basálticas. Como unidades litológicas diferenciables y que abarcan mayor superficie se encuentran los depósitos fluvioglaciales y sedimentos aluviales (Valdivia, 1990).

Se distinguen de manera genérica cinco macrounidades geográficas (Figura 3.2), los cuales son parte del modelamiento realizado por procesos glaciares, fluviales y aluviales.

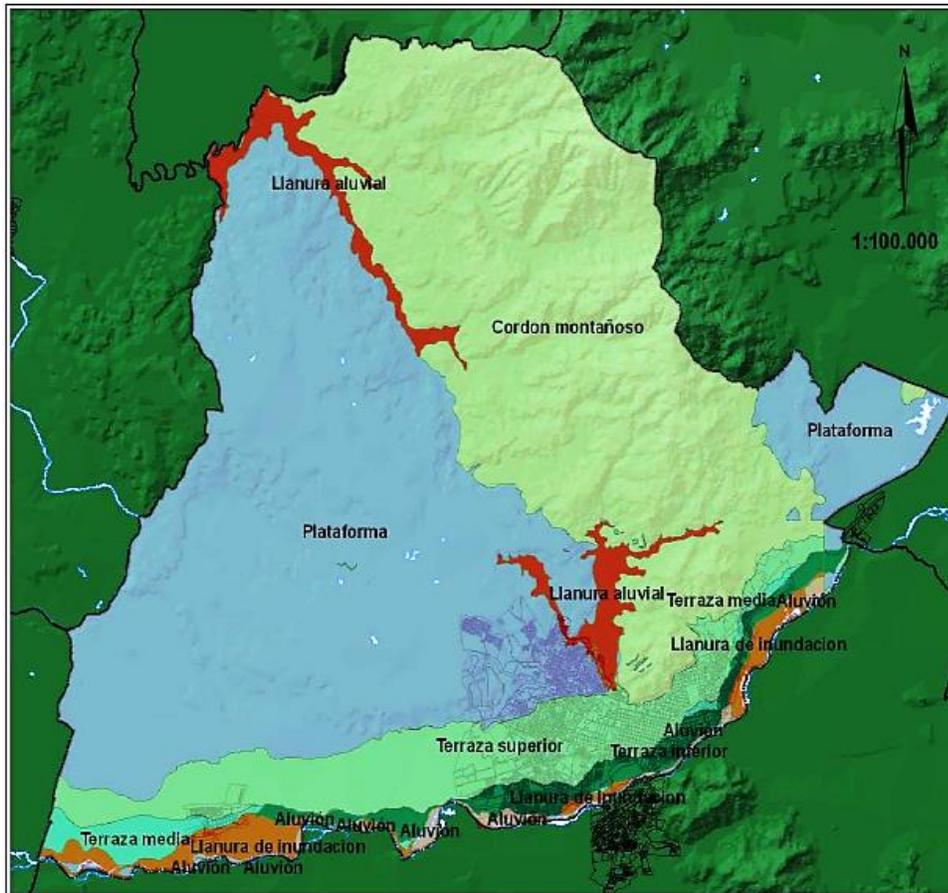


Figura 3.2 Geografía de Temuco.
Fuente: Municipalidad de Temuco, 2010.

- **Cordón Montañoso Ñielol:** La primera unidad corresponde al principal agente modelador del paisaje de la comuna el cordón montañoso del Ñielol, dicha estructura corresponde a un pequeño macizo que atraviesa la comuna desde el noroeste al sureste. Este cordón es producto de la erosión de una matriz de roca y tiene su origen en el plutonismo tardío, esto quiere decir que tienen un origen distinto del volcánico.
- **Llanura Aluvial:** A los pies del Cordón del Ñielol se encuentran llanuras aluviales, las que reciben los drenajes del cordón, son importantes zonas de acumulación de material proveniente de los cerros. Dicho proceso de acumulación está controlado fundamentalmente por la gravedad y corresponden a materiales no consolidados cuyos

constituyentes elásticos de carácter anguloso y subangulosos presentan una distribución variable de sus tamaños desde bloques a arcilla, esta última en pequeña proporción. La extensión de arena de estos depósitos, se restringe a las zonas de fluvios en las bases de las quebradas.

- Llanura de Inundación: Las llanuras de inundación están asociadas al río Cautín. Dichas unidades proveen un área de acumulación de las subidas al mismo río.
- Plataforma: La principal geoforma de la comuna corresponde a la plataforma, la que producto de varios procesos de transporte de material durante miles de años más la erosión directa de la roca madre han dado forma a este espacio que recibe parte importante del centro urbano.
- Terrazas Superiores, Media e Inferior: El aspecto característico de los sedimentos fluvio-glaciales es su distribución en terrazas dentro de los valles urbanos, a modo de ejemplo las series de poblaciones como Galicia, Planta Coca-Cola, etc.; su terraza, inmediatamente superior está representada por la población Ganaderos, luego del centro urbano de la ciudad. El punto superior corresponde a la zona de cresta en donde se construyó el tanque elevado de agua al final de la Av. Pedro de Valdivia. Existe aún otra descomposición en terraza y es la que corresponde al actual cauce principal del río Cautín y cuyo proceso de deterioro de la costa se puede observar por analogía con el desprendimiento de un sector de la ribera izquierda del río Metrenco, y cuyo descenso cercano a los 10.00 [m] provocó una isla (Isla Cautín). Las terrazas presentan fragmentos líticos derivados de morrenas retransportadas en medios fluviales de alta energía, las cuales registran horizontes de carbones jóvenes a profundidades de 60.00 [m], y otros de tipo superficial entre 40.00 y 60.00 [cm]. del suelo urbano (113.00 [msnm]) e incluso en los Cerros Ñielol y Conun Huenu (ambos a 370.00 [msnm]), antecedentes que indican períodos de recurrencia volcánica con fusión de hielo y nieves, e incendios de áreas forestales a nivel regional (Valdivia, 1990).

La Figura 3.3 muestra de forma detallada la zonificación geológica del área urbana de Temuco.

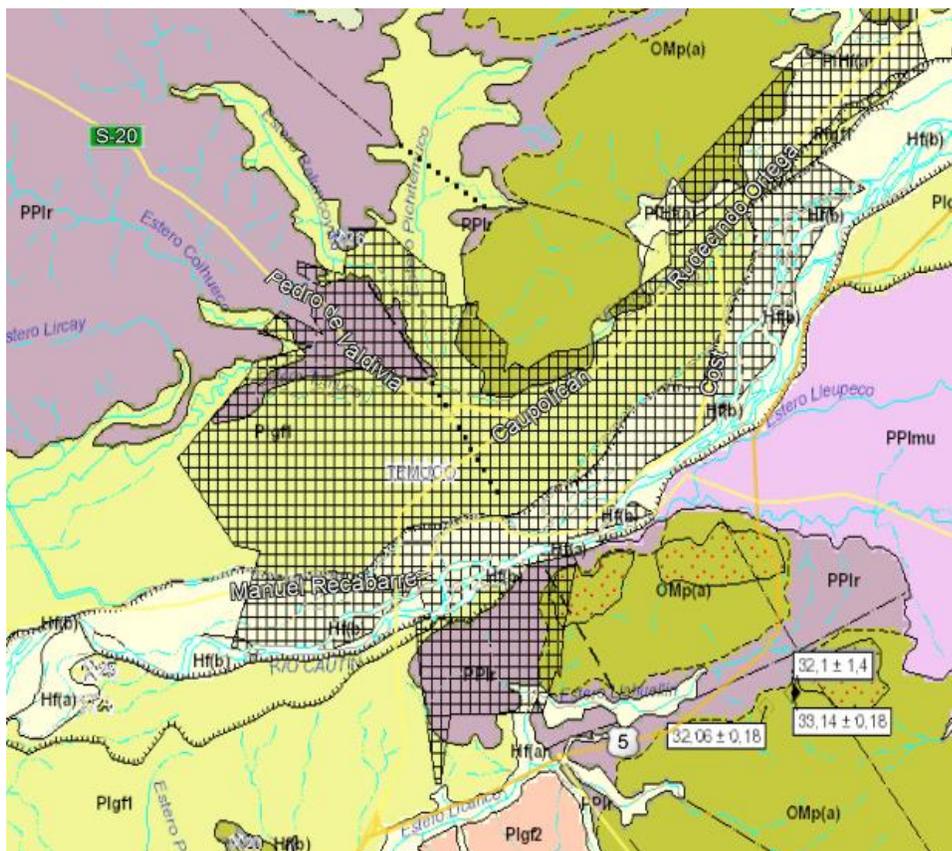


Figura 3.3 Geología del Área Urbana de Temuco.
Fuente: Mella y Quiroz, 2010.

De forma general, la zona urbana de Temuco se encuentra dentro de tres zonas geológicas básicas reconocibles las cuales se definen a continuación:

- PPIr (Zona Morada): (Conglomerados Raluncoyán (Plioceno- Pleistoceno)) conglomerados clasto y matriz soportados, con mala selección, con bolones redondeados a subredondeados y subordinadamente angulosos. Localmente, presentan imbricación que indica aporte desde el Este. Los clastos que componen el conglomerado están fuertemente alterados, son friables y muestran estructuras esferoidales de alteración. Subordinadamente existen niveles de arena, limo y arcilla. La composición de estos conglomerados es relativamente monomítica con predominancia de andesitas de piroxenos.

- Hf (Zona Blanca): (Depósitos fluviales (Holoceno)) Esta unidad consiste en depósitos de gravas, arenas y limos interestratificados, en partes, intercalados por gravas con moderada selección, compuestas por clastos redondeados a subredondeados de aspecto fresco. Las gravas se presentan, comúnmente, clastosoportadas y, en parte, imbricados, con matriz de arena gruesa, intercaladas con bancos de arena y limos, con estratificación cruzada y en artesa, y laminación, respectivamente. En general, estos depósitos se distribuyen en los lechos, riberas y llanuras de inundación de los cursos actuales (Hf (b)) y en llanuras de inundación asociadas a grandes eventos (Hf (a)).
- Plgf1 (Amarillo Claro): (Glaciación Llanquihue (Pleistoceno Superior), depósitos glaciofluviales) gravas y arenas. Las gravas son clastosoportadas, moderada a bien seleccionadas, con estratificación horizontal, granodecreciente y cruzada. Fragmentos moderadamente frescos con pátinas de óxidos de hierro y manganeso (< 2.00 [mm]), redondeados a subredondeados, compuestos por andesitas, andesitas basálticas, rocas graníticas, rocas y cuarzo, insertos en una matriz de arenas gruesas a intermedias (Mella y Quiroz, 2010).

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

4. Metodología

De acuerdo a la metodología SESAME y a estudios realizados previamente realizados en la ciudad de Temuco se selecciona una zona de interés, se identifica el sismógrafo utilizado, los softwares empleados para la adquisición y procesamiento de datos y las condiciones ambientales en las que se realizaron las mediciones con el fin de obtener resultados que sean representativos de la realidad.

4.1 Zona de Estudio y Puntos de Medición

La zona de interés y los puntos medidos (ver Figura 4.1) se encuentran en la periferia de Temuco, específicamente en la zona poniente sector Maipo. Abarca un área de 2.83 [km²] y un perímetro de 9.79 [km]. El sector encierra en su mayoría zonas no pobladas donde se proyecta construcción de casas y departamentos en el corto plazo, además se midieron dos puntos extras fuera de la zona delimitada donde se encuentra en construcción proyectos habitacionales de interés.

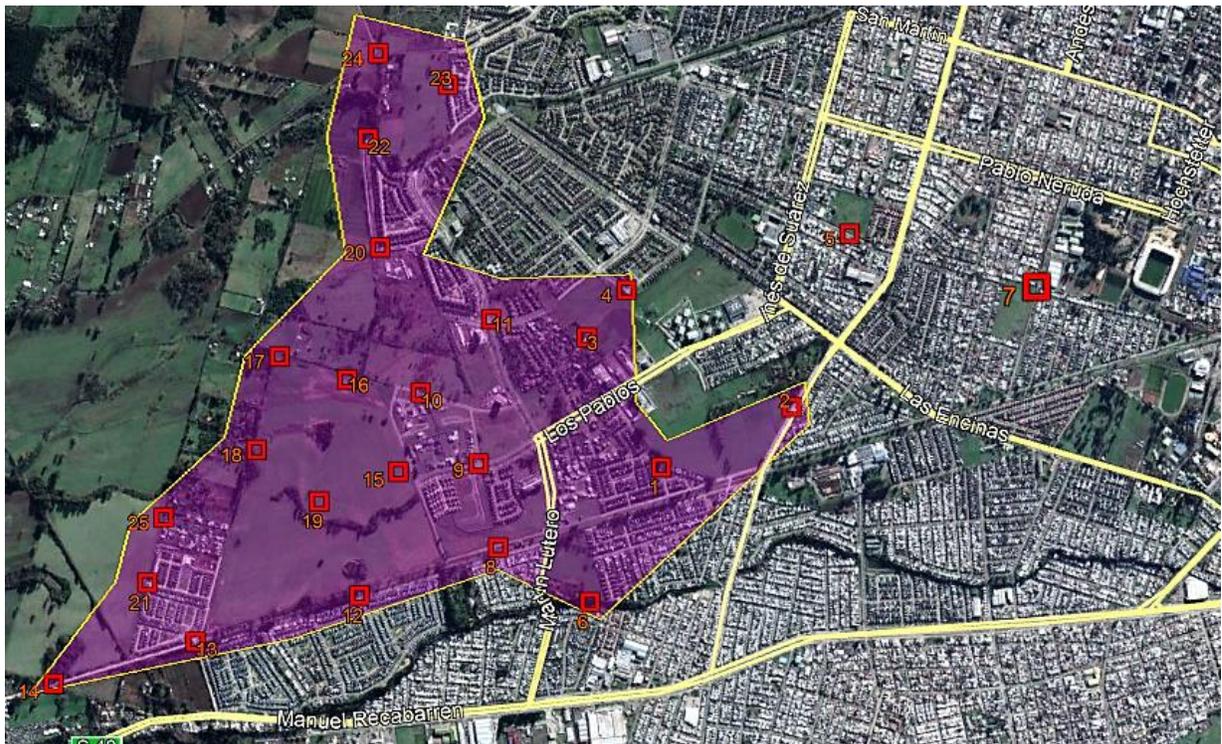


Figura 4.1 Zona de Estudio.
Fuente: Elaboración Propia.

El polígono de estudio encierra tres zonas geológicas reconocidas en la Figura 3.3 del Capítulo 3 anteriormente definido.

Abarca la zona clasificada por Gottschalk como suelo tipo C, que corresponde a gran parte del centro de la ciudad y sector Avenida Alemania, se conforma superficialmente por suelo vegetal de matriz limo arenosa y/o rellenos artificiales con espesores de hasta 1.00 [m]. Bajo los rellenos o suelo vegetal se encuentran estratos alternados de limo volcánico de consistencia variable, con arena limosa cementada o "cancagua". Los espesores de cancagua varían entre 0.20 a 1.00 [m]. Subyaciendo los limos y la cancagua, se detecta a partir de entre los 2.50 y 4.50 [m] de profundidad, el depósito de grava arenosa compactada o deposición del río Cautín con una potencia superior a los 25.00 [m] (Gottschalk, 2000).

De acuerdo a Saavedra el polígono está dentro de los suelos 2 y 3, los cuales son definidos como Unidad inferior: De espesor variable entre los 60.00 a 80.00 [m] de profundidad y unidad indiferenciada: Se dispone hacia los bordes superiores de valle y presenta altos contenidos de limos arcillosos, con reducción de la permeabilidad respectivamente (Saavedra, 2004).

La elección de los puntos se realiza en base a la indicación del manual SESAME donde se propone una malla donde la distancia entre puntos sea de aproximadamente 500.00 [m], además se ubicaron en lugares donde la morfología y las características permitiera obtener resultados confiables, es decir, donde la probabilidad de percibir ruido ambiental sea lo más baja posible, por ejemplo, zonas residenciales, zonas de campo abierto, ciclovías, pasajes etc. las coordenadas en grados decimales se muestran en el Anexo A.

4.2 Herramientas de Adquisición y Procesamiento de Datos

El equipo utilizado para realizar las mediciones corresponde al sismógrafo SR04 GeoBox, además se utiliza el software SeismoWIN para la adquisición de datos y para la obtención de resultados se utiliza el software GeoExplorer HVSR.

4.2.1 Equipo de Medición

El sismógrafo SR04 GeoBox (Figura 4.2) de la marca "SARA Electronic Instruments" es un sismógrafo triaxial el cual mide vibraciones en tres ejes los cuales son; Norte-Sur, Este-Oeste y verticalmente y debe ser ubicado apuntando la flecha en dirección norte y

perfectamente nivelado gracias a una burbuja nivelante con la que cuenta el equipo. Las especificaciones técnicas del SR04 GeoBox son: (SARA, 2019):

- Convertidor A/D con 3 canales de 24 [bit].
- Rango dinámico: 124 [dB] (144 [dB], 24 [bit] de ENOB, entre 0.10 y 10.00 [Hz]).
- Muestreo: simultaneo en los 3 canales (1 A/D por canal).
- Frecuencia de muestreo: desde 10 a 600 [Hz].
- Reloj de tiempo real: +/-10ppm (-20/+50 [°C])
- Precisión de tiempo UTC: <50 [ms].
- Velocidad de transmisión: 115200 [Bd].
- Temperatura de operación: -20/+60 [°C].



Figura 4.2 Equipo GeoBox SR04.
Fuente: Doit Corporation, 2017.

4.2.2 Software SeismoWIN - SEISMOLOG-MT

Corresponde a un software de acceso gratuito de la empresa “SARA Electronic Instruments”. Este software consiste en una serie de módulos de software que pueden utilizarse en los campos sismológico, geofísico y de ingeniería (Figura 4.3).

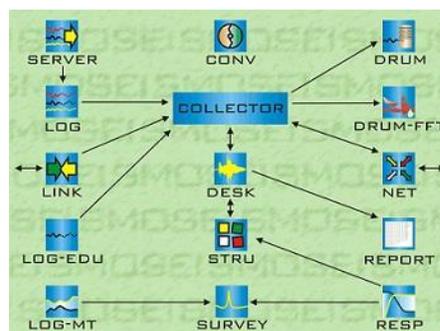


Figura 4.3 Interfaz SeismoWIN.
Fuente: SARA, 2012.

Para este trabajo en particular se utiliza el módulo Log-MT el cual sirve para la grabación de microtemores y permite monitorear en tiempo real la medida actual. Sin embargo, SEISMOLOG-MT no realiza ningún procesamiento en la señal grabada. Permite visualizar y analizar en profundidad en tiempo real la señal adquirida, permitiendo al usuario (geólogo, ingeniero, etc.) optimizar la medida y dar a conocer su corrección. Finalmente al terminar el tiempo de medición guarda los datos en un archivo .SAF (SARA, 2012).

4.2.3 Software GeoExplorer HVSR

El Software se entrega en forma ejecutable a través de un medio de almacenamiento o descargable desde el archivo SARA, junto con el hardware USB necesario para utilizarlo.

GeoExplorer HVSR se utiliza para el procesamiento de señales sísmicas usando Relación Espectral Horizontal Vertical (HVSR).

La técnica permite estimar la razón entre la componente horizontal del espectro de la señal y la componente vertical del espectro registrado, por una sola señal ya que es una estación sísmica triaxial.

La operación debe realizarse seleccionando diferentes porciones de la señal, llamadas ventanas para obtener una población de proporciones H/V estadísticamente significativas. Luego, calculando el promedio de todas las relaciones calculadas, es posible definir la curva HVSR, o curva de elipticidad, que es representativo del sitio investigado.

La curva de elipticidad permite obtener directamente las frecuencias de resonancia del sitio y calcular indirectamente el perfil sismo-estratigráfico, a través de la operación conocida como inversión.

GeoExplorer HVSR está diseñado para hacer que el procesamiento sea simple e inmediato, al mismo tiempo que se permite que el profesional pueda controlar libremente los parámetros de cálculo (SARA, 2017).

Las características más relevantes son:

- Selección automática o manual de las ventanas, con actualización en tiempo real de la curva HVSR.

- Exclusión transitoria opcional mediante umbrales de amplitud.
- El tamaño y la ubicación de las ventanas seleccionadas son ajustables.
- Verificación inmediata de los criterios SESAME en cualquier frecuencia de la curva.
- Gráficos de estacionalidad y direccionalidad de curvas HVSR
- Diagrama del espectro de los componentes individuales.
- Visualizaciones gráficas personalizables.
- Informe en formato PDF.
- Corrección instrumental opcional.
- Auditoría de señales sísmicas.

4.3 Toma de Datos en Terreno

La obtención de los datos necesarios se realiza en torno a una metodología y a ciertos parámetros que deben ser cumplidos con la finalidad de que estos datos sean confiables y representativos. Algunos de estos parámetros deben ser abordados en las campañas de medición tal y como lo sugiere el criterio SESAME.

4.3.1 Tiempo de Medición

En la guía SESAME se determina el tiempo mínimo de medición por puntos, desde los 5.00 a los 30.00 [min], dependiendo de la frecuencia fundamental esperada. En este trabajo se opta por realizar mediciones de 15.00 [min] ya que como se observa en trabajos realizados anteriormente se observa que predominan curvas cuyas frecuencias peak son superiores a 2.00 [Hz] sobre todo en la zona de estudio de este trabajo (Fuentes, 2015) (Pinto y Toledo, 2016), y tal como se indica en la Tabla 2.1 del Capítulo 2, la duración mínima del registro para esta frecuencia fundamental es de 5.00 [min]. De acuerdo a lo anterior se supone que con estos 5.00 [min] sería suficiente para obtener una curva representativa, sin embargo, se opta por tomar este margen de 10.00 [min] extras considerando la eventual presencia de vehículos o ruido artificiales de origen industrial que altere considerablemente el resultado de la medición y que el registro de datos obtenidos posea la cantidad de ventanas con longitudes de tiempos adecuadas para realizar el cálculo de la razón espectral sin necesidad de repetir las mediciones.

4.3.2 Condiciones Durante los Registros

Particularmente durante las mediciones se presentan ciertas condiciones ambientales que son contraproducentes para la adquisición de señales, sin embargo, son inevitables tanto en zonas urbanas como rurales, algunas de estas son:

- Presencia de ruido antrópico.
- Presencia de estructuras cercanas.
- Velocidad variable del viento.
- Presencia de estructuras subterráneas que a menudo se desconoce su existencia.

Es por ello que en un contexto de mitigar el efecto de estas eventualidades se determina medir en periodos del día en que la actividad humana disminuye o anula, es decir, entre las 22:00 pm y 04:00 am en sectores apartados como plazas, terrenos baldíos, callejones o pasajes lejos de árboles de gran altura o edificios y siempre tratando de respetar la malla de puntos previamente establecida. Además, se busca que las condiciones climáticas durante la medición sean favorables, esto significa, viento no superior a 5.00 [km/h], ausencia de lluvia, sitios sin pendiente, nunca en lugares con barro (SESAME, 2004).

4.3.3 Acoplamiento in Situ del Sensor

Se debe procurar realizar una correcta instalación del sensor en el suelo tal y como indican el manual SESAME tales como:

- Instalar el sensor en contacto directo con el suelo evitando vegetación, irregularidades, suelos blandos, hielo, nieve no compactada.
- Montar el equipo orientado al norte usando su puntero de orientación.
- Instalar el equipo nivelado, en caso de terreno desnivelado se debe utilizar una interfaz entre el sensor y el suelo por ejemplo una placa metálica, lo principal es procurar que la interfaz sea de un material rígido.
- Medir sobre superficies de hormigón o asfalto no afecta los resultados.
- Dentro de lo posible evitar instalar el sensor sobre estructuras subterráneas.

- Evitar el registro en suelos saturados de agua, por ejemplo, después de fuertes lluvias.
- Evitar el registro en grava superficial sin cohesión, ya que el sensor no será correcto. acoplado al suelo y se obtendrán curvas muy perturbadas.

Una vez cumplidos los parámetros anteriormente mencionados se procede a conectar el sensor al puerto USB del computador utilizando un adaptador de cable VGA a USB y finalmente se ejecuta el programa SeismoWIN para comenzar la grabación de microtemores.

4.4 Procesamiento y Análisis de Datos

Para el análisis de los datos obtenidos se utiliza el software GeoExplorer. Este programa funciona seleccionando el archivo con las mediciones originadas desde el programa Seismolog-MT y eligiendo ventanas de tiempo de forma automática o manual, otorgando parámetros de análisis para obtener la curva H/V. Estos parámetros están relacionados con filtros de amplitud, tiempo de ventanas y demás, tal y como se expone a continuación.

4.4.1 Visualización de los Registros y Selección de Ventanas

Los archivos con todos los registros obtenidos en terreno se generan y guardan automáticamente en una carpeta llamada “files” la cual contiene todas las carpetas con el nombre que se le dio a cada punto al momento de medir.

Una vez abierto el archivo a través del software GeoExplorer se visualizarán los tres canales que midió el sismógrafo. Posteriormente se aplica un filtro de amplitud del registro con la finalidad de dejar fuera las perturbaciones producidas por pasos de peatones cercanos, paso eventual de vehículos o golpes en las cercanías del sensor.

En la selección de ventanas (Figura 4.4) de acuerdo al manual SESAME, cada cálculo de frecuencia fundamental debe tener al menos 10 ciclos significativos por cada ventana, considerando que un ciclo significativo es el producto de la frecuencia por el tiempo de cada ventana. Además, el número de ciclos significativos mínimos para el cálculo de la curva debe ser mayor a 200 (SESAME, 2004).

Es por ello que en función de la señal obtenida se aplica la selección automática de ventanas con una longitud de 10.00 [s] con la finalidad de tomar en cuenta las secciones

de la señal que se encuentren entre puntos de amplitud que no califiquen para ser considerados como parte del cálculo de la curva final debido a que corresponden a vibraciones de origen artificial cercano. También se puede modificar el largo o eliminar algunas ventanas de forma manual si se estima conveniente

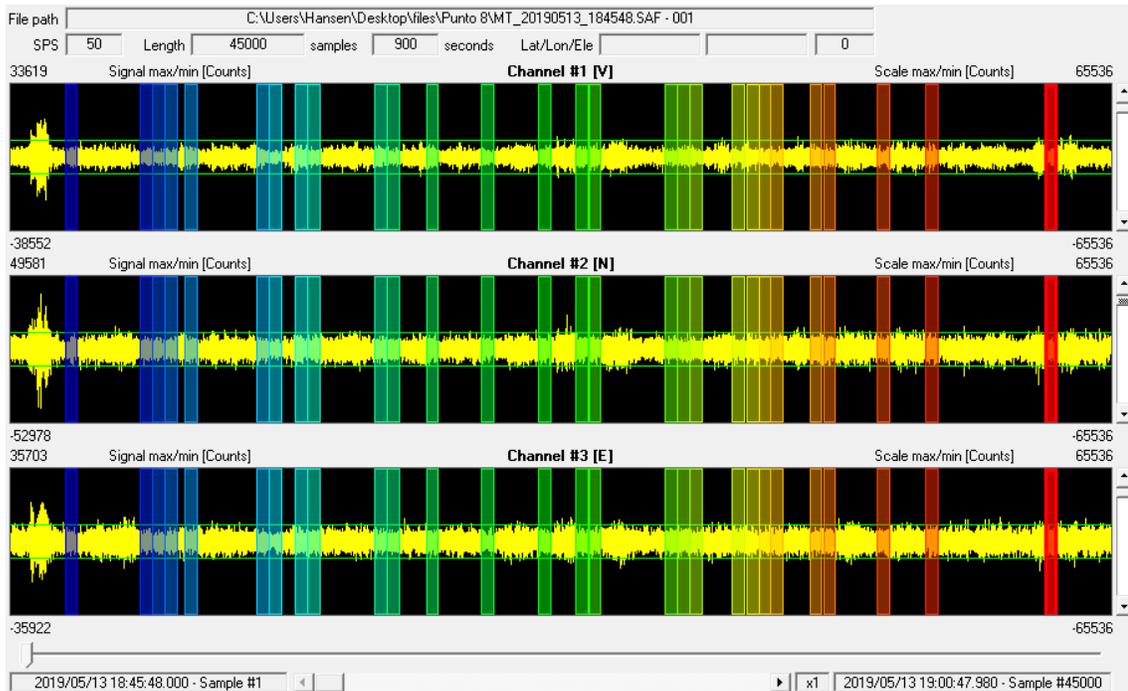


Figura 4.4 Registro de Vibración Ambiental Filtrado y con Selección de Ventanas.
Fuente: Elaboración Propia.

4.4.2 Obtención de Curva H/V

Una vez aplicados los filtros y seleccionadas las ventanas ya se puede obtener el espectro que contiene la frecuencia fundamental del suelo y la verificación del criterio SESAME.

Esta curva es producto del promedio de todas las relaciones calculadas de cada ventana, es decir cada ventana entrega una curva particular (Figura 4.5), cada una de estas curvas independientes tienen una tendencia ya que durante el tiempo que dura cada ventana el suelo se comporta de una manera similar en función de su frecuencia fundamental. Al visualizar cada una de estas curvas se puede eliminar alguna que se escape de la tendencia de la mayoría a causa de alguna circunstancia eventual como las mencionadas anteriormente relativas al ruido antrópico.

Dentro de las opciones del gráfico H/V se encuentra la opción para suavizar la curva H/V. Esta permite mejorar la visualización de la curva entregando tres funciones. Para este trabajo se utiliza la función de Konno y Ohmachi que a partir de la frecuencia central de máxima amplitud del grafico H/V aplica un coeficiente llamado “Ancho de Banda de Suavizado” (“Smoothing Bandwidth”) el cual varía entre 15 y 40 que permite suavizar la curva, dependiendo de la claridad del peak, siendo menor para curvas más claras y mayor para curvas menos claras.

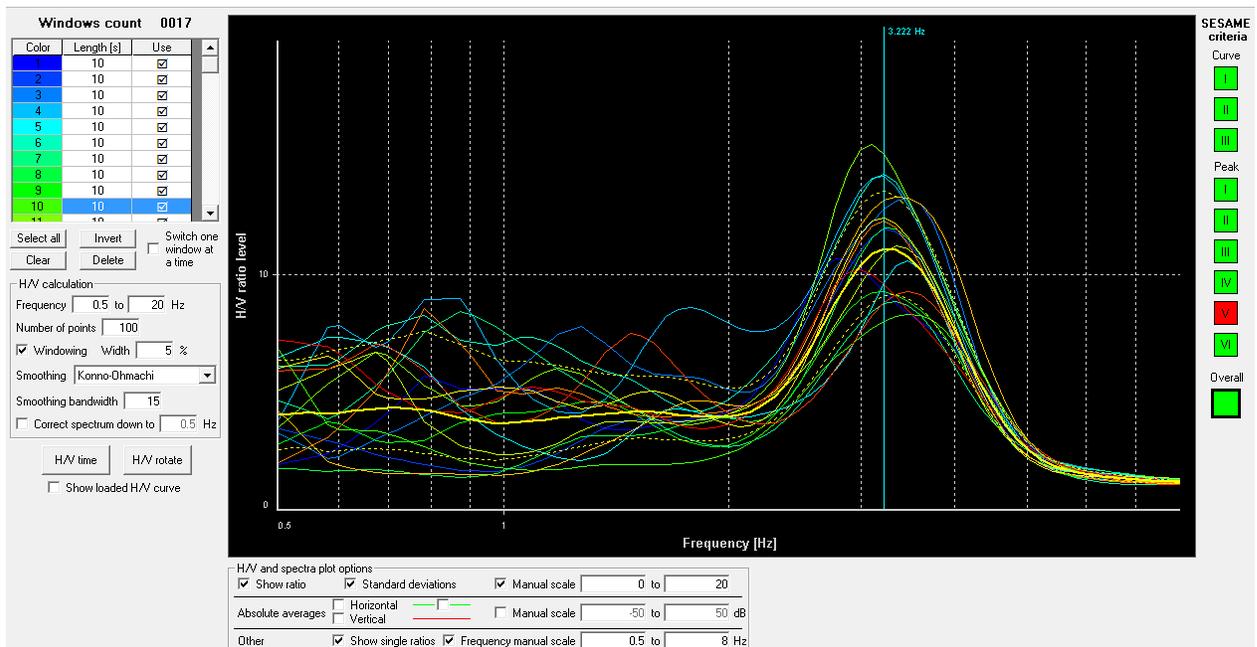


Figura 4.5 Curva Obtenida con GeoExplorer HVSR.
Fuente: Elaboración Propia.

4.5 Clasificación Según D.S. 61 y NCh 433 Of 1996 Modificada 2009

La normativa chilena realiza una clasificación del suelo en función de su rigidez, la cual es evaluada a partir de la velocidad de las ondas de corte que se transmiten a través de él, y otros factores mencionados en el capítulo 2 punto 2.4 del presente trabajo. Una vez seleccionado el tipo de suelo la finalidad es determinar la influencia que tendrá un sismo sobre un edificio en función del tipo de suelo sobre el que se funda la estructura, para ello la normativa nacional establece espectros de aceleración que dependen tanto de la clasificación del suelo y de la zona en la que se encuentre la edificación. Estos espectros están en función del periodo de oscilación del suelo y la aceleración que toma el mismo al verse expuesto a un movimiento con un periodo determinado. Así también el suelo presenta un periodo fundamental para el cual el suelo expresa la máxima amplitud de aceleración y por lo tanto su desplazamiento también es máximo.

Es este mismo valor el que se determina a través del método Nakamura y en el cual se basa este trabajo, es por ello que se realiza, al igual que en la normativa chilena, una clasificación de suelo, pero a partir de los espectros de aceleración, para los cuales se determina un rango de frecuencias que se aproximen a la frecuencia fundamental, para asociar las curvas determinadas por Nakamura, con las curvas entregadas por las normas nacionales. Estas curvas son determinadas en el capítulo 2 punto 2.4 del presente trabajo y a partir de las cuales se determina la Tabla 4.1 la cual contiene el periodo fundamental, la frecuencia fundamental y la aceleración máxima adquirida con este periodo.

4.5.1 Criterio Utilizado para Clasificación según NCh 433 Of 1996 Modificada 2009

El rango de periodos se selecciona a partir del valor de periodo para el cual la aceleración es máxima (S_a Máx.), es decir, el periodo fundamental (T_0). **A partir de T_0 se establece una desviación estándar**, es decir, se selecciona un rango de periodos cercanos a T_0 para obtener así un conjunto de periodos considerados fundamentales y asociarlos a los periodos obtenidos en terreno con método Nakamura, y poder así, **asignar una clasificación de suelo al punto medido**, ya que al realizar varias mediciones en un mismo lugar se pueden obtener valores para la frecuencia fundamental similares, pero no iguales, es por ello que es necesario establecer un intervalo de periodos de las curvas de aceleración para cada uno de los tipos de suelo definidos en la normativa.

El tamaño del rango de periodos va aumentando a medida que el suelo es peor ya que como se aprecia en la Figura 2.6 las curvas presentan una aproximación al Peak y un posterior mayor decaimiento de la función a medida que el suelo mejora, considerando que el mejor suelo es el clasificado como A.

En el siguiente ejemplo (Figura 4.6) se muestra gráficamente como seleccionar el rango de aceleraciones para un suelo E en Zona Sísmica 2:

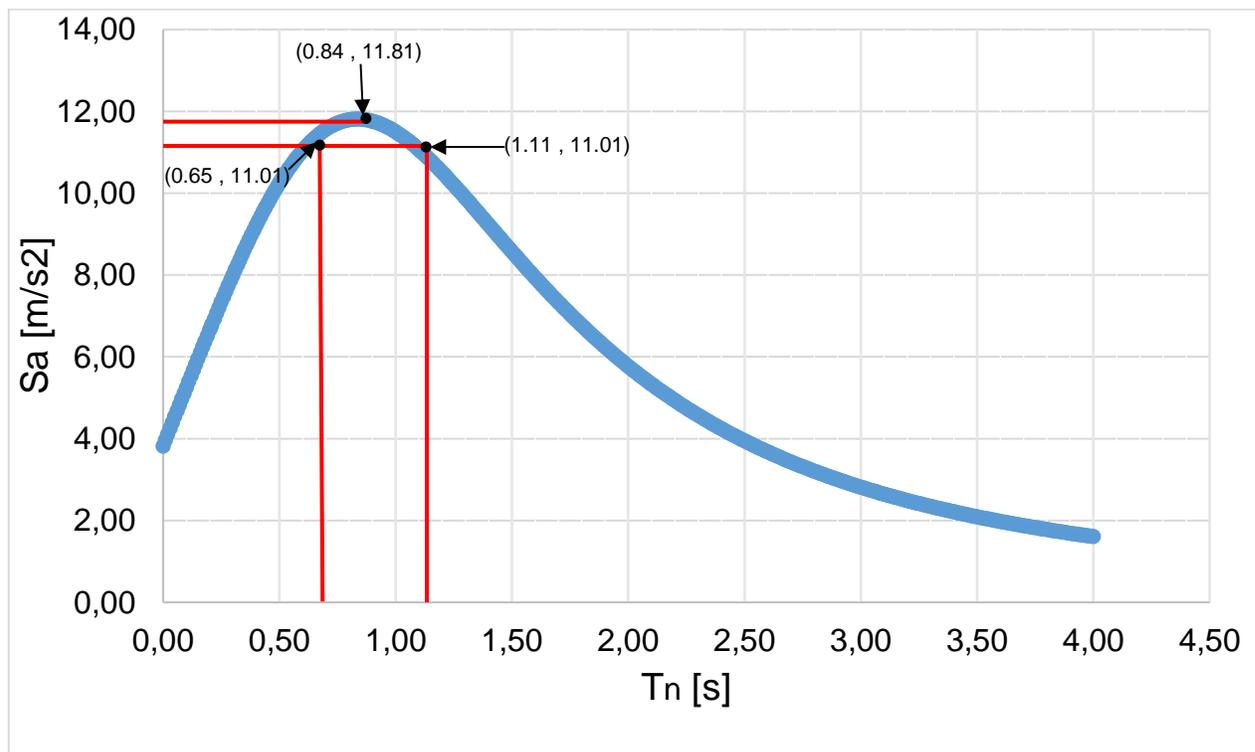


Figura 4.6 Selección del Rango de Periodos para el Suelo E.
Fuente: *Elaboración Propia.*

Para determinar el rango para cada tipo de suelo se debe cumplir la siguiente condición:

- Que el conjunto de periodos considerados fundamentales sea cerrado y no se intercepte con el conjunto de periodos fundamentales de otro suelo, es decir, 2 suelos distintos no pueden tener dentro de su conjunto el mismo periodo.

Esas condiciones quedan gráficamente explicadas en el Anexo A Tabla A.1 donde se remarca el valor del periodo fundamental, la respectiva aceleración máxima y el rango de periodos seleccionado para cada suelo.

Como la los espectro de aceleración se asimilan a una función cuadrática negativa, es posible establecer un rango de periodos, ya que para 2 dominios distintos existe el mismo recorrido, es decir, existe el mismo valor de aceleración no máxima para 2 periodos distinto, a partir de esto queda establecida la Tabla 4.1 donde se determina la aceleración fundamental mínima, la aceleración fundamental máxima y el rango de periodos y frecuencias a la que corresponden cada uno de los valores de estas aceleraciones.

Tabla 4.1: Frecuencias y Periodos Fundamentales de los Suelos.

Cabe notar que se destaca el Suelo E ejemplificado en la Figura 4.6

Suelo	Aceleración S_a Máx. [m/s ²]		Periodo fundamental T_0 [s]			Frecuencia fundamental f_0 [Hz]		
	Desde	Peak	Desde	Peak	Hasta	Desde	Peak	Hasta
A	7.015	7.315	0.130	0.160	0.190	7.692	6.250	5.263
B	7.936	8.246	0.191	0,260	0.280	5.236	3.846	3.571
C	8.263	8.573	0.285	0.360	0.440	3.509	2.778	2.273
D	10.532	10.902	0.450	0,520	0.640	2.222	1,923	1.563
E	11.010	11.810	0.650	0,840	1.110	1.538	1,190	0.901

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO 5
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y
COMENTARIOS

5. Análisis de Resultados y Comentarios

La finalidad del presente capítulo es clasificar y relacionar los resultados obtenidos con la información obtenida de los estudios previos de la zona. Se realiza la clasificación de las curvas en función de su amplitud basada en los estudios realizados por (F. L. G. Lezana, 2014) para establecer una relación entre las curvas y el tipo de suelo utilizando información geológica, estratigráfica y estudios previos. Clasificar los suelos de acuerdo a la normativa chilena en base a los espectros de respuesta establecidos por la misma para la zona sísmica II a la cual pertenece la comuna de Temuco.

5.1 Clasificación de Curvas

Las curvas se verificaron bajo el criterio de (F. L. G. Lezana, 2014) detallado en el capítulo 2 punto 2.7.3 de este trabajo. Todas las curvas cumplen con las tres condiciones para considerar curvas fiables según criterio SESAME. Para esto, se considera un tiempo por ventana y se utiliza un número de ventanas suficiente para que las curvas cumplan con la fiabilidad. Así, se agruparon las curvas obtenidas de acuerdo al tipo de peak y se muestra la amplitud tomada por cada peak. Para aquellas curvas que no presentan peak, es decir curvas planas el valor de la amplitud se establece como “No se identifica” (N.S.I):

- Curva Plana.
- “Peak” Somero.
- “Peak” Claro.
- “Peak” muy Marcado.

En la Tabla 5.1 se agrupan todos los puntos medidos con la clasificación de acuerdo a su peak, luego en el anexo B se muestran las curvas obtenidas, la verificación del criterio SESAME con el valor respectivo de cada punto a cumplir y la amplitud alcanzada por cada peak y la frecuencia obtenida según corresponda.

Tabla 5.1: Clasificación de Curvas.

Punto	Tipo de Curva	Amplitud del Peak [-]	Punto	Tipo de Curva	Amplitud del Peak [-]
1	Curva plana	N.S.I	14	Curva plana	N.S.I
2	Curva plana	N.S.I	15	Curva plana	N.S.I
3	Curva plana	N.S.I	16	Peak marcado	2.352
4	Curva plana	N.S.I	17	Peak marcado	2.31
5	Peak somero	1.82	18	Peak marcado	3.581
6	Curva plana	N.S.I	19	Curva plana	N.S.I
7	Peak muy marcado	12.21	20	Curva plana	N.S.I
8	Curva plana	N.S.I	21	Curva plana	N.S.I
9	Peak marcado	2.175	22	Curva plana	N.S.I
10	Peak marcado	1.914	23	Peak muy marcado	4.588
11	Peak marcado	2.017	24	Peak muy marcado	8.616
12	Curva plana	N.S.I	25	Peak muy marcado	3.559
13	Curva plana	N.S.I	26	Curva plana	N.S.I

Fuente: Elaboración propia

Las diferencias entre las formas y amplitudes de los registros depende del tipo de suelo, por lo que es de esperar que mientras menos rígido sea el suelo se presente un peak más claro y de mayor amplitud mientras que un suelo más rígido tienda a presentar una razón espectral plana para todo el rango de frecuencias estudiado (Bonneyoy-Claudet *et al.*, 2009) o bien un peak en una frecuencia superior a 5.00 [Hz].

5.2 Relación entre las Curvas Obtenidas y Geología Local

Los puntos medidos en este trabajo se ubican en 3 grandes zonas (Figura 5.1) geológicas identificadas en (Mella y Quiroz, 2010) para las cuales entrega características estratigráficas generales a partir de las cuales se puede establecer una tendencia de comportamiento frente a un sismo y finalmente compararlo con los puntos obtenidos en cada zona.

Básicamente se logra identificar que la geología varía de norte a sur desde la zona geográfica definida en el Capítulo 3 punto 3.2 como “plataforma” hasta la zona identificada como “terrazza superior” y limitando con la “llanura de inundación”.

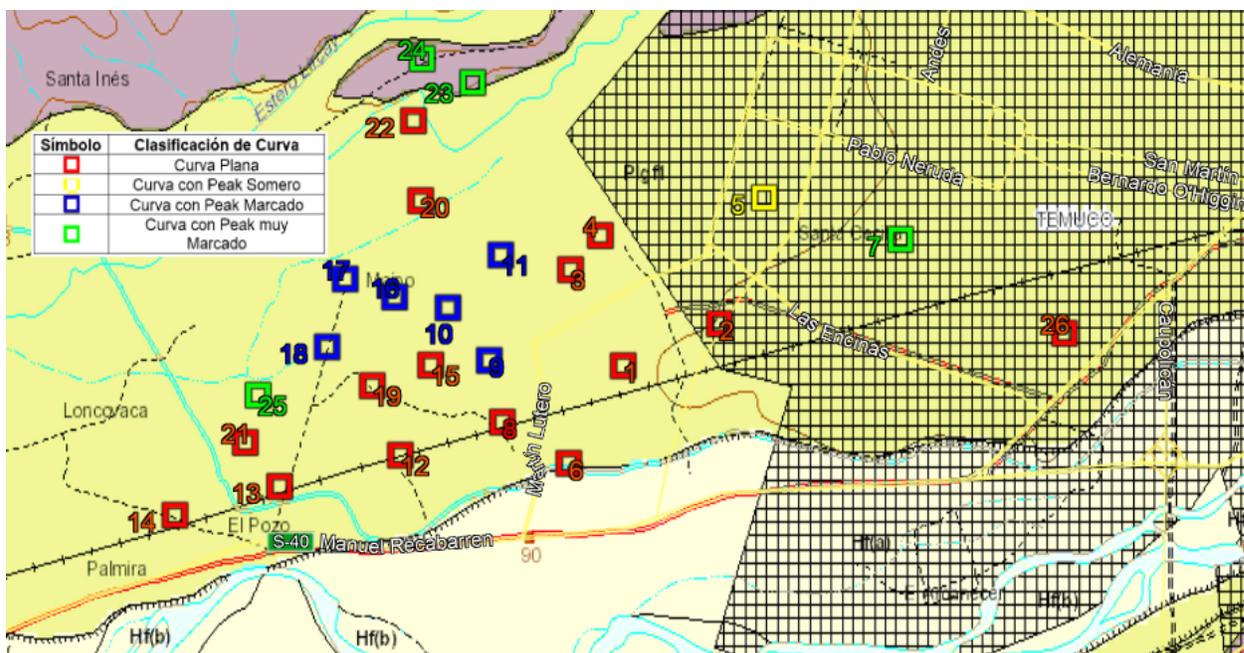


Figura 5.1 Ubicación de los Puntos sobre Mapa geológico.
Fuente: Elaboración Propia.

En la zona norte del área estudiada suelos definidos como clastos con presencia de bolones, es decir predomina una mezcla de suelos finos con suelo granular lo que puede significar que la rigidez de este suelo sea más baja que la rigidez de un suelo compuesto por grava limpia, por lo tanto, es posible que las ondas sísmicas generen una amplificación en superficie.

Como se indica en la Figura 5.1 en la zona previamente definida se encuentran los puntos 23 y 24 los cuales en la Tabla 5.1 se identifican con un peak muy marcado y una amplitud alta lo que afirma la hipótesis anteriormente mencionada. Mas detalles de estas curvas se encuentran en el anexo B.

El lugar donde se encuentran la mayoría de los puntos es la zona donde básicamente el tipo de suelo predominante se identifica como depósitos glaciofluviales con gravas y arenas, estas gravas son clastosoportadas bien graduada y arenas gruesas. En base a

esta clasificación del suelo predominante en el sector es posible establecer la baja amplificación de las ondas en superficie ya que se trataría de un suelo rígido.

En la Tabla 5.1 se observa que los puntos ubicados en la zona geológica definida previamente tienen una tendencia a presentar curvas planas, curvas con peaks someros y alguno que otro con un peak muy marcado.

Los puntos más cercanos al límite con la tercera zona cuya clasificación de suelo es “depósitos de gravas, arenas y limos interestratificados” presenta indiscutiblemente una tendencia de curvas planas, sin embargo, solo el punto 14 presenta un peak somero, ya que su amplitud es 2.018, y aunque se puede clasificar como curva plana, para ser estricto de acuerdo a los criterios de SESAME y a la clasificación de curvas se etiqueta la este punto como peak somero por tener un peak de amplitud superior a 2.

Las curvas de los puntos 18 y 25 son particularmente singulares ya que se encontró un peak ambos puntos siendo este un sector donde la tendencia es presentar curvas planas y peaks con frecuencias superiores a 4.00 [Hz] y se desconoce la razón ya que no se cuenta con información estratigráfica del lugar.

5.3 Relación de Curvas Obtenidas con Pozos Profundos y Estudios Previos

Algunos puntos medidos coinciden con la ejecución de pozo profundos de los cuales hay una estratigrafía (Saavedra, 2004), la cual, si bien no están clasificados por un geotécnico entregan características suficientes para establecer una comparación con las curvas obtenidas de los puntos.

5.3.1 Curvas 8, 12 y Pozo 169

La ubicación de las curvas a comparar con la estratigrafía del pozo profundo se indica en la Figura 5.2. Este sector corresponde a la calle Los Ganaderos detrás del Complejo habitacional Altos del Maipo.



Figura 5.2 Ubicación de Pozo Profundo y Puntos Cercanos.
Fuente: Google Earth, 2018

Las curvas 8 y 12 se muestran en la Figura 5.3 y 5.4

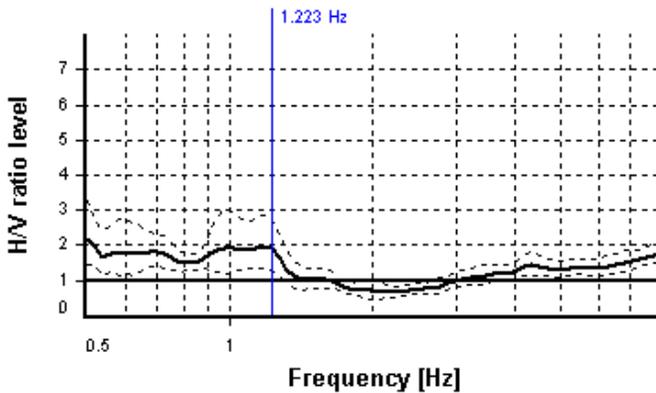


Figura 5.3: Curva 8
Fuente: Elaboración Propia.

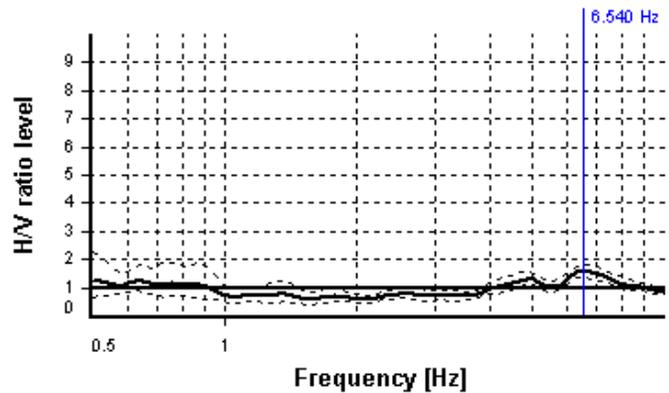


Figura 5.4: Curva 12
Fuente: Elaboración Propia.

Se aprecia que ambas curvas presentan una tendencia a ser planas y por lo tanto no cumple con la totalidad de los criterios SESAME, sin embargo la curvas al no presentar un peak, significa que no hay amplificación considerable del movimiento horizontal por sobre el vertical y por lo tanto, se puede inferir que los estratos de suelo en profundidad son rígidos.

Tabla 5.1 Estratigrafía Pozo Profundo N°169

Descripción	Pozo N°169	
	Profundidad [m]	Interpretación
0.00 – 1.00	Tierra Vegetal, Relleno (Antepozo)	SC-ML-Pt
1.00 – 9.00	Arena Fina, Gravilla, Arcilla	GP
9.00 - 15.00	Arena Gruesa, Ripio, Gravilla, Arcilla	GP
15.00 – 21.00	Arena Gruesa, Ripio (Granito), Arcilla	GP
21.00 – 24.00	Arena Gruesa, Cuarzo, poca Arcilla	GP
24.00 – 27.00	Arena Gruesa, Ripio, Cuarzo, Arcilla	GP
27.00 – 34.00	Arena Fina, poca Gravilla, Arcilla	GP
34.00 – 44.00	Arena Gruesa, Gravilla, Cuarzo, poca Arcilla	GP
44.00 – 53.00	Arena Fina, Ripio, Arcilla	GP
53.00 – 56.00	Arena Gruesa, Gravilla, poca Arcilla	GP
56.00 – 57.00	Arena Gruesa, Gravilla, poca Arcilla	GP

Fuente: Saavedra, 2004

La hipótesis de que el lugar de estudio corresponde a un estrato sedimentario rígido, es avalada por la estratigrafía del pozo profundo N°169 ya que indica que en los primeros 57.00 [m] hay predominante presencia de arena gruesa y grava la cual es probable que también predomine a mayor profundidad.

5.3.2 Curva 26 y Pozos 150 y 151

La ubicación de la curva a comparar con las estratigrafías de los pozos profundos se indica en la Figura 5.5. Este sector corresponde a las dependencias de la Universidad de la Frontera campus Andrés Bello.



Figura 5.5 Ubicación de Pozos Profundos y Punto Cercano.
Fuente: Google Earth, 2018

La curva 26 se muestra en la Figura 5.6.

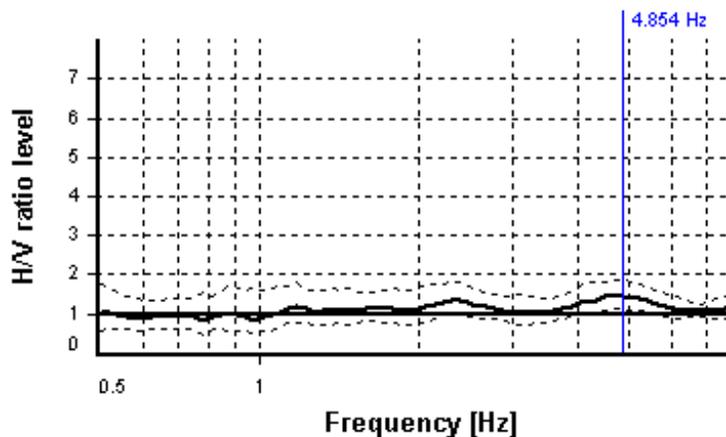


Figura 5.6 Curva 26
Fuente: Elaboración propia.

La curva 26 se clasifica como plana debido a que no se identifica un peak ni tampoco cumple con ningún criterio SESAME como se observa en el anexo B por lo tanto al igual que en las curvas analizadas anteriormente se infiere que el punto fue medido sobre un estrato rígido.

En la Tabla 5.2 y 5.3 se muestra la estratigrafía de ambos pozos profundos realizados en las cercanías.

Tabla 5.2: Estratigrafía Pozo N°150.

Descripción	Pozo UFRO N°150	
Profundidad [m]	Interpretación	Clasificación (USCS)
0.00 – 2.00	Tierra Vegetal (Antepozo)	SC-ML-Pt
2.00 – 6.00	Bolones, Grava, Arena, Ripio, 20% Arcilla	Bolones
6.00 – 7.00	Bolones, Arena, Ripio, Grava, 15% Arcilla	Bolones
7.00 – 12.00	Bolones, Arena, Ripio, Grava, 10% Arcilla	Bolones
12.00 – 17.00	Bolones, Arena, Ripio, Grava, 18% Arcilla	Bolones
17.00 – 19.00	Ripio, Grava, Arena, 15% Arcilla	GP - GC
19.00 – 23.00	Grava, Arena, 15% Arcilla	GP - GC
23.00 – 28.00	Ripio, Grava, Arena, 10% Arcilla	GP - GC
28.00 – 31.00	Grava, Arena, 20% Arcilla	GP - GC
31.00 – 35.00	Ripio, Grava, Arena, 15% Arcilla	GP - GC
35.00 – 40.00	Arena Gruesa a Fina 45% Arcilla	SP - SC

Fuente: Saavedra, 2004.

Tabla 5.3: Estratigrafía Pozo N°151.

Descripción	Pozo UFRO N°151	
	Profundidad [m]	Interpretación
0.00 – 4.00	Tierra Vegetal (Antepozo)	SC-ML-Pt
4.00 – 10.00	Arena, Limo Gris, poca Arcilla	SM
10.00 – 16.00	Grava, Arena, poco Limo Gris	GP
16.00 – 22.00	Limo Gris Consistente, algo de Arena	ML
22.00 – 27.00	Ripio, Gravilla, Arena	GP
27.00 – 28.00	Arena Fina, Limo Gris	SM
28.00 – 30.00	Arena Gruesa, Gravilla	GP
30.00 – 40.00	Arena Fina, Limo	SM

Fuente: Saavedra, 2004

Si bien la curva obtenida en el sector es plana, en la estratigrafía de los pozos se observan diferencias relevantes, ya que el pozo 150 presenta prácticamente el mismo material en todos los estratos el cual corresponde a una clasificación de grava y arena que debido a su bajo porcentaje de finos se puede determinar que corresponde a un conglomerado denso donde no haya amplificación de ondas. Por otro lado, el pozo 151 presenta mayor cantidad de finos, tales como limos y arcillas los cuales de acuerdo a la teoría deberían indicar un peak dentro de la banda de frecuencias estudiadas. Por lo tanto, se pueden plantear lo siguiente:

Los estratos aun teniendo una presencia predominante de finos y arenas puede que presenten una compacidad tal que no se produciría un contraste de amplitud ente los estratos de grava y los de finos impidiendo la formación de un peak notorio en los registros, ya que si se observa en el cuarto estrato se identifica la presencia de un limo consistente lo que indicaría que debajo de este estrato, es decir más allá de los 16 [m] de profundidad esta consistencia se mantendría.

Esta hipótesis se plantea ya que en el estudio realizado por (Fuentes, 2015) se realizó una medición exactamente en el punto donde se realizó el pozo N°150 obteniendo

también una curva plana, por lo tanto se comprueba que el sector presenta estratos altamente rígidos que impiden la predominancia del movimiento horizontal del suelo al someterse a vibraciones con frecuencias analizadas en este trabajo.

5.3.3 Curva 7 y Pozos 148 y 149

La ubicación de la curva a comparar con las estratigrafías de los pozos profundos se indica en la Figura 5.7. Este sector corresponde a calle Olimpia entre avenida Pablo Neruda y Paula Jaraquemada. Específicamente el pozo 148 se ubica donde hoy en día se encuentra el teatro municipal, el pozo 149 se ubica donde hoy se encuentra el gimnasio de la Asociación Cristiana de Jóvenes (YMCA) y el punto 7 se ubica en la intersección de Olimpia con Paula Jaraquemada.



Figura 5.7 Ubicación de Pozos Profundos y Punto Cercano.
Fuente: Google Earth, 2018

La curva 7 se muestra en la Figura 5.8.

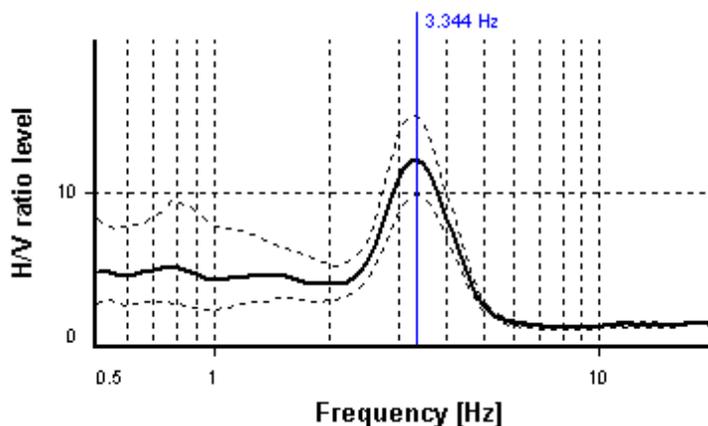


Figura 5.8 Curva 7.
Fuente: Elaboración propia.

La curva N°7 presenta un peak muy claro con una amplitud superior a 12 lo que indica una alta amplificación de las ondas en superficie bajo esa frecuencia, además este peak cumple con el criterio SESAME como se observa en el anexo B y por lo tanto puede ser considerada como representativa de la frecuencia fundamental del suelo en ese punto.

Por lo tanto, el peak encontrado en calle Olimpia donde la frecuencia fundamental es 3,34 [Hz] y la amplitud es alta se debe al gran contraste entre la capa de finos o mezcla de finos superficial (2.00 a 3.00 [m]) y los estratos inferiores mezcla de áridos y bolones (Leyton, Ramírez, y Vásquez, 2012).

Tal y como se aprecia en la estratigrafía de pozos profundos en el sector estadio donde hay presencia de bolones y 6.00 [m] superficiales de suelo fino. La Tabla 5.4 y 5.5 muestra la estratigrafía de los 2 pozos profundos ubicados en las cercanías de la medición de este punto.

Tabla 5.4: Estratigrafía Pozo N°148

Descripción	Pozo N°148	
Profundidad [m]	Interpretación	Clasificación (USCS)
0.00 – 1.00	Tierra Vegetal, Relleno (Antepozo)	SC-ML-Pt
1.00 – 5.00	Arcilla pura	CL
5.00 – 8.00	Conglomerado compacto	Áridos gruesos
8.00 – 18.00	Ripio, grava aren, 25% arcilla	GP
18.00 – 26.00	Conglomerado compacto	Áridos gruesos
26.00 – 38.00	Arcilla con poca grava	CL
38.00 – 39.00	Arenisca cementada	SM Compacto
39.00 – 47.00	Conglomerado compacto	Áridos gruesos
47.00 – 54.00	Ripio grueso, grava, arena, 25% de arcilla	GP
54.00 – 64.00	Conglomerado compacto arcilloso	Áridos gruesos
64.00 – 67.00	Arena, poca grava, ripio, 20% de arcilla	GP

67.00 – 76.00	Conglomerado compacto	Áridos gruesos
76.00 – 80.00	Arena, 40% de arcilla	SP - SC
80.00 – 86.00	Conglomerado compacto duro	Áridos gruesos
86.00 – 90.00	Arenisca cementada	SM Compacto

Fuente: Saavedra, 2004

Tabla 5.5: Estratigrafía Pozo N°149

Descripción	Pozo N°149	
	Profundidad [m]	Interpretación
0.00 – 1.00	Tierra Vegetal, Relleno (Antepozo)	SC-ML-Pt
1.00 – 6.00	Arcilla pura	CL
6.00 – 12.00	Conglomerado compacto	Áridos gruesos
12.00 – 14.00	Ripio, grava aren, 25% arcilla	GP
14.00 – 20.00	Conglomerado compacto	Áridos gruesos
20.00 – 27.00	Arcilla con poca grava	CL
27.00 – 31.00	Arenisca cementada	SM Compacto
31.00 – 39.00	Conglomerado compacto	Áridos gruesos
39.00 – 44.00	Ripio grueso, grava, arena, 25% de arcilla	GP
44.00 – 52.00	Conglomerado compacto arcilloso	Áridos gruesos
52.00 – 61.00	Arena, poca grava, ripio, 20% de arcilla	GP
61.00 – 68.00	Conglomerado compacto	Áridos gruesos
68.00 – 72.00	Arena, 40% de arcilla	SP - SC

Fuente: Saavedra, 2004

La curva obtenida en el sector de la calle Olimpia presenta un peak con una gran amplitud lo que indica una alta amplificación en superficie, esta característica es común sobre suelos blandos y tal como indica la estratigrafía de los pozos profundos hay estratos donde predomina la arcilla, particularmente en la superficie, además todos los estratos son descritos como conglomerado o con algún porcentaje de suelo fino, es por ello que la principal hipótesis es que debido a esta característica se obtenga este tipo de curva con peak muy marcado, además (Fuentes, 2015) en su trabajo indica que “la frecuencia predominante para el sector estadio se encuentra entre 3.19 y 3.36 [Hz], esta alta frecuencia podría explicarse por la imposición de la vibración del estrato rígido sobre la arcilla superficial que a su vez amplifica el movimiento”.

5.4 Clasificación de las Curvas de Acuerdo a NCh433 Of 1996 y Decreto Supremo N°61

La finalidad de este capítulo es establecer una comparación de las curvas obtenidas a través del método Nakamura con las curvas de espectro sísmico establecidas en la normativa chilena para cada uno de los tipos de suelo que allí se definen. Esta clasificación se realiza en base a la metodología establecida en el capítulo 4 punto 4.5 donde se le asigna un rango de frecuencias que se considera como un dominio de frecuencias para las cuales un suelo alcanza la resonancia. El punto de comparación corresponde a la frecuencia del peak donde la curva H/V se hace máxima, debido a esto para este trabajo se asigna una clasificación de tipo de suelo a aquellos puntos donde se presente un peak y cumpla el criterio SESAME ya que a partir del cumplimiento de estos parámetros se considera una curva representativa de la respuesta del suelo frente a un sismo, sin embargo hay algunos puntos que para cumplir con el criterio SESAME en su totalidad les falta cumplir con el criterio N°3 de peak claro el cual establece que el peak debe alcanzar una amplitud de 2, para los puntos cuya amplitud del peak sea cercana 2, es decir aquellos que presenten una amplitud mayor a 1.90 igual se les asignará una clasificación, ya que ese tipo de curvas presenta una tendencia a oscilar preponderantemente frente a la frecuencia que alcanza esa amplitud. Para las curvas planas y de peak somero que no cumplen con el criterio SESAME, ya que lógicamente no presentan un peak, se limita a establecer que se trata de un suelo rígido tal y como se establece (F. Lezana, Leyton, y Ruiz, 2015) pero no se le asignara una clasificación en

función de la normativa nacional ya que no existe punto de comparación. En la Tabla 5.6 se muestran los puntos que cumplen con el criterio SESAME en su totalidad, la frecuencia fundamental obtenida y la clasificación de acuerdo a la normativa chilena actual.

Tabla 5.6: Clasificación de Curvas de Acuerdo a Norma

Punto	Frecuencia [Hz]	Periodo Fundamental [s]	Clasificación D.S. 61
7	3.344	0.299	C
9	6.788	0.147	A
10	5.038	0.198	B
11	5.428	0.184	A
16	5.230	0.191	B
17	5.428	0.184	A
18	3.740	0.267	B
24	3.344	0.299	C
25	3.740	0.267	B

Fuente: Elaboración propia.

5.5 Comparación de Curva Obtenida con Velocidad de Onda de Corte

En la Figura 5.9 se muestra la ubicación de los perfiles y el punto medido más cercano

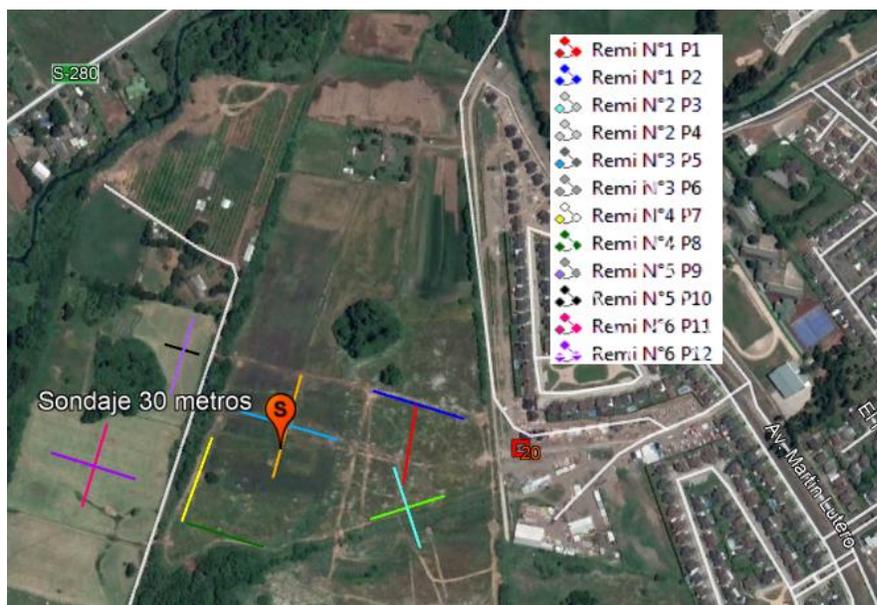


Figura 5.9 Ubicación de Sondaje y Ensayos ReMi

Fuente: Hermosilla, 2018a

En el Anexo A desde la Figura A.1 hasta la Figura A.6 se muestran los detalles de velocidad de onda de corte de todos los perfiles y el ensayo SPT del sondaje. La estratigrafía del sondaje pertinentes para realizar un análisis de la curva obtenida utilizando el método Nakamura se visualiza en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 Descripción Visual de Sondaje

ENTRE COTAS [m]	DESCRIPCIÓN VISUAL
0.00 – 0.60	Capa vegetal: Limo arenoso con lentes semi cementados al inicio del estrato, color café con bastante presencia de raicillas finas, humedad natural y consistencia blanda.
0.60 – 2.01	Limo arenoso de color café con presencia de gravas de tamaño medio a intermedias y arenas finas, humedad media a alta y consistencia firme.
2.01 – 3.50	Grava arenosa: Gravas de tipo rodado en su mayoría, en matriz areno limosa (arenas finas con finos limosos). Presenta gravas con vestigios de óxido en sus caras, humedad alta y compacidad densa. Además, contiene arenas de granos medios a gruesos de color gris.
3.50 – 11.35	Grava arenosa: Gravas de tipo rodado en su mayoría, en matriz areno limosa (arenas medias con lentes finos limosos). Presenta gravas con vestigios de óxido en sus caras, humedad alta y compacidad densa. Además, contiene arenas de granos medios a gruesos de color gris.
11.35 – 19.50	Limos y limos arcillosos de color café con algunas gravillas y gravas al inicio, además contiene algunos lentes de arena cementada. Presenta baja plasticidad, humedad alta y consistencia blanda a firme.
19.50 – 30.10	Gravas en matriz de arenas, con bastante presencia de lentes limos arcillosos. Gravas de tamaño variado entre ½” y 2 ½” de tipo rodado. Algunas presentan restos de corrosión en sus caras. Humedad alta y compacidad densa.

Fuente: Hermosilla, 2018b

En resumen, del sondaje se puede determinar que los 10.00 [m] primeros corresponde a un suelo de consistencia firme y con presencia de gravas, posteriormente los siguientes 10.00 [m] corresponde a un limo de consistencia blanda a firme y finalmente los últimos 10.00 [m] corresponde a una matriz con arena, pero bien compactada, si se observan las velocidades de onda de los perfiles y los ensayos SPT del sondaje se ve que la velocidad de onda de corte en los 10.00 [m] primeros es de entre 500 y 800 [m/s] y un número de

golpes de 50, es decir hay rechazo, esto según la norma corresponde a un suelo tipo B, luego los siguientes 10.00 [m] de limo tiene una velocidad de 300 [m/s] y un número de golpes promedio de 22 lo que corresponde a un suelo tipo D o E y los últimos 10.00 [m] tiene una velocidad cercana a los 900 [m/s] y un número de golpes de 50 lo que corresponde a un suelo que esta entre A y B siendo más cercano a clasificarse como A. Al realizar un promedio de V_{s30} de todos los perfiles entrega un promedio de 406 [m/s] lo que corresponde a un suelo tipo C.

La curva obtenida en el punto más cercano a estos ensayos de Refracción de Microtremores (ReMi) corresponde a la curva N°20 la cual se clasifica como una curva plana y representa un suelo rígido que no manifiesta amplificaciones en superficie frente a un sismo.

5.6 Comentarios

- Los resultados obtenidos se relacionan de buena manera a la geología descrita por (Mella y Quiroz, 2010).
- Las curvas de los puntos 7, 9, 10, 11, 16, 17, 18, 24, 25 cumple con el criterio SESAME para ser consideradas representantes fieles de la frecuencia fundamental de aquellos sectores al igual que aquellos puntos donde se obtienen curvas planas y se verifica que el suelo es rígido.
- En Temuco particularmente es difícil aplicar el método Nakamura y obtener resultados útiles, ya que mayoritariamente los suelos son gravas rígidas y por lo tanto no presentan un peak frecuencial claro, por lo tanto se recomienda utilizar el método en sectores donde el suelo sea fino en profundidad o al menos los primeros 10.00 [m] superficiales correspondan a estos mismos, ya que se verificó en este trabajo, en (Fuentes, 2015) y (Leyton *et al.*, 2012) que la presencia superficial de un suelo fino como limo o arcilla si afecta la respuesta sísmica.
- El Método Nakamura puede ser útil en la mejora de la clasificación de suelo que existe hoy en día ya que permite representar el comportamiento real del suelo en presencia de vibraciones lo cual se puede utilizar para mejorar los espectros de respuesta.

- La clasificación de suelos basada en D.S. N°61 “Diseño Sísmico de Edificios” establecida en este trabajo, **se realiza netamente en base a las frecuencias fundamentales obtenidas, y no en base a otras propiedades físicas o mecánicas del suelo, por lo tanto, no se puede establecer que un suelo clasificado en este trabajo como Suelo A presente propiedades físicas o mecánicas como las establecidas en D.S N°61 “Diseño Sísmico de Edificios”** para este tipo de suelo, y por ende no se debe suponer ni asegurar que en aquel lugar existe un Suelo A.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6. Conclusiones y Recomendaciones

- Los resultados obtenidos relacionados al tipo de curva esta correlacionado a estudios previos (Fuentes, 2015) (Pinto y Toledo, 2016).
- Las curvas obtenidas y el tipo de suelo presente en los puntos en que hay información de estratigrafía de pozos profundos son compatibles ya que se obtuvieron curvas planas en suelos calificados como rígidos y peak claros de gran amplitud en suelos blandos.
- El criterio que no se cumple en ninguna curva corresponde al criterio V de peak claro, que controla la desviación estándar de la frecuencia peak, el cual debe estar dentro de un umbral establecido por la misma frecuencia y que aumenta de manera proporcional a la misma, sin embargo, para que este criterio se cumpla debe haber una coincidencia en el valor de la frecuencia peak de todas las curvas obtenidas del análisis de cada una de las ventanas seleccionadas de la señal lo cual se cumple pocas veces debido a la sensibilidad de la medición.
- El criterio de curva fiable relacionado con la cantidad de ventanas seleccionadas y el tiempo de medición se cumple para todas las curvas.
- Existe una singularidad en calle Olimpia frente al gimnasio YMCA, ya que en el trabajo realizado por (Pinto y Toledo, 2016) se obtuvo un peak con frecuencia de 2.70 [Hz] pero que no cumple en su totalidad el criterio SESAME. En el presente trabajo se obtuvo un peak de 3.34 [Hz] el cual es similar a las características de los peak obtenidos por (Fuentes, 2015) en frecuencia, amplitud y en el cumplimiento de los criterios SESAME para ser considerado una curva representativa del suelo en ambos trabajos.
- A pesar de que se realiza una clasificación de suelo en función de los espectros de respuesta, lo cual es lógico debido a que estos espectros son la principal referencia de comportamiento sísmico, utilizar solo un parámetro de referencia como la frecuencia, probablemente no sea suficiente, ya que para clasificar el suelo la normativa se basa en velocidad de onda de corte, ensayo SPT, resistencia a la Compresión Simple no Confinada (q_u), resistencia al Corte No Drenada (S_u) y RQD, cada parámetro según corresponda. Por lo tanto, es probable que a través del método Nakamura el suelo sea

clasificado como B debido a su frecuencia, pero al realizar ensayos en terreno el factor N1 de SPT dé como resultado 42 y entonces el suelo automáticamente será clasificado como tipo C, aun cuando la curva obtenida por Nakamura sea clara y fiable, la clasificación se estará determinada por los parámetros establecidos en la normativa.

- En comparación a los estudios realizados en Santiago se determina que en Temuco las curvas que manifiestan un peak tienen frecuencias superiores lo cual también está comprobado en (Fuentes, 2015) y (Pinto y Toledo, 2016) debido a que existe algún grado de heterogeneidad y presencia de suelos limosos en los estratos.
- No se encontraron peaks con frecuencias menores a 1.00 [Hz] que se asocian a suelos clasificados como especiales en el Decreto Supremo N°61.
- La presencia de 10.00 [m] superficiales de estrato rígido clasificado a través de V_{s30} y SPT como suelo B rígido, es suficiente para aplacar una posible manifestación de amplificaciones de onda originadas por la presencia de una capa de suelo blando de 10.00 [m] inmediatamente después del primer estrato. Esto significa que la presencia de este estrato blando condiciona la clasificación del suelo de acuerdo a la norma ya que evalúa los primeros 30.00 [m], sin embargo, no condiciona a una amplificación del movimiento o un efecto de sitio.

Como recomendación se establecen los siguientes puntos:

- Es importante respetar las sugerencias del manual SESAME con respecto a las condiciones de medición de los registros, ya que se dificulta la selección de ventanas cuando hay exceso de ruido artificial.
- Utilizando el Método Nakamura sobre suelos rígidos se determina que no hay amplificaciones del movimiento en superficie, es decir, no hay un peak que destaque en la curva y por lo tanto no se puede comparar la curva obtenida con los espectros de respuesta del Decreto Supremo N°61 para dar una clasificación de suelo al lugar.
- Se recomienda efectuar futuros estudios que relacionen la clasificación de acuerdo a ensayos ReMi o similar y el Método Nakamura para analizar la fiabilidad del método y mejorar la clasificación de acuerdo a Decreto Supremo N°61 y Nch433 Of 1996 modificada 2009 “Diseño Sísmico de Edificios”.

Glosario

SESAME: Site Effects assessment using Ambient Excitations.

HVSR: Razón espectral H/V. [-]

f_0 : Frecuencia fundamental. [Hz]

A_{hs} : Amplitud del movimiento horizontal en superficie. [-]

A_{hb} : Amplitud del movimiento horizontal en el basamento rocoso. [-]

V_{s30} : Velocidad de onda de corte en los primeros 30.00 [m]. [m/s]

V_{s-i} : Velocidad de ondas de corte del estrato i. [m/s]

h_i : Espesor del estrato i [m].

M_s : Magnitud de ondas superficiales.

M_w : Magnitud de momento sísmico.

V_p : Velocidad de ondas P. [m/s]

V_s : Velocidad de ondas S. [m/s]

S_T : Razón de amplitudes del movimiento horizontal en superficie sobre el horizontal en basamento. [-]

E_s : Razón del movimiento vertical en superficie sobre el movimiento vertical en basamento. [-]

S_{TT} : Razón del movimiento horizontal en superficie sobre el movimiento vertical en superficie. [-]

n : Número de estratos superiores. [N°]

l_w : Longitud de la ventana seleccionada. [s]

n_w : Número de ventanas seleccionadas para la curva media de H/V. [N°]

n_c : $l_w \cdot n_w \cdot f_0$ Número de ciclos significativos. [N°]

$\sigma_A(f)$: Desviación estándar de $\frac{A_H(f)}{V}$, $\sigma_A(f)$ es el factor por el cual la curva media $\frac{A_H(f)}{V}$ debe ser multiplicada o dividida. [-]

σ_f : Desviación estándar de la frecuencia peak de H/V. [-]

$\varepsilon(f_0)$: Valor umbral para la condición de estabilidad. [-]

A_0 : Peak de amplitud de la curva H/V a la frecuencia f_0 . [-]

$\frac{A_H}{V}(f)$: Peak de amplitud de la curva H/V a la frecuencia. [-]

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- Arquitectura, N. (2015). ¿Qué es un terremoto? Retrieved May 12, 2019, from <http://ncarquitectura.com/que-es-un-terremoto/>
- Astroza, M., y Sanhueza, S. (2002). “Estudio Comparativo de los Efectos de los Terremotos de Chillan de 1939 y de Talca de 1928.”
- Bonnefoy-Claudet, S., Bonilla, L. F., Berge - Thierry, C., Pasten, C., Campos, J., Volant, P., y Verdugo, R. (2009). “Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements,” 925 – 937. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.04020.x>
- Cargaz, I. estructural. (2012). Evolución de la Norma NCh433 Of 96. Retrieved from <http://www.cargaz.cl/2012/04/evolucion-de-la-norma-nch433/>
- Chávez - García, J. F., y Montalva, G. A. (2014). “Efectos de Sitio para Ingenieros Geotécnicos , estudio del valle Parkway Introducción.” *Obras y Proyectos*, 16(03 de septiembre de 2014), 6–30.
- Cisternas, A. (2011). “El País más Sísmico del Mundo.” *Revista Anales*, 7, 17–34.
- Cisternas, A., y Vera, Y. E. (2008). “Sismos Históricos y Recientes en Magallanes.” *MagallaniA*, 36(1), 43–51.
- CSN, C. Sismológico Nacional. (2014). “Sismicidad y Terremotos en Chile.”
- CSN, C. Sismológico Nacional. (2016). “Tipos de Sismo en Chile.” Santiago, Chile. Retrieved from <https://www.csn.uchile.cl/tipos-de-sismos-chile/>
- CSN, C. Sismológico Nacional. (2019). Grandes Terremotos. Retrieved from <http://www.csn.uchile.cl/sismologia/grandes-terremotos-en-chile/>
- Doit Corporation. (2017). Site Inspection. Retrieved May 28, 2019, from <http://www.k-doit.com/?tpf=seismometer/site-amplification>
- Ercilla, O. (2012). Terremotos y su Precaución en Construcción. Retrieved May 18, 2019, from <https://ponungeologentuvida.wordpress.com/2012/04/03/terremotos-y-su-precaucion-en-construccion/>
- Fuentes, D. (2015). “*Determinación del Periodo Fundamental en Suelos Derivados de*

-
- Cenizas Volcánicas del Sur de Chile.*” Universidad Tecnica Federico Santa María.
- Galvez, P. (2013). Mediciones Sísmicas e Investigación. Retrieved from <http://geofisicasismospgf.blogspot.com/p/ondas-p-y-ondas-s.html>
- Google Earth. (2018). Google Earth Pro. San Francisco.
- Gottschalk, C. (2000). “*Suelos de Fundación de la Ciudad de Temuco.*” Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago.
- Guendelman, T. (2012). “*El Instituto Tiene Mucho Que Decir, Aportar y Canalizar.*” Santiago, Chile. Retrieved from <http://www.iconstruccion.cl/contenidos/entrevistas-ic/tomas-guendelman-el-instituto-tiene-mucho-que-decir-aportar-y-canalizar>
- Hermosilla, M. (2018a). *Medición de Velocidades de Onda “Mirador de la Frontera, 6 Loteos (13 Hectáreas).”* Temuco.
- Hermosilla, M. (2018b). *Sondaje 30 [m] “Mirador de la Frontera, 6 Loteos (13 Hectáreas).”* Temuco.
- INN. (2009). “*NCh433 Diseño Sísmico de Edificios.*” Santiago, Chile.
- INN. (2011). “*D.S. N°61 Diseño Sísmico de Edificios.*” Santiago, Chile.
- Leyton, F., Ramírez, S., y Vásquez, A. (2012). Uso y Limitaciones de la Técnica de Microvibraciones (RHV) en la Clasificación Sísmica de Suelos. In *VII Congreso Chileno de Geotecnia* (pp. 1–10). Concepción. Retrieved from <https://docplayer.es/9483907-Uso-y-limitaciones-de-la-tecnica-de-microvibraciones-rhv-en-la-clasificacion-sismica-de-suelos.html>
- Leyton, F., Ruiz, S., y Sepulveda, S. (2010). “Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central.” *Andean Geology*.
- Lezana, F. L. G. (2014). “*Correlación de Razones Espectrales H/V de Registros Sísmológicos y Características Geotécnicas de Suelos de Santiago.*” Universidad de Chile.
- Lezana, F., Leyton, F., y Ruiz, S. (2015). “*Razones Espectrales H/V de una Red Temporal de Estaciones Sísmológicas en la Cuenca de Santiago – Resultados Premilinares.*” Santiago.

- Mella, M., y Quiroz, D. (2010). “*Geología del Área Temuco-Nueva Imperial, Región de la Araucanía.*” Santiago, Chile. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1980.7606>
- Municipalidad de Temuco. (2010). *Diagnostico Sistémico Territorial.* Temuco.
- Nakamura, Yukata. (1989). “*A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Surface Using Microtremor on the Ground Surface.*”
- Nakamura, Yutaka. (2008). “ON THE H/V SPECTRUM.” In *World Conference on Earthquake Engineering.* Beijing, China.
- NEIC. (2010). National Earthquake Information Center. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov>
- Onemi, R. (2019). “*Resumen Actividad Sísmica Anual en Chile 2018.*” Santiago, Chile.
- Pasten, C. (2007). “*Respuesta Sísmica de la Cuenca de Santiago.*” Universidad de Chile.
- Pinto, C., y Toledo, V. (2016). “*Utilización del Método de Nakamura para la Caracterización Sísmica de los Suelos en la Ciudad de Temuco.*” Universidad de la Frontera.
- Rosales, C. (2001). “*Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia.*” Universidad del Valle.
- Saavedra, P. (2004). “*Estratigrafías de pozos profundos y suelos de fundación de la cuenca de Temuco.*” Universidad de la Frontera.
- Santibáñez, I., Cembrano, J., García, T., González, G., Yañez, G., y Arancibia, G. (2015). “Potencial Sismogénico de las Fallas Corticales en los Andes chilenos,” 352–354.
- SARA. (2012). *SEISMOWIN module SEISMOLOG-MT User’s Manual.* Perugia. Retrieved from www.sara.pg.it
- SARA. (2017). “*GEOEXPLORER HVSR Version 2.2.3 User’s Manual.*” Perugia. Retrieved from www.sara.pg.it
- SARA, E. I. (2019). *SR04S3 GeoBox.* Perugia, Italia. Retrieved from https://www.osop.com.pa/wp-content/uploads/2014/10/SR04_GEOBOX_DATASHEET_ENG.pdf
- SERNAGEOMIN. (2003). “*Mapa Geológico de Chile : Versión Digital Leyenda Geológica.*”

Santiago.

SERNAGEOMIN. (2015, December 4). “¿Por qué Chile parece «desmembrarse» en las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes?” Retrieved from <https://futurorenovable.cl/por-que-chile-parece-desmembrarse-en-las-regiones-de-los-lagos-aysen-y-magallanes/>

SESAME. (2004). “*Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations Measurement , Processing and Interpretation SESAME European research project.*” Retrieved from <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm%0AParticipating>

Valdivia, H. P. (1990). “*Estratigrafía e Hidrología de los Sedimentos Cuaternarios de la Ciudad de Temuco, IX región de la Araucanía.*” Universidad de Chile.

Vetterling, W. T., Teukolsky, S. A., Press, W. H., y Flannery, B. P. (1992). “*Numerical Recipes in FORTRAN 77.*” (L. Cowles y A. Harvey, Eds.) (2th ed.). Cambridge. Retrieved from.

https://websites.pmc.ucsc.edu/~fnimmo/eart290c_17/NumericalRecipesinF77.pdf

Vizconde Campos, A. (2017). “Estudios de Vibración Ambiental en Edificaciones Existentes.” Retrieved from <http://edificacionesdecalidad.com/content/estudios-de-vibración-ambiental-en-edificaciones-existentes>

ANEXOS

Anexos

Anexo A

En este Anexo se muestra la tabla de cálculo de la aceleración para cada uno de los suelos, la ubicación de los puntos medidos en Grados Decimales, los perfiles de velocidades de onda de los ensayos ReMi y el Perfil de Ensayo SPT del sondaje de 30.00 [m]

La Tabla A.1 muestra como varia el valor del factor Alpha y de la aceleración de cada uno de los suelos en función del periodo de vibración. Además, está destacado en colores los periodos fundamentales correspondiente a cada uno de los suelos.

Tabla A.1: Valores de Aceleración, Factor Alpha y Periodo de Cada Suelo.

T[s]	SUELO									
	A		B		C		D		E	
	α	S_a [m/s ²]								
0	1	2,646	1	2,94	1	3,087	1	3,528	1	3,822
0,010	1,020	2,698	1,027	3,020	1,012	3,125	1,060	3,740	1,037	3,965
0,020	1,077	2,851	1,077	3,167	1,037	3,202	1,120	3,951	1,075	4,109
0,030	1,171	3,098	1,141	3,355	1,071	3,306	1,180	4,163	1,112	4,252
0,040	1,295	3,428	1,216	3,576	1,112	3,433	1,240	4,374	1,150	4,395
0,050	1,446	3,827	1,300	3,822	1,159	3,579	1,300	4,585	1,187	4,538
0,060	1,617	4,277	1,391	4,091	1,212	3,742	1,359	4,796	1,225	4,681
0,070	1,797	4,756	1,488	4,376	1,270	3,920	1,419	5,006	1,262	4,824
0,080	1,980	5,238	1,590	4,673	1,332	4,112	1,478	5,215	1,300	4,967
0,090	2,155	5,701	1,694	4,979	1,398	4,315	1,537	5,424	1,337	5,110
0,100	2,314	6,124	1,799	5,290	1,467	4,528	1,596	5,631	1,374	5,252
0,110	2,453	6,490	1,905	5,601	1,538	4,749	1,655	5,838	1,411	5,394
0,120	2,566	6,790	2,010	5,909	1,612	4,976	1,713	6,043	1,449	5,536
0,130	2,653	7,020	2,112	6,209	1,687	5,208	1,771	6,247	1,486	5,678
0,140	2,714	7,180	2,210	6,497	1,763	5,443	1,828	6,450	1,523	5,819
0,150	2,750	7,277	2,303	6,771	1,840	5,680	1,885	6,650	1,559	5,960
0,160	2,765	7,315	2,390	7,027	1,916	5,915	1,941	6,848	1,596	6,101
0,170	2,761	7,305	2,470	7,262	1,992	6,148	1,997	7,045	1,633	6,241
0,180	2,742	7,255	2,542	7,474	2,066	6,377	2,052	7,238	1,669	6,380
0,190	2,711	7,173	2,606	7,662	2,138	6,601	2,106	7,429	1,706	6,519
0,200	2,670	7,066	2,661	7,823	2,208	6,817	2,159	7,617	1,742	6,658
0,205	2,647	7,005	2,685	7,894	2,242	6,922	2,185	7,710	1,760	6,727

0,210	2,623	6,940	2,707	7,959	2,276	7,025	2,211	7,802	1,778	6,795
0,220	2,570	6,801	2,744	8,067	2,340	7,223	2,263	7,983	1,814	6,932
0,230	2,515	6,654	2,772	8,149	2,400	7,409	2,313	8,161	1,849	7,069
0,240	2,457	6,501	2,791	8,205	2,457	7,584	2,363	8,335	1,885	7,204
0,250	2,398	6,345	2,802	8,237	2,509	7,745	2,411	8,505	1,920	7,339
0,260	2,339	6,189	2,805	8,246	2,557	7,892	2,458	8,670	1,955	7,472
0,270	2,280	6,034	2,801	8,234	2,600	8,026	2,503	8,831	1,990	7,605
0,280	2,223	5,881	2,790	8,201	2,638	8,144	2,547	8,987	2,024	7,737
0,290	2,166	5,732	2,772	8,151	2,672	8,248	2,590	9,138	2,058	7,867
0,300	2,111	5,586	2,750	8,085	2,701	8,337	2,632	9,284	2,092	7,997
0,310	2,058	5,444	2,723	8,005	2,725	8,411	2,671	9,425	2,126	8,125
0,320	2,006	5,307	2,691	7,912	2,744	8,471	2,710	9,559	2,159	8,252
0,330	1,956	5,175	2,656	7,809	2,759	8,516	2,746	9,688	2,192	8,377
0,340	1,907	5,047	2,618	7,697	2,769	8,548	2,781	9,811	2,224	8,502
0,350	1,861	4,924	2,578	7,578	2,775	8,567	2,814	9,928	2,257	8,624
0,360	1,816	4,805	2,535	7,453	2,777	8,573	2,845	10,038	2,288	8,746
0,370	1,773	4,691	2,491	7,323	2,776	8,568	2,875	10,142	2,320	8,865
0,380	1,731	4,581	2,445	7,189	2,770	8,552	2,902	10,240	2,350	8,983
0,390	1,691	4,476	2,399	7,053	2,762	8,525	2,928	10,331	2,381	9,099
0,400	1,653	4,374	2,352	6,916	2,750	8,489	2,952	10,415	2,411	9,214
0,410	1,616	4,276	2,305	6,777	2,736	8,445	2,974	10,493	2,440	9,326
0,420	1,581	4,183	2,258	6,639	2,718	8,392	2,994	10,563	2,469	9,437
0,430	1,547	4,092	2,211	6,501	2,699	8,332	3,012	10,627	2,498	9,546
0,440	1,514	4,005	2,164	6,363	2,678	8,266	3,028	10,685	2,526	9,652
0,450	1,482	3,922	2,118	6,227	2,654	8,193	3,043	10,735	2,553	9,757
0,460	1,452	3,841	2,073	6,093	2,629	8,116	3,055	10,778	2,580	9,860
0,470	1,422	3,764	2,028	5,961	2,603	8,034	3,066	10,815	2,606	9,960
0,480	1,394	3,689	1,983	5,831	2,575	7,949	3,074	10,846	2,632	10,058
0,490	1,367	3,617	1,940	5,704	2,546	7,860	3,081	10,869	2,657	10,154
0,500	1,341	3,548	1,898	5,579	2,516	7,768	3,086	10,886	2,681	10,247
0,510	1,316	3,481	1,856	5,457	2,486	7,673	3,089	10,897	2,705	10,338
0,520	1,291	3,416	1,815	5,337	2,455	7,577	3,090	10,902	2,728	10,426
0,530	1,268	3,354	1,776	5,221	2,423	7,480	3,090	10,900	2,751	10,513
0,540	1,245	3,294	1,737	5,107	2,391	7,381	3,088	10,893	2,772	10,596
0,550	1,223	3,235	1,699	4,996	2,359	7,281	3,084	10,880	2,794	10,677
0,560	1,201	3,179	1,663	4,888	2,326	7,181	3,078	10,861	2,814	10,755
0,570	1,181	3,125	1,627	4,783	2,294	7,081	3,072	10,837	2,834	10,831
0,580	1,161	3,072	1,592	4,681	2,261	6,980	3,063	10,807	2,853	10,904
0,590	1,142	3,021	1,558	4,581	2,229	6,880	3,053	10,773	2,871	10,974
0,600	1,123	2,972	1,525	4,484	2,196	6,780	3,042	10,733	2,889	11,041
0,610	1,105	2,924	1,493	4,390	2,164	6,681	3,030	10,689	2,906	11,106
0,620	1,087	2,877	1,462	4,299	2,132	6,582	3,016	10,641	2,922	11,168

0,630	1,070	2,832	1,432	4,210	2,101	6,485	3,001	10,588	2,937	11,227
0,640	1,054	2,789	1,403	4,124	2,069	6,388	2,985	10,531	2,952	11,283
0,650	1,038	2,747	1,374	4,040	2,038	6,293	2,968	10,471	2,966	11,336
0,660	1,022	2,705	1,347	3,959	2,008	6,198	2,950	10,407	2,979	11,387
0,670	1,007	2,666	1,320	3,880	1,978	6,105	2,931	10,339	2,992	11,435
0,680	0,993	2,627	1,293	3,803	1,948	6,013	2,911	10,269	3,003	11,479
0,690	0,978	2,589	1,268	3,728	1,919	5,923	2,890	10,195	3,014	11,521
0,700	0,965	2,552	1,243	3,656	1,890	5,833	2,868	10,119	3,025	11,560
0,710	0,951	2,517	1,219	3,585	1,861	5,746	2,846	10,040	3,034	11,596
0,720	0,938	2,482	1,196	3,517	1,833	5,659	2,823	9,958	3,043	11,629
0,730	0,925	2,448	1,173	3,450	1,806	5,575	2,799	9,875	3,051	11,660
0,740	0,913	2,416	1,151	3,385	1,779	5,491	2,775	9,789	3,058	11,687
0,750	0,901	2,384	1,130	3,322	1,752	5,409	2,750	9,702	3,064	11,712
0,760	0,889	2,352	1,109	3,261	1,726	5,329	2,725	9,613	3,070	11,734
0,770	0,878	2,322	1,089	3,202	1,701	5,250	2,699	9,523	3,075	11,753
0,780	0,866	2,292	1,069	3,144	1,676	5,173	2,673	9,431	3,079	11,769
0,790	0,855	2,263	1,050	3,088	1,651	5,097	2,647	9,338	3,083	11,783
0,800	0,845	2,235	1,032	3,033	1,627	5,022	2,620	9,244	3,086	11,794
0,810	0,834	2,208	1,014	2,980	1,603	4,949	2,593	9,149	3,088	11,802
0,820	0,824	2,181	0,996	2,928	1,580	4,877	2,566	9,053	3,089	11,807
0,830	0,814	2,155	0,979	2,878	1,557	4,807	2,539	8,957	3,090	11,810
0,840	0,805	2,129	0,962	2,829	1,535	4,738	2,512	8,861	3,090	11,810
0,850	0,795	2,104	0,946	2,781	1,513	4,671	2,484	8,764	3,090	11,808
0,860	0,786	2,080	0,930	2,735	1,492	4,604	2,456	8,666	3,088	11,803
0,870	0,777	2,056	0,915	2,689	1,471	4,539	2,429	8,569	3,086	11,796
0,880	0,768	2,033	0,900	2,645	1,450	4,476	2,401	8,471	3,084	11,786
0,890	0,760	2,010	0,885	2,602	1,430	4,414	2,374	8,374	3,081	11,774
0,900	0,751	1,988	0,871	2,560	1,410	4,353	2,346	8,277	3,077	11,760
0,910	0,743	1,966	0,857	2,519	1,391	4,293	2,319	8,180	3,073	11,743
0,920	0,735	1,944	0,843	2,480	1,372	4,234	2,291	8,083	3,068	11,724
0,930	0,727	1,924	0,830	2,441	1,353	4,177	2,264	7,987	3,062	11,703
0,940	0,719	1,903	0,817	2,403	1,335	4,120	2,237	7,891	3,056	11,680
0,950	0,712	1,883	0,805	2,366	1,317	4,065	2,210	7,795	3,049	11,655
0,960	0,704	1,863	0,792	2,330	1,299	4,011	2,183	7,700	3,042	11,628
0,970	0,697	1,844	0,780	2,295	1,282	3,958	2,156	7,606	3,035	11,599
0,980	0,690	1,825	0,769	2,260	1,265	3,906	2,129	7,512	3,027	11,567
0,990	0,683	1,807	0,757	2,227	1,249	3,855	2,103	7,420	3,018	11,534
1,000	0,676	1,789	0,746	2,194	1,233	3,806	2,077	7,327	3,009	11,500
1,010	0,669	1,771	0,735	2,162	1,217	3,757	2,051	7,236	2,999	11,463
1,020	0,663	1,754	0,725	2,131	1,201	3,709	2,025	7,145	2,989	11,425
1,030	0,656	1,737	0,714	2,100	1,186	3,662	2,000	7,056	2,979	11,385
1,040	0,650	1,720	0,704	2,071	1,171	3,616	1,975	6,967	2,968	11,344

1,050	0,644	1,704	0,694	2,041	1,157	3,570	1,950	6,879	2,957	11,301
1,060	0,638	1,688	0,685	2,013	1,142	3,526	1,925	6,792	2,945	11,256
1,070	0,632	1,672	0,675	1,985	1,128	3,483	1,901	6,706	2,933	11,210
1,080	0,626	1,656	0,666	1,958	1,114	3,440	1,877	6,621	2,921	11,163
1,090	0,620	1,641	0,657	1,931	1,101	3,398	1,853	6,536	2,908	11,115
1,100	0,615	1,626	0,648	1,905	1,088	3,357	1,829	6,453	2,895	11,065
1,110	0,609	1,612	0,639	1,880	1,075	3,317	1,806	6,371	2,882	11,014

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla A.2 muestra las coordenadas de cada punto medido.

Tabla A.2: Coordenadas de cada uno de los Puntos Medidos.

Punto	Latitud	Longitud
1	-38.749063°	-72.641253°
2	-38.747123°	-72.635569°
3	-38.744630°	-72.644364°
4	-38.743056°	-72.642601°
5	-38.741315°	-72.632916°
6	-38.753563°	-72.644467°
7	-38.743233°	-72.624869°
8	-38.751656°	-72.648396°
9	-38.748816°	-72.649168°
10	-38.746387°	-72.651606°
11	-38.743954°	-72.648487°
12	-38.753183°	-72.654424°
13	-38.754619°	-72.661559°
14	-38.755945°	-72.667748°
15	-38.749031°	-72.652630°
16	-38.745892°	-72.654763°
17	-38.745058°	-72.657678°
18	-38.748188°	-72.658749°
19	-38.749978°	-72.656082°
20	-38.741448°	-72.653220°
21	-38.752596°	-72.663588°
22	-38.737765°	-72.653641°
23	-38.736005°	-72.650140°
24	-38.734903°	-72.653133°
25	-38.750414°	-72.662830°
26	-38.747567°	-72.615167°

Fuente: Elaboración Propia.

Los siguientes gráficos representan las velocidades de onda de corte en profundidad de los ensayos ReMi (Ver Figura 5.9)

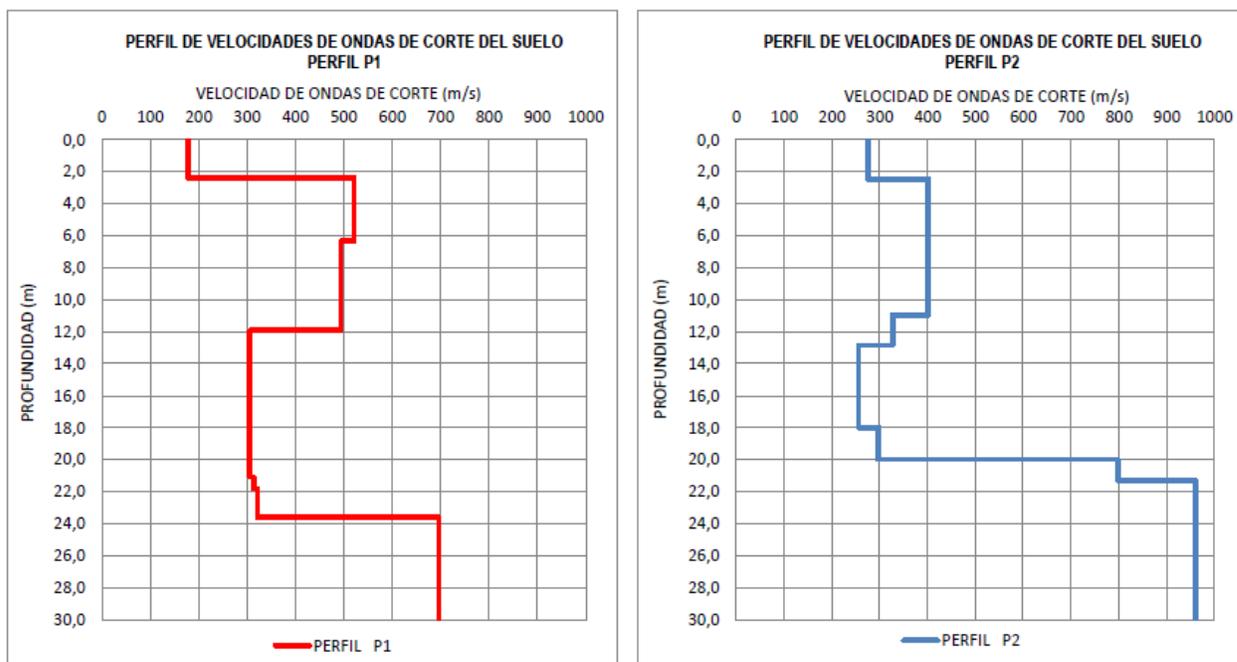


Figura A.1 Perfiles ReMi 1
Fuente: Hermosilla, 2018a

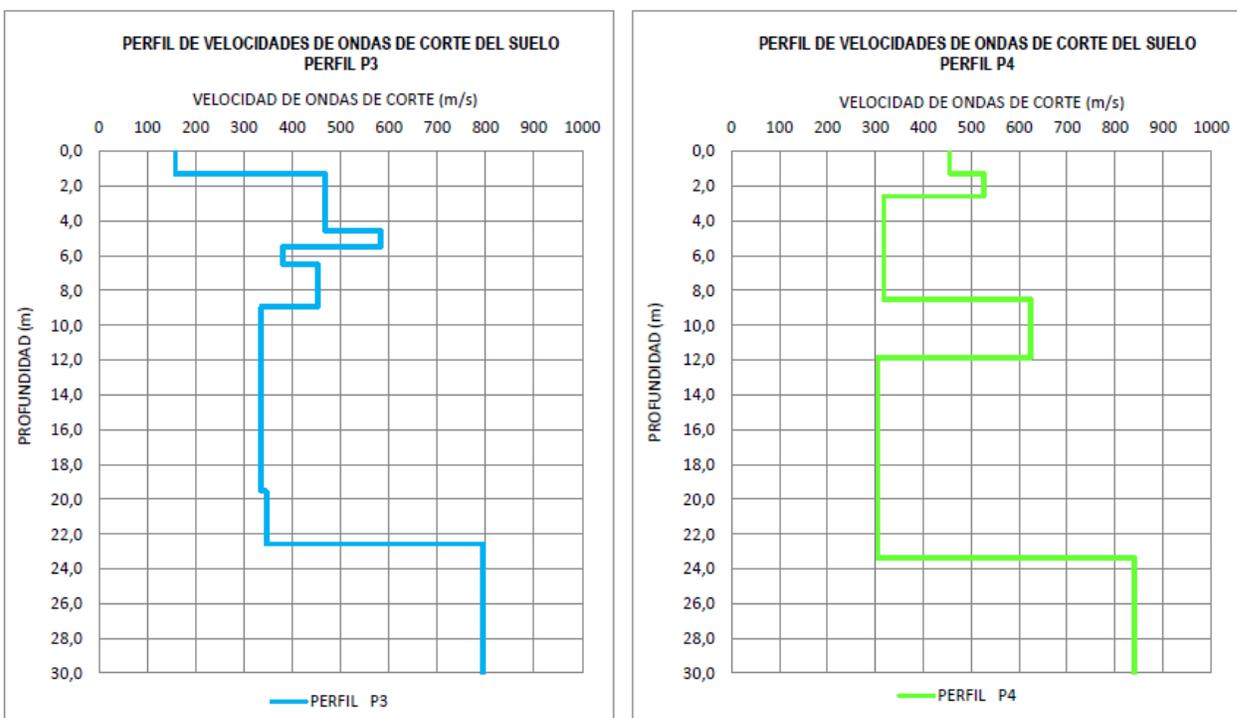


Figura A.2 Perfiles ReMi 2
Fuente: Hermosilla, 2018a

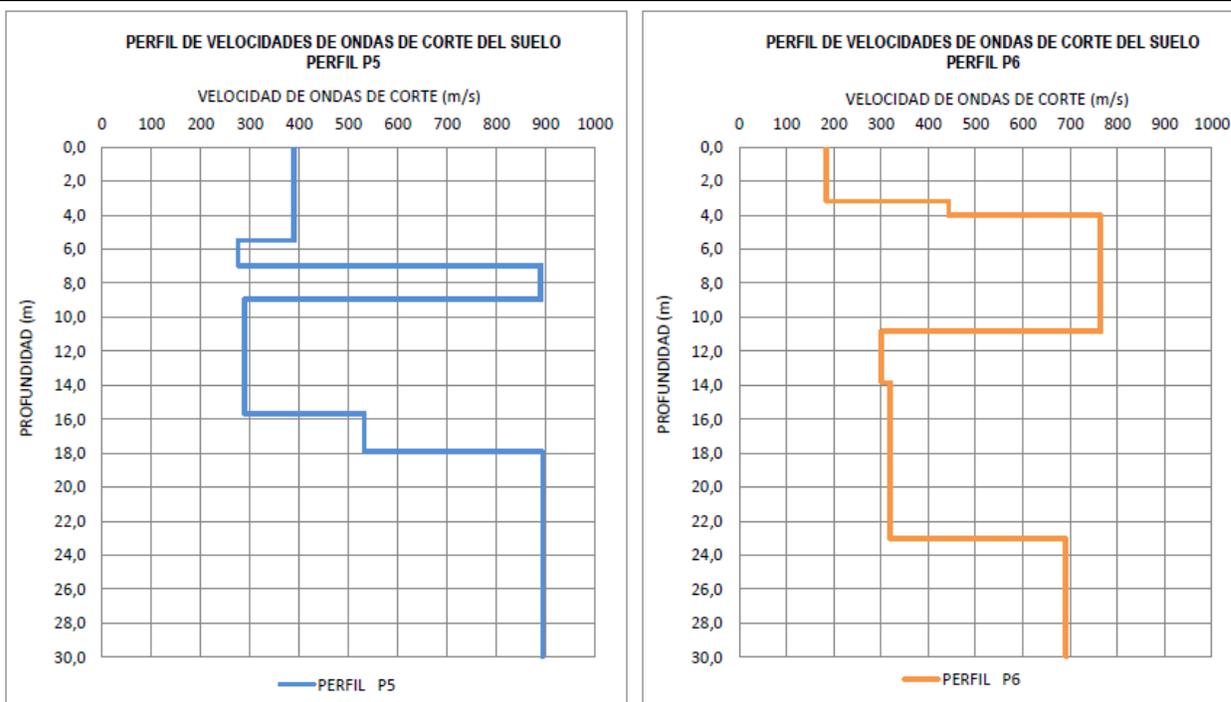


Figura A.3 Perfiles ReMi 3
Fuente: Hermosilla, 2018a

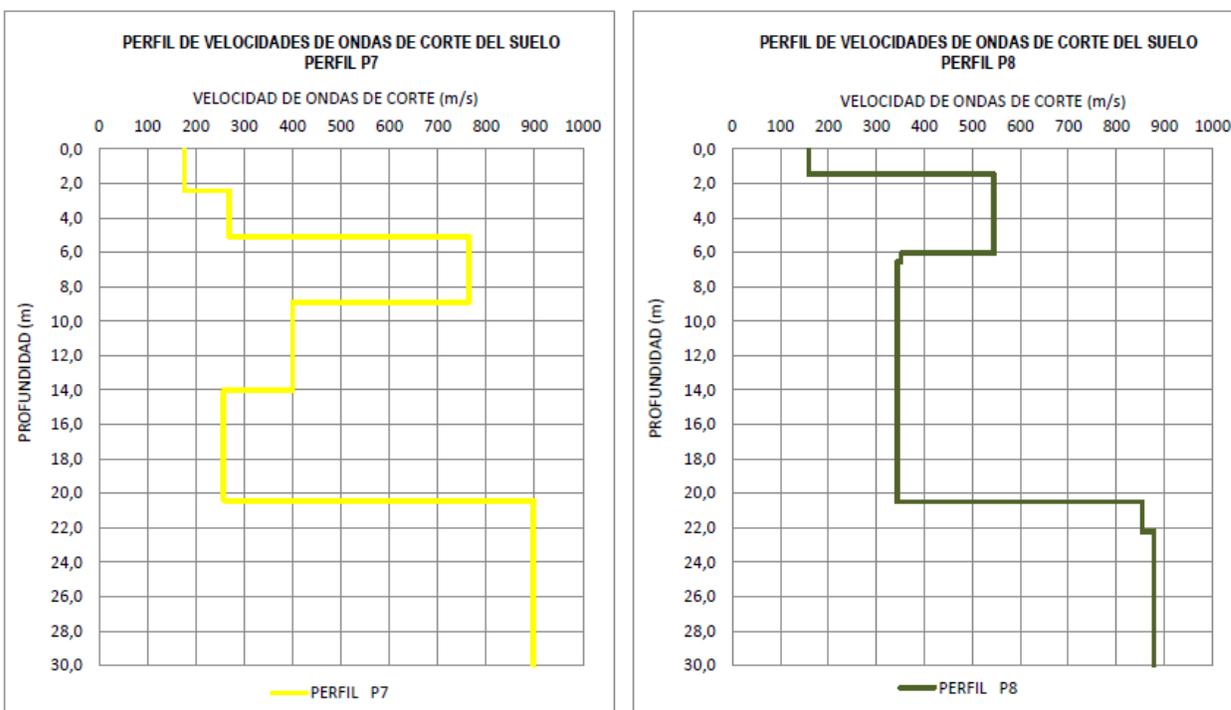


Figura A.4 Perfiles ReMi 4
Fuente: Hermosilla, 2018a

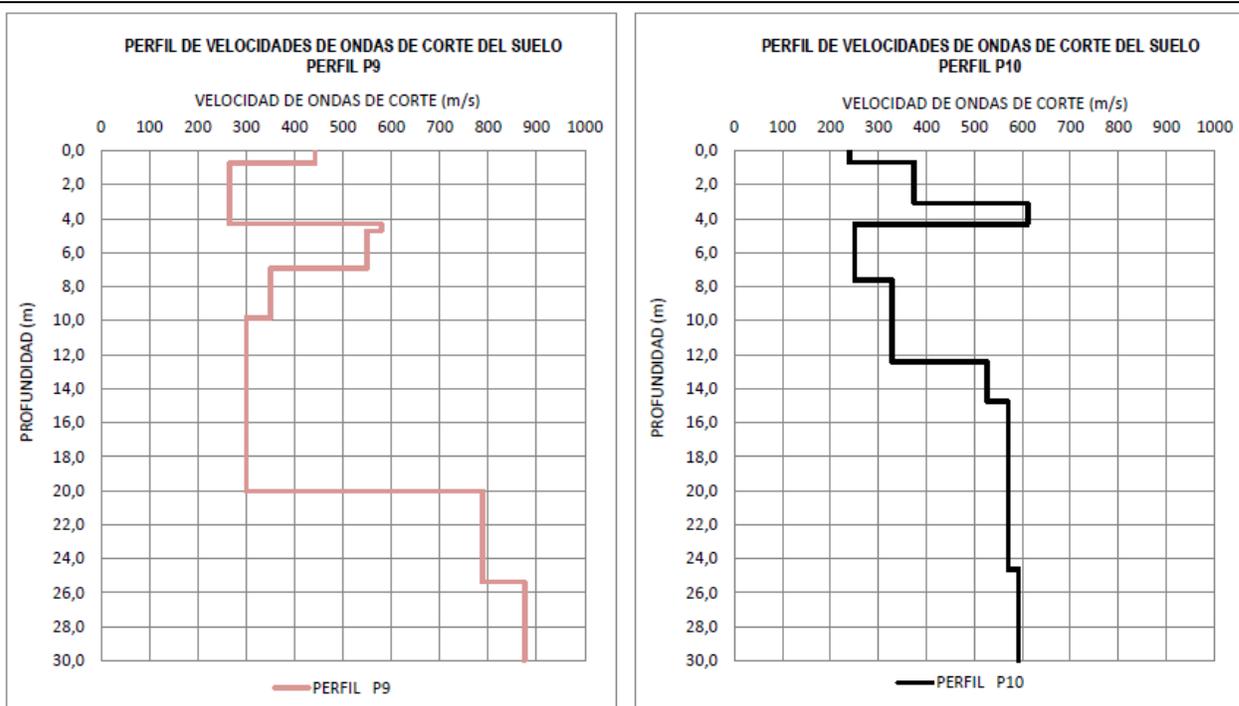


Figura A.5 Perfiles ReMi 5
Fuente: Hermosilla, 2018a

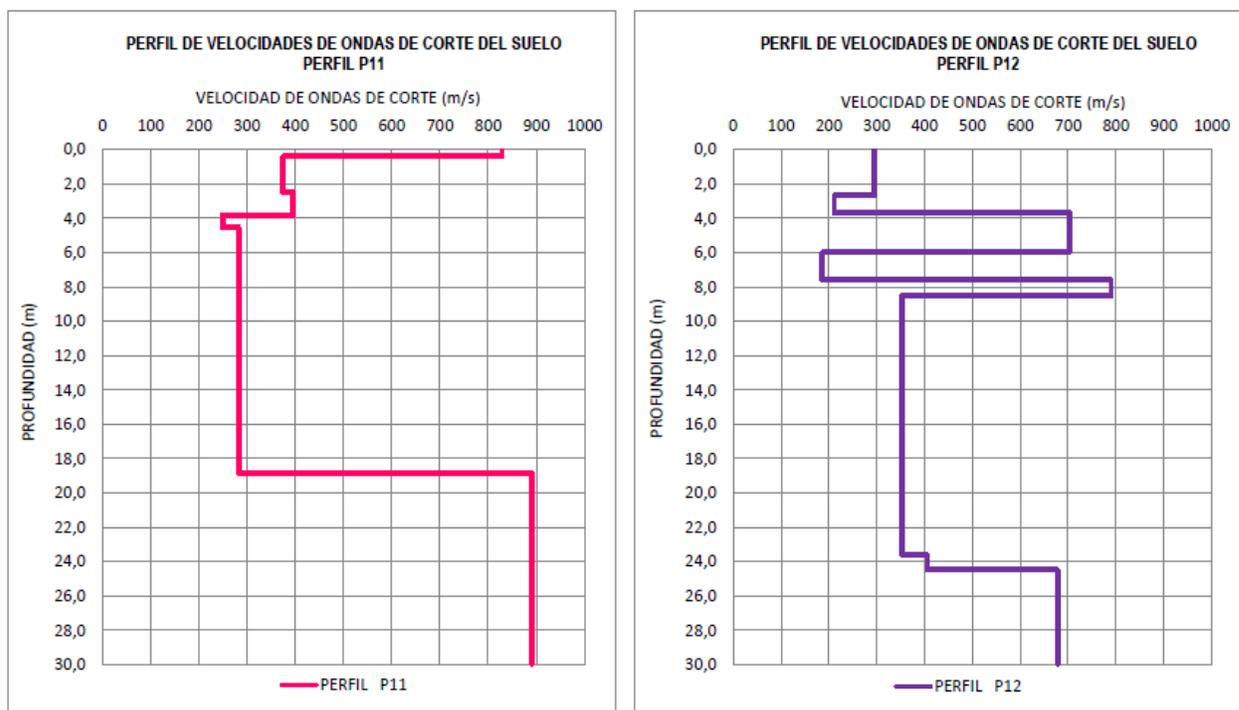


Figura A.6 Perfiles ReMi 6
Fuente: Hermosilla, 2018a

La Figura A.7 muestra en número de golpes en los primeros 30.00 [m] al realizar el ensayo SPT en el sondaje (Ver Figura 5.9).

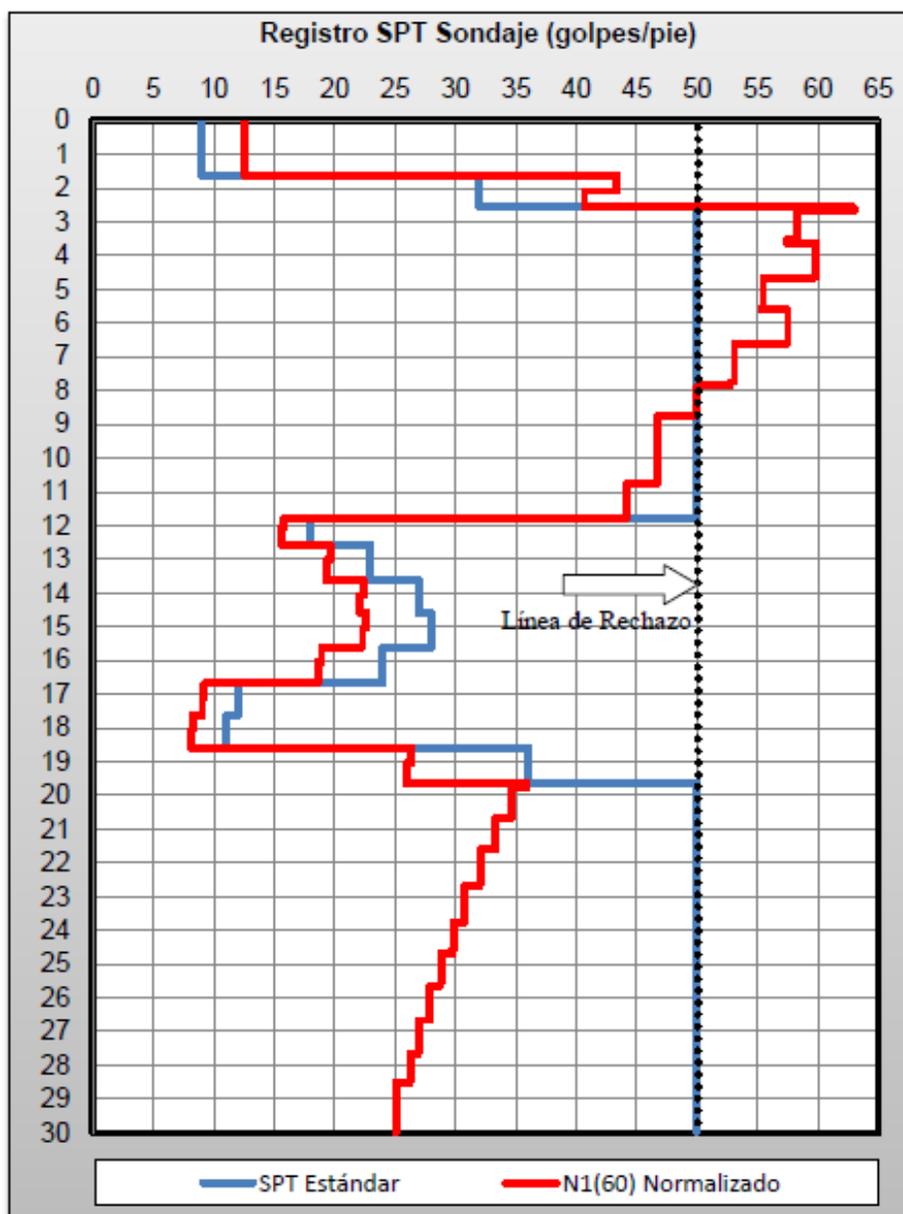


Figura A.7 Número de Golpes Ensayo SPT
Fuente: Hermosilla, 2018b

Anexo B

Este Anexo muestra las figuras de las curvas obtenidas en cada punto medido y sus respectivos parámetros, además de los criterios SESAME cumplidos.

Las siguientes figuras representan las curvas obtenidas en los puntos respectivos y la verificación del criterio SESAME.

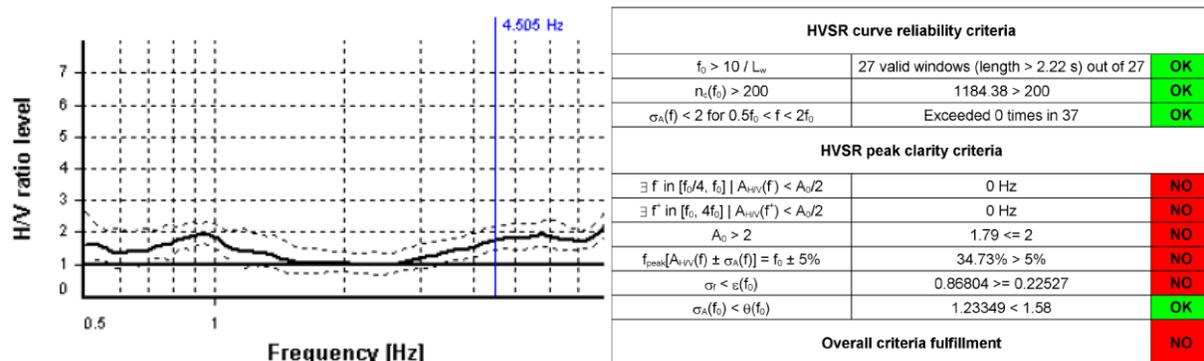


Figura B.1 Curva H/V 1
Fuente: Elaboración Propia.

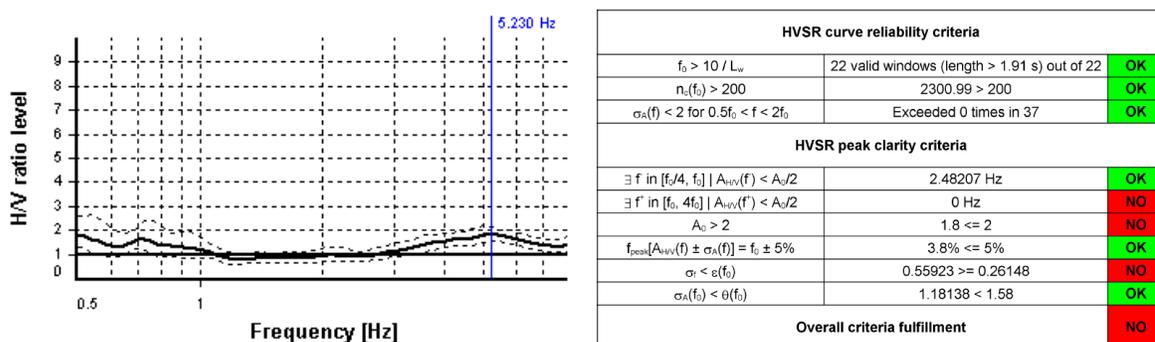


Figura B.2 Curva H/V 2
Fuente: Elaboración Propia.

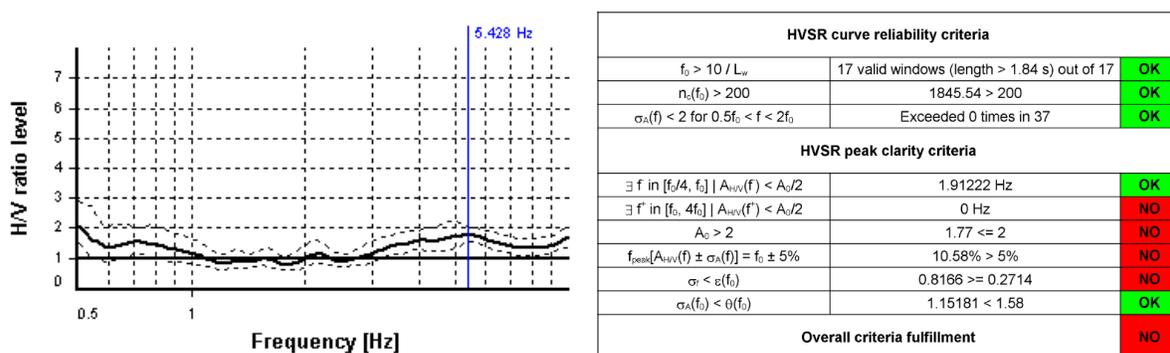
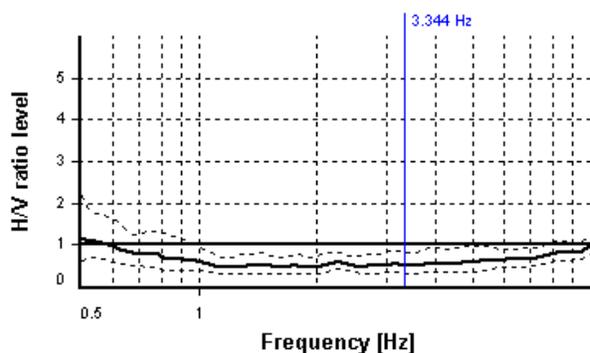
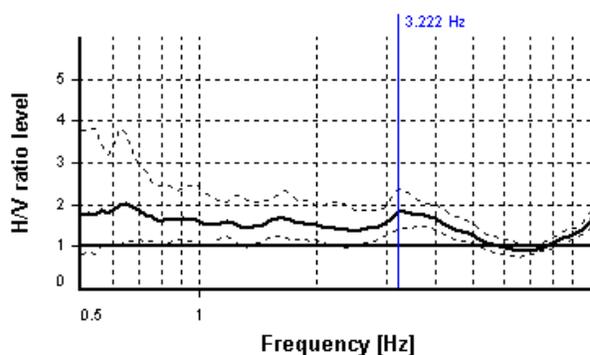


Figura B.3 Curva H/V 3
Fuente: Elaboración Propia.



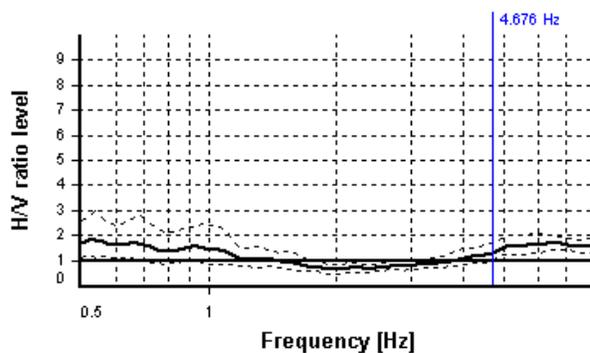
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	30 valid windows (length > 2.99 s) out of 30	OK
$n_c(f_0) > 200$	1837.77 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	0 Hz	NO
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	0 Hz	NO
$A_0 > 2$	0.52 <= 2	NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	45.15% > 5%	NO
$\sigma < \varepsilon(f_0)$	0.97322 >= 0.1672	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.60094 >= 1.58	NO
Overall criteria fulfillment		NO

Figura B.4 Curva H/V 4
Fuente: Elaboración Propia.



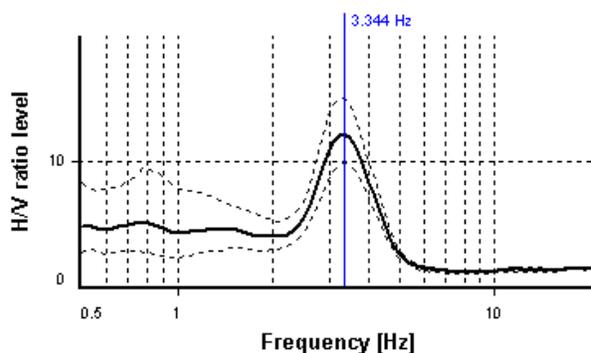
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	24 valid windows (length > 3.1 s) out of 24	OK
$n_c(f_0) > 200$	1590.83 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	0 Hz	NO
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	6.53969 Hz	OK
$A_0 > 2$	1.82 <= 2	NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	16.07% > 5%	NO
$\sigma < \varepsilon(f_0)$	0.68162 >= 0.16109	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.2977 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Figura B.5 Curva H/V 5
Fuente: Elaboración Propia.



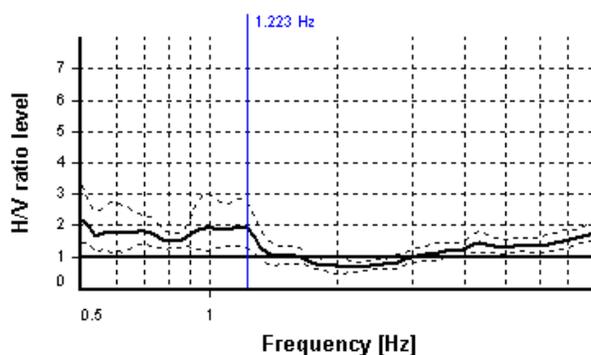
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	26 valid windows (length > 2.14 s) out of 26	OK
$n_c(f_0) > 200$	2125.35 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	2.06017 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	0 Hz	NO
$A_0 > 2$	1.29 <= 2	NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	39.84% > 5%	NO
$\sigma < \varepsilon(f_0)$	0.73369 >= 0.23382	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.30914 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Figura B.6 Curva H/V 6
Fuente: Elaboración Propia.



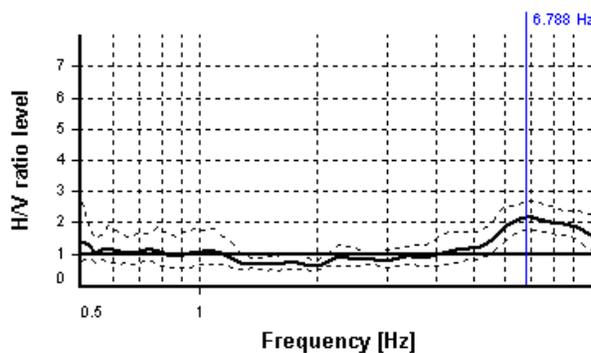
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	22 valid windows (length > 2.99 s) out of 22	OK
$n_s(f_0) > 200$	735.69 > 200	OK
$\sigma_\lambda(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	2.48207 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	4.34061 Hz	OK
$A_0 > 2$	12.22 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_\lambda(f)] = f_0 \pm 5\%$	3.66% <= 5%	OK
$\sigma < \varepsilon(f_0)$	0.18582 >= 0.1672	NO
$\sigma_\lambda(f_0) < \theta(f_0)$	1.23507 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		OK

Figura B.7 Curva H/V 7
Fuente: Elaboración Propia.



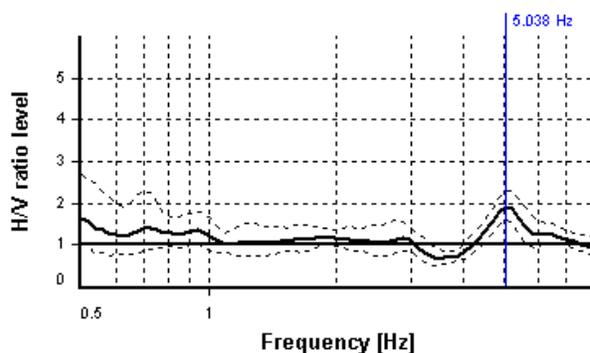
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	19 valid windows (length > 8.18 s) out of 19	OK
$n_s(f_0) > 200$	464.66 > 200	OK
$\sigma_\lambda(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	0 Hz	NO
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	1.70998 Hz	OK
$A_0 > 2$	1.91 <= 2	NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_\lambda(f)] = f_0 \pm 5\%$	20.03% > 5%	NO
$\sigma < \varepsilon(f_0)$	0.11136 < 0.12228	OK
$\sigma_\lambda(f_0) < \theta(f_0)$	1.44806 < 1.78	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Figura B.8 Curva H/V 8
Fuente: Elaboración Propia.



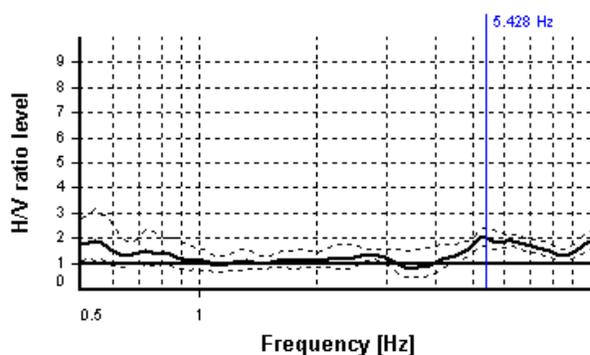
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	18 valid windows (length > 1.47 s) out of 18	OK
$n_s(f_0) > 200$	2443.67 > 200	OK
$\sigma_\lambda(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	4.34061 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	15.9932 Hz	OK
$A_0 > 2$	2.17 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_\lambda(f)] = f_0 \pm 5\%$	3.8% <= 5%	OK
$\sigma < \varepsilon(f_0)$	0.77289 >= 0.3394	NO
$\sigma_\lambda(f_0) < \theta(f_0)$	1.24139 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		OK

Figura B.9 Curva H/V 9
Fuente: Elaboración Propia.



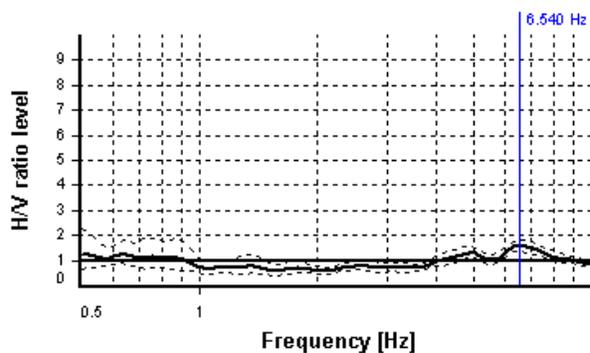
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	30 valid windows (length > 1.98 s) out of 30	OK
$n_c(f_0) > 200$	3022.95 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	4.02889 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f') < A_0/2$	8.17809 Hz	OK
$A_0 > 2$	1.91 <= 2	NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0% <= 5%	OK
$\sigma < \varepsilon(f_0)$	0.38615 >= 0.25191	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.21072 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Figura B.10 Curva H/V 10
Fuente: Elaboración Propia.



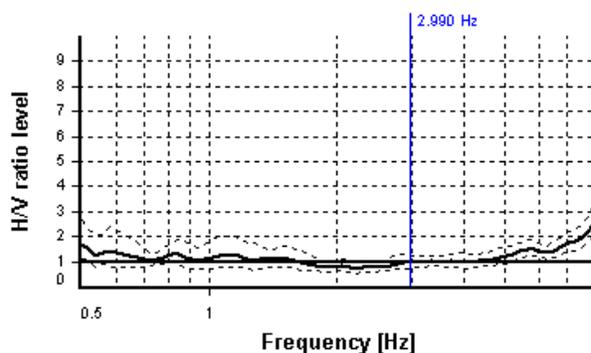
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	28 valid windows (length > 1.84 s) out of 28	OK
$n_c(f_0) > 200$	3016.38 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	3.88153 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f') < A_0/2$	17.88474 Hz	OK
$A_0 > 2$	2.02 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	3.66% <= 5%	OK
$\sigma < \varepsilon(f_0)$	0.82345 >= 0.2714	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.18627 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		OK

Figura B.11 Curva H/V 11
Fuente: Elaboración Propia.



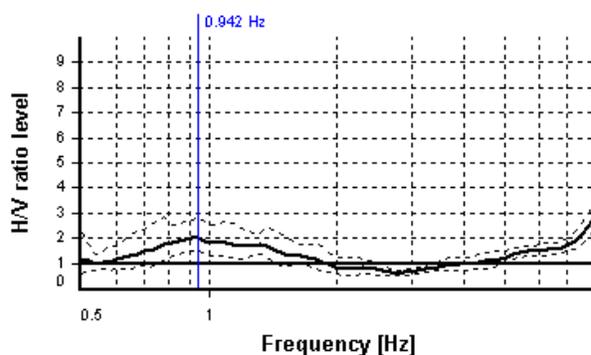
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	13 valid windows (length > 1.53 s) out of 13	OK
$n_c(f_0) > 200$	1700.32 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	3.73956 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f') < A_0/2$	0 Hz	NO
$A_0 > 2$	1.58 <= 2	NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0% <= 5%	OK
$\sigma < \varepsilon(f_0)$	0.69056 >= 0.32698	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.15318 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Figura B.12 Curva H/V 12
Fuente: Elaboración Propia.



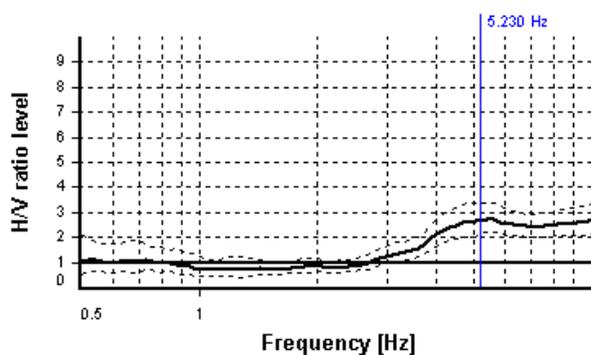
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	12 valid windows (length > 3.34 s) out of 12	OK
$n_s(f_0) > 200$	638.33 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	0 Hz	NO
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	0 Hz	NO
$A_0 > 2$	0.96 <= 2	NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	29.8% > 5%	NO
$\sigma < \varepsilon(f_0)$	0.59015 >= 0.14952	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.31135 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Figura B.13 Curva H/V 13
Fuente: Elaboración Propia.



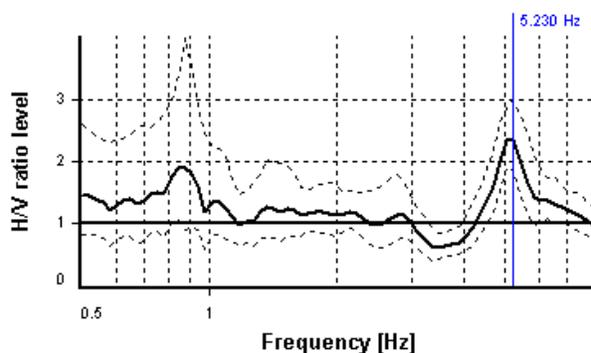
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	12 valid windows (length > 10.62 s) out of 12	OK
$n_s(f_0) > 200$	226.09 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 36	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	0.53868 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	1.91222 Hz	OK
$A_0 > 2$	2.02 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	17% > 5%	NO
$\sigma < \varepsilon(f_0)$	0.19152 >= 0.14131	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.37274 < 2	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Figura B.14 Curva H/V 14
Fuente: Elaboración Propia.



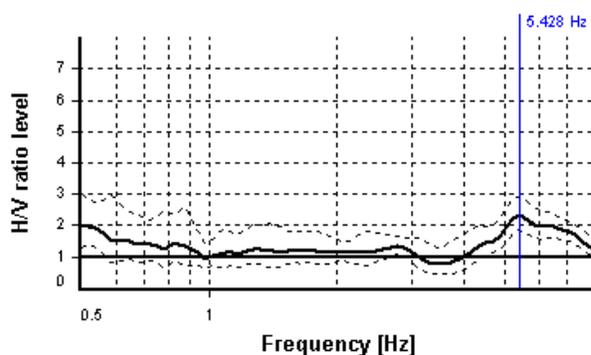
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	36 valid windows (length > 1.91 s) out of 36	OK
$n_s(f_0) > 200$	1882.63 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	3.10391 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	0 Hz	NO
$A_0 > 2$	2.67 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	3.8% <= 5%	OK
$\sigma < \varepsilon(f_0)$	0.99972 >= 0.26148	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.25842 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Figura B.15 Curva H/V 15
Fuente: Elaboración Propia.



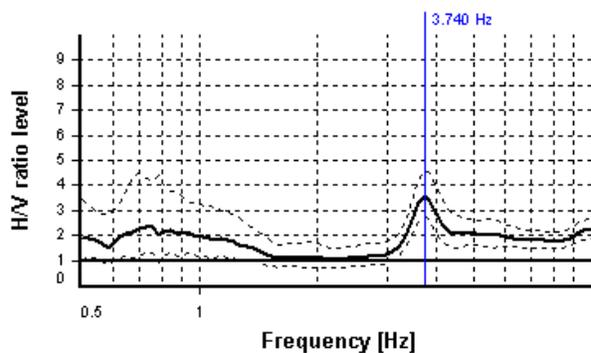
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	24 valid windows (length > 1.91 s) out of 24	OK
$n_c(f_0) > 200$	1255.09 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	4.34061 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f') < A_0/2$	7.31315 Hz	OK
$A_0 > 2$	2.35 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	3.66% <= 5%	OK
$\sigma_c < \varepsilon(f_0)$	0.392 >= 0.26148	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.26521 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		OK

Figura B.16 Curva H/V 16
Fuente: Elaboración Propia.



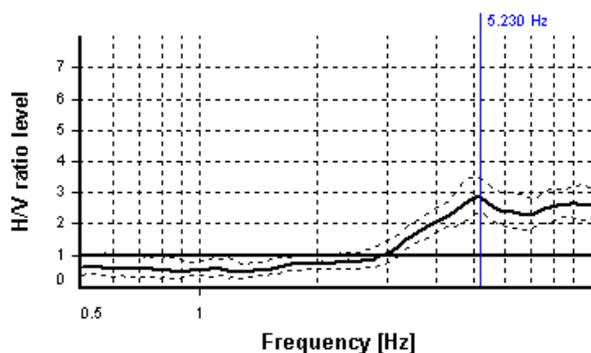
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	31 valid windows (length > 1.84 s) out of 31	OK
$n_c(f_0) > 200$	1682.7 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	4.02889 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f') < A_0/2$	17.2306 Hz	OK
$A_0 > 2$	2.32 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0% <= 5%	OK
$\sigma_c < \varepsilon(f_0)$	0.62284 >= 0.2714	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.25017 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		OK

Figura B.17 Curva H/V 17
Fuente: Elaboración Propia.



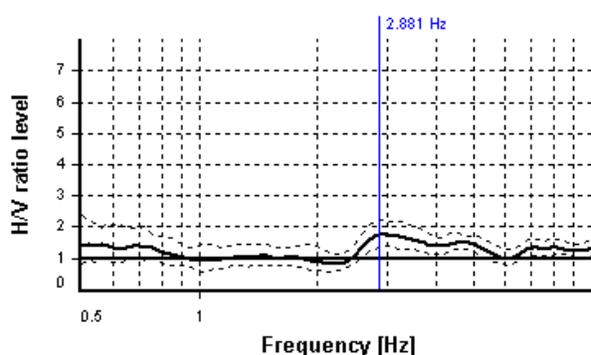
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	53 valid windows (length > 2.67 s) out of 53	OK
$n_c(f_0) > 200$	1981.97 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	3.22175 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f') < A_0/2$	7.59079 Hz	OK
$A_0 > 2$	3.58 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0% <= 5%	OK
$\sigma_c < \varepsilon(f_0)$	0.40557 >= 0.18698	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.28757 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		OK

Figura B.18 Curva H/V 18
Fuente: Elaboración Propia.



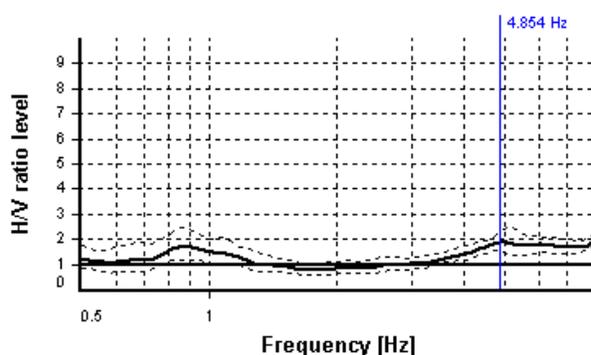
HVSR curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	23 valid windows (length > 1.91 s) out of 23	OK
$n_c(f_0) > 200$	1202.79 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSR peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	3.22175 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	0 Hz	NO
$A_0 > 2$	2.86 > 2	OK
$f_{peak}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	3.66% <= 5%	OK
$\sigma_v < v(f_0)$	0.74567 >= 0.26148	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.20947 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Figura B.19 Curva H/V 19
Fuente: Elaboración Propia.



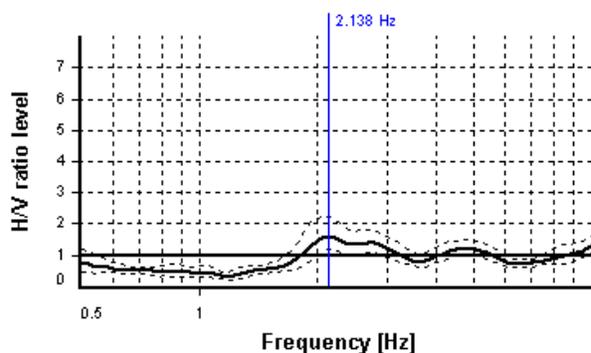
HVSR curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	24 valid windows (length > 3.47 s) out of 24	OK
$n_c(f_0) > 200$	1382.88 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSR peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	2.30382 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	0 Hz	NO
$A_0 > 2$	1.75 <= 2	NO
$f_{peak}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	3.8% <= 5%	OK
$\sigma_v < v(f_0)$	0.36462 >= 0.14405	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.26869 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Figura B.20 Curva H/V 20
Fuente: Elaboración Propia.



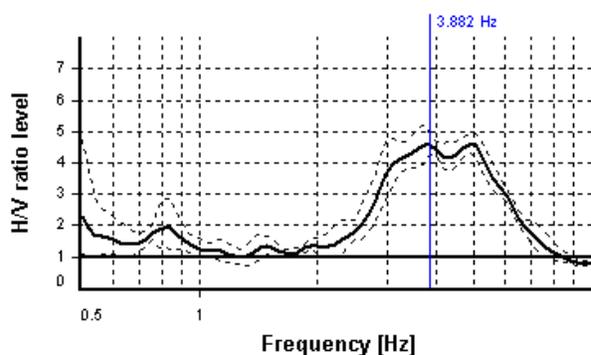
HVSR curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	24 valid windows (length > 2.06 s) out of 24	OK
$n_c(f_0) > 200$	2329.91 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSR peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	2.48207 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	0 Hz	NO
$A_0 > 2$	1.87 <= 2	NO
$f_{peak}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	3.8% <= 5%	OK
$\sigma_v < v(f_0)$	0.81959 >= 0.2427	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.21604 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Figura B.21 Curva H/V 21
Fuente: Elaboración Propia.



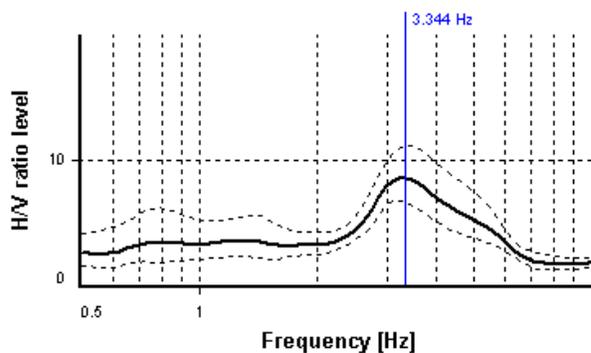
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	30 valid windows (length > 4.68 s) out of 30	OK
$n_c(f_0) > 200$	1230.51 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	1.70998 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	3.60279 Hz	OK
$A_0 > 2$	1.61 <= 2	NO
$f_{peak}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	3.66% <= 5%	OK
$\sigma < \varepsilon(f_0)$	0.31101 >= 0.10692	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.37615 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Figura B.22 Curva H/V 22
Fuente: Elaboración Propia.



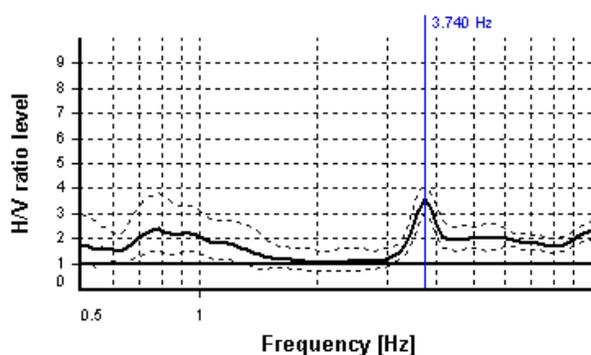
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	6 valid windows (length > 2.58 s) out of 6	OK
$n_c(f_0) > 200$	1149.09 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	2.5763 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	6.53969 Hz	OK
$A_0 > 2$	4.59 > 2	OK
$f_{peak}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	25.05% > 5%	NO
$\sigma < \varepsilon(f_0)$	0.74974 >= 0.19408	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.08001 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Figura B.23 Curva H/V 23
Fuente: Elaboración Propia.



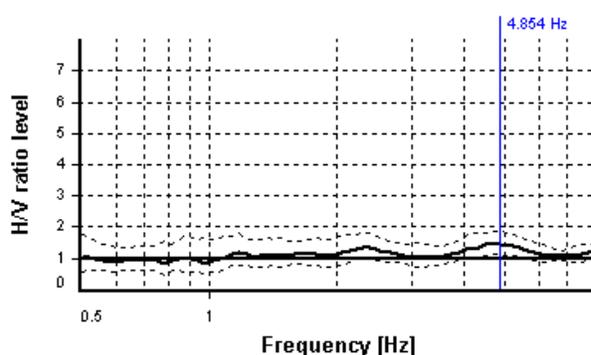
HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	21 valid windows (length > 2.99 s) out of 21	OK
$n_c(f_0) > 200$	1141.93 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	2.39129 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	5.84804 Hz	OK
$A_0 > 2$	8.62 > 2	OK
$f_{peak}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	3.66% <= 5%	OK
$\sigma < \varepsilon(f_0)$	0.39196 >= 0.1672	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.29474 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		OK

Figura B.24 Curva H/V 24
Fuente: Elaboración Propia.



HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	23 valid windows (length > 2.67 s) out of 23	OK
$n_s(f_0) > 200$	1691.33 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	3.34406 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	7.59079 Hz	OK
$A_0 > 2$	3.56 > 2	OK
$f_{peak}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0% <= 5%	OK
$\sigma_v < v(f_0)$	0.36376 >= 0.18698	NO
$\sigma_\lambda(f_0) < \theta(f_0)$	1.15765 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		OK

Figura B.25 Curva H/V 26
Fuente: Elaboración Propia.



HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	26 valid windows (length > 2.06 s) out of 26	OK
$n_s(f_0) > 200$	1262.03 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 37	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f) < A_0/2$	0 Hz	NO
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f') < A_0/2$	0 Hz	NO
$A_0 > 2$	1.44 <= 2	NO
$f_{peak}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	3.66% <= 5%	OK
$\sigma_v < v(f_0)$	0.65666 >= 0.2427	NO
$\sigma_\lambda(f_0) < \theta(f_0)$	1.30545 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Figura B.26 Curva H/V 27
Fuente: Elaboración Propia.

Anexo C

Este es un Anexo digital donde se elaboran 2 mapas en archivos .KMZ los cuales muestran la ubicación de los puntos medidos en el presente trabajo, más los puntos medidos por Pinto y Toledo en 2016 donde se realiza la clasificación del suelo de cada punto de acuerdo a Decreto Supremo N°61 “Diseño Sísmico de Edificios” y la norma Nch433 Of 1996 Modificada 2009 “Diseño Sísmico de Edificios” además de mostrar una imagen de la curva obtenida en cada punto y sus parámetros principales.