

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO - CHILE



**APORTES PARA UNA ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LAS
LOCALIDADES DE REÑACA Y CONCÓN, A PARTIR DE
MEDICIONES ESPECTRALES H/V NAKAMURA**

Memoria de titulación presentada por
GONZALO AGUIRRE NAVARRO

Como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
DENNIS RADDATZ A.

Junio de 2024

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO - CHILE



**APORTES PARA UNA ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LAS
LOCALIDADES DE REÑACA Y CONCÓN, A PARTIR DE
MEDICIONES ESPECTRALES H/V NAKAMURA**

Memoria de titulación presentada por
GONZALO AGUIRRE NAVARRO

Como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
DENNIS RADDATZ A.

Junio de 2024

AGRADECIMIENTOS

Quisiera dejar escrito mis más sinceros agradecimientos a mis queridos padres, quienes me han apoyado a lo largo de mi vida en todos los pasos que he podido dar. Agradecimientos para la empresa Ferrara, y en particular a Oscar Taiba por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo investigativo facilitando los equipos e instrumentos para realizar las mediciones del proyecto y también de contratar a un practicante para que me pudiera acompañar en la campaña de ejecución de las mediciones. A Dennis Raddatz, como profesor guía de esta tesis, por tener siempre generosidad en la entrega de conocimientos, amabilidad en responder ante consultas, apoyarme y fomentar a publicar artículos de mi trabajo investigativo.

A Paul Gálvez del LEMCO, quien me ayudó y me enseñó en los inicios del proyecto de investigación a usar el software Geopsy y procesar los datos de la mejor manera.

Deseo agradecer también a mis compañeros de universidad, con quienes siempre nos apoyamos en los trabajos y el estudio para todos pudiéramos cumplir nuestras metas, en particular agradezco con mucho cariño a Franco Rivano, quien siempre nos recibió en su departamento cercano a la universidad, y nos acogió para que pudiéramos estudiar en grupo incluso los fines de semana.

También debo agradecer a mi polola Fernanda Zúñiga por alentarme a terminar mi tesis que la tuve detenida durante un buen tiempo sin darle un cierre definitivo.

RESUMEN

Ante el alto nivel de sismicidad de Chile, resalta la importancia de estudios que proporcionen información sobre el comportamiento sísmico de suelos, especialmente para identificar áreas susceptibles a un rendimiento deficiente durante terremotos.

Este estudio se fundamenta en la realización de más de 100 mediciones in situ del periodo predominante del suelo (T_g) en las localidades de Reñaca y Concón, utilizando el método Nakamura. Este método estima el T_g a partir de la relación espectral entre las componente horizontales y verticales (RHV), lo que proporciona una representación de las propiedades dinámicas del suelo. Aunque la medición de T_g actualmente no es obligatoria según la norma NCh 433 Of. 96 (Modificada por D.S. N° 61) en Chile, su inclusión está siendo considerada en el proyecto de norma prNCh433, actualmente en consulta pública. No obstante, se ha utilizado de manera complementaria en ciertos estudios de mecánica de suelos. Su creciente popularidad radica en su capacidad para identificar áreas con "efecto de sitio" de manera rápida, simple y económica.

En este trabajo, se procesaron las mediciones siguiendo las pautas del proyecto SESAME, lo que permitió la generación de curvas de isoperiodos en toda el área de estudio y la elaboración de mapas de periodos para establecer una zonificación sísmica basada en diferentes rangos de periodos.

Utilizando las curvas de isoperiodos, se logró estimar los valores del período predominante de 91 proyectos en la zona de estudio. Estos valores fueron analizados para realizar un análisis comparativo entre el sistema actual de clasificación sísmica de suelos y la nueva propuesta de clasificación. En este análisis, se determinó cuántos proyectos experimentaron un cambio de clasificación, ya sea ascendiendo o descendiendo, y en qué medida. Se identificaron también los parámetros críticos de cada clasificación sísmica. Asimismo, se detectaron áreas específicas propensas a cambios en la clasificación sísmica debido a las modificaciones implementadas.

ABSTRACT

Given Chile's high level of seismic activity, there is a pressing need for studies providing information on the seismic behavior of soils, particularly to identify areas prone to poor performance during earthquakes.

This study is based on conducting over 100 in-situ measurements of the predominant soil period (T_g) in the Reñaca and Concón areas, using the Nakamura method. This method estimates T_g from the spectral ratio between horizontal and vertical components (RHV), providing a representation of soil dynamic properties. Although measuring T_g is currently not mandatory according to the NCh 433 Of. 96 standard (Modified by D.S. No. 61) in Chile, its inclusion is being considered in the prNCh433 standard project, currently under public consultation. However, it has been used complementarily in certain soil mechanics studies. Its growing popularity lies in its ability to quickly, simply, and inexpensively identify areas with "site effects".

In this work, measurements were processed following the SESAME project guidelines, allowing for the generation of isoperiod curves across the entire study area and the creation of period maps to establish seismic zoning based on different period ranges.

Using isoperiod curves, the predominant period values of 91 projects in the study area were estimated. These values were analyzed to conduct a comparative analysis between the current soil seismic classification system and the new classification proposal. In this analysis, it was determined how many projects experienced a change in classification, either ascending or descending, and to what extent. Additionally, the critical parameters of each seismic classification were identified. Furthermore, specific areas prone to changes in seismic classification due to implemented modifications were identified.

GLOSARIO

A_0	Amplitud peak de la curva H/V, asociada a la frecuencia f_0
$A_{H/V}(f)$	Amplitud de la curva H/V, asociada a la frecuencia f variable
A_{hor}	Área horizontal del elemento sobre el cual se le aplica el esfuerzo de corte
D	Razón de amortiguamiento
F	Frecuencia fundamental, [Hz]
$F(w)$	Función de transferencia
f^-	Frecuencia entre $f_0/4$ y f_0 , para que $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	Frecuencia entre f_0 y $4f_0$, para que $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
f	Frecuencia, [Hz]
f_0	Frecuencia peak de la curva H/V, [Hz]
f_{sensor}	Frecuencia de desconexión del sensor
G	Módulo de corte
H	Espesor del depósito de suelo
h	Profundidad a la roca madre
h_{min}	Estimación de límite inferior de h
l_w	Longitud de ventana, [s]
N_1	Índice de penetración estándar normalizado por presión de confinamiento de 0,1 MPa. Aplicable solo a suelos que clasifican como arenas
n_c	Número de ciclos significativos
n_w	Número de ventanas seleccionadas para la curva promedio H/V
q_u	Resistencia a la compresión simple del suelo
RQD	Rock Quality Designation, según norma ASTM D 6032
S_T	Función de transferencia, método de Nakamura
S_{TT}	Función de transferencia corregido, método de Nakamura
S_u	Resistencia al corte no-drenada del suelo
T	Periodo natural, [s]
T_g	Periodo predominante del suelo, [s]

T_{nak}	Periodo predominante del terreno estimado mediante la razón espectral H/V (método de Nakamura), [s]
t	Tiempo
u_g	Movimiento basal horizontal
u	Desplazamiento de una partícula de suelo
\dot{u}	Velocidad de una partícula de suelo
\ddot{u}	Aceleración de una partícula de suelo
V_s	Velocidad de ondas de corte, [m/s]
V_{s30}	Velocidad de propagación de ondas de corte de los 30 m superiores del terreno, [m/s]
$V_{s,av}$	Velocidad media de ondas de corte para el depósito total, [m/s]
$V_{s,surf}$	Velocidad de ondas de corte para la capa superficial, [m/s]
z	Coordenada vertical
$\sigma_A(f)$	Desviación estándar de $A_{H/V}(f)$
σ_f	Desviación estándar de la frecuencia peak de la curva H/V ($f_0 \pm \sigma_f$)
$\sigma_{\log H/V}(f)$	Desviación estándar de $A_{H/V}(f)$
$\varepsilon(f_0)$	Valor umbral para la condición de estabilidad $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
ε_{qu}	Deformación unitaria desarrollada cuando se alcanza la resistencia máxima en el ensayo de compresión simple
$\theta(f_0)$	Valor umbral para la condición de estabilidad $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$
ρ	Densidad de masa del suelo
τ	Esfuerzo de corte
ω	Frecuencia de vibración, [rad]

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo general.....	2
1.1.2	Objetivos específicos:.....	2
2	MARCO TEÓRICO	3
2.1	Tectónica de Placas.....	3
2.2	Propagación de ondas sísmicas.....	5
2.2.1	Tipos de ondas sísmicas	5
2.3	Microtemores	9
2.4	Efectos de Sitio	10
2.5	Análisis de la respuesta del suelo	11
2.5.1	Modelo viscoelástico	11
2.5.2	Propagación unidimensional de ondas de corte	13
2.5.3	Amplitud del movimiento dentro del depósito y en superficie	15
2.5.4	Amplitud de roca basal - superficie del depósito de suelos	17
2.5.5	Respuesta de depósito de suelos con “n” estratos.....	22
2.5.6	Aproximación lineal equivalente de la respuesta no lineal	25
3	RELACIÓN ESPECTRAL H/V	28
3.1	Introducción.....	28
3.2	Método Nakamura	29
3.3	Proyecto SESAME.....	31
3.3.1	Instrumentación	33
3.3.2	Condiciones experimentales	34
3.3.3	Guía para el procesamiento de datos	39
3.3.3.1	Módulo de selección de ventanas	39
3.3.3.2	Cálculo de relación espectral H/V	40
3.3.4	Guía para la interpretación de resultados	40
3.3.4.1	Criterio para la confiabilidad de resultados	40
3.3.4.2	Tipos de curvas H/V.....	42
3.3.4.2.1	Peak Claro	42
3.3.4.2.2	Peak de baja frecuencia poco claro	43
3.3.4.2.3	Peak ancho y múltiples peaks	44
3.3.4.2.4	Caso de dos peaks ($f_1 > f_0$)	45
3.3.4.2.5	Peak pronunciado y de origen industrial	46

3.3.4.2.6	Curvas H/V planas	47
4	CASO DE ESTUDIO:	49
4.1	Antecedentes del área de estudio	49
4.1.1	Contexto Geomorfológico.....	49
4.1.1.1	Cordillera de la Costa (a):.....	50
4.1.1.2	Rio Aconcagua y Estero Reñaca (b):	50
4.1.1.3	Sector Costero (c):	50
4.1.2	Contexto Geológico	51
4.1.2.1	Grimme K. y Álvarez L. (1964)	51
4.1.2.2	Actualización Plan Regulador Comunal de Concón (2014).....	52
4.1.3	Estratigrafía de sitios de la zona de estudio	53
4.1.4	Velocidad de ondas de corte V_s30	54
4.1.5	Clasificación Sísmica de suelos.....	55
4.1.6	Propuesta preliminar de zonificación sísmica por Baquedano F. (2012)	56
4.2	Metodología de Trabajo.....	57
4.2.1	Alcance	57
4.2.2	Mapa de zonificación	58
4.2.3	Clasificación Sísmica de los sitios	58
4.2.3.1	Clasificación Sísmica de los sitios según normativa actual D61	58
4.2.3.2	Clasificación Sísmica de los sitios según nueva propuesta de normativa 60	60
4.2.3.3	Comparación de clasificaciones sísmicas	61
4.3	Mediciones de Ruido Sísmico Ambiente.....	61
4.3.1	Descripción de equipos de medición	61
4.3.2	Partes de registro	63
4.3.3	Descripción de la campaña en terreno	64
4.3.4	Adquisición de datos	65
4.3.5	Procesamiento de datos.....	68
5	RESULTADOS	72
5.1	Curvas H/V obtenidas	73
5.1.1	Curvas no confiables	73
5.1.2	Curvas confiables	74
5.1.2.1	Curvas con Peak Claro	74
5.1.2.2	Curvas con Peak levemente ancho.....	74
5.1.2.3	Curva con peak ancho poco claro	75
5.1.2.4	Curvas H/V Planas.....	76
5.1.2.5	Curvas de peaks no claros	77

5.2	Emplazamiento de los tipos de curvas en la zona	78
5.3	Periodos obtenidos en la zona de estudio	80
5.4	Curvas de isoperiodos y mapa de periodos fundamentales	81
5.5	Mapas de zonificación	82
5.5.1	Nueva propuesta de clasificación sísmica de suelos	82
5.5.2	Propuesta preliminar de zonificación sísmica por Baquedano, F. (2012).....	83
5.6	Clasificaciones Sísmicas de Suelos	85
5.6.1	Periodos fundamentales en proyectos recopilados	85
5.6.2	Análisis comparativo entre sistemas de clasificaciones sísmicas de suelos	87
6	CONCLUSIONES	91
7	BIBLIOGRAFÍA.....	93
8	ANEXOS	95
	ANEXO A: Resumen de Resultados	95
	ANEXO B: Curvas de Espectro H/V Nakamura	98
	ANEXO C: Proyectos analizados	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Placas tectónicas en la tierra.....	3
Figura 2: Tipos de terremotos en Chile, asociados a la subducción.....	4
Figura 3: Ondas de cuerpo 11 (Robert J. Lillie, 1999).....	6
Figura 4: Valores típicos de constantes elásticas y velocidades sísmicas para diversos materiales (Robert J. Lillie, 1999).	6
Figura 5: Gráfica de velocidad sísmica versus densidad de materiales (Robert J. Lillie, 1999).....	7
Figura 6: Rangos aproximados de velocidad de onda compresional para algunos suelos (Robert J. Lillie, 1999).	7
Figura 7: Movimientos de partícula de ondas superficiales (Robert J. Lillie, 1999).....	8
Figura 8: (a) Ondas P, (b) Ondas S, (c) Ondas Rayleigh y (d) Ondas Love.....	8
Figura 9: Esquema del efecto de sitio, registros de movimiento del suelo en la roca y en superficie (Bonney-Claudet, S. 2004).	10
Figura 10: Componentes elástica y viscosa del modelo viscoelástico del suelo (Verdugo, R., 2009).....	12
Figura 11: Esquema del depósito horizontal de suelos, sometido a una perturbación de corte basal (Verdugo, R., 2009)	13
Figura 12: Amplitud de aceleración a nivel de la roca basal y en superficie (Verdugo, R., 2009).....	17
Figura 13: Influencia de la frecuencia en la respuesta de un depósito de suelos no amortiguado (Kramer, S., 1996).....	20
Figura 14: Influencia de la frecuencia en la respuesta de un depósito de suelos amortiguado (Verdugo, R., 2009).	21
Figura 15: Patrones de desplazamiento para ondas estacionarias en las frecuencias naturales del suelo, con un amortiguamiento de 5% (Kramer, S., 1996).	22
Figura 16: Esquema de depósito de suelo con “n” estratos (Verdugo, R., 2009).....	22
Figura 17: Curvas típicas de módulo de corte y razón de amortiguamiento (Tatsuoka, F. et al. 1979).	26
Figura 18: Procedimiento iterativo del método lineal equivalente (Kramer, S., 1996).....	27
Figura 19: Diagramas que muestran la evolución del tipo de artículos de esta materia (Bonney-Claudet, S. 2004).....	29
Figura 20: Procedimiento para obtener la relación espectral H/V (Yauri, S. 2006).	31
Figura 21: Comparación de las curvas H/V obtenidas con y sin asfalto, en el mismo emplazamiento, que no muestran ningún efecto significativo de la capa asfáltica (SESAME H/V User Guidelines, 2004).....	36
Figura 22: Comparación de las curvas H/V obtenidas en el mismo lugar sobre césped con y sin viento (arriba), en asfalto y césped en un agujero (abajo) (SESAME H/V User Guidelines, 2004).	37
Figura 23: Comparación de las curvas H/V obtenidas con y sin una placa de espuma de poliestireno bajo el sensor, en el mismo lugar, mostrando un fuerte efecto de la espuma de poliestireno (SESAME H/V User Guidelines, 2004).	38
Figura 24: Ejemplo de una curva H/V clara, que cumple con todos los criterios de confiabilidad y claridad (SESAME H/V User Guidelines, 2004).	43
Figura 25: Curva H/V con peak de baja frecuencia poco claro (SESAME H/V User Guidelines, 2004).	44
Figura 26: Curva H/V con peaks múltiples (SESAME H/V User Guidelines, 2004).	45

Figura 27: Ejemplo de curva H/V con caso de dos peaks (SESAME H/V User Guidelines, 2004).....	46
Figura 28: Ejemplo de curva H/V con frecuencia de origen industrial (arriba), espectros de Fourier en las componentes (abajo izquierda) y curvas reprocesadas con distintos valores de suavizado (abajo derecha) (SESAME H/V User Guidelines, 2004).	47
Figura 29: Ejemplo de curva H/V plana de sitio en roca, específicamente en la confluencia de dos valles (SESAME H/V User Guidelines, 2004).....	48
Figura 30: Geomorfología de zona de estudio: localidades de Reñaca y Concón. Fuente: elaboración propia en base a Google Earth.	49
Figura 31: Geología en zona de estudio (Grimme, K. y Álvarez, L., 1964).	51
Figura 32: Mapa Geológico y Geomorfológico del área urbana de Concón (Actualización P.R.C. de Concón (2014) en base a SERNAGEOMIN (2002)).....	52
Figura 33: Valores de $Vs30$ recopilados de informes de mecánica de suelos.	54
Figura 34: Clasificaciones sísmicas de suelos obtenidas de los informes de mecánica de suelos.....	55
Figura 35: Estimación de frecuencia predominante, tamaño es proporcional a la amplitud RHV, (Baquedano F., 2012). Mapa geológico de Reñaca y Concón (modificado de Álvarez et al., 1964).....	56
Figura 36: Propuesta de microzonificación preliminar en zonas de Reñaca y Concón (Baquedano F., 2012).....	57
Figura 37: Sismógrafo GEODE, GEOMETRICS.	62
Figura 38: SeisMonitor GS-1 3C, GEOSPACE.	62
Figura 39: Equipos de medición.....	62
Figura 40: Parte de registro con información relevante para el ensayo de Nakamura.	63
Figura 41: Emplazamiento $Vs30$ de informes de mecánica de suelos recopilados.	64
Figura 42: Grilla preliminar establecida usando puntos de referencia en donde se cuenta con $Vs30$ y sectores sin acceso.....	64
Figura 43: Programa Geometrics Seismodule Controller para la adquisición de datos.	65
Figura 44: 90 registros de 1 minuto de grabación (N-S, E-O y Z).....	66
Figura 45: Edición de tiempos de comienzo y direcciones de señales (N, E y Z).	66
Figura 46: Señales concatenadas para obtener 1 registro de 30 minutos en las 3 coordenadas (N, E y Z).	67
Figura 47: Emplazamiento de mediciones de ruido sísmico ambiente.	68
Figura 48: Ejemplo de registro y ventanas de tiempo asociadas a parámetros.	69
Figura 49: Ejemplo de algoritmo anti-triggering usado para seleccionar ventanas de tiempo estacionarias.....	69
Figura 50: Tipo de gráficas al evaluar suavizado Konno & Ohmachi con distintos valores de la constante b.	70
Figura 51: Esquema del procesamiento de datos.	71
Figura 52: Esquema del reprocesamiento de datos.....	71
Figura 53: Curvas H/V sin peak reconocible con distorsión en la señal.	73
Figura 54: Algunas curvas H/V con peak claro.....	74
Figura 55: Algunas curvas H/V con peak levemente ancho.....	75
Figura 56: Curva H/V con peak ancho.....	76
Figura 57: Curvas H/V Planas obtenidas:.....	77
Figura 58: Algunas curvas H/V de Peaks no claros.	78
Figura 59: Emplazamiento de tipos de curvas H/V en zona de estudio.....	79
Figura 60: Periodos fundamentales obtenidos por método Nakamura.	80
Figura 61: Curvas de Isoperiodos de Tg [s] en la zona de estudio (elaboración propia)... ..	81
Figura 62: Mapa de periodos fundamentales del suelo (Tg [s]) en zona de estudio.	82

Figura 63: Mapa de zonificación de acuerdo con nueva propuesta de clasificación sísmica (solo categorización con periodo fundamental del suelo (T_g [s])	83
Figura 64: Mapa de zonificación sísmica de acuerdo con los límites de T_g [s] establecidos por microzonificación preliminar de Baquedano.	84
Figura 65: Comparativa de propuesta preliminar de microzonificación sísmica (izquierda) por Baquedano, F. (2012) y mapa de zonificación resultante de estudio.	85
Figura 66: Proyectos recopilados emplazados en curvas de isoperiodos.	86
Figura 67: Comparación entre las clasificaciones sísmicas según normativa vigente y la nueva propuesta para 91 proyectos analizados.	87
Figura 68: Representación gráfica de los cambios de clasificación.	88
Figura 69: Análisis de clasificaciones sísmicas con propuesta de clasificación.	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Síntesis de fuentes de ruido según frecuencia (Peck, L., 2008).....	9
Tabla 2: Conclusiones de síntesis sobre la proporción de Ondas Rayleigh y Love en el ruido.	10
Tabla 3: Colaboradores del proyecto SESAME.....	32
Tabla 4: Recomendación de duración del registro (SESAME H/V User Guidelines, 2004).	35
Tabla 5: Criterios para una curva H/V confiable.	40
Tabla 6: Criterios para peak claro.	41
Tabla 7: Valores umbrales para σ_f y σ_{Af0}	41
Tabla 8: Zonas con distinto comportamiento sísmico en base a frecuencias predominantes, Fuente: Elaboración propia en base a Baquedano F., 2012.	57
Tabla 9: Clasificación sísmica del terreno de fundación según D61 (2011).	59
Tabla 10: Nueva propuesta de clasificación sísmica de suelos, Comité NCh433 (Ruz & Finn, 2019).	61
Tabla 11: Resumen de mediciones ejecutadas y no ejecutadas según la grilla propuesta (elaboración propia).....	67
Tabla 12: Resumen de mediciones procesadas mediante criterio SESAME.	78
Tabla 13: Zonas con distinto comportamiento sísmico en base a frecuencias predominantes, Fuente: Elaboración propia en base a Baquedano F., 2012.	83
Tabla 14: Comparación de clasificaciones sísmicas en los 91 proyectos analizados.	88

1 INTRODUCCIÓN

La medición del espectro de H/V Nakamura para la obtención del periodo predominante del suelo ha experimentado un notable crecimiento en relevancia en los últimos años dentro del ámbito de la ingeniería geotécnica, impactando significativamente en el diseño sísmico de estructuras. Este avance se ve reflejado en las normativas vigentes en Chile, como la reciente inclusión del valor del periodo predominante del suelo (T_g) en la norma NCh2369:2023, así como su consideración en la norma NCh433, actualmente en proceso de consulta pública.

En el contexto específico de las localidades de Reñaca y Concón, que fueron escogidas para el estudio investigativo de la presente tesis, se caracterizan por una variada composición de suelos que abarcan desde suelos blandos como paleodunas y dunas activas, hasta arenas, gravas de playa y formaciones rocosas como la formación Horcón compuesta por areniscas, limolitas y arcillolitas, la diversidad tanto en tipos de suelo como en topografía ha generado una amplia gama de resultados de periodos predominantes en estudios previos. Sin embargo, la elaboración de un mapa detallado de periodos predominantes requiere de un mayor número de mediciones en la zona para mejorar la precisión y abarcar de manera más completa las características de las mencionadas localidades. En este sentido, la presente investigación ha llevado a cabo más de 100 mediciones en estas áreas, utilizando instrumentos proporcionados por la empresa Ferrara, con el objetivo de contribuir a un mayor entendimiento de la respuesta sísmica del suelo en esta región.

En contraste con investigaciones previas como la realizada por Baquedano, F. et al (2012), que determinó las frecuencias predominantes de los suelos en la zona de Valparaíso-Viña del Mar mediante mediciones de Nakamura y propuso una microzonificación preliminar, es evidente la importancia de contar con una cantidad significativa de mediciones para establecer una microzonificación confiable. Esta necesidad se alinea con las directrices del proyecto europeo de investigación SESAME, el cual ofrece una guía para la implementación de la técnica de la razón espectral H/V, resaltando la importancia de una metodología rigurosa y una cantidad adecuada de datos para lograr resultados sólidos y representativos.

Al final de esta tesis, se presentará un análisis comparativo entre el sistema actual de clasificación sísmica de suelos y una nueva propuesta de clasificación, utilizando datos recopilados de 91 proyectos ubicados en la zona de estudio. En el contexto de la ingeniería civil y la geotecnia, la evaluación de la respuesta sísmica del suelo es fundamental para el diseño seguro y eficaz de estructuras frente a eventos sísmicos.

Este análisis permitió observar las características distintivas de los sitios clasificados en diferentes categorías, proporcionando información valiosa para el diseño estructural y la evaluación del riesgo sísmico en la zona de estudio.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Proponer un mapa de periodos predominantes del suelo para las localidades de Reñaca y Concón, a partir de mediciones espectrales H/V Nakamura.

1.1.2 Objetivos específicos:

- Aprender a utilizar el equipo de medición Nakamura proporcionado por la empresa Ferrara.
- Medir microvibraciones de ruido ambiental utilizando el método Nakamura en más de 100 sitios en las localidades de Reñaca y Concón, cumpliendo con la cantidad mínima de mediciones establecidas por guía SESAME para microzonificación sísmica.
- Aplicación de guía SESAME para la implementación de la técnica de razón espectral H/V, incluyendo aplicaciones tanto para mediciones, procesamiento e interpretación.
- Determinar el periodo predominante del suelo para cada sitio medido, a través de software GEOPSY.
- Generar un base de datos georeferenciados de todas las frecuencias predominantes.
- Con los resultados obtenidos se generarán curvas de isoperiodos, se elaborarán mapas de colores y microzonificaciones mediante rangos de periodo predominante, establecidos en la propuesta de clasificación sísmica y también comprobando la propuesta de microzonificación preliminar.
- Realizar un análisis comparativo entre sistema actual de clasificación sísmica de suelos y la nueva propuesta de clasificación en 91 proyectos recopilados en la zona de estudio.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Tectónica de Placas

Esta Teoría tiene sus orígenes en la primera parte del siglo XX, con la idea de la “deriva continental”, propuesta por el meteorólogo Alemán Alfred Wegener. Observaciones geofísicas posteriores realizadas durante los años 1950 y 1960, hizo que los geólogos se dieran cuenta de que los continentes son pasajeros en grandes placas compuestas principalmente de manto, información que fue crítica para la aceptación de la teoría de tectónica de placas. La condición de presión y temperatura en el manto crean una zona de manto relativamente suave, intercalada entre el manto más duro arriba y abajo. El Manto más suave (“Astenosfera”) permite que las placas rígidas del manto y la corteza (“Litosfera”) se muevan horizontalmente durante miles de kilómetros.

La corteza terrestre se encuentra dividida en seis placas continentales (Africana, Antártica, Americana, Indo-Australiana, Euroasiática, Pacífico) y catorce placas subcontinentales (Nazca, Cocos, Filipina, etc). Parte de las placas más importantes se muestran en la Figura 1 a continuación.

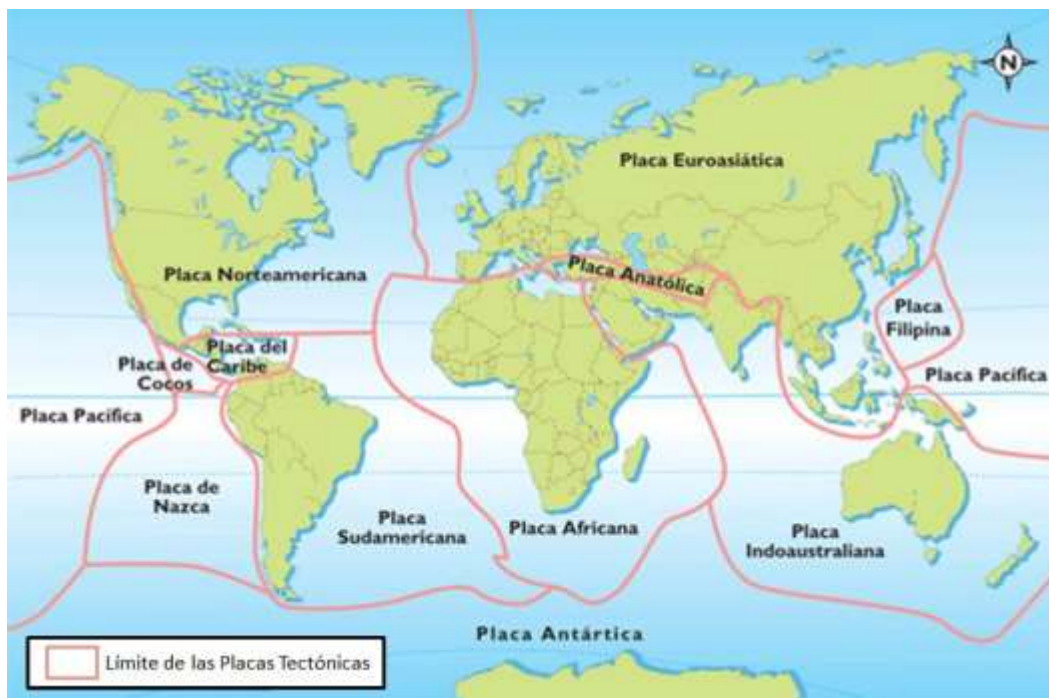


Figura 1: Placas tectónicas en la tierra.

La idea fundamental de la teoría de tectónica de placas es la existencia en la superficie de la tierra, de placas delgadas rígidas que interactúan entre sí. Estas placas se mueven

debido a que son arrastradas por corrientes de convección del manto, donde los bordes más fríos y densos de cada placa, “empujan” a las placas hacia el manto más caliente y ligero. Las Placas tectónicas se desplazan unas respecto a otras con velocidades entre 1 y 10 cm/año e interaccionan unas con otras a lo largo de sus fronteras o límites provocando intensas deformaciones en la corteza, lo que ha dado lugar a la formación de grandes cadenas montañosas y grandes sistemas de fallas. El contacto por fricción entre los bordes de las placas es responsable de la mayor parte de los terremotos en todo el planeta.

Existen tres tipos de desplazamiento relativo entre placas o márgenes tectónicos: divergente, convergente y transformante. La naturaleza de estos movimientos determina también la característica de los sismos asociados a estas deformaciones. En el caso de Chile, se encuentra en una zona de subducción (margen convergente), donde interactúan la placa Oceánica de Nazca y Antártica que subducen bajo la placa continental Sudamericana a razón media de 7 cm/año (CSN, 2013).

En las zonas de subducción se producen 5 tipos de terremotos:

- A. Terremotos tipo Intra placa (outer rise)
- B. Terremotos tipo Inter placa (thrust)
- C. Terremotos profundidad intermedia Intra placa (profundidad entre 60 a 150 km.)
- D. Terremotos superficiales Intra placa (profundidad menor a 20 km.)
- E. Terremotos profundos Intra placa (profundidad mayor a 150 km.)

Estos tipos de terremotos se pueden apreciar en la Figura 2. La mayoría de los terremotos en Chile son de tipo B y C (el 95% de ellos son a profundidades menores que 100 km).

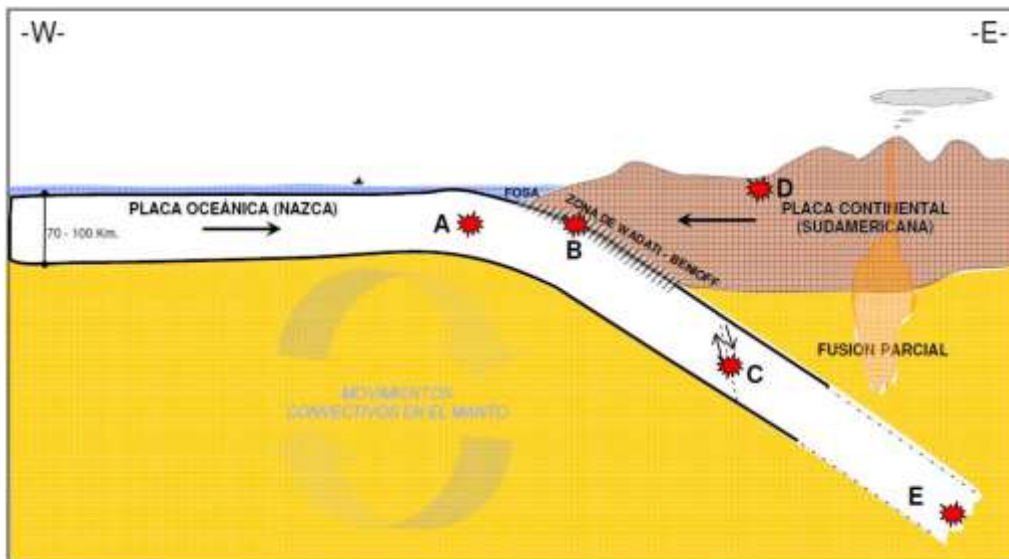


Figura 2: Tipos de terremotos en Chile, asociados a la subducción.

2.2 Propagación de ondas sísmicas

Cuando ocurre un desplazamiento relativo entre placas tectónicas que libera suficiente energía como para generar un terremoto, parte de la energía liberada es propagada a través de la estructura interna de la Tierra en forma de ondas mecánicas; estas ondas sísmicas se propagan en distintas direcciones (lo que siente el humano es la manifestación en superficie, que provoca que sintamos que el piso se mueve de arriba abajo y de un lado hacia otro).

Los grandes terremotos producen suficiente energía para causar temblores medibles en puntos de todo el mundo. A medida que los diferentes tipos de ondas sísmicas viajan a través de la Tierra, se refractan y se reflejan en los límites entre las diferentes capas, llegando a diferentes puntos de la superficie de la Tierra por diferentes caminos.

2.2.1 Tipos de ondas sísmicas

Las ondas sísmicas se clasifican en dos tipos: Ondas de Cuerpo (body waves), las cuales viajan a través de la Tierra y las Ondas Superficiales (surface waves), que se generan en la superficie de la tierra cuando se superponen las ondas de Cuerpo.

Tipos de ondas de Cuerpo

- a) Las Ondas P, también conocidas como primarias, compresionales u ondas longitudinales; involucra una compresión sucesiva y la rarefacción de los materiales a través de los cuales pasan. Estas son análogas a las ondas de sonido, en las cuales las partículas se mueven en la misma dirección que la propagación de la onda. La velocidad de propagación de compresión, suponiendo un medio elástico, se puede expresar como:

$$V_p = \sqrt{\frac{k + 4/3\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (2-1)$$

Donde G es el módulo de corte del suelo, ρ la densidad y λ se define como:

$$\lambda = \frac{\nu * E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2-2)$$

- b) Las ondas S, también conocidas como secundarias, ondas de corte (shear waves); son ondas transversales en la cual las partículas se mueven en sentido perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Debido a que son ondas de corte, estas no se propagan a través del agua. Para una onda que lleva energía moviéndose en dirección horizontal por ejemplo, existe una componente de la onda de corte con movimiento de partículas en la dirección vertical "SV" y en la horizontal "SH" (perpendicular al sentido de la onda).

Teniendo en cuenta las mismas consideraciones que en el caso anterior, la velocidad de propagación de onda de corte se puede definir como:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-3)$$

Entre más resistente es el material a la deformación (material con mayor incompresibilidad o rigidez), más rápido pueden viajar las ondas.

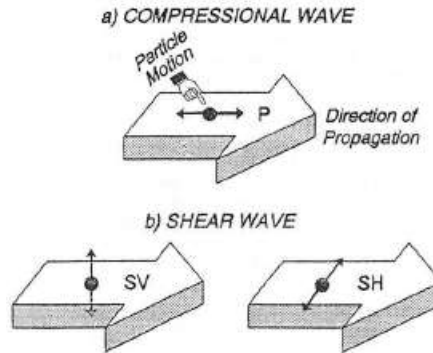


Figura 3: Ondas de cuerpo 11 (Robert J. Lillie, 1999).

En la Figura 4 se muestran propiedades físicas típicas para varias sustancias, enumeradas hacia abajo de acuerdo con el aumento de la velocidad de onda P. Bajando por la lista, los materiales generalmente se vuelven más fuertes (mayor k y μ) y más densos al aumentar la velocidad.

	ELASTIC CONSTANTS		SEISMIC VELOCITIES		
	10^8 N/m^2	Shear Modulus (μ)	kg/m^3	km/s	
			Density (ρ)	Compress. Wave (V_p)	Shear Wave (V_s)
Air	0.0001	0	1.0 0.001	0.32	0
Water	2.2	0	1000 1.0	1.5	0
Ice	3.0	4.9	920 0.92	3.2	2.3
Shale	8.8	17	2400 2.4	3.6	2.6
Sandstone	24	17	2500 2.5	4.3	2.6
Salt	24	18	2200 2.2	4.7	2.9
Limestone	38	22	2700 2.7	5.0	2.9
Quartz	33	39	2700 2.7	5.7	3.8
Granite	88	22	2600 2.6	6.7	2.9
Peridotite	139	58	3300 3.3	8.1	4.2

Figura 4: Valores típicos de constantes elásticas y velocidades sísmicas para diversos materiales (Robert J. Lillie, 1999).

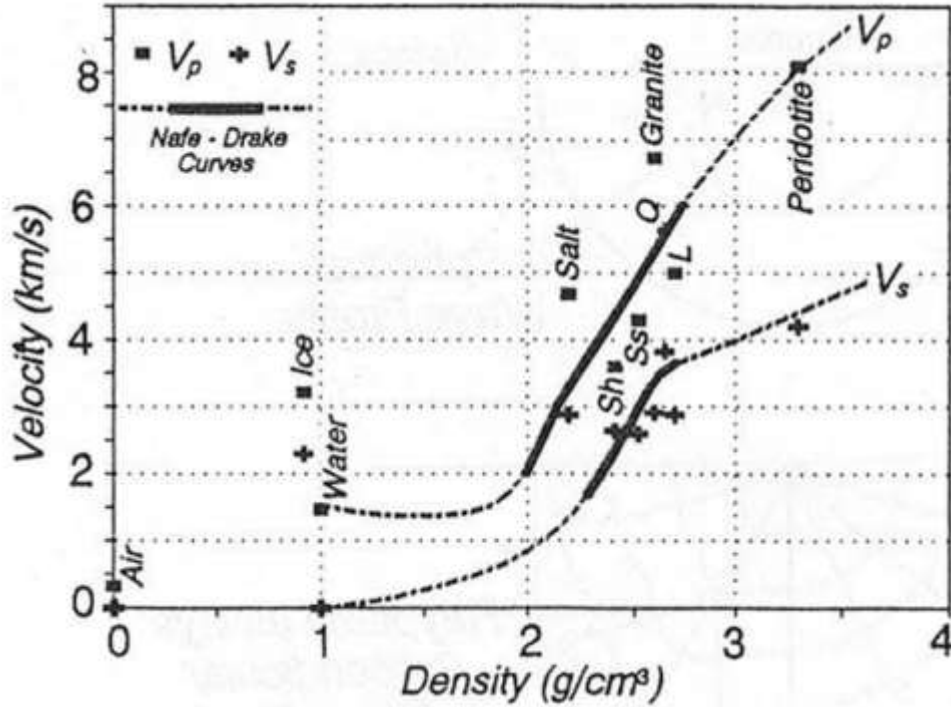


Figura 5: Gráfica de velocidad sísmica versus densidad de materiales (Robert J. Lillie, 1999).

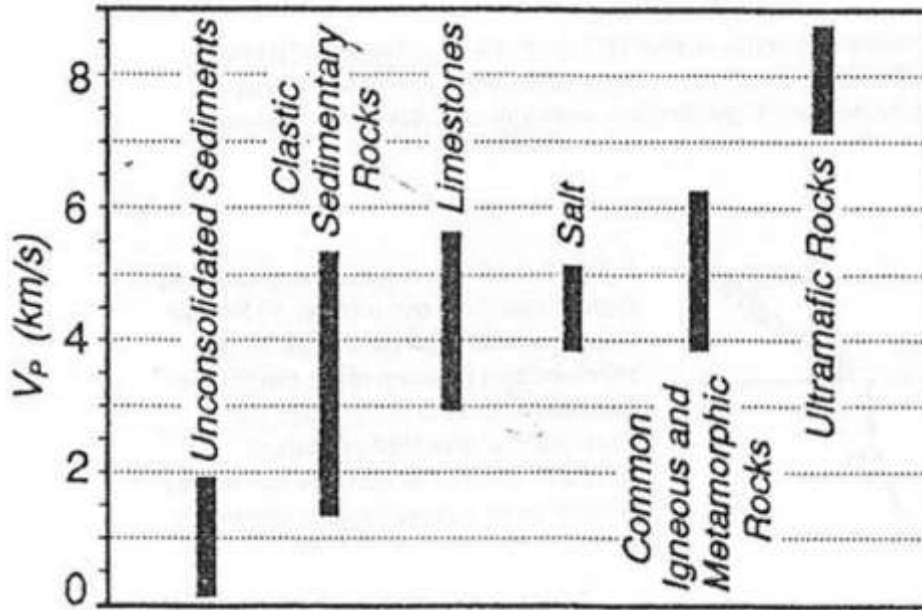


Figura 6: Rangos aproximados de velocidad de onda compresional para algunos suelos (Robert J. Lillie, 1999).

Tipos de ondas Superficiales

Las ondas superficiales pueden generarse cuando un medio posee un perímetro libre, tal como la superficie de la Tierra. A medida que la energía viaja a lo largo de la capa exterior de la tierra, la perturbación es mayor en la superficie, disminuyendo exponencialmente con la profundidad.

- c) Las ondas Rayleigh, son ondas superficiales caracterizadas por tener un movimiento “elíptico retrógrado”. La amplitud del movimiento decrece exponencialmente con la profundidad. Estas ondas se producen al interactuar las ondas P con las ondas S verticales al llegar a la superficie.
- d) Las ondas Love, son ondas superficiales que se producen de la interacción de las ondas S horizontales con la superficie de medios estratificados. Estas ondas no poseen componente vertical, se propagan con un movimiento de partículas perpendicular a la dirección de propagación, solo que polarizadas en el plano de la superficie de la Tierra, es decir, solo posee la componente horizontal a la superficie.

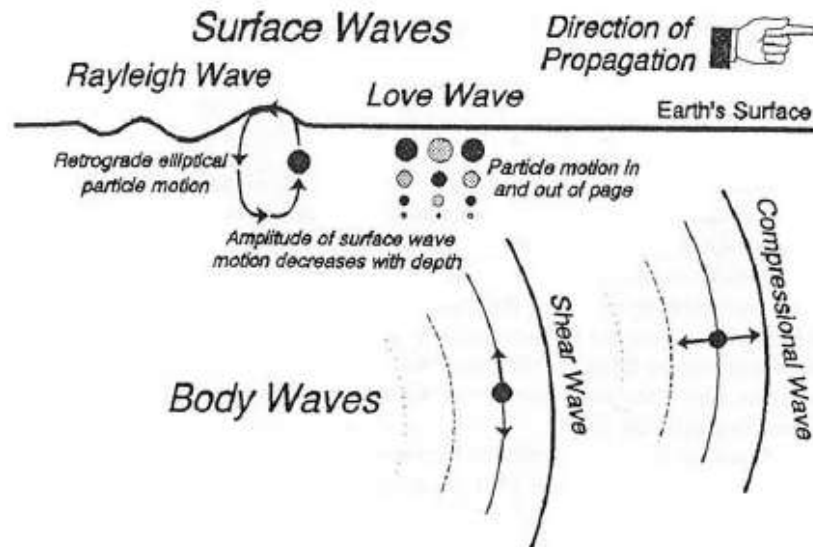


Figura 7: Movimientos de partícula de ondas superficiales (Robert J. Lillie, 1999).

Todas estas ondas descritas anteriormente, se muestran en la Figura 7 y Figura 8, donde se pueden apreciar las diferencias en los movimientos de partícula de cada tipo de onda.

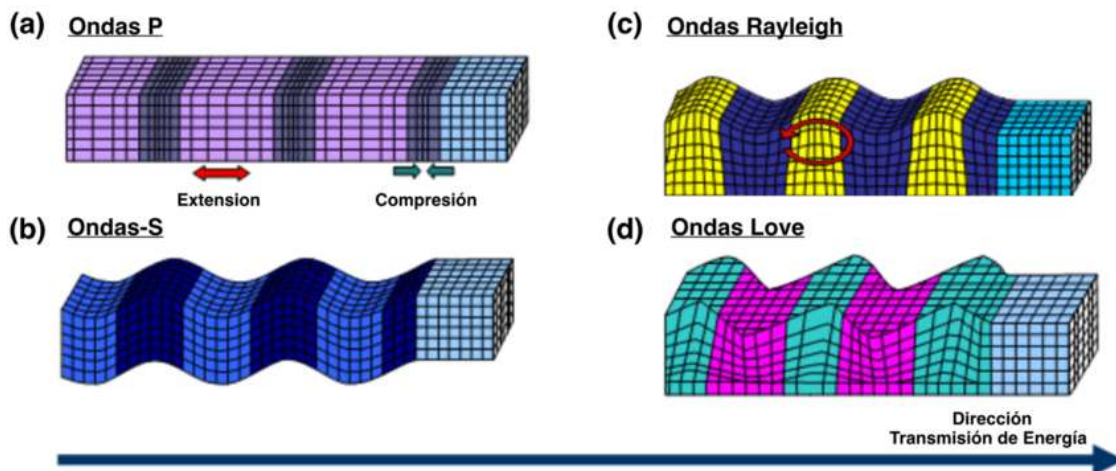


Figura 8: (a) Ondas P, (b) Ondas S, (c) Ondas Rayleigh y (d) Ondas Love.

2.3 Microtremores

De manera general, se utiliza el término “Ruido” para señalar las vibraciones del suelo producto del medio ambiente, causadas por fuentes como la marea, viento y su repercusión en edificios o árboles, maquinas industriales, tráfico automovilístico o de transeúntes, etc.

Diversos autores han clasificado el ruido ambiental dependiendo de la fuente y su frecuencia (Tabla 1), por lo que primero se debe señalar que existen dos tipos de ruidos ambientales de acuerdo a su origen: naturales y antropogénicos (artificiales). A grandes rasgos se podría clasificar las frecuencias en tres rangos: frecuencias bajas, menores a 1 Hz, que provienen de fuentes naturales, tales como el océano y condiciones meteorológicas de gran escala; frecuencias intermedias, rondando entre 1 Hz a 5 Hz, que también provienen de fuentes naturales, como las condiciones meteorológicas locales, pero también de fuentes antropogénicas; y por último las frecuencias altas, de frecuencias sobre 5 Hz, que tienen su origen primordialmente por fuentes antropogénicas.

Tabla 1: Síntesis de fuentes de ruido según frecuencia (Peck, L., 2008)

	Gutenberg (1958)	Asten (1978); Asten y Genstridge (1984)
Olas oceánicas que golpean la costa	0,05 - 0,1 Hz	0,5 - 1,2 Hz
Monzones / Perturbaciones meteorológicas a gran escala	0,1 - 0,25 Hz	0,16 - 0,5 Hz
Ciclones sobre el océano	0,3 - 1 Hz	0,5 - 3 Hz
Condiciones meteorológicas locales	1,4 - 5 Hz	-
Temblor producto de actividad volcánica	2 - 10 Hz	-
Urbano	1 - 100 Hz	1,4 - 30 Hz

Según Bard et al. (2003), en el análisis publicado del estudio de ruido como parte del programa SESAME (Site Effects Assessment using Ambient Excitations), realizaron la siguiente diferenciación:

- Para frecuencias bajo 0,5 Hz, las fuentes de ruido son naturales (oceánica y condiciones meteorológicas a gran escala) y este ruido es denominado como “microsismos”.
- Para frecuencias ~ 1 Hz, las fuentes son los efectos del viento y condiciones meteorológicas locales.
- Para frecuencias sobre 1 Hz, las fuentes son actividades humanas y el ruido es denominado como “microtremores”.

Nakamura (1989), reconoce que existen dos teorías para comprender el movimiento ondulatorio del microtremor, bajo la teoría de las ondas de cuerpo y ondas superficiales. Sin embargo, ambas teorías han intentado probar su respectiva validez sobre la base de medidas del microtremor, sin embargo, aún no se reconocen como establecidas. El microtremor, aunque no se conoce completamente, se ha utilizado con fines de ingeniería, como la estimación de la frecuencia predominante de las capas superficiales.

Los estudios de Bard et al. (2003), presentaron la proporción de ondas superficiales dentro de los rangos de frecuencias comúnmente estudiada en geofísica por diversos autores, y se aprecian en la Tabla 2, esto hace referencia a que hay una gran influencia de las ondas superficiales en los rangos de frecuencia para el ruido.

Tabla 2: Conclusiones de síntesis sobre la proporción de Ondas Rayleigh y Love en el ruido.

Autores	Rango de Frecuencia	Ondas Rayleigh [%]	Ondas Love [%]
Chouet et al. (1998) (volcanic tremor)	> 2 Hz	30%	70%
Yamamoto (2000)	3 - 10 Hz	<50%	>50%
Arai y Tokimatsu (1998)	1 - 12 Hz	30%	70%
Cornou (2002)	<1Hz	60%	40%

2.4 Efectos de Sitio

Los efectos de sitios corresponden a los cambios en amplitud, duración y contenido de frecuencia que experimentan las ondas sísmicas cuando atraviesan capas de suelo de distinta rigidez, debido al contraste de impedancia (cambio de rigidez) entre ellos. Si las ondas pasan de un estrato más duro a uno más blando existe una amplificación de las ondas asociadas a su frecuencia fundamental (Figura 9), y en el caso contrario ocurre una deamplificación de las mismas. Esto significa que, para una misma onda sísmica, sitios con diferentes características geotécnicas (por ejemplo: V_s , ρ , frecuencia fundamental) generarán una respuesta en superficie distinta, lo cual puede ser trascendente para las estructuras emplazadas en dichos lugares.

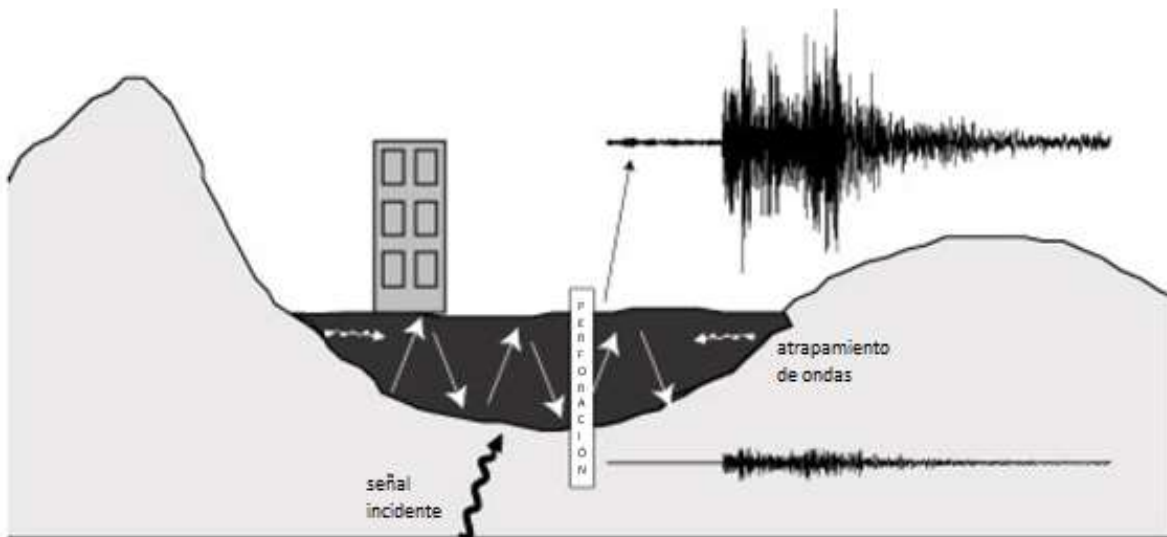


Figura 9: Esquema del efecto de sitio, registros de movimiento del suelo en la roca y en superficie (Bonney-Claudet, S. 2004).

Existen diferentes técnicas para acceder a los efectos del sitio:

- Métodos clásicos de prospección geofísica (reflexión y refracción sísmica, penetración, perforación), seguidos de una modelización numérica directa.
- Métodos experimentales basados en el análisis de los registros sísmicos en el lugar considerado, por comparación con un lugar de referencia, lo que permite medir directamente los efectos del lugar (cualquiera que sea su origen).

- Métodos basados en registros sísmicos de fondo (método de relación espectral H/V, análisis de redes), que dan información sobre la frecuencia de resonancia de un lugar (H/V), o sobre la naturaleza del subsuelo (redes).

Para efectos de esta investigación, se hará uso del tercer método mencionado anteriormente de relación espectral H/V, el llamado método "Nakamura", es uno de los métodos basados en el ruido más utilizados en el mundo para caracterizar los efectos de sitio y para la microzonificación sísmica.

2.5 Análisis de la respuesta del suelo

Uno de los problemas más frecuentes e importantes de la ingeniería sísmica-geotécnica es la evaluación de la respuesta del suelo. Estos análisis sobre la respuesta del suelo se utilizan para predecir los movimientos de la superficie del terreno y posterior desarrollo de los espectros de respuesta de diseño.

En condiciones ideales, un análisis completo de la respuesta del suelo se modelaría mediante el mecanismo de ruptura en el punto de origen del terremoto, propagándose las ondas a través de la tierra hasta llegar a la parte superior de la roca basal bajo un sitio particular, y luego determinaría cómo el movimiento de la superficie del suelo esta influenciado por los suelos que se encuentran por encima de esta roca basal. Este análisis es tan complicado y la naturaleza de la transmisión de energía entre la fuente y el lugar en superficie, es tan incierto el enfoque, que no es practico para las aplicaciones comunes de la ingeniería. En la práctica, se utilizan métodos empíricos basados en las características de los terremotos registrados, para desarrollar relaciones de predicción de diversos tipos (Kramer, S., 1996). Estas relaciones de predicción se utilizan frecuentemente junto con un análisis de riesgo sísmico para predecir las características del movimiento de la roca basal del sitio. Entonces, el problema del análisis de la respuesta del suelo radica en la determinación de la respuesta del depósito de suelo, debido al movimiento de la roca basal bajo este depósito.

Cuando una falla se rompe bajo la superficie terrestre (sismo), las ondas de cuerpo viajan en todas las direcciones, al encontrarse con distintos materiales geológicos, se reflejan y refractan. Los análisis unidimensionales de la respuesta de suelo se basan en que todas las capas de suelo son horizontales y que la respuesta del depósito de suelo es causada predominantemente por ondas de corte que se propagan verticalmente desde la roca basal subyacente.

2.5.1 Modelo viscoelástico

De manera semejante a un análisis dinámico de estructuras, en suelos resulta practico y muy útil asumir un comportamiento viscoelástico también. Se tiene que, bajo una sollicitación de esfuerzo de corte:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (2-4)$$

Donde τ_1 , considera una componente elástica caracterizada por el módulo de corte G ; y τ_2 , que considera la componente de naturaleza viscosa caracterizada por el parámetro c .

$$\tau_1 = G\gamma \quad ; \quad \tau_2 = c\dot{\gamma} = c \frac{d\gamma}{dt}$$

$$\Rightarrow \tau = G\gamma + c\dot{\gamma} \quad (2-5)$$

Al considerar una sollicitación del tipo sinusoidal, se obtiene la siguiente ecuación de equilibrio dinámico:

$$\tau_0 \text{sen}(\omega t - \varphi) = G\gamma + c\dot{\gamma} \quad (2-6)$$

Cuya solución particular en régimen permanente es del tipo:

$$\gamma = \gamma_0 \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (2-7)$$

Donde se tiene que:

$$\text{tg}(\varphi) = \frac{c\omega}{G} \quad ; \quad \gamma_0 = \frac{\tau_0}{G \sqrt{1 + \left(\frac{c\omega}{G}\right)^2}}$$

Luego, se puede obtener la componente viscosa:

$$\tau_2 = c\omega\gamma_0 \cos(\omega t - \varphi) = c\omega\gamma_0 \cdot (\sqrt{1 - \text{sen}^2(\omega t - \varphi)}) \quad (2-8)$$

Reemplazando el valor de $\text{sen}(\omega t - \varphi)$ de la ecuación (2-7) en (2-8):

$$\tau_2 = c\omega\gamma_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^2} \quad (2-9)$$

Si reordenamos esta expresión, obtenemos:

$$\frac{\tau_2^2}{(c\omega\gamma_0)^2} + \frac{\gamma^2}{\gamma_0^2} = 1 \quad (2-10)$$

Esta expresión presenta que la componente viscosa genera una elipse. Se puede visualizar las gráficas de las componentes de este modelo en la Figura 10.

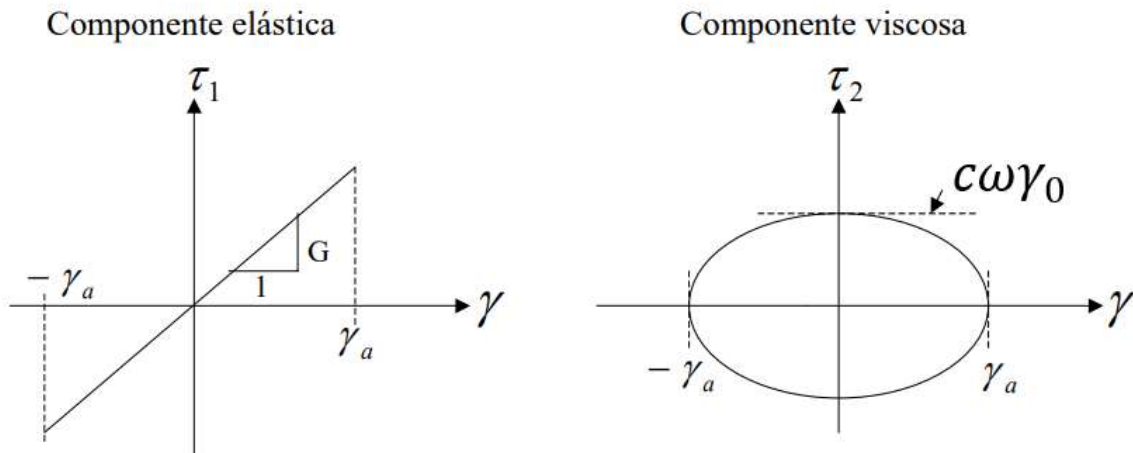


Figura 10: Componentes elástica y viscosa del modelo viscoelástico del suelo (Verdugo, R., 2009)

La disipación de energía que desarrolla el modelo presentado, está asociada con el área de la elipse, la cual queda expresado como:

$$A_{\text{elipse}} = \pi c \omega \gamma_0^2 \quad (2-11)$$

Para un ciclo de sollicitación, se define la razón de amortiguamiento D , como la disipación total de energía normalizada por la energía elástica que se le entrega al sistema y dividida por 4π :

$$D = \frac{\pi c \omega \gamma_0^2}{4\pi \left(\frac{1}{2} G \gamma_0\right) \gamma_0} = \frac{c \omega}{2G} \quad (2-12)$$

Esto quiere decir, que al modelarse con un amortiguamiento $c = \text{constante}$, la disipación de energía será directamente proporcional a la frecuencia de excitación. Esta aseveración no concuerda con lo observado en suelos que presentan ciclos de carga y descarga independientes de la frecuencia de excitación, con un amortiguamiento histerético. Esta incompatibilidad se soluciona utilizando un valor de amortiguamiento c variable. El parámetro de amortiguamiento c aparece en todas las expresiones de interés siempre como:

$$2D = \frac{c \omega}{G} \quad (2-13)$$

La determinación de D a partir de ensayos resulta en una propiedad del material independiente de la frecuencia.

2.5.2 Propagación unidimensional de ondas de corte

Como se explicó en el apartado 2.5, el depósito horizontal de suelos es considerado de propiedad uniforme, por el cual se produce una propagación vertical de ondas de cortes que parten desde la roca basal, atravesando un depósito de suelo hasta llegar a la superficie del terreno.

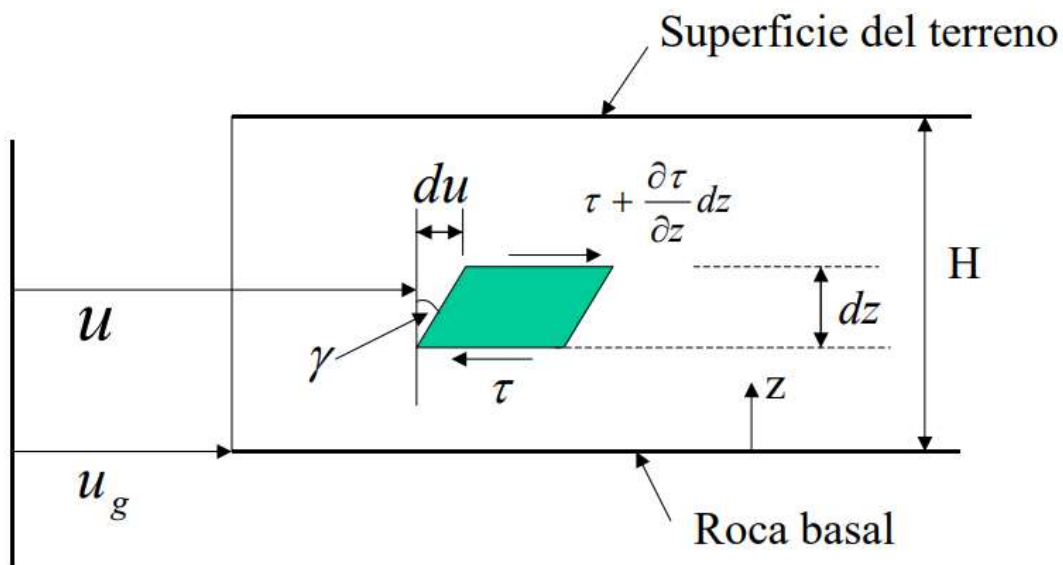


Figura 11: Esquema del depósito horizontal de suelos, sometido a una perturbación de corte basal (Verdugo, R., 2009)

El conjunto de ondas de corte de propagación vertical que excita la base, se considera de forma sinusoidal, de modo que genera una aceleración basal del tipo:

$$\ddot{u}_g = a_b \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (2-14)$$

Si formulamos el equilibrio dinámico de un elemento de suelo sometido a una sollicitación de corte, representado en la Figura 11, se obtiene:

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} dz A_{hor} = \rho A_{hor} dz \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2-15)$$

En donde ρ es la densidad de masa, y A_{hor} representa el área horizontal del elemento sobre la cual se esta aplicando el esfuerzo de corte.

Si se considera que el suelo posee un comportamiento viscoelástico presentado en la ecuación (2-5), se tiene que:

$$\tau = G \frac{\partial u}{\partial z} + c \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z} \quad (2-16)$$

Reemplazando esta expresión en la ecuación de equilibrio dinámico (2-15), se obtiene la ecuación de onda siguiente:

$$G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + c \frac{\partial^3 u}{\partial t \partial z^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2-17)$$

Ahora introduciendo la variable $y = u - u_g$, que corresponde al movimiento relativo del suelo con respecto de la base, se tiene que:

$$G \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} + c \frac{\partial^3 y}{\partial t \partial z^2} = \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \rho \frac{\partial^2 u_g}{\partial t^2} \quad (2-18)$$

Luego, para una excitación del tipo sinusoidal:

$$\ddot{u}_g = a_b e^{i\omega t} \quad (2-19)$$

La ecuación de ondas se puede escribir de la siguiente manera:

$$G \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} + c \frac{\partial^3 y}{\partial t \partial z^2} - \rho a_b e^{i\omega t} = \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2-20)$$

Antes de ver la solución completa de la ecuación, es interesante ver el comportamiento de la vibración libre de un depósito de suelo que no posee amortiguamiento. Para poder hacerlo, basta con hacer los parámetros $a_b = 0$ ($u_g = 0 \rightarrow y = u$) y $c = 0$, transformándose la ecuación en:

$$G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (2-21)$$

La solución a este tipo de ecuación es:

$$u = f(z + vt) + g(z - vt) \quad (2-22)$$

Donde v es una constante que se determina reemplazando esta solución en la ecuación anterior:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = f'' + g'' \quad (2-23)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (f'' + g'')v^2 \quad (2-24)$$

Reemplazando estas expresiones, el valor de la constante resulta:

$$G - \rho v^2 = 0 \rightarrow v = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-25)$$

Esta variable v corresponde a la velocidad de propagación de onda de corte V_s , puesto que se esta analizando una onda de corte puro, demostrando la expresión presentada en la ecuación (2-3) del apartado 2.2.1.

2.5.3 Amplitud del movimiento dentro del depósito y en superficie

La solución de la ecuación de onda (2-20), permite conocer la amplitud del movimiento dentro del depósito y en la superficie. La solución matemática esta compuesta por dos partes, una que corresponde a la vibración libre del suelo, que cuando el suelo posee amortiguamiento, tiende a desaparecer, y la otra parte, que corresponde a la vibración forzada que representa la respuesta en régimen permanente. Esta última es la solución que se utiliza y se expresa de la siguiente manera:

$$y = U(z)e^{i\omega t} \quad (2-26)$$

Derivando se tiene:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\omega^2 U e^{i\omega t} \quad (2-27)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{d^2 U}{dz^2} e^{i\omega t} \quad (2-28)$$

$$\frac{\partial^3 y}{\partial t \partial z^2} = i\omega \frac{d^2 U}{dz^2} e^{i\omega t} \quad (2-29)$$

Reemplazando en la ecuación de onda (2-20), se obtiene:

$$G \frac{d^2 U}{dz^2} e^{i\omega t} + c \frac{d^2 U}{dz^2} i\omega e^{i\omega t} - \rho a_b e^{i\omega t} = \rho \omega^2 U e^{i\omega t} \quad (2-30)$$

Reordenando:

$$(G + i\omega c) \frac{d^2 U}{dz^2} + \rho \omega^2 U = \rho a_b \quad (2-31)$$

La solución homogénea corresponde a:

$$(G + i\omega c) \frac{d^2 U}{dz^2} + \rho \omega^2 U = 0 \quad (2-32)$$

Reescribiendo:

$$\frac{d^2 U}{dz^2} + \frac{\rho \omega^2}{G + i\omega c} U = 0 \quad (2-33)$$

Se define la siguiente expresión:

$$p^2 = \frac{\rho \omega^2}{G + i\omega c} \quad (2-34)$$

Entonces, reemplazando (2-34) en (2-33):

$$\frac{d^2 U}{dz^2} + p^2 U = 0 \quad (2-35)$$

Luego, la solución homogénea es:

$$U_h = B_1 \cos(pz) + B_2 \operatorname{sen}(pz) \quad (2-36)$$

Donde B_1 y B_2 son constantes. Por otro lado, la solución particular de esta ecuación diferencial ordinaria es:

$$U_p = \frac{a_b}{\omega^2} \quad (2-37)$$

Por lo que la solución completa es:

$$U = B_1 \cos(pz) + B_2 \operatorname{sen}(pz) + \frac{a_b}{\omega^2} \quad (2-38)$$

Teniendo las siguientes condiciones de borde:

- A nivel de la roca basal:

$$u(z=0) = u_g \Rightarrow y = 0 \Rightarrow U(0) = 0$$

- A nivel de superficie del terreno:

$$\tau(z=H) = 0 \Rightarrow \gamma(z=H) = 0 \Rightarrow \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z=H} = 0 \Rightarrow \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_{z=H} = 0$$

Con estas condiciones, se obtiene los valores de las constantes:

$$B_1 = -\frac{a_b}{\omega^2} ; B_2 = -\frac{a_b}{\omega^2} \operatorname{tg}(pH)$$

Reemplazando en la solución completa:

$$U = -\frac{a_b}{\omega^2} \cos(pz) - \frac{a_b}{\omega^2} \operatorname{tg}(pH) \operatorname{sen}(pz) + \frac{a_b}{\omega^2} \quad (2-39)$$

Recordando que $u = y + u_g$, el movimiento absoluto se representa como:

$$u = -\frac{a_b}{\omega^2} [\cos(pz) + \operatorname{tg}(pH) \operatorname{sen}(pz)] e^{i\omega t} \quad (2-40)$$

Por lo tanto, la aceleración absoluta queda expresada por:

$$\ddot{u}(z = H) = \ddot{u}_{sup} = \frac{a_b}{\cos(pH)} e^{i\omega t} \quad (2-41)$$

2.5.4 Amplitud de roca basal - superficie del depósito de suelos

Para este estudio, es importante establecer la magnitud de la amplificación o atenuación que se pueda generar a través del depósito de suelos. Una manera directa es definiendo el factor de aplicación A_1 , como una razón entre la amplitud de la aceleración en superficie y la amplitud de la aceleración a nivel de la roca basal, como se puede apreciar en la

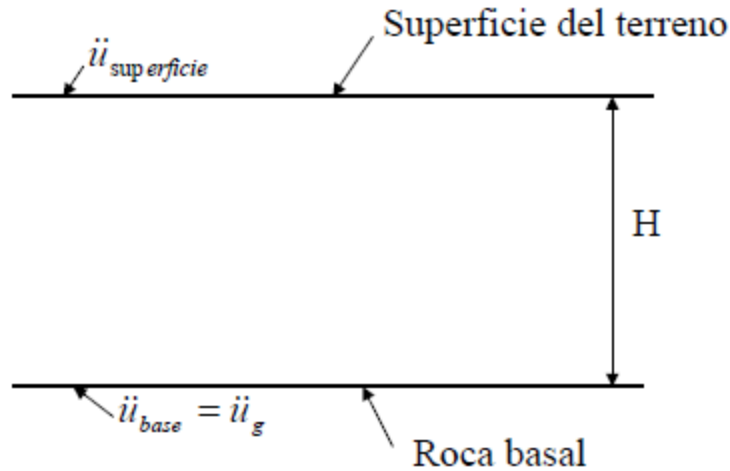


Figura 12: Amplitud de aceleración a nivel de la roca basal y en superficie (Verdugo, R., 2009).

El factor de amplificación se define mediante la siguiente expresión:

$$A_1 = \frac{\ddot{u}_{sup}}{\ddot{u}_{base}} \quad (2-42)$$

Reemplazando las variables $z = H$ y $z = 0$, para superficie y base respectivamente en la ecuación (2-41):

$$A_1 = \frac{\frac{a_b}{\cos(pH)} e^{i\omega t}}{\frac{a_b}{\cos(0)} e^{i\omega t}} = \frac{1}{\cos(pH)} \quad (2-43)$$

Considerando que:

$$p^2 = \frac{p\omega^2}{G + c\omega i} = \frac{\rho\omega^2}{G} \left[\frac{1}{1 + \frac{c\omega i}{G}} \right] = \frac{\rho\omega^2}{G} \times \frac{1 - \frac{c\omega}{G} i}{1 + \left(\frac{c\omega}{G}\right)^2} \quad (2-44)$$

Entonces,

$$\Rightarrow pH = \omega H \sqrt{\frac{\rho}{G}} \frac{\sqrt{1 - \frac{c\omega}{G}i}}{\sqrt{1 + \left(\frac{c\omega}{G}\right)^2}} \quad (2-45)$$

Sea,

$$d = \frac{c\omega}{G} \quad (2-46)$$

Con lo cual,

$$\Rightarrow pH = \omega H \sqrt{\frac{\rho}{G}} \frac{\sqrt{1 - di}}{\sqrt{1 + d^2}} \quad (2-47)$$

Recordemos que:

$$\begin{aligned} a + bi &= r[\cos\alpha + isen\alpha] \\ (a + bi)^n &= r^n[\cos n\alpha + isen n\alpha] \end{aligned} \quad (2-48)$$

Donde:

$$r = \sqrt{a^2 + b^2} \quad ; \quad \operatorname{tg}\alpha = b/a$$

Entonces se tiene:

$$\begin{aligned} \sqrt{1 - di} &= \left[\sqrt{1 + d^2}\right]^{1/2} \left[\cos\frac{\alpha}{2} + isen\frac{\alpha}{2}\right] \quad \text{con} \quad \operatorname{tg}\alpha = -d \\ &= \sqrt{\sqrt{1 + d^2}} \left[\sqrt{\frac{1 + \cos\alpha}{2}} + i\sqrt{\frac{1 - \cos\alpha}{2}}\right] \quad \begin{aligned} \cos\frac{\alpha}{2} &= \sqrt{\frac{1 + \cos\alpha}{2}} \\ \operatorname{sen}\frac{\alpha}{2} &= \sqrt{\frac{1 - \cos\alpha}{2}} \end{aligned} \end{aligned}$$

Pero:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\alpha = -d &\Rightarrow \cos\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + d^2}} \\ \Rightarrow \sqrt{1 - di} &= \sqrt{\sqrt{1 + d^2}} \left[\sqrt{\frac{1 + \frac{1}{\sqrt{1 + d^2}}}{2}} + i\sqrt{\frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + d^2}}}{2}}\right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{\frac{\sqrt{1+d^2}}{2}} \left[\frac{\sqrt{\sqrt{1+d^2}+1}}{\sqrt{\sqrt{1+d^2}}} + i \frac{\sqrt{\sqrt{1+d^2}-1}}{\sqrt{\sqrt{1+d^2}}} \right] \\
&= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\sqrt{\sqrt{1+d^2}+1} + i \sqrt{\sqrt{1+d^2}-1} \right] \\
\Rightarrow pH &= \frac{\omega H \sqrt{\rho/G}}{\sqrt{2} \sqrt{1+d^2}} \left[\sqrt{\sqrt{1+d^2}+1} + i \sqrt{\sqrt{1+d^2}-1} \right] \quad (2-49)
\end{aligned}$$

Sean:

$$\begin{aligned}
\alpha &= \omega H \sqrt{\frac{\rho}{2G}} \frac{\sqrt{\sqrt{1+d^2}+1}}{\sqrt{1+d^2}} \\
\beta &= \omega H \sqrt{\frac{\rho}{2G}} \frac{\sqrt{\sqrt{1+d^2}-1}}{\sqrt{1+d^2}}
\end{aligned}$$

Reemplazando estas variables, queda:

$$\cos pH = \cos(\alpha + \beta i) = \cos \alpha \cos \beta i - \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \beta i \quad (2-50)$$

Pero,

$$\begin{aligned}
\operatorname{sen} hxi &= \frac{e^{xi} - e^{-xi}}{2} = \frac{1}{2} [\cos x + i \operatorname{sen} x - \cos x + i \operatorname{sen} x] = i \operatorname{sen} x \\
\Rightarrow i \operatorname{sen} ix &= \operatorname{sen} h(-x) = -\operatorname{sen} hx \rightarrow \operatorname{sen} ix = i \operatorname{sen}(x)
\end{aligned}$$

Además:

$$\begin{aligned}
\operatorname{cosh} xi &= \frac{e^{xi} + e^{-xi}}{2} = \frac{1}{2} [\cos x + i \operatorname{sen} x + \cos x - i \operatorname{sen} x] = \cos x \\
\Rightarrow \cos xi &= \operatorname{cosh}(-x) = \operatorname{cosh}(x)
\end{aligned}$$

Esto permite obtener,

$$\cos pH = \cos \alpha \cdot \operatorname{cosh} \beta - i \operatorname{sen} \alpha \cdot \operatorname{sen} h\beta \quad (2-51)$$

Con esto se obtiene la siguiente expresión del factor de amplificación:

$$A_1(\omega) = \frac{1}{\cos \alpha \cdot \operatorname{cosh} \beta - i \operatorname{sen} \alpha \cdot \operatorname{sen} h\beta} \quad (2-52)$$

De esta expresión, lo importante es el módulo del factor de amplificación:

$$\|A_1(\omega)\| = \frac{1}{\cos\alpha \cdot \cosh\beta - i\operatorname{sen}\alpha \cdot \sinh\beta} \quad (2-53)$$

Si analizamos el caso sin amortiguamiento ($d = 0$), se tiene que:

$$\alpha = \omega H \sqrt{\frac{\rho}{G}} = \frac{\omega H}{V_s}$$

$$\beta = 0$$

Con lo cual resulta:

$$\|A_1(\omega)\| = \frac{1}{\cos\alpha} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{V_s}\right)} \quad (2-54)$$

Para que la máxima amplificación ocurra, el valor de $\cos\alpha = 0$, condición en la cual esta amplificación tiende a infinito (puesto que no hay amortiguamiento). Esta condición se cumple cuando:

$$\cos\left(\frac{\omega H}{V_s}\right) = 0 \rightarrow \frac{\omega H}{V_s} = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2} \dots \quad (2-55)$$

Esto indica que existen frecuencias de excitación ω , que maximizan la respuesta del depósito de suelos. Estas pueden ser consideradas como frecuencias de resonancia, por lo que coinciden con las frecuencias de vibración del suelo. Entonces, las frecuencias fundamentales de vibración de un estrato de suelo son (Figura 13):

$$\omega = \frac{\pi V_s}{2H}, \frac{3\pi V_s}{2H}, \frac{5\pi V_s}{2H} \dots$$

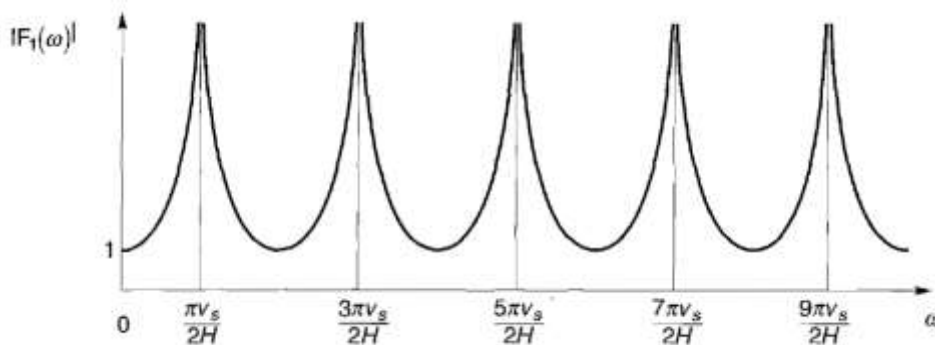


Figura 13: Influencia de la frecuencia en la respuesta de un depósito de suelos no amortiguado (Kramer, S., 1996).

Incluso este modelo sencillo ilustra que una respuesta de un depósito de suelos depende en gran medida de la frecuencia del movimiento de la roca basal, y que las frecuencias a las que se produce una fuerte amplificación dependen de la geometría (espesor) y de las propiedades del material (velocidad de onda de corte) de la capa de suelo.

Expresando la ecuación (2-55) en periodos fundamentales de vibración son:

$$T = \frac{4H}{V_s}, \frac{4H}{3V_s}, \frac{4H}{5V_s}, \dots \quad (2-56)$$

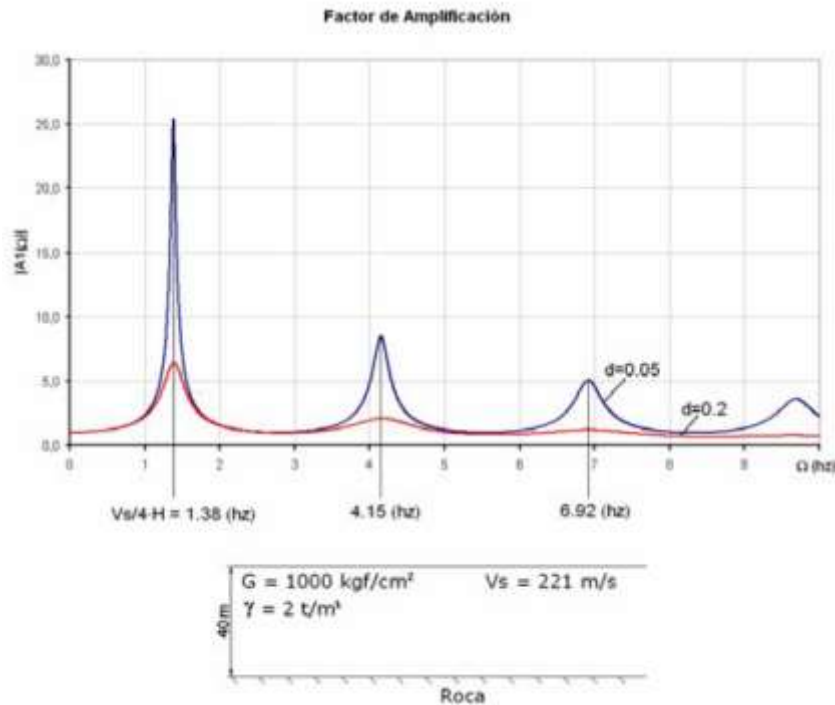


Figura 14: Influencia de la frecuencia en la respuesta de un depósito de suelos amortiguado (Verdugo, R., 2009).

En la Figura 14 se presenta el factor de amplificación A_1 en función de la frecuencia de excitación para el depósito de suelos indicado, considerando un caso no amortiguado y otro con un nivel medio de amortiguamiento. Se observa de manera clara el efecto de la frecuencia y el amortiguamiento en el nivel de amplificación de la respuesta en superficie. La comparación entre la Figura 13 y Figura 14, indica que la amortiguación afecta más a la respuesta en las frecuencias altas que en las bajas.

Dado que el factor de amplificación máximo disminuye al aumentar la frecuencia natural, el mayor factor de amplificación se producirá aproximadamente en la frecuencia natural mas baja, también conocida como la frecuencia fundamental:

$$\omega_0 = \frac{\pi V_s}{2H} \quad (2-57)$$

El periodo de vibración correspondiente a esta frecuencia fundamental es denominado como el periodo fundamental del suelo:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{4H}{V_s} \quad (2-58)$$

El periodo fundamental del suelo depende únicamente del espesor del depósito de suelo y de la velocidad de onda de corte del estrato, esto proporciona una indicación muy útil del periodo de vibración en el que se espera una amplificación más significativa.

En cada frecuencia natural, se desarrolla una onda estacionaria en el suelo. En la Figura 15, se muestran los modos de las deformadas normalizadas, o modos de vibrar, para las primeras tres frecuencias naturales. Observar que, en las frecuencias superiores a la fundamental, una parte del depósito de suelo puede moverse en una dirección, mientras que otra parte se mueve en la dirección opuesta.

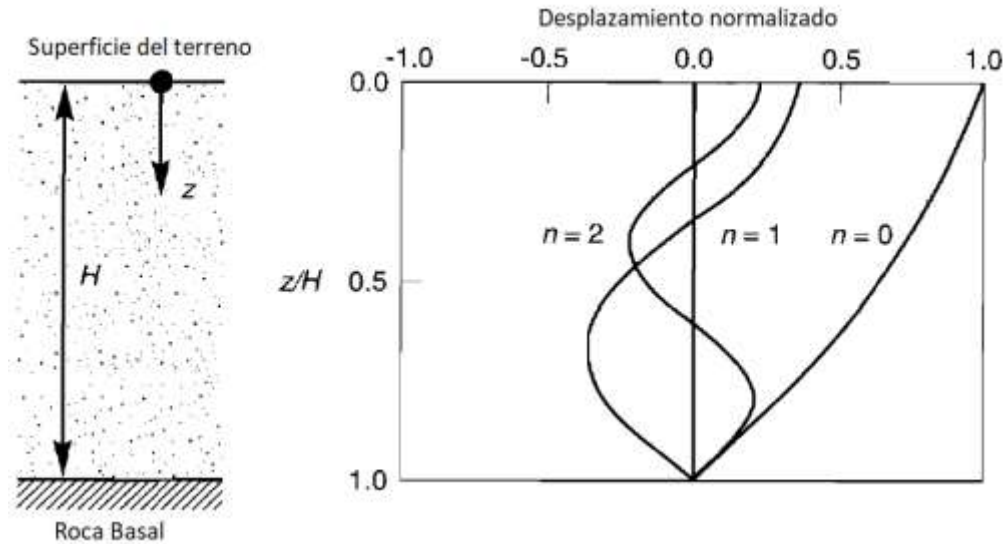


Figura 15: Patrones de desplazamiento para ondas estacionarias en las frecuencias naturales del suelo, con un amortiguamiento de 5% (Kramer, S., 1996).

2.5.5 Respuesta de depósito de suelos con “n” estratos

Generalmente en la realidad, los depósitos de suelos están constituidos por una secuencia de varios estratos con propiedades diferentes. En la Figura 16, se presenta la situación con un depósito de “n” estratos.

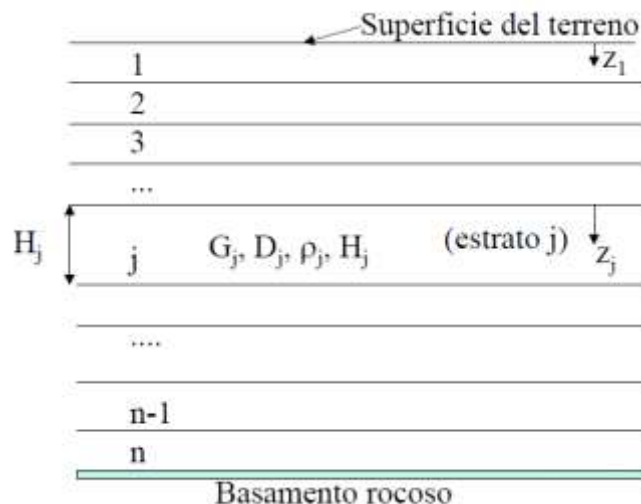


Figura 16: Esquema de depósito de suelo con “n” estratos (Verdugo, R., 2009).

Para abordar este problema, primero es útil presentar la solución de la ecuación de ondas como:

$$u = y + u_g = [E e^{ipz} + F e^{-ipz}] e^{i\omega t}$$

$$u = E e^{i(pz+\omega t)} + F e^{-i(pz-\omega t)} \quad (2-59)$$

Las condiciones de borde se establecerán considerando un sistema coordenado local en cada estrato desde su parte superior hacia abajo. Luego, en la superficie del depósito de suelos ($z_1 = 0$), se cumple que:

$$\begin{aligned} \tau = 0 \rightarrow \gamma = 0 \rightarrow \frac{\partial u}{\partial z} &= 0 \\ \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z_1=0} = 0 &\Rightarrow ((E_1 ip - F_1 ip)e^{i\omega t} = 0) \\ &\Rightarrow E_1 = F_1 \\ \Rightarrow u &= E_1 [e^{i(pz+\omega t)} + e^{-i(pz-\omega t)}] \end{aligned} \quad (2-60)$$

Con esto, se tiene que en la superficie del primer estrato se cumple que:

$$u_{sup} = 2E_1 e^{i\omega t} \quad (2-61)$$

Por otra parte, la solución de la ecuación de ondas debe cumplirse en cada estrato, por lo tanto:

$$u_j = E_j e^{i(p_j z_j + \omega t)} + F_j e^{-i(p_j z_j - \omega t)} \quad (2-62)$$

En el contacto entre los estratos j y $(j + 1)$, se tienen las siguientes dos condiciones de borde:

$$\begin{aligned} u_j(z_j = H_j) &= u_{j+1}(z_{j+1} = 0) \\ \tau_j(z_j = H_j) &= \tau_{j+1}(z_{j+1} = 0) \end{aligned}$$

De la primera condición de borde, se obtiene que:

$$E_{j+1} + F_{j+1} = E_j e^{ip_j H_j} + F_j e^{-ip_j H_j} \quad (2-63)$$

Por otro lado, se tiene que:

$$\begin{aligned} \tau_j &= G_j \left(\frac{\partial u_j}{\partial z_j}\right) + c_j \left(\frac{\partial^2 u_j}{\partial t \partial z}\right) = (G_j + ic_j \omega) \frac{\partial u_j}{\partial z_j} \\ \tau_j &= (G_j + ic_j \omega)(E_j e^{ip_j z_j} - F_j e^{-ip_j z_j}) ip_j e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (2-64)$$

Utilizando esta expresión en la segunda condición de borde, se tiene que:

$$(G_j + ic_j \omega)(E_j e^{ip_j H_j} - F_j e^{-ip_j H_j}) p_j = (G_{j+1} + ic_{j+1} \omega)(E_{j+1} - F_{j+1}) p_{j+1}$$

$$\Rightarrow E_{j+1} - F_{j+1} = \frac{(G_j + ic_j \omega)}{(G_{j+1} + ic_{j+1} \omega)} \frac{p_j}{p_{j+1}} (E_j e^{ip_j H_j} - F_j e^{-ip_j H_j})$$

Sea:

$$\Delta_j = \frac{(G_j + ic_j \omega)}{(G_{j+1} + ic_{j+1} \omega)} \frac{p_j}{p_{j+1}} = \frac{\sqrt{\rho_j G_j (1 + i \frac{c_j \omega}{G_j})}}{\sqrt{\rho_{j+1} G_{j+1} (1 + i \frac{c_{j+1} \omega}{G_{j+1}})}}$$

$$\Delta_j = \frac{\sqrt{\rho_j G_j}}{\sqrt{\rho_{j+1} G_{j+1}}} \frac{\sqrt{(1 + d_j i)}}{\sqrt{(1 + d_{j+1} i)}} \quad (2-65)$$

Luego, la expresión de la segunda condición de borde queda:

$$E_{j+1} - F_{j+1} = \Delta_j (E_j e^{ip_j H_j} - F_j e^{-ip_j H_j}) \quad (2-66)$$

De (2-63) y (2-66):

$$E_{j+1} = \frac{1}{2} [E_j (1 + \Delta_j) e^{ip_j H_j} + F_j (1 - \Delta_j) e^{-ip_j H_j}] \quad (2-67)$$

$$F_{j+1} = \frac{1}{2} [E_j (1 - \Delta_j) e^{ip_j H_j} + F_j (1 + \Delta_j) e^{-ip_j H_j}] \quad (2-68)$$

Debemos recordar que $E_1 = F_1$, es posible establecer los valores de E_2 y F_2 en función de E_1 :

$$E_2 = \frac{1}{2} [(1 + \Delta_j) e^{ip_j H_j} + (1 - \Delta_j) e^{-ip_j H_j}] E_1$$

$$F_2 = \frac{1}{2} [(1 - \Delta_j) e^{ip_j H_j} + (1 + \Delta_j) e^{-ip_j H_j}] E_1$$

De esta manera con estas expresiones recursivas, es posible establecer los valores de E_3 y F_3 , en función de F_1 y así sucesivamente para los demás estratos. Se puede entonces establecer para el estrato de roca que:

$$E_{roca} = M E_1 \quad (2-69)$$

$$F_{roca} = N E_1 \quad (2-70)$$

Entonces es posible evaluar el factor de amplificación de roca basal - superficie del terreno:

$$A_1 = \frac{u_1(z_1 = 0)}{u_{roca}(z_{roca} = 0)} = \frac{2 E_1 e^{i\omega t}}{(E_{n+1} + F_{n+1}) e^{i\omega t}}$$

$$\Rightarrow A_1 = \frac{2E_1}{ME_1 + NE_1} = \frac{2}{M + N} \quad (2-71)$$

Análogamente, es posible establecer el factor de amplificación respecto de un afloramiento rocoso:

$$A_2 = \frac{u_1(z_1 = 0)}{u_{\text{afloramiento}}(z_{\text{afloramiento}} = 0)} = \frac{2E_1 e^{i\omega t}}{2E_{\text{afloramiento}} e^{i\omega t}}$$

$$A_2 = \frac{1}{M} \quad (2-72)$$

De esta forma resulta posible relacionar el movimiento en un estrato con el que ocurre en otro:

$$A_{ij}(\omega) = \frac{u_i}{u_j} = \frac{M_i + N_i}{M_j + N_j} \quad (2-73)$$

El factor de amplificación también puede ser considerado como una función de transferencia entre los estratos i y j .

2.5.6 Aproximación lineal equivalente de la respuesta no lineal

Dado que la no linealidad del comportamiento del suelo es bien conocida, un enfoque lineal debe ser modificado para proporcionar estimaciones razonables de la respuesta del suelo para los problemas prácticos de interés. El comportamiento real no lineal de esfuerzo-deformación histerético de los suelos cargados cíclicamente puede ser aproximado por las propiedades lineales equivalentes del suelo. El módulo de corte lineal equivalente G , se considera generalmente como un módulo de corte secante y la relación de amortiguamiento lineal equivalente D , como la relación de amortiguamiento que produce la misma pérdida de energía en un solo ciclo de histéresis real.

Como este enfoque lineal requiere del valor de G y D para cada capa de suelo, el problema se convierte en determinar estos valores que deben ser consistentes con el nivel de deformación inducido en cada capa de suelo. En la Figura 17 se presentan resultados típicos de la variación del módulo de corte G normalizado y la razón de amortiguamiento D , con el nivel de deformación. Se puede observar que a mayor deformación, el módulo de corte disminuye y la razón de amortiguamiento aumenta. Distintos suelos tienen diferentes curvas, sin embargo, en general, es posible agruparlos de acuerdo a su granulometría según el tipo que sea, arcillas, limos, arenas y gravas.

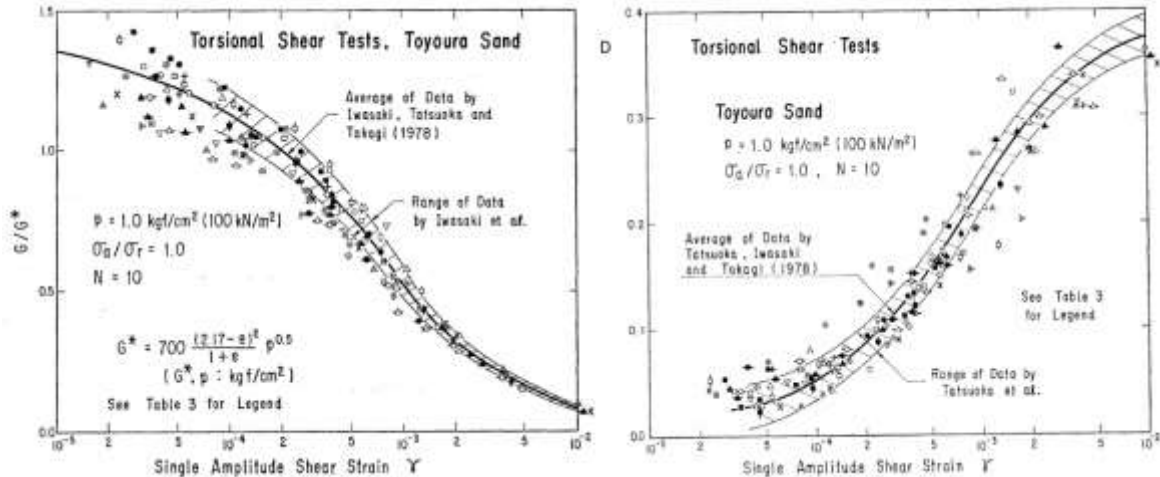


Figura 17: Curvas típicas de módulo de corte y razón de amortiguamiento (Tatsuoka, F. et al. 1979).

Los desarrollos matemáticos utilizados anteriormente consideran que G y D son constantes, sin embargo, la evidencia empírica demuestra claramente una dependencia de estos parámetros con el nivel de deformación del suelo. Por lo tanto, se ha desarrollado un método lineal equivalente, el cual consiste en asumir inicialmente valores de G y D , con los cuales se realiza el cálculo. En este cálculo se determina el nivel medio de deformación efectiva (usualmente $0.65\gamma_{max}$) y con ésta se re evalúan los parámetros G y D . De existir coincidencia con los valores adoptados, se concluye el cálculo; de lo contrario se vuelve a repetir el análisis con los nuevos valores de G y D . Este es un proceso iterativo, que se realiza hasta obtener coincidencia de valores G y D adoptados, con el nivel de deformación efectiva resultante.

El procedimiento iterativo opera de la siguiente forma:

1. Estimación inicial de G y D para cada estrato. Los valores estimados inicialmente suelen corresponder al mismo nivel de deformación; a menudo se utilizan los valores de baja deformación para la estimación inicial.
2. Con los valores estimados de G y D , se utilizan para calcular la respuesta del suelo, incluyendo registros de esfuerzos y deformaciones.
3. La deformación angular efectiva se determina para cada estrato:

$$\gamma_{effj}^{(i)} = R_{\gamma} \gamma_{maxj}^{(i)} \quad (2-74)$$

R_{γ} es la razón entre deformación angular efectiva y la deformación angular máxima, y depende de la magnitud del terremoto M (Idress y Sun, 1992), este parámetro puede ser estimado como:

$$R_{\gamma} = \frac{M - 1}{10} \quad (2-75)$$

4. A partir del esfuerzo cortante efectivo, se evalúan nuevos valores lineales equivalentes $G^{(1+i)}$ y $D^{(1+i)}$ para la siguiente iteración.
5. Los pasos 2 y 4 se repiten hasta que las diferencias entre los valores calculados del módulo de corte, y de la relación de amortiguamiento en dos iteraciones sucesivas disminuyan por debajo de algún valor predeterminado en todos los estratos. A pesar de que la convergencia no está absolutamente garantizada, normalmente se

consiguen diferencias inferiores al 5-10% en tres o cinco iteraciones (Schnabel et al., 1972).

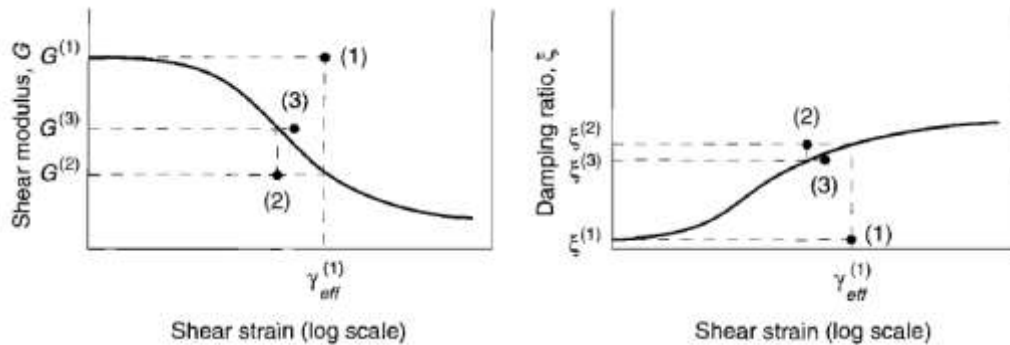


Figura 18: Procedimiento iterativo del método lineal equivalente (Kramer, S., 1996).

Cabe destacar que este proceso de iteración permite aproximar el comportamiento no lineal del suelo, por lo que sigue siendo un método lineal de análisis. Las propiedades del suelo compatibles con la deformación son constantes durante todo el transcurso de un terremoto, independientemente si las deformaciones en algún momento sean pequeñas o grandes. El método es incapaz de representar cambios de rigidez del suelo que se producen realmente durante un terremoto.

3 RELACIÓN ESPECTRAL H/V

3.1 Introducción

En zonas muy urbanizadas, donde el riesgo sísmico puede ser elevado (recuérdese que el riesgo sísmico es una combinación de riesgo y vulnerabilidad), el uso de métodos geofísicos convencionales suele ser difícil. El uso de explosivos o camiones vibradores en zonas urbanas requiere autorizaciones especiales que no son concedidas sistemáticamente por las autoridades locales, y conlleva un coste raramente aceptado para los estudios de riesgo. Además, el nivel de ruido urbano dificulta el uso de estas técnicas. El método de registro de terremotos es difícil de utilizar en un contexto sísmico moderado. Por otra parte, los métodos basados en el ruido sísmico de fondo, y en particular el método H/V, utilizan las propiedades del ruido urbano para estimar las características físicas de los suelos con un coste muy bajo.

Debido a estas ventajas, el método de la relación espectral H/V, o el llamado método "Nakamura", es uno de los métodos basados en el ruido más utilizados en el mundo para caracterizar los efectos de sitio y para la microzonificación sísmica. Esta técnica consiste en obtener una estimación de la frecuencia de resonancia de un lugar realizando la relación de las amplitudes espectrales del ruido registrado en las componentes horizontal y vertical.

Inicialmente, este método fue propuesto en el año 1971 por Nogoshi e Igarashi, donde este método se limitó inicialmente a la comunidad japonesa. En el año 1989, Nakamura introdujo esta técnica al mundo occidental, popularizando el método, llegando a tener un número cada vez mayor de personas y autores que utilizan este método para investigaciones y proyectos de ingeniería. La comunidad científica sísmica de esos años pudo reconocer el potencial del método para dar una estimación correcta de la frecuencia natural de un sitio (Algunos científicos: Field et al. 1993, Lermo et al. 1993, Lachet et al. 1994, Lermo et al. 1994, Gitterman et al. 1996, Seekins et al. 1996, Wakamatsu et al. 1996, Tokeshi et al. 1998).

Nakamura (1989), basándose en explicaciones más cualitativas que cuantitativas, concluyó que la relación H/V se debía a las ondas S. A pesar de que su demostración le faltaba claridad, esta explicación atrajo un gran número de personas de la comunidad sísmica, puesto que establecía que la relación H/V es una "imagen" de la función de transferencia de la onda S, entrega una estimación de la amplificación y además la frecuencia de resonancia. Esta explicación fue fuertemente cuestionada por varios autores (Lachet y Bard 1994, Kudo 1995, Bard 1998, Konno et al. 1998), quienes proponen y muestran, que existe una dependencia de la relación H/V de la elipticidad propias de las ondas Rayleigh (que fue una hipótesis ya propuesta por Nogoshi e Igarashi en 1971). Estas simulaciones numéricas muestran que la frecuencia del peak de elipticidad del modo fundamental de las ondas Rayleigh coincide aproximadamente con la frecuencia de resonancia, dada por la función de transferencia de una estructura (para ondas SH que inciden verticalmente), sin embargo,

también hay estudios teóricos sobre la influencia de otros parámetros, como el contraste de impedancia entre el sedimento y la roca; y relación de Poisson en el sedimento.

A través de los años, se ha podido demostrar con la Figura 19, que las investigaciones de técnicas que utilizan el ruido de fondo se han ido desarrollando en mayor cantidad con el tiempo, mientras tanto, la investigación sobre la comprensión del ruido ha ido perdiendo interés. Esta situación es bastante paradójica, puesto que los métodos son cada vez más populares, mientras que sus principios fundamentales no se verifican.

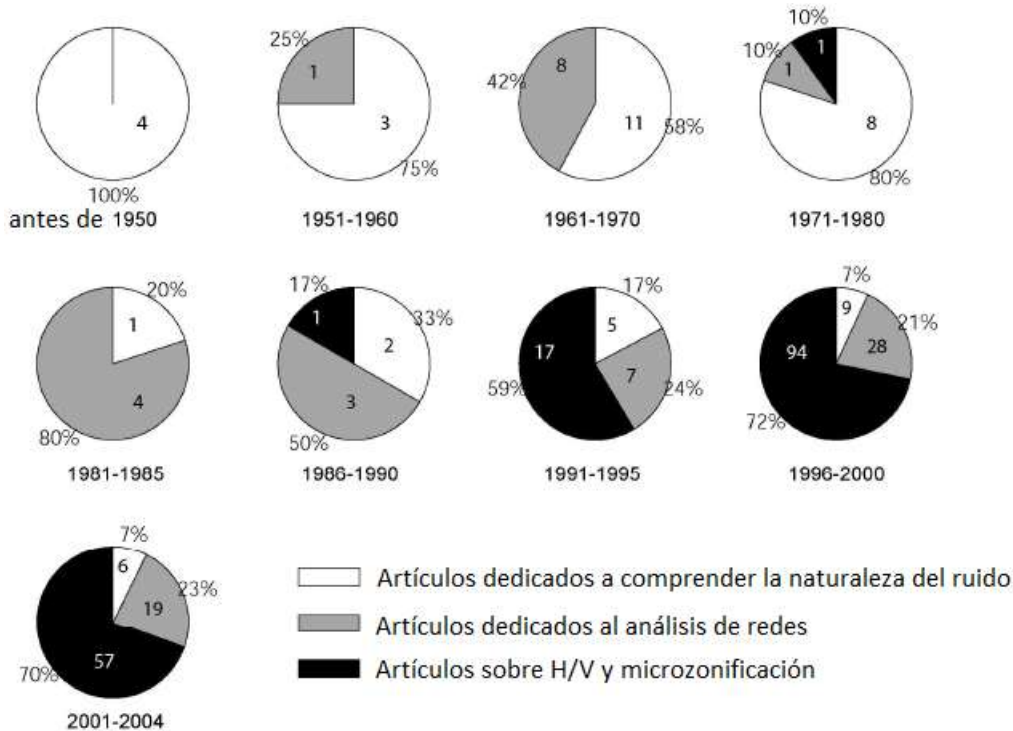


Figura 19: Diagramas que muestran la evolución del tipo de artículos de esta materia (Bonney-Claudet, S. 2004).

Todas estas interrogantes fueron uno de los motores de la puesta en marcha del programa de investigación europeo en 2001, denominado SESAME (Site EffectS using AMbients Excitations). Uno de los objetivos de este programa fue comprender de mejor manera el origen del Peak H/V, definir las posibilidades y limitaciones del método H/V. Uno de los puntos esenciales es comprender mejor el causante del cual se basa el método H/V: el ruido de fondo sísmico. Existe tal incomprensión del método, en parte por el hecho de que el conocimiento sobre el ruido de fondo es limitado.

3.2 Método Nakamura

El método Nakamura o Razón Espectral H/V, es un método pasivo, basado en el análisis de microtremores y el uso de sensores de tres componentes (triaxiales). Nakamura (1989) propuso la utilización de los microtremores para la evaluación de los efectos de sitio, relacionando los espectros de Fourier de las componentes horizontales (N-S y O-E) con la componente vertical del movimiento superficial registrado en un sitio (H/V). El método presenta un comportamiento muy similar a los espectros de amplificación, donde se obtiene una señal compuesta donde el Peak de mayor amplitud indica la Frecuencia fundamental del suelo. La base de los supuestos de Nakamura (1989) es que la relación espectral entre

la componente horizontal y la vertical superficial es una aproximación de la función de transferencia de los suelos.

Se definen las siguientes variables:

- S_{VS} : Espectro vertical de movimiento en superficie.
- S_{HS} : Espectro horizontal de movimiento en superficie.
- S_{VB} : Espectro vertical de movimiento en la base
- S_{HB} : Espectro horizontal de movimiento en la base

La función de transferencia S_T de las capas superficiales se define generalmente como:

$$S_T = S_{HS}/S_{HB} \quad (3-1)$$

El efecto de la onda Rayleigh E_S en el movimiento vertical se define como:

$$E_S = E_{VS}/E_{VB} \quad (3-2)$$

Si no hay onda Rayleigh, $E_S = 1$. E_S tomará un valor superior a "1" cuando se incremente el efecto de la onda Rayleigh. Ahora asumiendo que el efecto de la onda Rayleigh es igual para las componentes verticales y horizontales, se puede considerar que S_T/E_S ofrece una función de transferencia más fidedigna. Al eliminar el efecto de la onda Rayleigh, se define una nueva función de transferencia:

$$S_{TT} = S_T/E_S = R_S/R_B \quad (3-3)$$

Donde:

$$R_S = S_{HS}/S_{VS} \quad (3-4)$$

$$R_B = S_{HB}/S_{VB} \quad (3-5)$$

R_S y R_B se obtiene al dividir el espectro horizontal de movimiento por el espectro vertical, correspondiendo respectivamente al movimiento en la superficie y en la base.

R_B se convierte en 1,0 para una gama de frecuencias relativamente amplia, es decir, en el sustrato firme (base), la propagación es uniforme en todas las direcciones, por lo tanto:

$$R_B = S_{HB}/S_{VB} = 1 \quad (3-6)$$

Entonces, la función de transferencia queda:

$$S_{TT} = \frac{R_S}{1} = R_S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (3-7)$$

De la ecuación (3-7) se puede concluir que la función de transferencia de las capas superficiales se puede estimar únicamente a partir del ruido sísmico ambiente medido en la superficie. En otras palabras, el movimiento en la superficie conserva las características del movimiento horizontal del sustrato firme, sustituyéndolo en la ecuación antes mencionada.

En la Figura 20 se presenta el procedimiento para el análisis de las microvibraciones mediante el método relación espectral HV o Nakamura. En la parte superior se muestran las mediciones del geófono de tres componentes, el cual se ubica en el suelo

para registrar las ondas S (componente horizontal) y las ondas P (componente vertical). Luego estas mediciones se filtran y se obtiene un espectro en cada dirección, sin embargo, para las direcciones horizontales se realiza un promedio del espectro horizontal y finalmente se obtiene la razón espectral H/V.

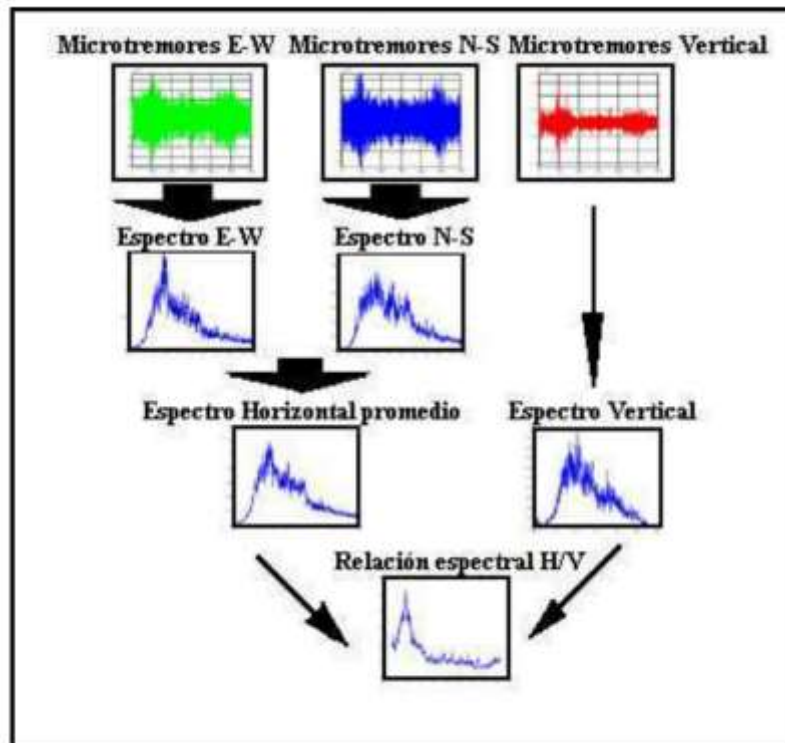


Figura 20: Procedimiento para obtener la relación espectral H/V (Yauri, S. 2006).

Este método permite proporcionar el periodo fundamental del suelo (peak del gráfico H/V), y además las amplificaciones asociadas. Sin embargo, el mismo autor y una serie de investigaciones experimentales (Lachet y Bard, 1994; Chávez-García et al, 2007; Bonnefoy-Claudet et al, 2008) han demostrado que las amplitudes obtenidas por este método no representan las amplificaciones del sitio, incluso se ha demostrado que la amplitud del peak H/V es muy sensible, no sólo al contraste de velocidad, sino también a parámetros como la relación de Poisson en el estrato sedimentario y la distancia entre la fuente y el receptor. Según SESAME, la amplitud se puede ver influenciada por el tipo de suelo en el que se está apoyando el geófono de tres componentes, ya sea hormigón, asfalto, suelo o pasto, etc., no obstante, el valor numérico del periodo fundamental del suelo no se ve afectado. Finalmente, se puede concluir que éste es un método válido sólo para la determinación del periodo fundamental del suelo.

3.3 Proyecto SESAME

El Proyecto SESAME (Site EffectS using AMbients Excitations), es una comisión europea creada el año 2001 bajo una serie de universidades, institutos y centros de investigación. La asociación del proyecto SESAME está compuesta por las entidades descritas en la Tabla 3:

Tabla 3: Colaboradores del proyecto SESAME.

Siglas	Descripción de Institución	País
UJF	University Joseph Fourier - Grenoble (Pierre-Yves Bard)	France
Resonance	Résonance Ingénieurs-Conseils SA - Geneva (Martin Koller)	Switzerland
UP	University of Potsdam (Franck Sherbaum)	Germany
ULG	University of Liège (Denis Jongmans)	Belgium
UIB	University of Bergen (Kuvvet Atakan)	Norway
ETHZ	Polytechnic School of Zürich (Donat Faeh)	Switzerland
ITSAK	Institute of Engineering Seismology and Earthquake Engineering - Thessaloniki (Nikos Theodulidis)	Greece
ICTE	Institute of Earth and Space Sciences - Lisbon (Paula Teves-Costa)	Portugal
INGV	National Institute of Geophysics and Volcanology - Roma (Antonio Rovelli)	Italy
GPISAS	Geophysical Institute Slovak Academy of Sciences - Bratislava (Peter Moczo)	Slovakia
CNR	National Research Council - Milano (Alberto Marcellini)	Italy
CETE	Center of Technical Studies - Nice (Anne-Marie Duval)	France
CNRS	National Center for Scientific Research - Grenoble	France
LCPC	Central Laboratory for Bridges and Roads - Paris	France

El Proyecto SESAME aborda la importante problemática de la estimación del efecto de sitio para la mitigación del riesgo sísmico, con especial atención a las zonas urbanas. Se centra en dos técnicas de bajo coste que utilizan las vibraciones sísmicas del entorno, y pretende aclarar su capacidad real de proporcionar información útil, directa o indirecta, para la estimación de la amplificación local.

La primera técnica, muy sencilla, es la llamada técnica H/V anunciada por Nakamura (que es la desarrollada en esta investigación); y la segunda, más avanzada, utiliza mediciones de matrices de ruido para derivar las curvas de dispersión de las ondas superficiales, y a partir de ellas el perfil de velocidad. El trabajo propuesto por SESAME incluye una parte teórica y numérica para comprender mejor la naturaleza del ruido sísmico y desarrollar herramientas numéricas validadas para simular el ruido sísmico en entornos arbitrarios. También incluye investigaciones experimentales y de procesamiento de datos para evaluar claramente la estabilidad, la solidez, la confiabilidad y el significado físico de estas dos técnicas.

El proyecto SESAME tiene una gran influencia en este trabajo investigativo, ya que pasa a ser una guía para las mediciones, procesamiento de datos e interpretación de resultados. Esta guía indica que hay ciertos parámetros de registro que influyen en la calidad y confiabilidad de los datos obtenidos, y comprenderlos podrá ayudar a acelerar el proceso de medición. Las mediciones de razón espectral H/V en ciudades se realizan dentro del siguiente contexto:

- El ruido antrópico es muy alto.

- En ciudades es algo complicado obtener datos sobre suelo, por ende, se debe considerar que la mayoría de las mediciones se realizarán en calles y veredas, y en menor medida, sobre césped o suelo en plazas o espacios públicos.
- Las mediciones podrán ser realizadas en entornos con edificios de diversas dimensiones.
- Los registros no siempre serán realizados al mismo tiempo y bajo las mismas condiciones meteorológicas.
- La presencia de estructuras subterráneas puede ser desconocida (tuberías, por ejemplo).

En las siguientes secciones de este apartado, se resumirá y describirá ciertos temas de la guía entregada por SESAME que son los más significativos para realizar las mediciones de relaciones espectrales H/V mediante el método Nakamura, estos abordan desde la instrumentación, condiciones experimentales a la hora de realizar las mediciones, la guía para el procesamiento de datos y la guía para la interpretación de resultados.

3.3.1 Instrumentación

Durante el proyecto SESAME se realizó un workshop de instrumentos para investigar la influencia de los distintos instrumentos en el uso de la técnica H/V con datos de vibraciones ambientales. Se llevaron a cabo cuatro tareas principales, que consistieron en probar los digitalizadores y sensores, y en realizar registros simultáneos tanto en campo libre como en el laboratorio para realizar comparaciones.

Influencia del digitalizador:

Para investigar la posible influencia de los digitalizadores, se realizaron varias pruebas para cuantificar la sensibilidad experimental, el ruido interno, la estabilidad con el tiempo y la coherencia de canales.

- La mayoría de los digitalizadores probados dieron finalmente resultados correctos.
- En general, todos los digitalizadores necesitan un tiempo de calentamiento. De 2 a 10 minutos suele ser suficiente para la mayoría de los instrumentos para asegurar que la línea de base es más o menos estable. Se recomienda a los usuarios que comprueben la estabilidad del instrumento antes de utilizarlo.
- Para un análisis óptimo de la curva H/V, parece necesario comprobar la densidad de energía a lo largo de la banda de frecuencia estudiada, para garantizar que la energía es suficiente para permitir la extracción de la señal del ruido instrumental. Además, las desviaciones deben ser las mismas en todos los componentes.
- Los usuarios deben comprobar la sincronización entre canales: A partir de una simulación numérica, se ha demostrado que por debajo de 15 Hz no se produce ninguna modificación H/V. Por encima de 15 Hz, las modificaciones de los resultados H/V dependen del porcentaje de desincronización de las muestras, obteniéndose el mínimo para un número redondo de muestras desincronizadas y el máximo (hasta el 80% de cambio de amplitud H/V) para 0,5 muestras.
- Los usuarios deben elegir la misma ganancia para los tres canales. Las pequeñas diferencias de ganancia pueden provocar ligeros cambios en los resultados.

Influencia del sensor:

Durante el proyecto SESAME, se investigó la influencia del tipo de sensor, y para esto se registraron simultáneamente con dos sensores acoplados al mismo digitalizador. En total

se probaron 17 sensores. En general, las señales fueron similares, como era de esperarse. Sin embargo,

- Los acelerómetros no eran suficientemente sensibles para frecuencias inferiores a 1 Hz y dan resultados H/V muy inestables. No se recomienda realizar mediciones de H/V con acelerómetros sismológicos, ya que no son lo bastante sensibles para los niveles de vibración ambiente.
- La estabilidad es importante. No se recomienda realizar mediciones H/V con sismómetros de banda ancha (con periodo natural superior a 20 s), ya que requieren un largo tiempo de estabilización, sin aportar ninguna ventaja adicional. Se recomienda a los usuarios que comprueben la estabilidad del sensor antes de utilizarlo.
- No se recomienda utilizar sensores cuya frecuencia natural sea superior a la frecuencia más baja de interés.

3.3.2 Condiciones experimentales

Como recomendación general, se sugiere que antes de realizar mediciones H/V sobre el terreno, el equipo eche un vistazo a la información geológica disponible sobre la zona de estudio. En particular, deberían examinarse los tipos de formaciones geológicas, la posible profundidad hasta el basamento rocoso y las posibles estructuras 2D o 3D.

Durante el proyecto SESAME se llevó a cabo una evaluación de la influencia de las condiciones experimentales en la estabilidad y reproducibilidad de las estimaciones de H/V a partir de vibraciones ambientales. Los resultados obtenidos se basan en 593 registros utilizados para probar 60 condiciones experimentales que pueden dividirse en las siguientes categorías:

- Parámetros de registro.
- Duración del registro.
- Distancia entre mediciones.
- Acoplamiento in situ de suelo-sensor.
- Acoplamiento artificial de suelo-sensor.
- Configuración del sensor.
- Estructuras cercanas
- Condiciones meteorológicas.
- Perturbaciones.

Parámetros de registro

- Mientras no haya saturación de señal, los resultados son equivalentes independientemente de la ganancia utilizada. Sin embargo, sugerimos fijar el nivel de ganancia al máximo posible sin saturación de la señal. El único efecto apreciable es una compresión de la curva H/V cuando se utiliza un valor de ganancia demasiado alto, lo que implica una saturación excesiva de la señal.
- Una frecuencia de muestreo de 50 Hz es suficiente, ya que la frecuencia máxima de interés para la ingeniería no supera los 25 Hz, aunque las frecuencias de muestreo superiores no influyen en los resultados de H/V.
- La longitud del cable para conectar el sensor a la estación no influye en los resultados de H/V al menos hasta una longitud de 100 metros.

Duración del registro

- Para que una medición sea confiable, recomendamos que se cumpla la siguiente condición: $f_0 > 10/l_w$. Esta condición se propone para que, a la frecuencia de interés, haya al menos 10 ciclos significativos en cada ventana (ver Tabla 4).
- Se necesita un gran número de ventanas y de ciclos: recomendamos que el número total de ciclos significativos: $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_w$ sea superior a 200 (lo que significa, por ejemplo, que, para un peak de 1 Hz, haya al menos 20 ventanas de 10 seg cada una; o, para un peak a 0,5 Hz, 10 ventanas de 40 seg cada una, o 20 ventanas de 20 seg, pero no 40 ventanas de 10 seg). Para otras frecuencias de interés, ver Tabla 4.

Tabla 4: Recomendación de duración del registro (SESAME H/V User Guidelines, 2004).

f_0 [Hz]	Minimum value for l_w [s]	Minimum number of significant cycles (n_c)	Minimum number of windows	Minimum useful signal duration [s]	Recommended minimum record duration [min]
0.2	50	200	10	1000	30'
0.5	20	200	10	400	20'
1	10	200	10	200	10'
2	5	200	10	100	5'
5	5	200	10	40	3'
10	5	200	10	20	2'

Distancia entre mediciones

- Para una microzonificación, se recomienda adoptar inicialmente un espaciado grande (por ejemplo, una cuadrícula de 500 m) y, en caso de variación lateral de los resultados, densificar el espaciado de los puntos de la cuadrícula, hasta 250 m, por ejemplo.
- Para un estudio de respuesta en un solo lugar, nunca se debe utilizar un único punto de medición para obtener un valor f_0 . Se recomienda utilizar al menos tres puntos de medición.

Acoplamiento in situ de suelo-sensor

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 o irregulares, como el barro, la hierba, el suelo arado, el hielo, la grava, la nieve no compactada, etc., debe examinarse con más atención.

- Para garantizar un buen acoplamiento entre el suelo y el sensor, éste debe colocarse directamente sobre el suelo, excepto en situaciones muy especiales (pendientes pronunciadas, por ejemplo).
- El recubrimiento de asfalto u hormigón no afecta a los resultados H/V en la banda principal de frecuencias de interés, aunque pueden observarse ligeras perturbaciones en la gama de 7-8 Hz, que no modifican la forma de las curvas H/V. En el rango de 0,2 - 20 Hz no se observan peaks artificiales. Deberían realizarse ensayos en frecuencias más altas para comprobar la influencia del espesor del asfalto. Ver en la Figura 21 la comparación con y sin asfalto, en el mismo sitio.

- El césped por sí mismo no afecta a los resultados de H/V, siempre que el sensor esté en buen contacto con el suelo y no esté, por ejemplo, colocado de forma inestable sobre la hierba, como puede ocurrir con la hierba alta doblada bajo el sensor. En tales casos, es mejor retirar la hierba alta antes de instalar el sensor, o cavar un agujero para instalar el sensor directamente sobre el suelo. Realizar mediciones sobre césped cuando sopla el viento puede dar lugar a resultados completamente perturbados por debajo de 1 Hz, como se muestra en la Figura 22
- Evitar colocar el sensor sobre capas superficiales de suelos "blandos", como barro, tierra arada o cubiertas artificiales, como cubiertas deportivas sintéticas.
- Evitar hacer mediciones en suelos saturados de agua, por ejemplo, después de una lluvia intensa.
- Evitar registrar sobre grava superficial sin cohesión, ya que el sensor no se acoplará correctamente al suelo y se obtendrán curvas muy perturbadas. Intente encontrar otro tipo de suelo a pocos metros, o retire la grava superficial para encontrar el suelo firme debajo, si es posible.
- La grabación sobre nieve o hielo puede afectar a los resultados. En tales casos, se recomienda compactar la nieve e instalar el sensor sobre una placa metálica o de madera para evitar la inclinación del sensor debido al derretimiento local bajo las patas del sensor. Cuando registre en estas condiciones, asegúrese de que la temperatura está dentro de las especificaciones del equipo indicadas por el fabricante.

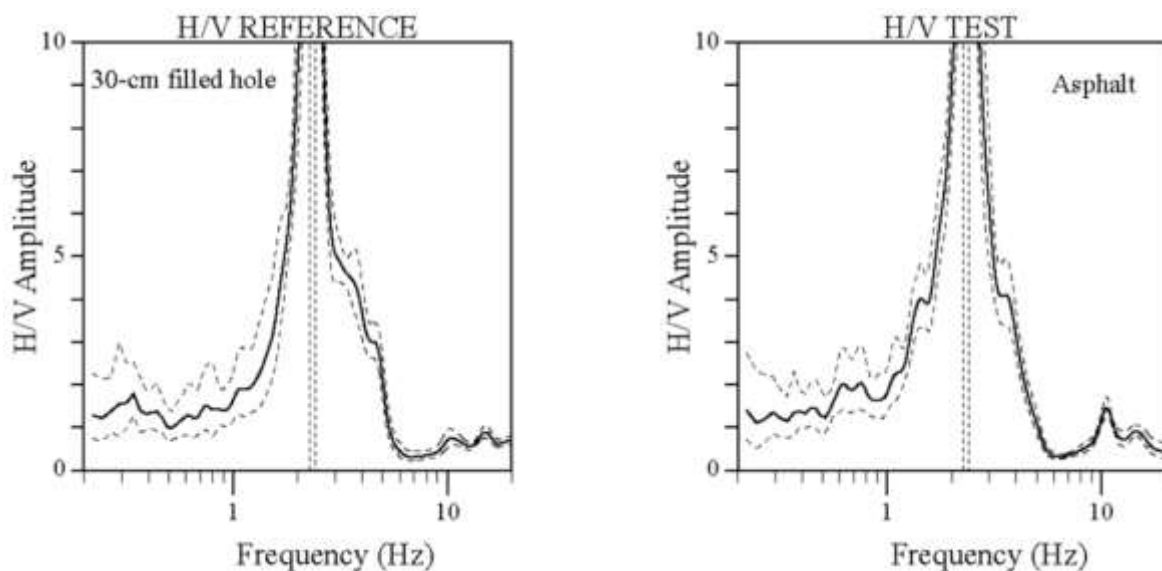


Figura 21: Comparación de las curvas H/V obtenidas con y sin asfalto, en el mismo emplazamiento, que no muestran ningún efecto significativo de la capa asfáltica (SESAME H/V User Guidelines, 2004).

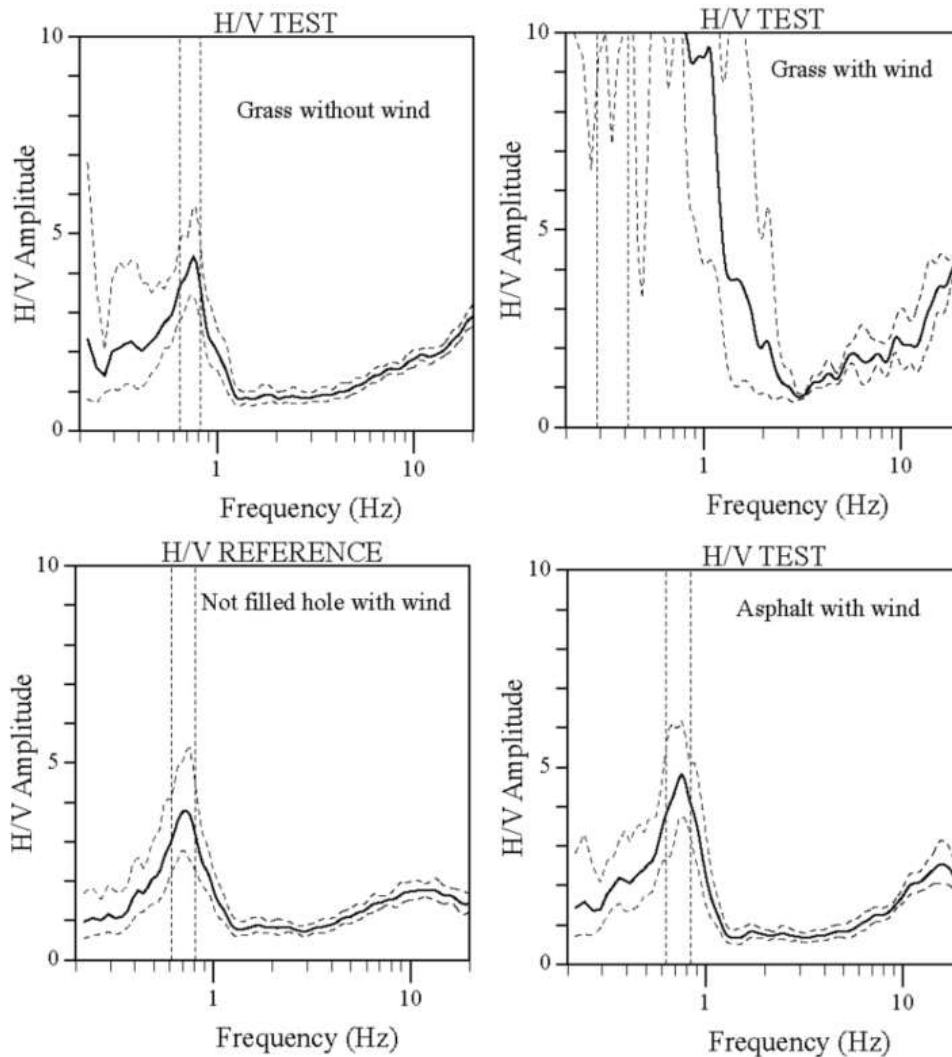


Figura 22: Comparación de las curvas H/V obtenidas en el mismo lugar sobre césped con y sin viento (arriba), en asfalto y césped en un agujero (abajo) (SESAME H/V User Guidelines, 2004).

La comparación de Figura 22 muestra el fuerte efecto del viento combinado con el césped, mientras que en asfalto o en un agujero, el viento no tiene ningún efecto significativo.

Acoplamiento artificial de suelo-sensor

Cuando se necesite una interfaz artificial entre el suelo y el sensor, se recomienda encarecidamente realizar algunas pruebas antes de efectuar los registros para examinar una posible influencia de la interfaz elegida.

- El uso de una placa metálica entre el sensor y el suelo no modifica los resultados.
- En caso de una pendiente pronunciada que no permita nivelar correctamente el sensor, la mejor solución es instalarlo sobre un montón de arena o en un recipiente de plástico lleno de arena.
- En general, evite los materiales "blandos / no cohesivos", como la gomaespuma, el cartón, la grava (en un contenedor o no), etc., para facilitar la colocación del sensor. Ver Figura 23 para la comparación con el sensor directamente sobre el suelo natural, o sobre una placa de espuma de poliestireno.

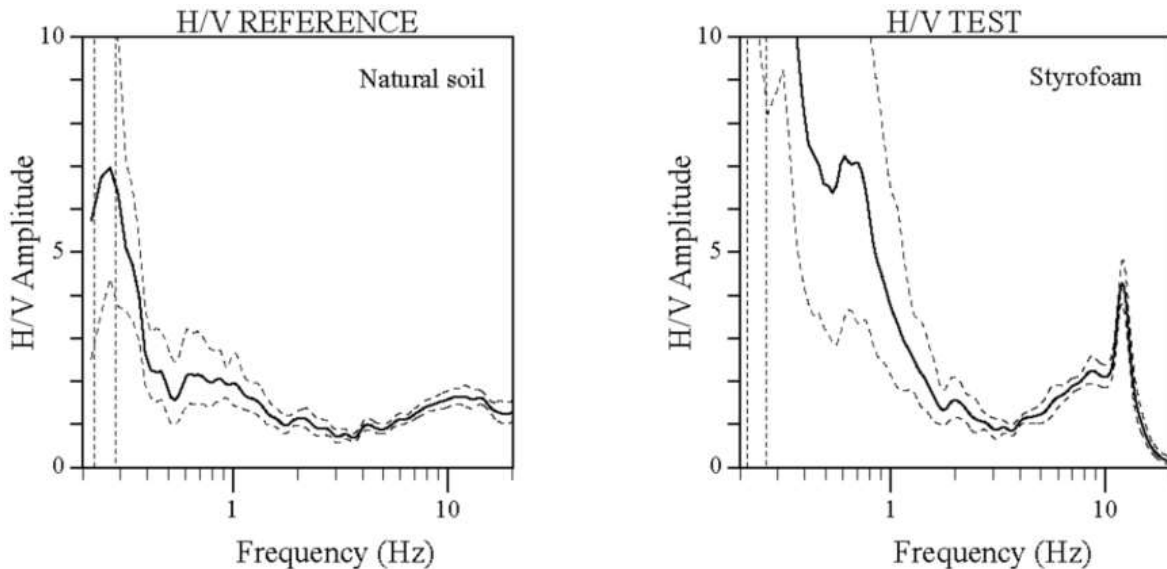


Figura 23: Comparación de las curvas H/V obtenidas con y sin una placa de espuma de poliestireno bajo el sensor, en el mismo lugar, mostrando un fuerte efecto de la espuma de poliestireno (SESAME H/V User Guidelines, 2004).

Configuración del sensor

- El sensor debe instalarse horizontalmente según las recomendaciones del fabricante.
- No es necesario enterrar el sensor, pero no está de más hacerlo. Sin embargo, puede ser útil colocar el sensor en un agujero (sin necesidad de rellenarlo) de su propio tamaño para eliminar, por ejemplo, el efecto de un viento débil sobre el césped. Esto sólo sería eficaz si no hay estructuras cercanas, como edificios o árboles, que también podrían inducir algunas perturbaciones fuertes de baja frecuencia en el suelo, debido al viento.
- No colocar ninguna carga sobre el sensor.

Estructuras cercanas

- Se advierte a los usuarios de que el registro cerca de estructuras como edificios, árboles, etc., puede influir en los resultados: hay pruebas claras de que los movimientos de las estructuras debidos al viento pueden introducir fuertes perturbaciones de baja frecuencia en el suelo. Desgraciadamente, no es posible cuantificar la distancia mínima desde la estructura en la que la influencia es insignificante, ya que esta distancia depende de demasiados factores externos (tipo de estructura, fuerza del viento, tipo de suelo, etc.).
- Evitar medir por encima de estructuras subterráneas como aparcamientos, tuberías, tapas de alcantarillado, etc., estas estructuras pueden alterar significativamente la amplitud del movimiento vertical.

Condiciones meteorológicas

- El viento es probablemente la influencia más frecuente y se sugiere evitar las mediciones durante los días ventosos. Incluso un viento ligero (aprox. > 5 m/s) puede influir fuertemente en los resultados de H/V al introducir grandes perturbaciones a bajas frecuencias (por debajo de 1 Hz) que no están relacionadas con los efectos del emplazamiento. Una consecuencia es que el viento sólo perturba los lugares de baja frecuencia

- Deben evitarse las mediciones con lluvia intensa, mientras que la lluvia ligera no influye notablemente en los resultados de H/V.
- Las temperaturas extremas deben tratarse con cuidado, siguiendo las recomendaciones del fabricante para el sensor y el registrador; las pruebas deben realizarse comparando las mediciones noche/día o sol/sombra.
- Los fenómenos meteorológicos de baja presión suelen elevar el contenido de bajas frecuencias y pueden alterar la curva H/V. Si las mediciones no pueden aplazarse hasta condiciones meteorológicas más tranquilas, deberá anotarse la aparición de tales fenómenos en el parte de registro.

Perturbaciones

- No se ha observado ninguna influencia de los cables de alta tensión.
- Todo tipo de fuentes locales de corta duración (pisadas, coche, tren, etc) pueden perturbar los resultados. La distancia de influencia depende de la energía de la fuente, de las condiciones del suelo, etc., por lo que no es posible dar valores generales de distancia mínima. Sin embargo, en general se ha observado, por ejemplo, que las fuentes de vibraciones ambientales con períodos cortos de gran amplitud (por ejemplo, el tráfico rápido de las autopistas) **influyen en las relaciones H/V si se encuentran a menos de 15-20 metros**, pero que las fuentes más continuas (por ejemplo, el tráfico lento del centro de la ciudad) sólo influyen en las relaciones H/V cuando están mucho más cerca. Por tanto, el tráfico es mucho menos problemático en una ciudad que cerca de una autopista, por ejemplo. En cualquier caso, se recomienda a los usuarios que comprueben sobre el terreno las series temporales registradas cuando realicen mediciones en un entorno ruidoso.
- Las perturbaciones de corta duración de la señal pueden evitarse durante el análisis H/V utilizando una selección de ventana "anti-trigger" para eliminar los transitorios. La consecuencia es que debe aumentarse la duración de los registros para obtener una duración suficiente de señal "tranquila".
- **Evitar las mediciones cerca de fuentes monocromáticas como máquinas de construcción, máquinas industriales, bombas, etc.**
- El personal debe mantener el motor del coche apagado durante la medición.

3.3.3 Guía para el procesamiento de datos

La guía SESAME para el procesamiento de datos estándar indica recomendaciones generales, pero también entrega información detallada sobre el software J-SESAME, que sirve como guía para el uso de software GEOPSY, que es el utilizado en esta tesis.

Estos tipos de softwares cuentan con un diseño general con cuatro módulos principales: módulo de navegación, de selección de ventanas, de procesamiento y de visualización.

3.3.3.1 Módulo de selección de ventanas

Las ventanas se pueden seleccionar de manera automática o manualmente. La selección manual suele ser el método más confiable, pero es el que requiere de más tiempo, por eso los softwares incluyen un módulo de selección automático de ventanas para permitir el tratamiento de grandes cantidades de datos. El objetivo es conservar las partes del registro más estacionario de las vibraciones ambientales y así evitar los registros transitorios asociados a menudo a fuentes específicas (pisadas, tráfico cercano). Este objetivo es exactamente el opuesto al habitual de los sismólogos, que quieren detectar señales y han desarrollado algoritmos específicos de "trigger" para rastrear los transitorios inusuales. En consecuencia, aquí se recomienda utilizar el algoritmo "anti-trigger", que es exactamente lo

contrario: detecta los transitorios, pero intenta evitarlos. Es por eso que se seleccionan ventanas sin transitorios energéticos. Además, se quiere evitar ventanas de vibración ambiental con amplitudes anormalmente bajas, por lo tanto, se introducen umbrales mínimos. También existen dos criterios que pueden utilizarse opcionalmente en la selección de las ventanas: evitar la saturación de la señal por medio de excluir automáticamente ventanas con amplitud peak superior a un % de la amplitud máxima y la otra opción es evitar las “ventanas ruidosas” en caso de existir transitorios largos (por ejemplo, relacionados con tráfico pesado, trenes, máquinas, etc). El detalle de estas opciones se puede verificar en la guía SESAME y en el documento “WP03 – H/V Technique: Data Processing”.

3.3.3.2 Cálculo de relación espectral H/V

Los módulos de procesamiento que tienen estos tipos de Softwares, realizan los cálculos de la relación espectral H/V y otros procesamientos asociados como la eliminación del desplazamiento de CC de una grabación, filtrado, suavizado, fusión de componentes horizontales, etc., ya sea en las ventanas seleccionadas para archivos individuales o alternativamente en varios archivos como un proceso por lotes.

Las principales funciones del módulo de procesamiento son:

- FFT (Transformada de Fourier).
- Suavizado con varias opciones. Se recomienda el suavizado Konno & Ohmachi, ya que tiene en cuenta el diferente número de puntos a bajas frecuencias.
- Fusión de dos componentes horizontales con varias opciones. Se recomienda la media geométrica.
- Relación H/V para cada ventana individual
- Promedio de las relaciones H/V.
- Estimaciones de la desviación estándar de las relaciones espectrales.

El detalle de las diferentes opciones se encuentra en el Apéndice del Manual del Usuario de J-SESAME, incluido en el documento “WP03 – H/V Technique: Data Processing”.

3.3.4 Guía para la interpretación de resultados

3.3.4.1 Criterio para la confiabilidad de resultados

El proyecto SESAME presenta criterios para la confiabilidad de los resultados, basados en tres criterios para una curva H/V confiable y en 6 criterios para un peak claro H/V.

Los criterios para una curva H/V confiable se presentan en la Tabla 3, en donde se deben cumplir los 3 criterios.

Tabla 5: Criterios para una curva H/V confiable.

i)	$f_0 > 10/l_w$	(3-8)
ii)	$n_c(f_0) = l_w \cdot n_w \cdot f_0 > 200$	(3-9)
iii)	$\sigma_A(f) < 2$ para $0,5 f_0 < f < 2f_0$ si $f_0 > 0,5$ [Hz]	(3-10)
	o	
	$\sigma_A(f) < 3$ para $0,5 f_0 < f < 2f_0$ si $f_0 < 0,5$ [Hz]	(3-11)

Los criterios para un peak claro de la curva H/V se detallan en la Tabla 6, en donde se deben cumplir al menos 5 de los 6 criterios.

Tabla 6: Criterios para peak claro.

i)	$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	(3-12)
ii)	$\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	(3-13)
iii)	$A_0 > 2$	(3-14)
iv)	$f_{peak}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	(3-15)
v)	$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	(3-16)
vi)	$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	(3-17)

Adicionalmente, en la Tabla 7 se presentan valores umbrales para las desviaciones estándar σ_f y $\sigma_A(f_0)$ que son utilizados para los criterios v) y vi) de la Tabla 6.

Tabla 7: Valores umbrales para σ_f y $\sigma_A(f_0)$.

Rango de Frecuencia [Hz]	< 0,2	0,2 – 0,25	0,5-1,0	1,0-2,0	> 2,0
$\varepsilon(f_0)$	$0,25f_0$	$0,20f_0$	$0,15f_0$	$0,10f_0$	$0,05f_0$
$\theta(f_0)$ para $\sigma_A(f_0)$	3,0	2,5	2,0	1,78	1,58
$\log\theta(f_0)$ para $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0,48	0,40	0,30	0,25	0,20

Donde:

- l_w Longitud de ventana, [s]
- n_w Número de ventanas seleccionadas para la curva promedio H/V
- n_c Número de ciclos significativos
- f Frecuencia, [Hz]
- f_{peak} Frecuencia asociada al valor de máxima amplitud de la curva H/V (peak)
- f_{sensor} Frecuencia de desconexión del sensor
- f_0 Frecuencia peak de la curva H/V, [Hz]
- σ_f Desviación estándar de la frecuencia peak de la curva H/V ($f_0 \pm \sigma_f$)
- $\varepsilon(f_0)$ Valor umbral para la condición de estabilidad $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
- A_0 Amplitud peak de la curva H/V, asociada a la frecuencia f_0
- $A_{H/V}(f)$ Amplitud de la curva H/V, asociada a la frecuencia f
- f^- Frecuencia entre $f_0/4$ y f_0 , para que $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
- f^+ Frecuencia entre f_0 y $4f_0$, para que $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
- $\sigma_A(f)$ Desviación estándar de $A_{H/V}(f)$
- $\sigma_{\log H/V}(f)$ Desviación estándar de $A_{H/V}(f)$
- $\theta(f_0)$ Valor umbral para la condición de estabilidad $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

En la investigación realizada en esta tesis, se tomaron en cuenta las mediciones que al procesarlas cumplieran con los criterios SESAME para confiabilidad y peak claro.

3.3.4.2 Tipos de curvas H/V

3.3.4.2.1 Peak Claro

Un caso de peak claro se genera cuando la curva H/V presenta un solo y claro peak de H/V. La propiedad de “único” está relacionada al hecho de que en ninguna otra banda de frecuencia se presenta otro peak “claro” que satisfaga los mismos criterios. El concepto de claridad puede estar asociado a las siguientes características: la amplitud del peak H/V y su valor relativo con respecto a los valores de H/V en otras bandas de frecuencia; al valor relativo de la desviación estándar $\sigma_A(f)$ y a la desviación estándar σ_f de las estimaciones de f_0 de las ventanas individuales.

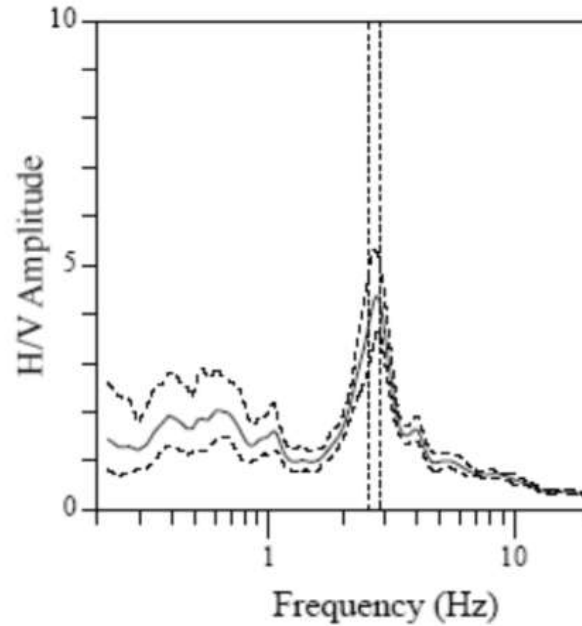
SESAME propone criterios cuantitativos para la “claridad”: condiciones de amplitud, que se son los tres primeros criterios para peak claro de la Tabla 6, y condiciones de estabilidad, que son los últimos tres criterios para peak claro de la Tabla 6.

Si la curva H/V resultante cumple al menos con 5 de estos 6 criterios, el valor f_0 puede considerarse una estimación muy confiable de la frecuencia fundamental. Si, además, el peak de amplitud A_0 es superior a 4 ó 5, se puede estar casi seguro de que existe una discontinuidad aguda con un gran contraste de velocidad a cierta profundidad.

En cualquier caso, hay que realizar las dos comprobaciones siguientes:

- $f_0 > f_{sensor}$
- Que el peak agudo no tenga un origen industrial (ver sección 3.3.4.2.5).

La Figura 24 muestra una curva H/V con peak claro, y se presentan los parámetros para la comprobación de los criterios mencionados anteriormente.



Window length l_w [s]	Number of windows n_w	Number of significant cycles n_c	Frequency statistics from individual windows			
			f_0 [Hz]	σ_f [Hz]	A_0	$\sigma_A(f_0)$
41	14	1561	2.72	0.11	4.4	1.2

Figura 24: Ejemplo de una curva H/V clara, que cumple con todos los criterios de confiabilidad y claridad (SESAME H/V User Guidelines, 2004).

3.3.4.2.2 Peak de baja frecuencia poco claro

Si al procesar los registros se presenta una curva con un peak de baja frecuencia poco claro, se debe revisar las siguientes condiciones:

- Si se está frente a un sitio rocoso, f_0 no será confiable.
- Si se produce un aumento constante de la relación H/V al disminuir la frecuencia, se solicita reprocesar la curva H/V con las siguientes revisiones:
 - Comprobar las curvas H/V de las ventanas individuales seleccionadas y eliminar las ventanas que tengan curvas H/V muy distintas de lo esperado (ilegítimas).
 - Utilizar ventanas más largas y/o criterios de selección de ventanas más estrictos.
 - Utilizar un ancho de banda proporcional y menos suavizado.

Si al reprocesar la curva H/V y se completan los criterios de claridad, se puede considerar que f_0 es confiable.

- Si la curva H/V reprocesada no cumple los criterios de claridad, se recomienda realizar mediciones adicionales durante más tiempo y/o durante la noche y/o en condiciones meteorológicas tranquilas y/o utilizar registros de terremotos utilizando también un emplazamiento rocoso cercano.

La Figura 25 muestra un ejemplo de curva H/V con un peak de baja frecuencia poco claro.

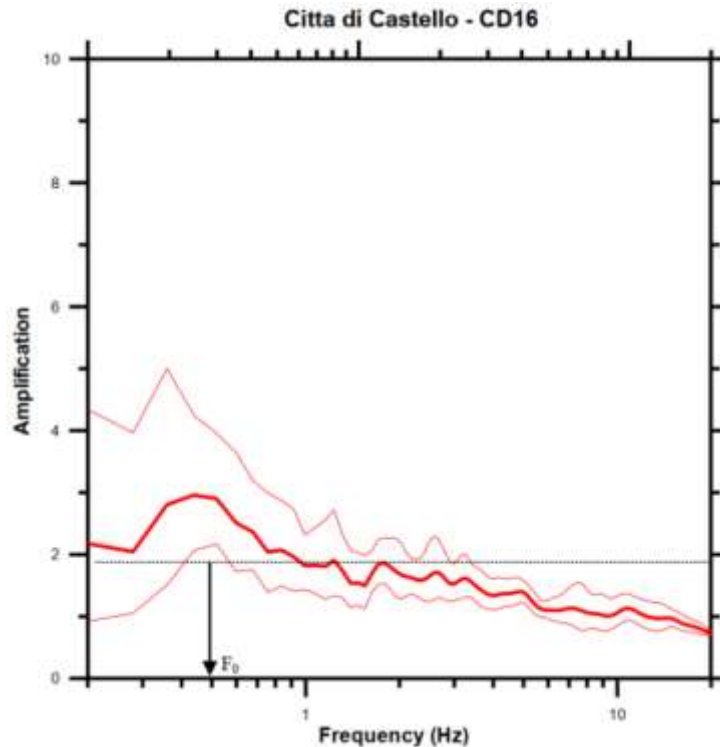


Figura 25: Curva H/V con peak de baja frecuencia poco claro (SESAME H/V User Guidelines, 2004).

3.3.4.2.3 Peak ancho y múltiples peaks

En algunos casos, la curva H/V puede presentar un peak ancho, o múltiples de máximos locales, en donde ninguno de los cuales cumple los criterios i), ii) y posiblemente v) de la Tabla 6.

Para el caso de un peak ancho, se debe disminuir el ancho de banda de suavizado. Si la prominencia del peak no es estable y/o la amplitud $A_{H/V}(f)$ es muy grande, la frecuencia f_0 no es confiable. En cambio, si la prominencia del peak es estable y la amplitud $A_{H/V}(f)$ es bastante baja:

- Si se observan peak más claros en las proximidades y si sus frecuencias relacionadas se encuentran dentro del rango de frecuencias del peak ancho, y si sus frecuencias relacionadas presentan una variación significativa de un sitio a otro; entonces, se debe examinar la posibilidad de una variación lateral subterránea del estrato o cambio de impedancia en el suelo, especialmente en terrenos con pendientes.
- De lo contrario, no se recomienda extraer ninguna información.

Para el caso de múltiples peaks, se debe comprobar que ninguno de los peaks tiene un origen industrial y se debe aumentar el ancho de banda de suavizado. Luego, si la curva H/V reprocesada cumple los criterios de claridad, f_0 es confiable. En cambio, si la curva H/V reprocesada no cumple con los criterios de claridad, se deben repetir las mediciones durante más tiempo y/o durante la noche.

La Figura 26 muestra un ejemplo de curva H/V con múltiples peaks.

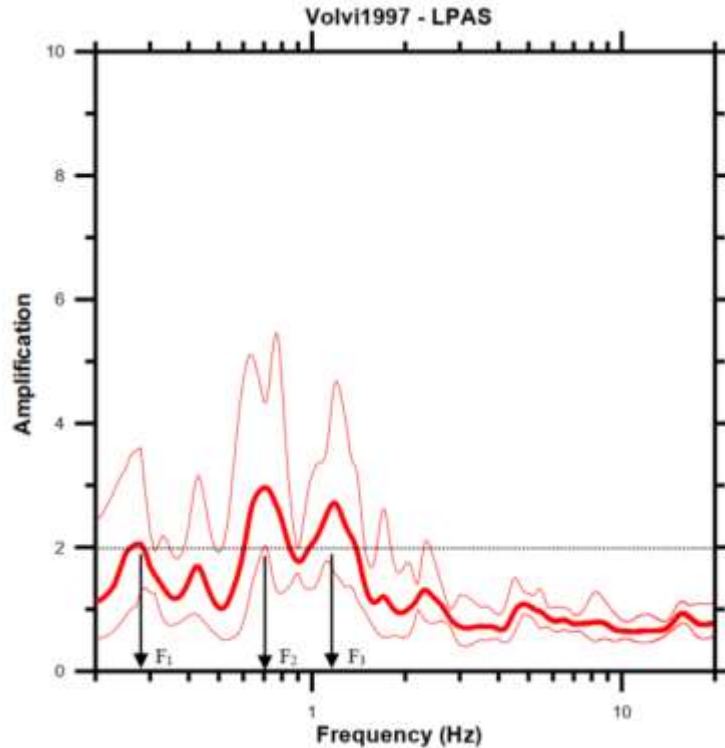


Figura 26: Curva H/V con peaks múltiples (SESAME H/V User Guidelines, 2004).

3.3.4.2.4 Caso de dos peaks ($f_1 > f_0$)

En primera instancia se debe verificar que f_0 o f_1 no tengan un origen industrial, ya que en caso de que alguna de las frecuencias tenga un origen industrial, se debe descartar dicha frecuencia en el análisis y se debe concentrar en la otra frecuencia. Si f_1 es confiable, se espera un probable contraste nítido a poca profundidad, en cambio, si f_0 es la frecuencia confiable, también se espera un probable contraste nítido, pero a gran profundidad. En ambos casos, se debe comprobar que:

- Si se conoce el valor del espesor del depósito de suelo “H” de la ecuación (2-58), entonces $V_{s,av} \sim 4H \cdot f$.
- Si se conoce el valor de $V_{s,surf}$, entonces $H_{min} \sim V_{s,surf} / 4f_0$.

En otro caso, si la geología del lugar da cuenta de la posibilidad de tener dos grandes contrastes de velocidad a dos escalas diferentes. Si se cumplen los criterios de claridad tanto para f_0 como para f_1 , ambos se consideran frecuencias confiables, se espera probablemente que existan dos grandes contrastes a poca y gran profundidad a dos escalas diferentes.

En la Figura 27 se presenta una curva H/V con dos peaks.

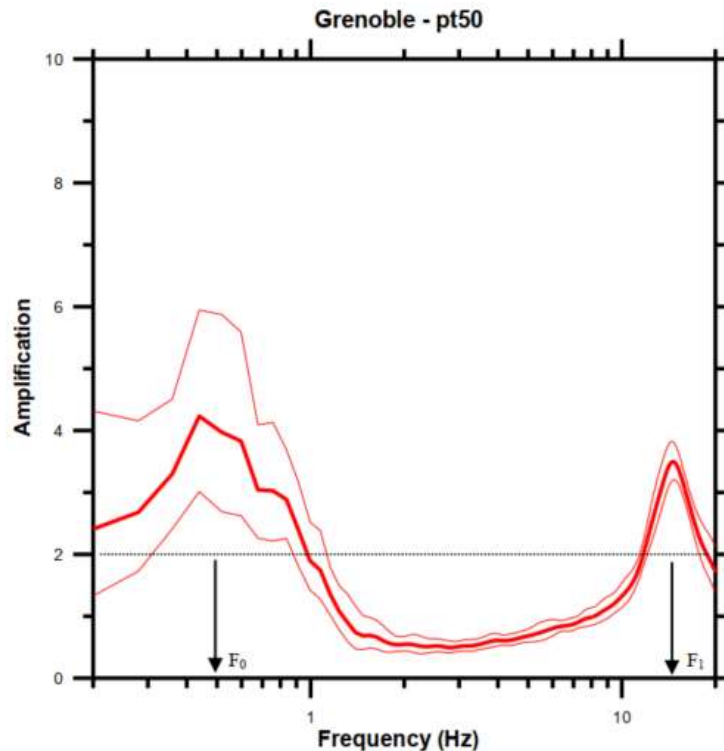


Figura 27: Ejemplo de curva H/V con caso de dos peaks (SESAME H/V User Guidelines, 2004).

3.3.4.2.5 Peak pronunciado y de origen industrial

Las frecuencias de origen industrial con peaks pronunciados deben ser completamente descartados para la interpretación.

Para descartar que un peak tenga un origen industrial, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Los espectros brutos presentan peaks agudos en las tres componentes (N, E y Z).
- La técnica de disminución aleatoria (RDM) indica una amortiguación muy baja (<5%).
- Los peaks se agudizan cuando se disminuye el suavizado de la curva H/V.

En la Figura 28 se puede visualizar la un peak local bien estrecho en la frecuencia F_1 que tiene un origen industrial. Este peak se debe a ruido o maquinaria provocado por el hombre. El reprocesamiento con diferentes parámetros de suavizado (gráfico de abajo a la derecha) muestra que se vuelve cada vez más estrecho al disminuir el suavizado de la curva H/V, con una amplitud cada vez mayor cuando el valor de "b" (suavizado de Konno-Ohmachi) está aumentando, este un típico comportamiento de origen industrial. Una segunda confirmación se obtiene del hecho que el peak estrecho ocurre en la misma frecuencia en los espectros de Fourier de las tres componentes (gráfico de abajo a la izquierda).

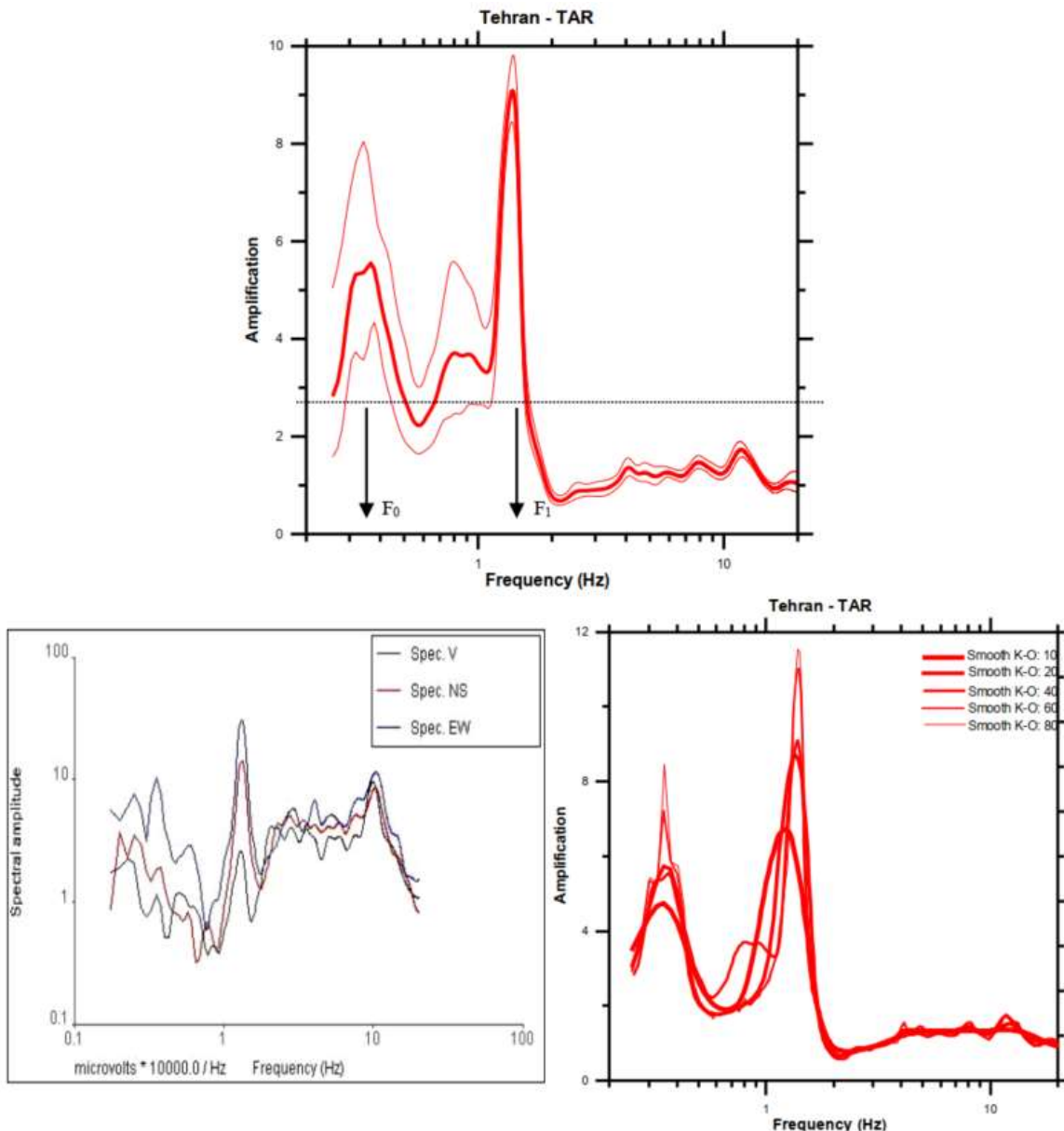


Figura 28: Ejemplo de curva H/V con frecuencia de origen industrial (arriba), espectros de Fourier en las componentes (abajo izquierda) y curvas reprocesadas con distintos valores de suavizado (abajo derecha) (SESAME H/V User Guidelines, 2004).

3.3.4.2.6 Curvas H/V planas

Si estamos frente a una curva H/V plana, que tiene valores de amplitud entre 0,5 y 2,0, sin ningún peak claro, es muy probable que no presente ningún contraste de impedancia pronunciado en profundidad. Sin embargo, esto no significa necesariamente que no haya amplificación de sitio. Por lo tanto, no se debe apresurar demasiado al interpretar la curva H/V plana en términos de un sitio sin amplificación: esto solo se puede hacer para sitio de roca.

En casos donde la información geológica disponible indica inequívocamente que se trata de un sitio de roca dura, la curva H/V plana puede interpretarse como un buen sitio de

referencia no erosionado y libre de cualquier amplificación, incluso a altas frecuencias. Un ejemplo claro de este tipo de curva se muestra en la Figura 29.

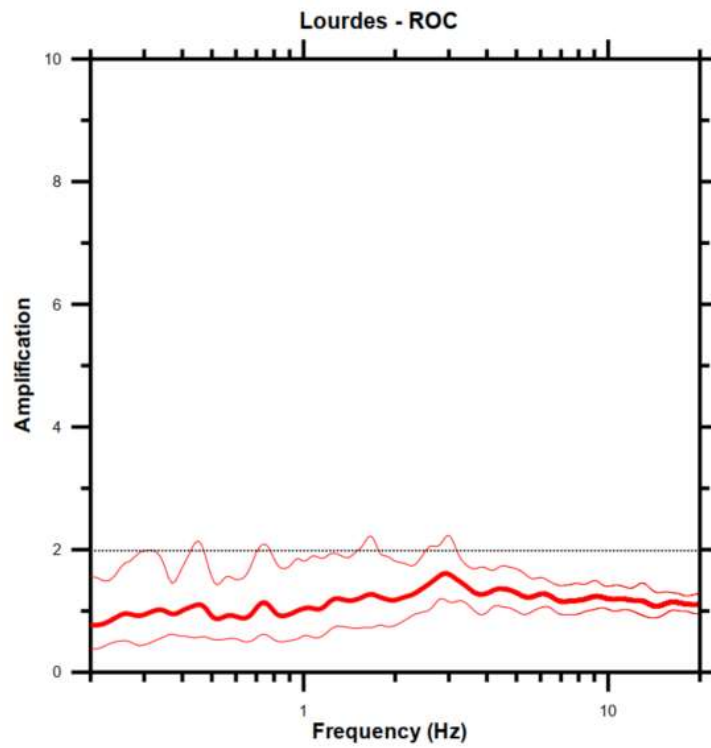


Figura 29: Ejemplo de curva H/V plana de sitio en roca, específicamente en la confluencia de dos valles (SESAME H/V User Guidelines, 2004).

4 CASO DE ESTUDIO:

4.1 Antecedentes del área de estudio

4.1.1 Contexto Geomorfológico

En cuanto a la geomorfología, la comuna de Concón se localiza sobre una topografía irregular, conformada hacia la costa y hacia el sur, por terrazas litorales recortadas por quebradas y cubiertas de dunas. Hacia el este, está delimitada por cordones pertenecientes a la Cordillera de la Costa, al norte por el río Aconcagua y su desembocadura, y al suroeste por el océano Pacífico. El desarrollo de la ciudad se ha realizado sobre estas condiciones topográficas, que inciden en situaciones morfológicas de alturas relevantes dentro del total de la meseta de terraza marina. Por el sector sur se encuentra la localidad de Reñaca con la desembocadura del Estero Reñaca, que es parte de la Cuenca Estero Reñaca, la cual se componen con quebradas y depósitos del estero, que terminan en el sector de la playa de Reñaca.



Figura 30: Geomorfología de zona de estudio: localidades de Reñaca y Concón. Fuente: elaboración propia en base a Google Earth.

4.1.1.1 Cordillera de la Costa (a):

Constituye un sector formado por lomajes con pendientes fuertes, destacando la línea de cumbres entre los cerros Torquemada y Cóndores. Las laderas de los cerros presentan remanentes de vegetación nativa con formaciones boscosas en el fondo de las quebradas.

4.1.1.2 Río Aconcagua y Estero Reñaca (b):

La desembocadura del Aconcagua se emplaza entre los cordones divisorios formados por el cerro Mauco por el norte y Torquemada por el sur, antecedidos por un sistema de terrazas litorales; forma un amplio estuario de influencia fluvio-marina, en cuyo curso inferior se reconocen varios niveles de terrazas fluviales. Río arriba, el río Aconcagua recibe como tributario costero al estero Limache. Por el lado sur se encuentra el Estero Reñaca rodeado por quebradas, que es parte de una cuenca hidrográfica de carácter costero interfluvial, la cual se origina en la cordillera de costa (Cerro El Cóndor y Los Culenes) y desemboca en el océano Pacífico.

4.1.1.3 Sector Costero (c):

Comprende el borde costero, con playas, acantilados y dunas incorporadas a dos niveles de terrazas marinas con altitudes aproximadas de 80 y 180 m.s.n.m., debido al retroceso del mar solo quedan algunos acantilados vivos. Otro elemento son las dunas que actualmente se encuentran sobre el nivel del mar, compuestas por sedimentos finos relativamente recientes que derivaron de rocas graníticas del batolito costero, se identifican dunas semiestabilizadas, estabilizadas y activas. Las playas litorales constituyen el principal elemento del paisaje litoral, aunque experimentan cambios importantes a través del año, ya que se erosionan durante el invierno y en verano vuelven a rellenarse debido al mayor aporte de sedimentos fluviales.

- Acantilado Costero: Conformado por acantilados inactivos, que presentan estabilización de sus taludes por la vegetación o la construcción urbana, tienen pendientes de medianas a fuertes (20 a 90°), y se encuentran separados de la línea de costa, en algunos casos, por la zona de sedimentación marina correspondiente a las playas.
- Planicies Litorales: Ocupan grandes extensiones y se conforman de mantos de rodados grandes combinados desordenadamente con gravas y arenas gruesas de origen marino y fluvial, y vastos campos de dunas relictas. En el borde costero de la comuna, los acantilados se intercalan con playas de poca extensión, las cuales están formadas por arenas de diferentes características y en algunos casos sobre playas de rodados.
- Terrazas Fluvio – Marinas: En la desembocadura del río Aconcagua, las geoformas planas y de baja pendiente forman un delta de ensenada amplia, con una serie de meandros por los cuales el mar penetra la costa, conformando un ecosistema de ambientes mixtos, como estuariales, de humedales costeros asociados a sistemas de agua dulce y ambientes terrestres de costa templada.
- Dunas: Corresponden a formaciones dunarias antiguas datación plesitocena (2,3 millones de años – 100 mil años), y holocénica (100 mil años al presente), relacionadas con grandes depósitos eólicos de sedimentos finos que provienen de la descomposición de las rocas cristalinas, las que en el pasado fueron transportadas por el viento desde la playa al sector inmediatamente continuo a ésta. Actualmente se encuentran estabilizadas o semiestabilizadas por la vegetación y las urbanizaciones, en el sector de Costa Brava., que se encuentran sobre una terraza marina entre los 25 y los 80 m.s.n.m. de altitud con forma colinar, no están

siendo alimentadas por sedimentos desde la playa, su tendencia evolutiva natural, sin intervención humana, sería hacia una estabilización por parte de la vegetación y procesos de erosión eólica, hasta equilibrarse ambos.

4.1.2 Contexto Geológico

El contexto geológico es muy importante en esta investigación, puesto que nos dará ciertas directrices o ciertas líneas en el mapa que deberían esperarse en una zonificación sísmica, ya que, dependiendo de la zona de estudio, podrían existir depósitos muy distintos en cuanto a rigidez, por lo cual podríamos esperar cierta tendencia al superponer las zonas sísmicas con la geología del lugar.

4.1.2.1 Grimme K. y Álvarez L. (1964)

El principal mapa geológico que abarca toda la zona de estudio es un mapa elaborado por los autores Grimme K. y Álvarez L. (1964), quienes presentaron un trabajo con los resultados obtenidos durante estudios realizados para la confección de la carta del suelo de fundación de Valparaíso y Viña del Mar, que incluye las localidades de Reñaca y Concón, que puede visualizarse en la Figura 31.

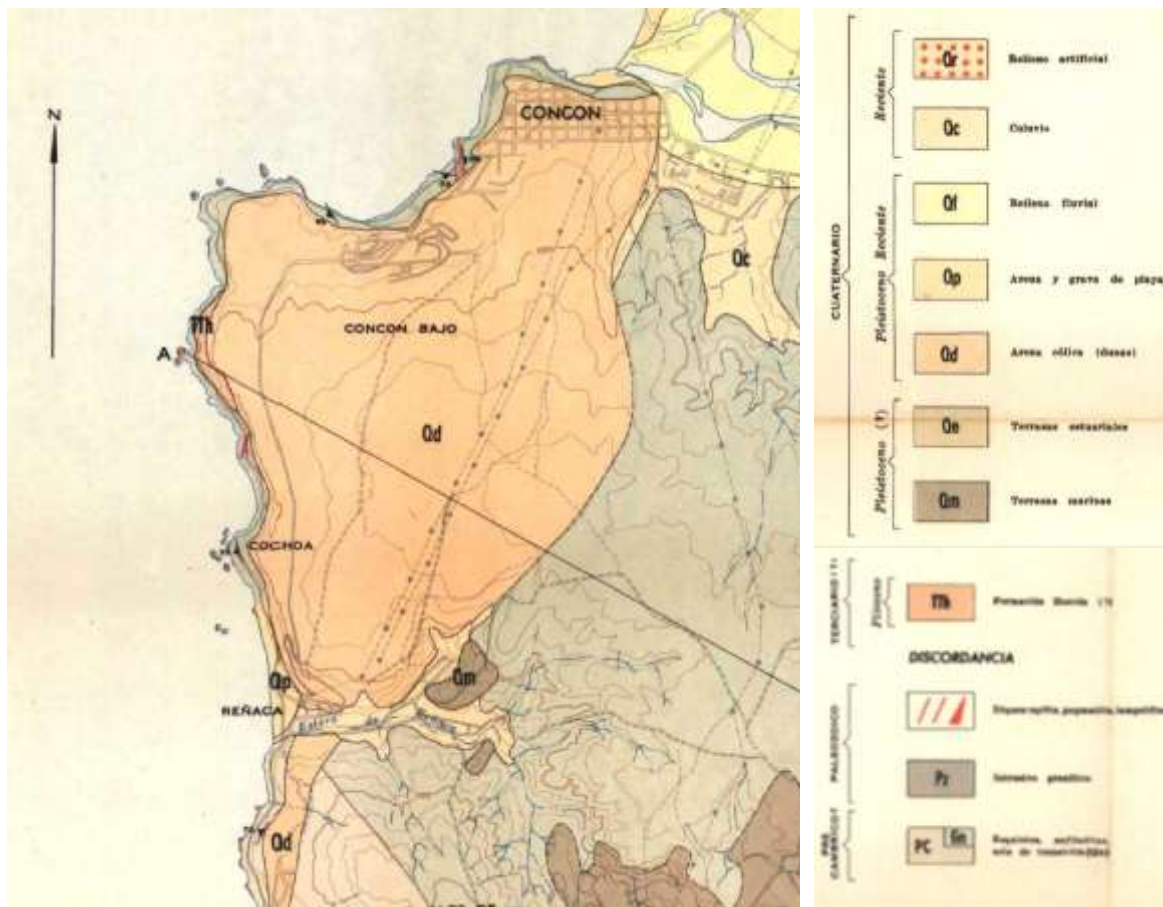


Figura 31: Geología en zona de estudio (Grimme, K. y Álvarez, L., 1964).

En este trabajo se distinguen cinco unidades de suelo de fundación: roca fresca, roca meteorizada, arenas y gravas cementadas, arenas no cementadas y relleno artificial.

Las principales unidades geológicas presentes en la zona de estudio son:

- Arena y grava de playa (Qp): Unidad perteneciente al Cuaternario, Pleistoceno reciente, que se presentan en la localidad de Reñaca.
- Arena eólica (dunas) (Qd): La conforman sedimentos de paleodunas inactivas, constituidos por arenas amarillas. Se presentan en la ciudad de Viña del Mar y localidades de Reñaca y Concón.
- Qm: Terrazas marinas, sedimentos marinos, conformados por limos, arenas y gravas. Se presentan ciudad de Viña del Mar y plan de Reñaca.
- TTh: Formación Horcón, compuesta por conjunto de areniscas, limolitas y arcillolitas, poco consolidadas, de color amarillento pardusco, con contenido fosilífero. Se encuentran parcialmente cementadas y presentan intercalaciones de gravas y rodados de porfídicas.
- PC, Gn: Esquistos, anfibolitas, roca con textura lepidoblástica y constituida por oligoclasa levemente alterada a sercítica, cuarzo con extinción ondulosa y anfíbola alterada a biotita y clorita. Neis granítico de transición (Gn), roca de color gris claro, grano grueso y con equistosidad.

4.1.2.2 Actualización Plan Regulador Comunal de Concón (2014)

Como mapa secundario, pero más actualizado se consideró un mapa geológico de la zona urbana de Concón, elaborado en los estudios de riesgos para la actualización del plan regulador de la comuna de Concón (2014), en base a SERNAGEOMIN (2002). Este mapa se puede visualizar en la Figura 32:

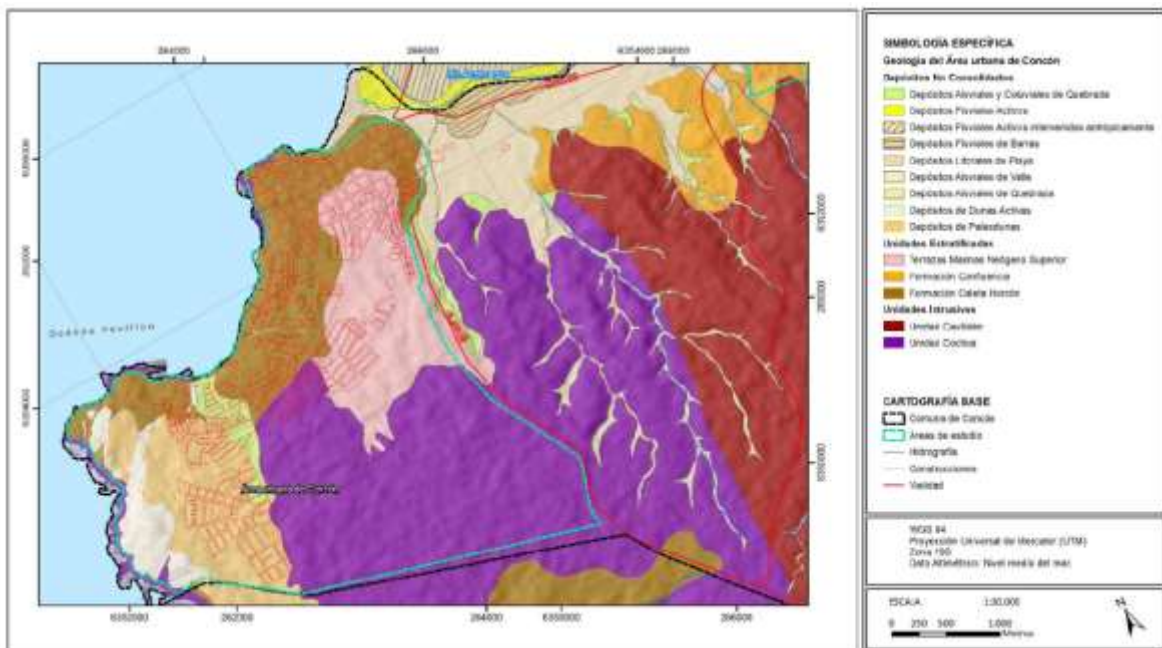


Figura 32: Mapa Geológico y Geomorfológico del área urbana de Concón (Actualización P.R.C. de Concón (2014) en base a SERNAGEOMIN (2002)).

Las principales unidades geológicas definidas en la zona de estudio para este mapa:

- Depósitos No Consolidados – Eólicos Antiguos (Depósitos de Paleodunas): Arenas de color pardo que se encuentran conformando dunas fósiles, establizadas y con reactivación.

- Depósitos No Consolidados – Eólicos Activos (Depósitos de Dunas Activas): Corresponden a arenas finas amarillas que conforman las dunas activas del área de estudio.
- Formación Caleta Horcón: Unidad compuesta por un conjunto de areniscas, limolitas y arcillolitas, poco consolidadas, de color amarillento pardusco, con contenido fosilífero. Se encuentran parcialmente cementadas y presentan intercalaciones de gravas y rodados de rocas porfídicas.
- Unidad Cochoa: Corresponde a un conjunto de tonalitas, granodioritas, monzodioritas y sienogranitos (Gana, 1996), de grano medio a grueso, de edad Paleozoico (Rivano, et al., 1993).
- Formación Confluencia: Corresponde a un conjunto de conglomerados, brechas, areniscas y limolitas poco consolidadas, con resto de vegetales mal preservados. En esa unidad (Gana, 1996) distinguen facies predominantemente continentales aluviales, en parte transicionales, las que engranan hacia el oeste con los estratos marinos superiores de la Formación Caleta Horcón.

4.1.3 Estratigrafía de sitios de la zona de estudio

Gracias a la colaboración de la empresa Ferrara, se ha podido recopilar un total de 91 informes de mecánica de suelos para la zona de estudio, los cuales incluyen tanto informes de empresas consultoras externas como informes elaborados por Ferrara. Estos informes externos fueron proporcionados por clientes para la realización de estudios geotécnicos y asesorías en proyectos geotécnicos llevados a cabo por Ferrara. Dentro de estos informes se han realizado exploraciones geotécnicas a través de calicatas y sondajes, así como ensayos geofísicos y de laboratorio.

En términos generales, los suelos más representativos en la zona clasifican como arenas algo limosas de clasificación USCS variable entre SP, SP-SM, SP-SM (ML) y SM. Estos suelos presentan un contenido de 0% de gravas, un rango de 85-95% de arenas y 5-15% de finos, siendo suelos no plásticos con niveles de humedad que varían de baja a media. En algunos casos específicos de suelos costeros, se observa un mayor contenido de humedad. No se detectaron olores particulares de los suelos, ni presencia de cementación, predominando estructuras homogéneas en general. Se han identificado diferentes colores para los distintos tipos de suelos, desde tonos café claro para la arena de duna, café oscuro para la “duna vieja”, se identifican colores café amarillento y café grisáceo para la arena limosa (maicillo); y ante la roca tipo granito gneis meteorizado con colores que van desde grises a amarillentos blanquizcos y gris verdoso.

En el sector sur de Reñaca, específicamente en la zona de subida por Jardín del Mar hacia Av. Gómez Carreño, se encuentra un suelo predominantemente del tipo macillo limo arenoso de grano grueso, con una transición desde roca muy meteorizada a roca más sana en profundidad.

Por otro lado, en los sectores sobre los acantilados del borde costero, es decir desde subida Av. Edmundo Eluchans y la subida Av. Gastón Hamel Nieto, se observan arenas de dunas de grano fino mal graduada de origen eólico (duna), mostrando una compacidad suelta en las capas superficiales y que aumenta en profundidad, hasta volverse muy compacta. Posteriormente se observa una transición a suelo residual (maicillo) antes de transformarse en una roca tipo granito altamente meteorizada, con bajos valores de índice de calidad de la roca (RQD) que oscilan entre el 10% y el 50%.

En relación con la napa freática, se ha identificado su presencia en algunos sitios costeros como en el plan de Reñaca, donde se sitúa entre 1,20 m y 2,0 m de profundidad y a no más

4.1.5 Clasificación Sísmica de suelos

Durante la revisión de los informes de mecánica de suelos de los 91 proyectos en la zona de estudio, se ha obtenido la clasificación sísmica del suelo de acuerdo con la norma NCh433 y el decreto 61 del año 2011 (revisar metodología en la sección 4.2.3.1). Estos resultados serán empleados para llevar a cabo un análisis comparativo entre la clasificación sísmica actual y la propuesta de clasificación sísmica. En la Figura 34 se puede observar las clasificaciones de los sitios estudiados siguiendo cierta tendencia en los resultados.

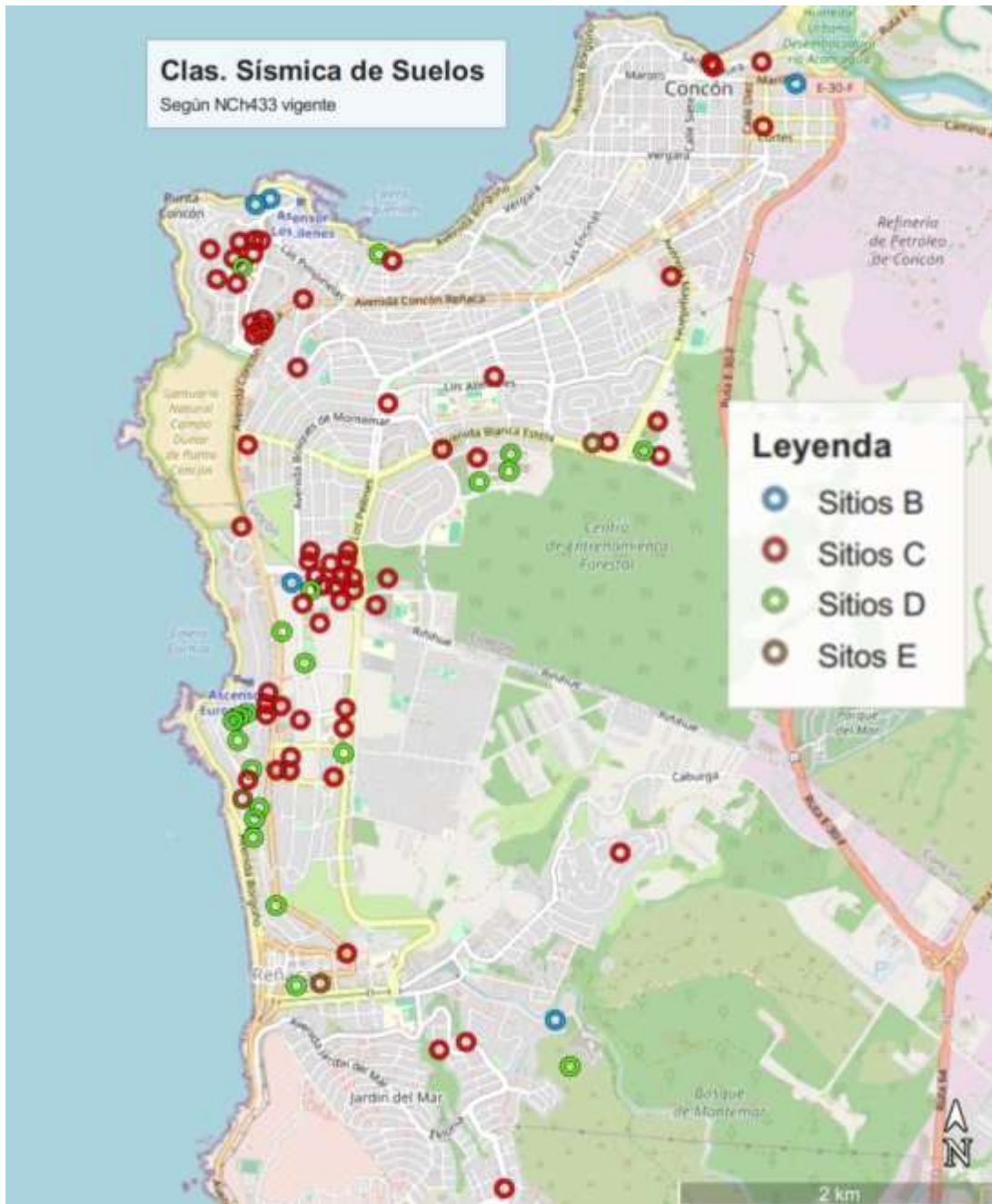


Figura 34: Clasificaciones sísmicas de suelos obtenidas de los informes de mecánica de suelos.

4.1.6 Propuesta preliminar de zonificación sísmica por Baquedano F. (2012)

El estudio más completo hasta la fecha que abarca la zona de estudio fue el realizado por Baquedano, F. (2012): “*Estudio de frecuencia predominante de los suelos de Valparaíso – Viña del Mar y una propuesta de microzonificación preliminar*”, presentado en el VII Congreso Chileno de Geotecnia. En dicha investigación se realizaron 40-45 mediciones de frecuencia predominante del suelo en la zona de estudio. Esta propuesta estudia con bastante detalle la relación entre frecuencia predominante y la geología local, por lo que las zonas sísmicas resultantes de dicho estudio se relacionan bastante bien con los suelos locales. En la Figura 35 se visualiza los valores de frecuencia predominante del suelo y el tamaño del punto tiene relación con el valor de la amplitud de la relación espectral H/V, los colores tienen relación a las zonas que fueron definidas según el comportamiento sísmico.

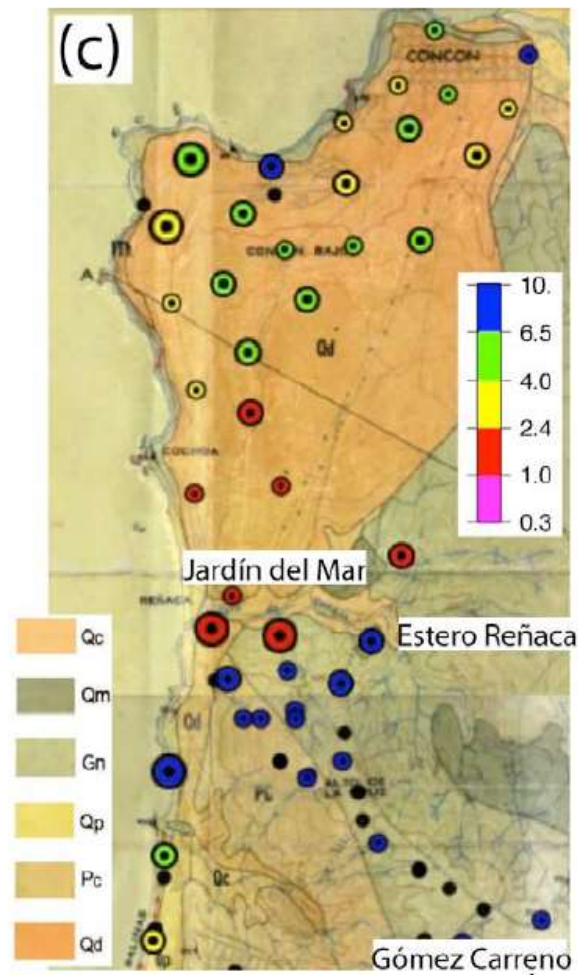


Figura 35: Estimación de frecuencia predominante, tamaño es proporcional a la amplitud R/V, (Baquedano F., 2012). Mapa geológico de Reñaca y Concón (modificado de Álvarez et al., 1964).

La propuesta de zonificación sísmica estudia con bastante detalle la relación entre frecuencia predominante y la geología local, por lo que las zonas sísmicas resultantes de dicho estudio se relacionan bastante bien con los suelos locales Figura 36. El estudio determinó 4 zonas que se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 8: Zonas con distinto comportamiento sísmico en base a frecuencias predominantes, Fuente: Elaboración propia en base a Baquedano F., 2012.

Zona	Descripción	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]
I	Rocas Intrusivas	$F_0 > 6.5$	$T_0 < 0.154$
II	Rocas intrusivas meteorizadas y depósitos de suelos blandos	$4.0 < F_0 < 6.5$	$0.250 < T_0 < 0.154$
III	Sedimentos Blandos	$2.4 < F_0 < 4.0$	$0.417 < T_0 < 0.250$
IV	Sedimentos sueltos o poco compactados	$F_0 < 2.4$	$T_0 > 0.417$

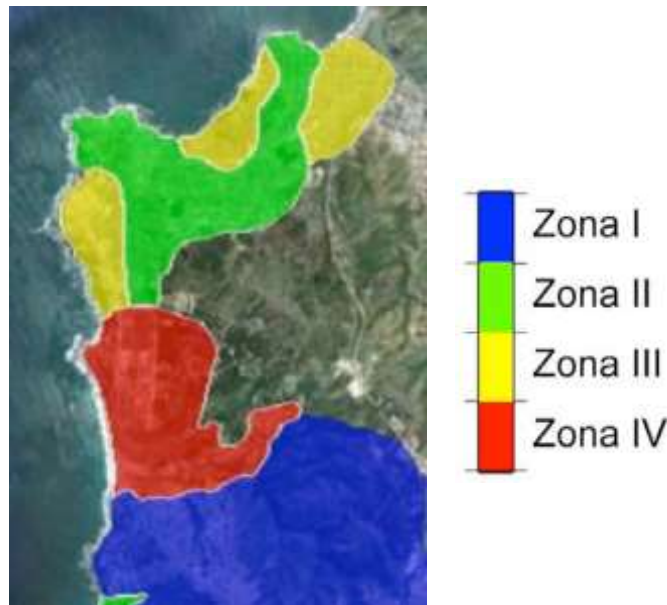


Figura 36: Propuesta de microzonificación preliminar en zonas de Reñaca y Concón (Baquedano F., 2012).

Sin embargo, hay algunos sitios fuera de la zona de estudio que pretenden ser completados con este estudio, y a la vez entregar una mayor cantidad de mediciones, generando una mayor densificación de puntos en la zona de estudio.

4.2 Metodología de Trabajo

4.2.1 Alcance

La investigación comienza con la recopilación de una serie de informes de mecánica de suelos en la zona de estudio (localidades de Reñaca y Concón), en donde se obtendrán los valores de velocidad de onda de corte para los primeros 30 m (V_{s30}) y la clasificación sísmica del sitio según la normativa vigente de diseño sísmico de edificios (Decreto 61).

Luego, para la misma zona y en particular, usando como referencia los mismos puntos donde se cuenta con informes de mecánica de suelos para la elaboración de la grilla, se realizan mediciones de microvibraciones (3 componentes) siguiendo las recomendaciones del SESAME y utilizando el método Nakamura para la obtención del periodo fundamental del suelo.

El estudio que comprende esta investigación se puede separar en dos análisis que tendrán sus propias metodologías:

1. Microzonificación sísmica: Elaboración de curvas isoperiodos con los valores de periodo fundamental del suelo T_g obtenidos en la investigación; elaborar mapa de periodo fundamental, luego analizar microzonificación sísmica bajo distintos criterios.
2. Comparación de cambios en la Clasificación Sísmica de suelos para proyectos reales, según la norma de clasificación sísmica vigente (Sondaje y V_{s30}) versus la nueva propuesta de clasificación sísmica de los suelos (V_{s30} y T_g).

4.2.2 Mapa de zonificación

Con los resultados de los valores de periodo fundamental del suelo T_g emplazados en la zona de estudio se utilizará el software MATLAB para generar curvas de isoperiodos para representar la zona de estudio a través de periodos fundamentales del suelo.

Con las curvas de isoperiodos se podrá generar un mapa de colores en función de los valores de periodo fundamental en la zona de estudio. Esto permitirá que se pueda encontrar valores de periodo fundamental para aquellos sitios que se encuentran en la zona y no necesariamente hay una medición exactamente en el lugar.

Contando con la posibilidad de generar mapa de colores, se podrá establecer ciertas zonas delimitadas por ciertos valores y rangos de periodo. Estos valores y rangos serán evaluados por los establecidos por la nueva propuesta de clasificación sísmica (4.2.3.2) y por la propuesta de microzonificación sísmica de Baquedano, F. (4.1.6), estos mapas serán analizados para determinar si será necesario realizar ajustes en una propuesta de microzonificación sísmica que identifique la zona de estudio, ya sea de manera sísmica como geológica.

4.2.3 Clasificación Sísmica de los sitios

De los informes de mecánica de suelos que se cuentan en la zona de estudio, se obtendrá la velocidad de onda de corte de los primeros 30 m de profundidad, esto puede ser obtenido mediante dos ensayos geofísicos: ReMi y MASW. No se hará diferencia entre ambos ensayos geofísicos, si no que se obtendrán sus resultados para la base de datos

4.2.3.1 Clasificación Sísmica de los sitios según normativa actual D61

Para la clasificación sísmica del sitio, se considerarán solamente las clasificaciones entregadas por informes en donde se haya realizado sondaje, puesto que la normativa permite castigar en una clasificación cuando no se cuenta con sondaje dentro de la exploración y no se pretende mezclar esas clasificaciones en este estudio, debido a ciertos criterios que hayan tomado las empresas para decidir no realizar sondaje y así abaratar costos en la exploración.

La clasificación sísmica se obtiene según la tabla de clasificación sísmica del terreno de fundación siguiente:

Tabla 9: Clasificación sísmica del terreno de fundación según D61 (2011).

Suelo Tipo		V_{s30} (m/s)	RQD	q_u (MPa)	(N_1) (golpes/pie)	S_u (MPa)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	$\geq 50\%$	≥ 10 ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)		
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		$\geq 0,40$ ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 50	
C	Suelo denso o firme	≥ 350		$\geq 0,30$ ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 40	
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180			≥ 30	$\geq 0,05$
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180			≥ 20	$< 0,05$
F	Suelos Especiales	*	*	*	*	*

Donde se definen los tipos de suelo:

- Suelo Tipo A:**
 Para Suelo Tipo A se debe justificar V_{s30} , más RQD en roca y q_u en suelo cementado, con un mínimo de 5 mediciones. En aquellos casos donde se demuestre que todo el perfil de los 15 metros superiores presenta una velocidad de onda de corte superior a 900 m/s, no será necesaria la justificación de RQD, ni q_u .
 Cuando la estructura se apoya íntegramente en el basamento rocoso y este basamento cumple las características geotécnicas antes indicadas, independientemente de los materiales geotécnicos existentes sobre el sello de fundación, el sitio clasifica como Suelo Tipo A.
- Suelo Tipo B:**
 Para Suelo Tipo B se debe justificar V_{s30} , más N_1 , en caso de arenas, y q_u , en el caso de suelos finos. En el caso de suelos granulares gruesos, donde no resulta posible el uso del Índice de Penetración, se deberá proporcionar una detallada descripción estratigráfica del terreno hasta una profundidad de 30 metros, medidos a partir de la superficie natural, indicando el tamaño máximo nominal de partícula cada 5 metros de profundidad.
 En el caso que sólo se disponga del perfil de V_s en profundidad y que dicho perfil indique claramente que V_s aumenta monótonamente con la profundidad y además, se cumple que $V_{s30} > 500$ m/s, se podrá clasificar automáticamente como suelo tipo C, sin necesidad de otras mediciones.
 Una excepción son las gravas fluviales de espesor mayor o igual a 30 metros (medidos a partir de la superficie natural), las cuales clasifican en Suelo Tipo B sin necesidad de medir V_s , ni presentar la descripción estratigráfica detallada. El sustento para establecer la presencia de gravas fluviales de espesor mayor o igual a 30 metros, puede ser de tipo geológico, o información confiable y demostrable de sectores del entorno inmediato. Se procesaron los datos según

- **Suelo Tipo C:**
Para Suelo Tipo C se debe justificar $V_{s_{30}}$, más N1, en caso de arenas, y q_u , en el caso de suelos finos.
En el caso de suelos granulares gruesos, donde no resulta posible el uso del Índice de Penetración, se deberá proporcionar una descripción estratigráfica del terreno hasta una profundidad de 30 metros, medidos desde la superficie natural, indicando el tamaño máximo nominal de partícula cada 5 metros de profundidad.
En el caso que sólo se disponga del perfil de Vs en profundidad y que dicho perfil indique claramente que Vs aumenta monótonamente con la profundidad y además, se cumple que $V_{s_{30}} > 350$ m/s, se podrá clasificar automáticamente como Suelo Tipo D, sin necesidad de mayores mediciones.
- **Suelo Tipo D:**
Para Suelo Tipo D se debe justificar $V_{s_{30}}$, más N1, en caso de arenas, y S_u en el caso de suelos finos.
En depósitos de suelos arenosos donde se disponga de mediciones del Índice de Penetración, al menos cada un metro de profundidad en los 30 metros superiores y se cumpla que $N1 > 30$ golpes/pie, se podrá clasificar automáticamente el terreno como Suelo Tipo D, sin necesidad de otras mediciones. Dentro de los 30 metros de medición del N-SPT se aceptan en total no más de 5 metros con N1, en el rango de 20 – 29 golpes/pie.
En el caso que sólo se disponga del perfil de Vs en profundidad y que dicho perfil indique claramente que Vs aumenta monótonamente con la profundidad y además, se cumple que $V_{s_{30}} > 180$ m/s, se podrá clasificar automáticamente como Suelo Tipo E, sin necesidad de otras mediciones.
- **Suelo Tipo E:**
Para suelo tipo E se debe justificar $V_{s_{30}}$, más N1, en caso de arenas y S_u en el caso de suelos finos.
- **Suelo Tipo F:**
Se consideran Suelos Especiales (Tipo F) aquellos que presentan singularidades en su comportamiento mecánico y por tanto requieren estudios geotécnicos especiales. Como ejemplo se pueden citar: suelos licuables, suelos colapsables, suelos orgánicos, suelos sensitivos, turba, entre otros.

Observación: Cuando la información sobre el suelo de fundación permita clasificarlo dentro de dos o más tipos de suelo, se debe optar por Clasificación Sísmica que resulte en el caso más desfavorable.

4.2.3.2 Clasificación Sísmica de los sitios según nueva propuesta de normativa

Actualmente en Chile se está desarrollando una nueva propuesta de clasificación sísmica de suelos (Ruz & Finn, 2019), a través del comité NCh433. La propuesta pretende eliminar el valor N-SPT y q_{uu} para la obtención de una clasificación sísmica determinada, sin embargo, se incorpora el método de razones espectrales (H/V) para predecir el periodo predominante del suelo. Según esta propuesta, se requerirá para el estudio de un sitio, de mínimo 5 mediciones de vibraciones ambientales con registros de al menos 30 minutos de duración. También establece los criterios SESAME para la obtención de un peak y para la interpretación de resultados.

Para la determinación del periodo fundamental del suelo, se realizó 1 registro de microvibraciones ambientales de 30 minutos por sitio estudiado. La adquisición de datos, procesamiento de datos e interpretación de datos se siguieron según los temas 3.3, 0 y 4.3.5.

La Tabla 10 presenta un resumen de la nueva propuesta de clasificación, manteniendo los tipos de suelos y los límites de V_{S30} ya conocidos.

Tabla 10: Nueva propuesta de clasificación sísmica de suelos, Comité NCh433 (Ruz & Finn, 2019).

Suelo Tipo		V_{S30} (m/s)	T_g (segundos)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	< 0.15 (o H/V plano)
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500	< 0.30 (o H/V plano)
C	Suelo denso o firme	≥ 350	< 0.40 (o H/V plano)
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180	< 1.00
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180	/
F	Suelos especiales		

Con los resultados de las mediciones de periodo fundamental del suelo se podrá determinar la clasificación de suelo que tendrían los sitios con la nueva propuesta, y se realizará un análisis de los cambios que podrían sufrir ciertos sitios.

4.2.3.3 Comparación de clasificaciones sísmicas

Utilizando la información recopilada de 91 proyectos reales en la zona y sus respectivos informes de mecánica de suelos, se llevará a cabo un análisis para determinar cuántos de estos proyectos experimentarían cambios en su clasificación sísmica al aplicar la nueva propuesta normativa. Es importante destacar que la mayoría de los informes analizados no incluyen datos sobre el periodo fundamental del suelo. Por esta razón, se empleará el mapa de periodos que se desarrollará con el fin de estimar el periodo fundamental del suelo en aquellos sitios donde no se disponga de esta información.

4.3 Mediciones de Ruido Sísmico Ambiente

Las mediciones de ruido sísmico ambiente fueron realizadas por un equipo geofísico del tipo pasivo no invasivo ni destructivo, que consiste en medir las microvibraciones o ruido sísmico ambiente en las 3 direcciones geográficas (N-S, E-O y Z).

4.3.1 Descripción de equipos de medición

Para realizar las mediciones se requiere de un computador portátil, una fuente de energía como una batería, un sismógrafo (y un geófono de 3 componentes, los últimos dos detallados a continuación:

Detalles Técnicos del Sismógrafo:

- Configuraciones de 8, 12, 16 o 24 canales.
- Conversión A/D: 24-bit.
- Rango Dinámico: 144 dB (sistema), 110 dB (instantáneo, medido) a 2 ms, 24 dB.
- Distorsión: 0.0005% @ 2ms, 1.75 a 208 Hz.
- Ancho de Banda: 1.75 Hz a 20 Hz. Opciones disponibles de baja frecuencia de 0.6 Hz y DC.
- Operación: -30 a +70°C. Hermético y sumergible.



Figura 37: Sismógrafo GEODE, GEOMETRICS.

Detalles Técnicos del Geófono:

- Frecuencia Natural: 1 Hz.
- Altura: 20.3 cm.
- Diámetro: 20.3 cm.
- Peso: 11.3 kg.
- Protección IP67.
- Operación: -40 a +100°C.
- Rango operación: Vertical a 7.5° - Horizontal a 0.5°.
- Encamisado de aluminio.
- Tipo de sensor: GS-1 Seismometer.
- DC Resistance Options: 450Ω, 4550Ω, 17400Ω.



Figura 38: SeisMonitor GS-1 3C, GEOSPACE.

En la Figura 39 se puede apreciar la instalación de toda la instrumentación para realizar las mediciones.



Figura 39: Equipos de medición.

4.3.3 Descripción de la campaña en terreno

La campaña en terreno se inicia luego de establecer las ubicaciones de los lugares donde se debe realizar las mediciones, por lo tanto, lo primero que se realizó fue emplazar en el mapa los sitios en donde se contaba con un informe de mecánica de suelos (91 proyectos) para obtener la clasificación sísmica y de la misma manera el valor de velocidad de onda de corte V_{s30} (Figura 41).

Estos puntos fueron tomados como referencia para crear la grilla propuesta para ir a realizar las mediciones. Se consideró una grilla del tipo tresbolillo, y la separación fue definida según la recomendación de SESAME, que indica partir con un espaciamiento de 500 m y en caso de variaciones laterales entre resultados, se recomienda disminuir el espaciamiento a 250 m. Para la gran mayoría de la zona se estableció una separación de 500 m y para el caso del plan de Reñaca, en donde se esperaba una mayor variación lateral al ser una zona de depósitos variados como: arena y grava de playa, relleno fluvial del Estero de Reñaca, por el lado norte con arena eólica (dunas) y por el lado sur, encontrarse rodeado de afloramientos rocosos; se consideró una separación de 250 m. Cabe destacar que esta grilla no pudo ser perfecta, debido que en terreno es muy difícil respetar el punto exacto que se estableció inicialmente, ya que muchas veces los puntos coincidían con un espacio no apto para realizar la medición, tales como calle, propiedad privada, terreno irregular, paso de peatones, etc., por ende, la grilla final no es perfecta y se considera una representación aproximada y lo más real que se pudo obtener.



Figura 41: Emplazamiento V_{s30} de informes de mecánica de suelos recopilados.



Figura 42: Grilla preliminar establecida usando puntos de referencia en donde se cuenta con V_{s30} y sectores sin acceso

En la Figura 42 además se puede visualizar 4 zonas en donde no se logró acceder para realizar las mediciones, estas áreas son:

- 1) Terrenos bajo supervisión de fuerza armada con prohibición de acceso.
- 2) Terrenos conformados por cerros con poco acceso vehicular (Parque Natural Gómez Carreño).
- 3) Terrenos privados, límite entre Reñaca y Concón (cerrados completamente, sin acceso ni caminos).
- 4) Dunas de Concón, campo dunar con una gran diferencia topográfica y de complejo acceso, además de ser un sitio protegido ambientalmente, que no se verá afectado por construcciones.

4.3.4 Adquisición de datos

Como se ha mencionado anteriormente, las mediciones en cada sitio fueron registros de 30 minutos, sin embargo, el sismógrafo es capaz de grabar registros (o archivos) de menor duración, por lo tanto, se definieron 30 registros de 1 minuto cada uno.

El equipo GEODE al ser un sismógrafo principalmente utilizado para ensayos geofísicos ReMi y MASW, tiene de 8 a 24 canales, pensando en la cantidad de geófonos que se utilizan en esos ensayos, por lo tanto, se requiere reconocer solo 3 señales obtenidas por el programa de adquisición de datos “Geometrics Seismodule Controller”, tal como se aprecia en la Figura 43.

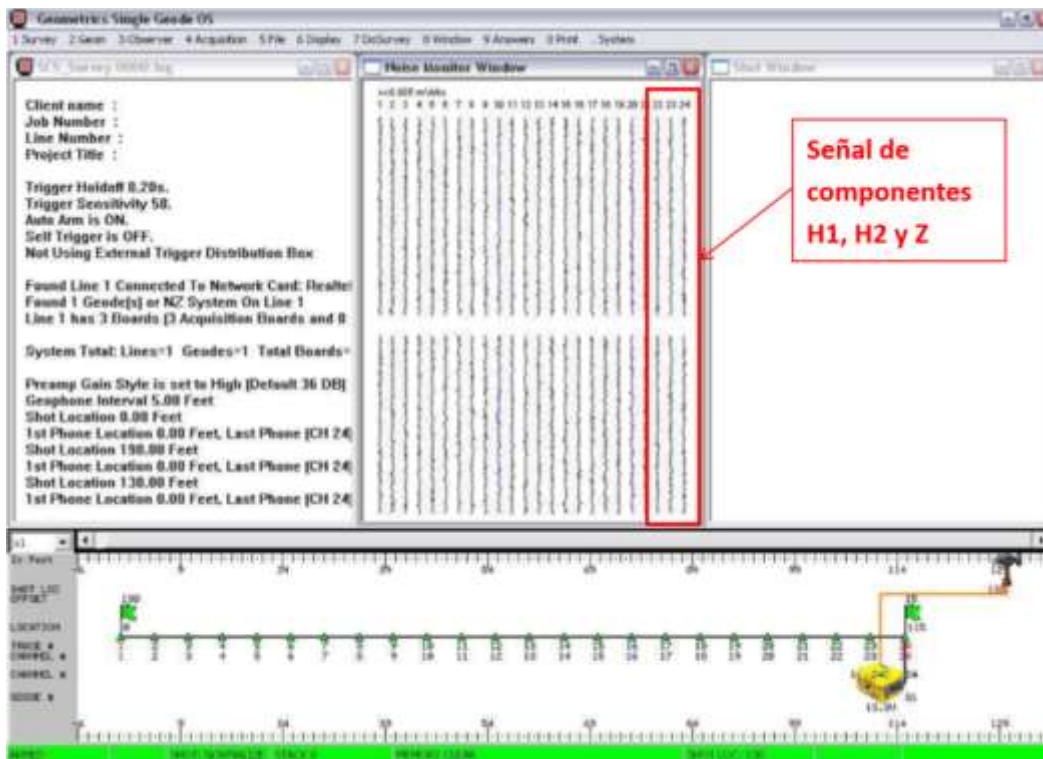


Figura 43: Programa Geometrics Seismodule Controller para la adquisición de datos.

Los 30 registros de 1 minutos se guardan en 30 archivos con extensión “.dat”, que pueden ser procesados en la gran mayoría de los programas de procesamiento de datos para geofísica. Para este caso en el cual se tienen 30 archivos es necesario juntarlos para obtener un registro de 30 minutos y que pueda ser procesado sin problemas. Para solucionar este problema es necesario abrir el software GEOPSY. Se parte con abrir los 30

archivos que contiene 90 registros (3 señales por archivo) como se puede ver en la Figura 44, luego se procede a editar el inicio y término de cada registro para que las señales queden de manera secuencial (Figura 45), y por último se procede a concatenar las señales para lograr 3 señales (N, E y Z) de 30 minutos de duración (Figura 46).

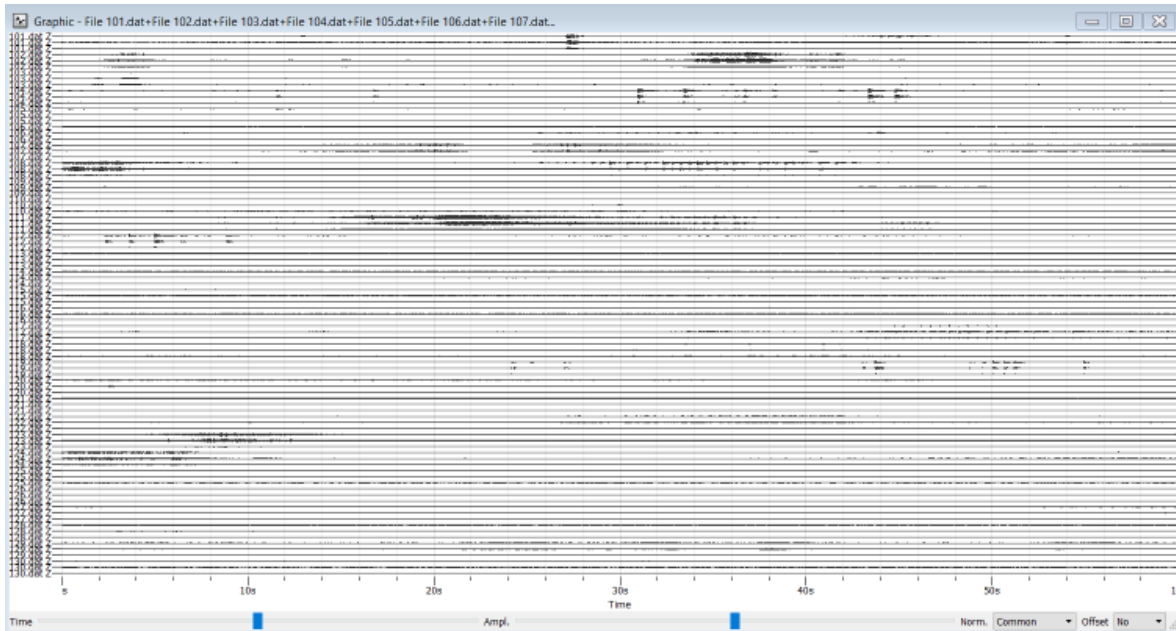


Figura 44: 90 registros de 1 minuto de grabación (N-S, E-O y Z).

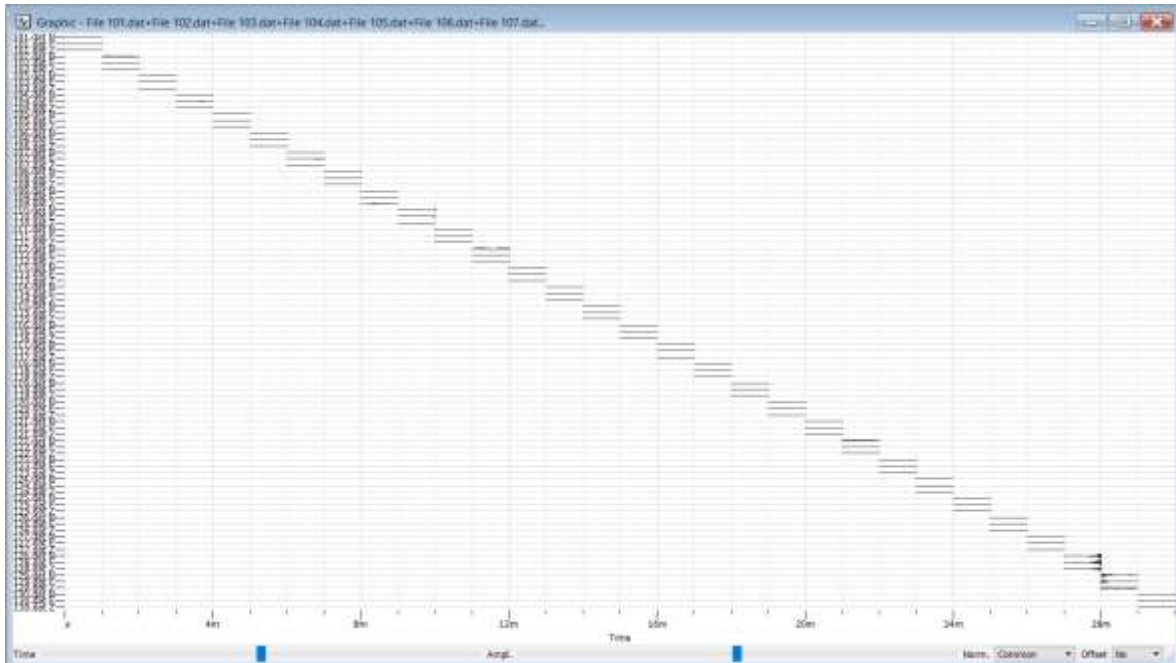


Figura 45: Edición de tiempos de comienzo y direcciones de señales (N, E y Z).

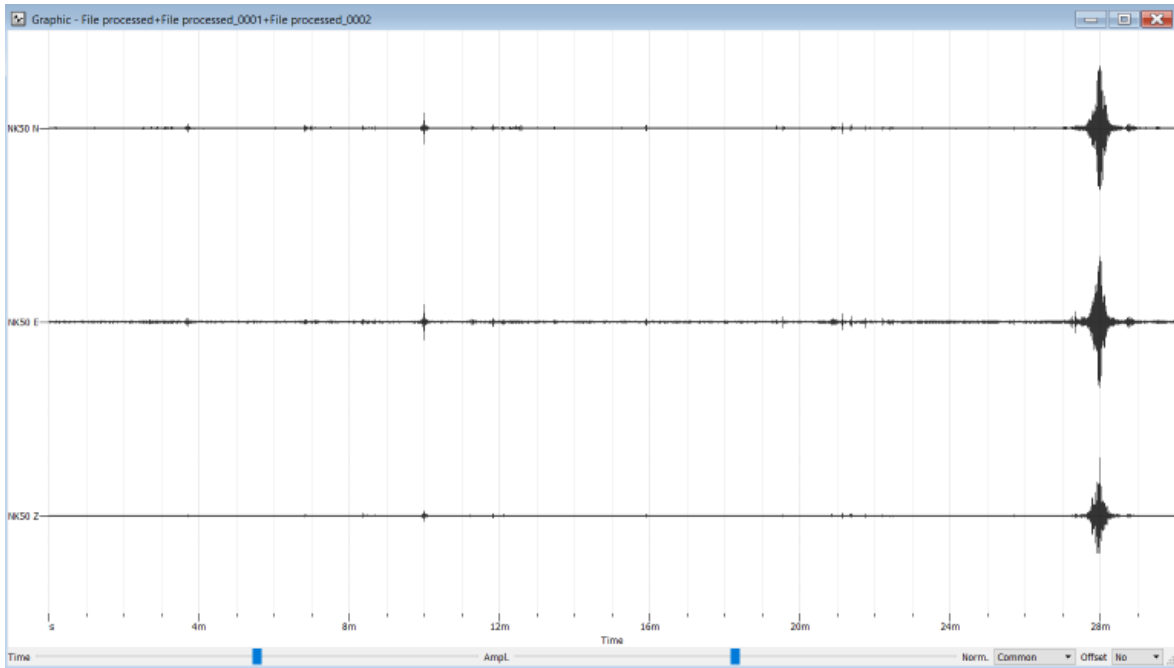


Figura 46: Señales concatenadas para obtener 1 registro de 30 minutos en las 3 coordenadas (N, E y Z).

La adquisición de los datos en terreno se llevó a cabo entre los días 17 de noviembre del 2018 y 01 de febrero de 2019, entre las 08:00 y las 18:00 horas. Tomando como referencia los puntos de la grilla propuesta en la Figura 42, se realizaron la mayor cantidad de mediciones posibles, de los 142 puntos propuestos, solo se pudieron realizar 130 mediciones, ya que en las 12 posiciones restantes, no fue posible ejecutar el ensayo, principalmente debido a problemas de acceso, tales como: imposibilidad para acceder a un terreno privado, no hay camino cercano para llegar en vehículo, punto emplazado estaba en una quebrada y también en ciertos sectores, era poco seguro para el personal y los equipos realizar la medición. En la Figura 47 se presenta en el mapa de la zona de estudio, los puntos de color verde donde se pudieron realizar las mediciones lo más cercano al punto de la grilla propuesto, y los puntos de color celeste donde no se pudo ejecutar la medición por las razones antes descritas.

Tabla 11: Resumen de mediciones ejecutadas y no ejecutadas según la grilla propuesta (elaboración propia).

Puntos de grilla	Cantidad [uni]	Porcentaje [%]
Mediciones ejecutadas	130	92%
Mediciones no ejecutadas	12	8%
Total	142	

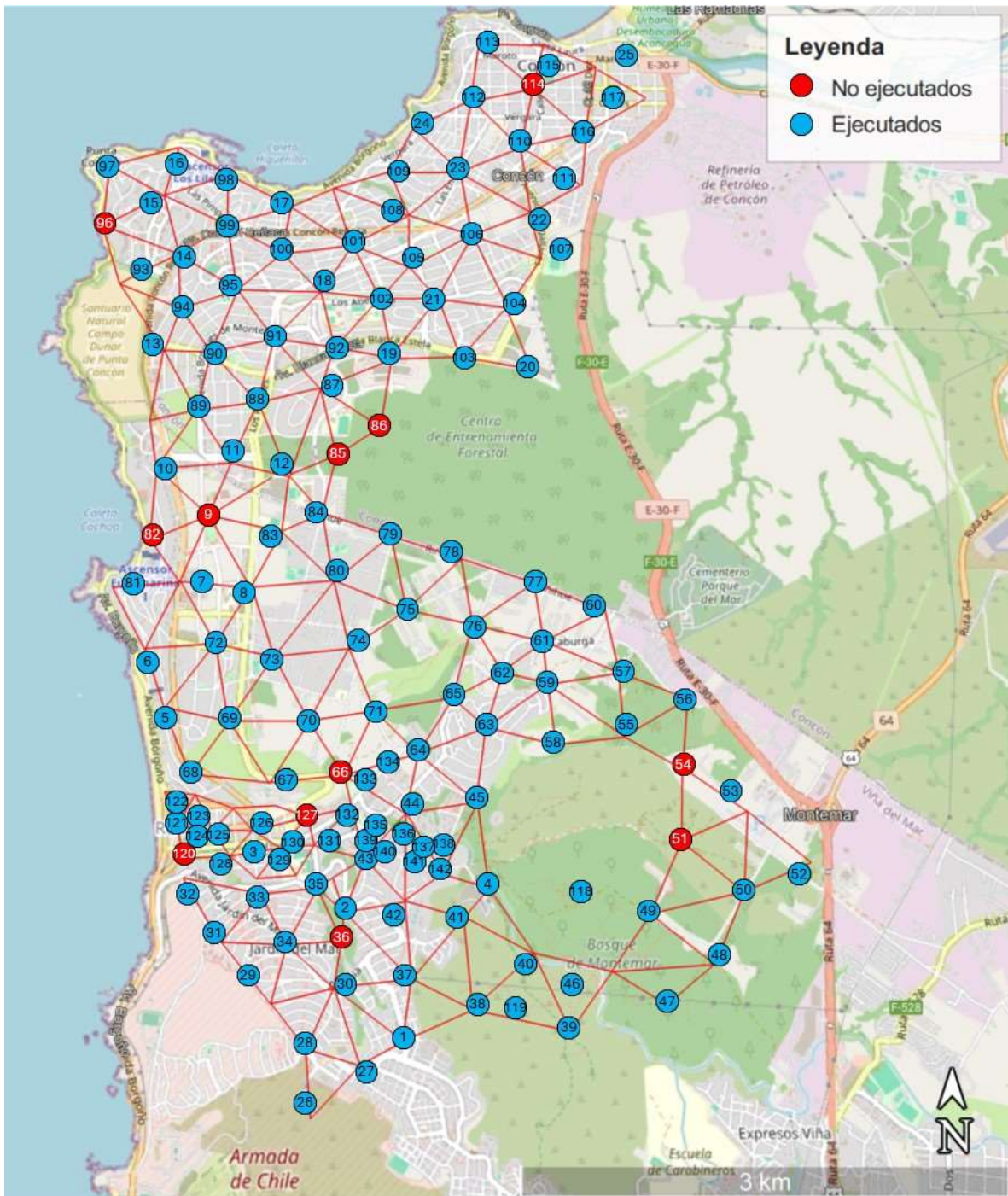


Figura 47: Emplazamiento de mediciones de ruido sísmico ambiente.

4.3.5 Procesamiento de datos

Luego de recopilados todas las mediciones, se procedió a procesar los datos siguiendo las recomendaciones de grupo SESAME y aplicado al software GEOPSY que se utiliza para el procesamiento de datos, análisis y cálculos de razones espectrales. Los registros concatenados de 30 minutos en las 3 componentes (Norte, Este y Z). Se selecciona la duración de las ventanas (30 segundos recomendados o seguir lo indicado en la Tabla 4), y ajustando los parámetros del algoritmo “anti-triggering” STA/LTA (Short Time Average over

Long Time Average) que se ha diseñado para rechazar los transitorios energéticos de las grabaciones de vibraciones ambientales, con vista de mantener solo las ventanas estacionarias o cuasi estacionarias.

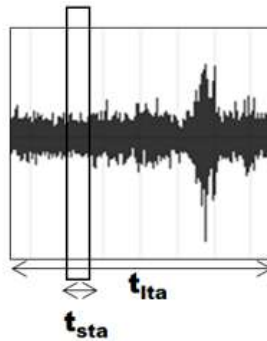


Figura 48: Ejemplo de registro y ventanas de tiempo asociadas a parámetros.

$$STA/LTA_{min} \approx 0,2 - 0,3 \quad (4-1)$$

$$STA/LTA_{m\acute{a}x} \approx 2,0 - 3,0 \quad (4-2)$$

En donde:

- *STA*: Ventana de un periodo corto de tiempo, de duración t_{sta} . Valor por defecto es de 1 s.
- *LTA*: Ventana de un periodo largo de tiempo, de duración t_{lta} . Valor por defecto es de 30 s.
- *STA/LTA*: Parámetro que compara los valores umbrales máximos y mínimos previamente definidos.

El algoritmo anti-triggering pretende seleccionar sólo las partes de la señal cuya amplitud es cuasi estacionaria, es decir, para que la relación *STA/LTA* se mantenga dentro de un rango limitado de valores en torno a 1. La Figura 49 muestra como el límite superior de *STA/LTA* pretende evitar los estallidos de energía producidos, por ejemplo, por peatones que caminan junto a un sensor. Esta selección de ventanas se realiza de manera automática mediante la opción anti-triggering antes descrita.

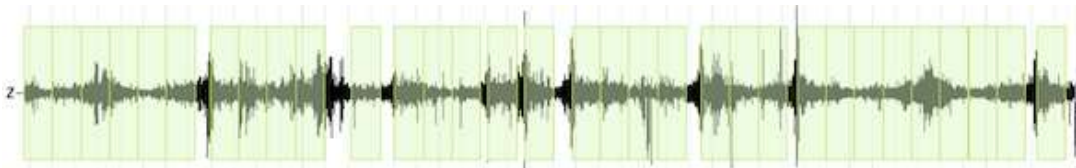


Figura 49: Ejemplo de algoritmo anti-triggering usado para seleccionar ventanas de tiempo estacionarias.

A la curva resultante H/V en el campo de frecuencias (luego de la aplicación de la transformada de Fourier para cada ventana), se aplica un suavizado del tipo Konno & Ohmachi, con un valor de constante de suavizado b en el rango de valores de 20 a 40.

$$k = \left(\frac{\sin \left(b \cdot \log \left(\frac{f}{f_c} \right) \right)}{b \cdot \log \left(\frac{f}{f_c} \right)} \right)^4 \quad (4-3)$$

El suavizado de la curva se puede apreciar en la siguiente Figura 50:

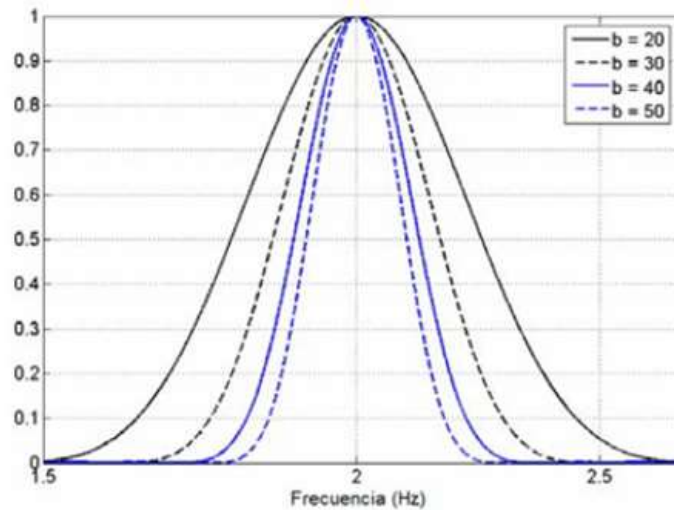


Figura 50: Tipo de gráficas al evaluar suavizado Konno & Ohmachi con distintos valores de la constante b.

El Software presenta el cálculo de la razón H/V de cada ventana y presenta finalmente las curvas de desviación estándar (máxima y mínima), y la curva promediada de la razón H/V de todas las ventanas, sobre esta curva resultante H/V del método Nakamura, se procede a una evaluación tanto de interpretación de los resultados como de análisis de criterios para la confiabilidad de los resultados, siguiendo la guía de recomendaciones del proyecto SESAME, resumido a lo indicado en las secciones 3.3.3 y 3.3.4, para procesamiento de datos e interpretación, según corresponda.

El proceso se puede resumir en los siguientes esquemas, que se compone de un primer procesamiento de datos (Figura 51) y la descripción del reprocesamiento de datos (Figura 52), que se puede repetir hasta que se cumplan los criterios SESAME, o bien, en última instancia, rechazar la medición y repetir la medición durante la noche para poder grabar registros más limpios.

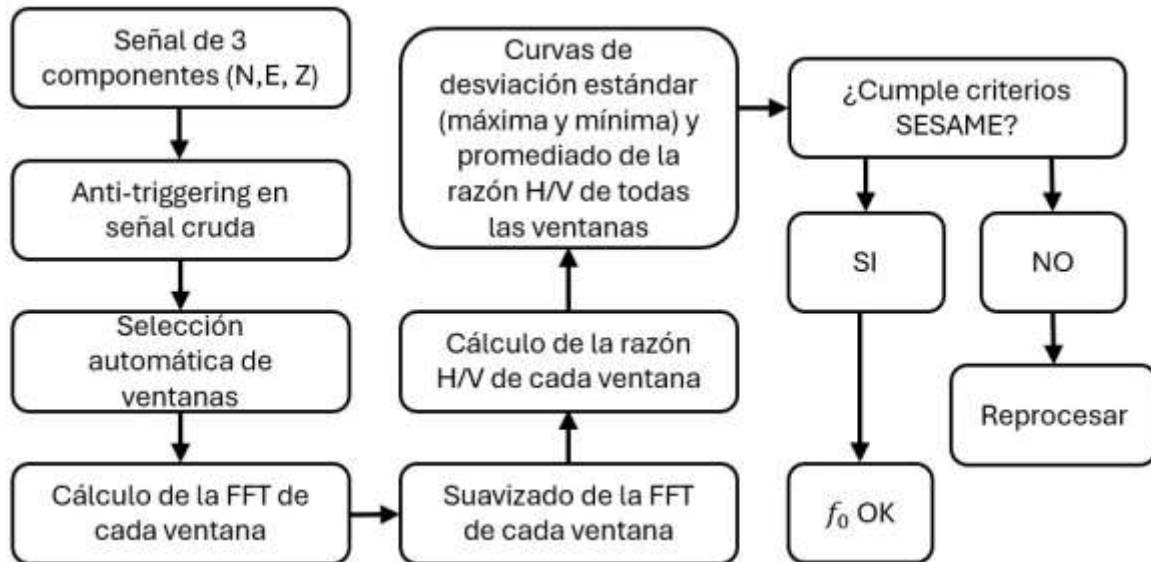


Figura 51: Esquema del procesamiento de datos.

El reproceso de datos consiste en mejorar las cualidades del peak, ya que muchas veces no se logran cumplir por muy poco algunos criterios de claridad del peak, por ende, reprocesar los datos incluyendo nuevas opciones, puede ayudar a mejorar el análisis e incluso que ciertos criterios de claridad del peak si se puedan cumplir. El reproceso incluye adicionalmente el cambiar algunos segundos el tiempo de selección de ventanas (l_w) según el valor de aproximado de f_0 según la Tabla 4, además se puede incluir un filtro pasa banda para eliminar ciertos rangos de frecuencias que no están aportando al resultado de la curva H/V, ya que en ciertos casos solo entorpecen y distorsionan la amplitud H/V en otros rangos de frecuencia, además, se incluye la eliminación de ventanas manualmente, sobre aquellas curvas H/V (de las ventanas) que no tienen una tendencia cercana al posible f_0 esperado y también perjudican al resultado del promediado de la razón H/V de todas las ventanas.

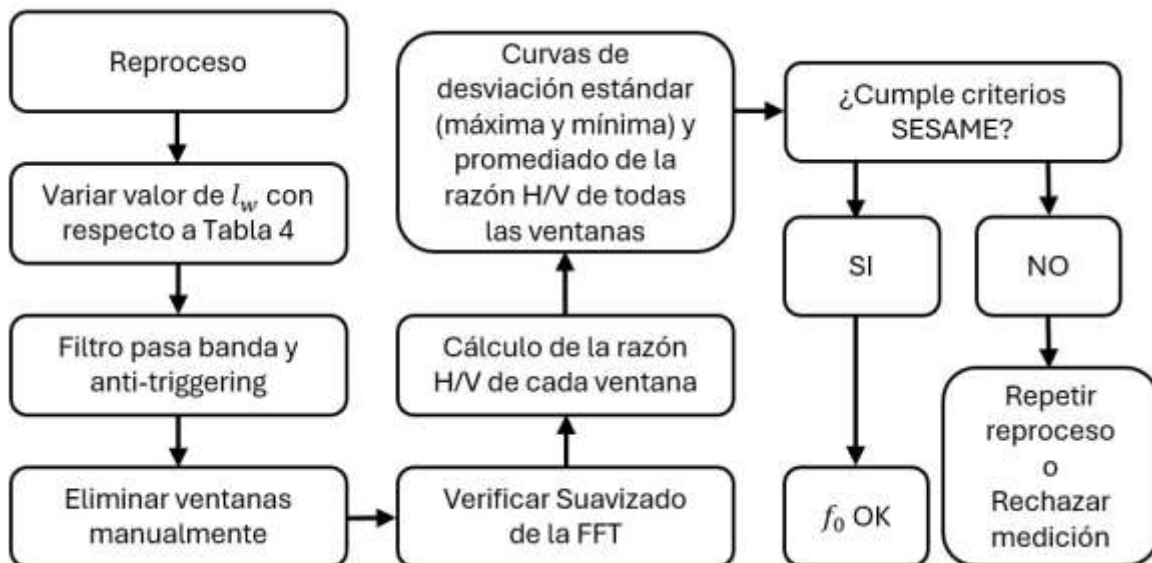


Figura 52: Esquema del reprocesamiento de datos.

5 RESULTADOS

En este capítulo se expondrán los resultados obtenidos en la investigación, comenzando con la presentación de los diferentes tipos de curvas H/V obtenidas y su distribución espacial en la zona de estudio. Posteriormente, se discutirán los periodos identificados en dicha área, lo que dará paso a la representación de las curvas de isoperiodos y al mapa de periodos fundamentales. Además, se incluirán dos mapas de zonificación: uno establecerá zonas de acuerdo a los límites de T_g , según la nueva propuesta de clasificación sísmica de suelos, mientras que el otro empleará la propuesta preliminar de zonificación sísmica por Baquedano, F. (2012).

Asimismo, se llevará a cabo un análisis comparativo entre los sistemas de clasificaciones sísmicas de suelos. En particular, se examinará la diferencia entre clasificar 91 suelos utilizando el sistema de clasificación actual en contraste con la nueva propuesta de clasificación.

Las mediciones realizadas y los resultados obtenidos mediante el método Nakamura, incluyendo las curvas obtenidas y los proyectos analizados para el análisis comparativo mencionado anteriormente, se detallan en la sección de ANEXOS.

5.1 Curvas H/V obtenidas

5.1.1 Curvas no confiables

De las 130 mediciones que se pudieron realizar, 4 mediciones (10; 40; 46; 95) no cumplieron con los tres criterios de confianza de la curva (Tabla 5), debido a que la señal presentó mucho ruido y la curva H/V que se obtiene del método Nakamura tiene mucha distorsión en distintos rangos de frecuencia. Estas mediciones sin algún peak reconocible se pueden ver en los siguientes gráficos:

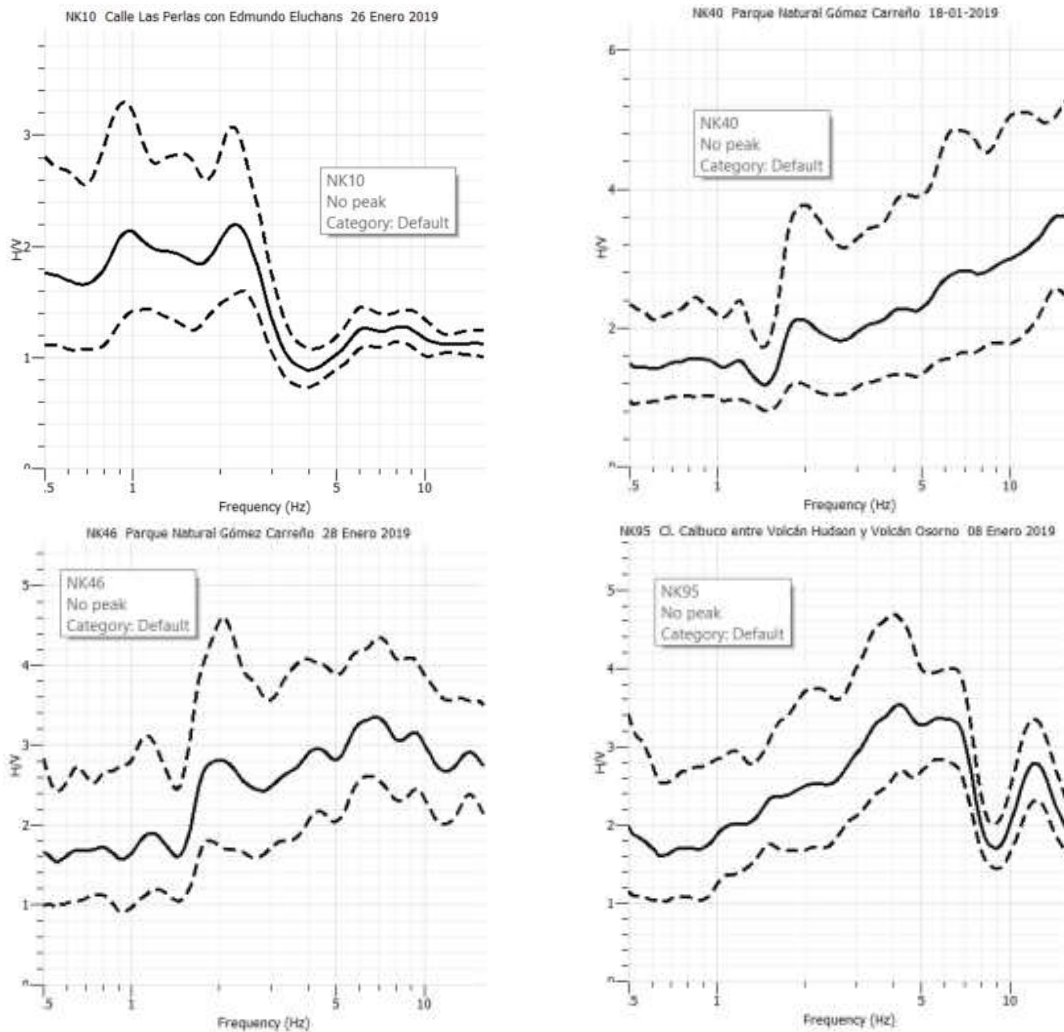


Figura 53: Curvas H/V sin peak reconocible con distorsión en la señal.

5.1.2 Curvas confiables

Restando las 4 curvas no confiables, queda un total de 126 mediciones aptas para aplicar los criterios para peak claro (Tabla 6).

5.1.2.1 Curvas con Peak Claro

De las 126 mediciones aptas para aplicar los criterios para peak claro, 103 mediciones obtuvieron un peak claro, cumpliendo con al menos 5 de 6 de los criterios de la Tabla 6.

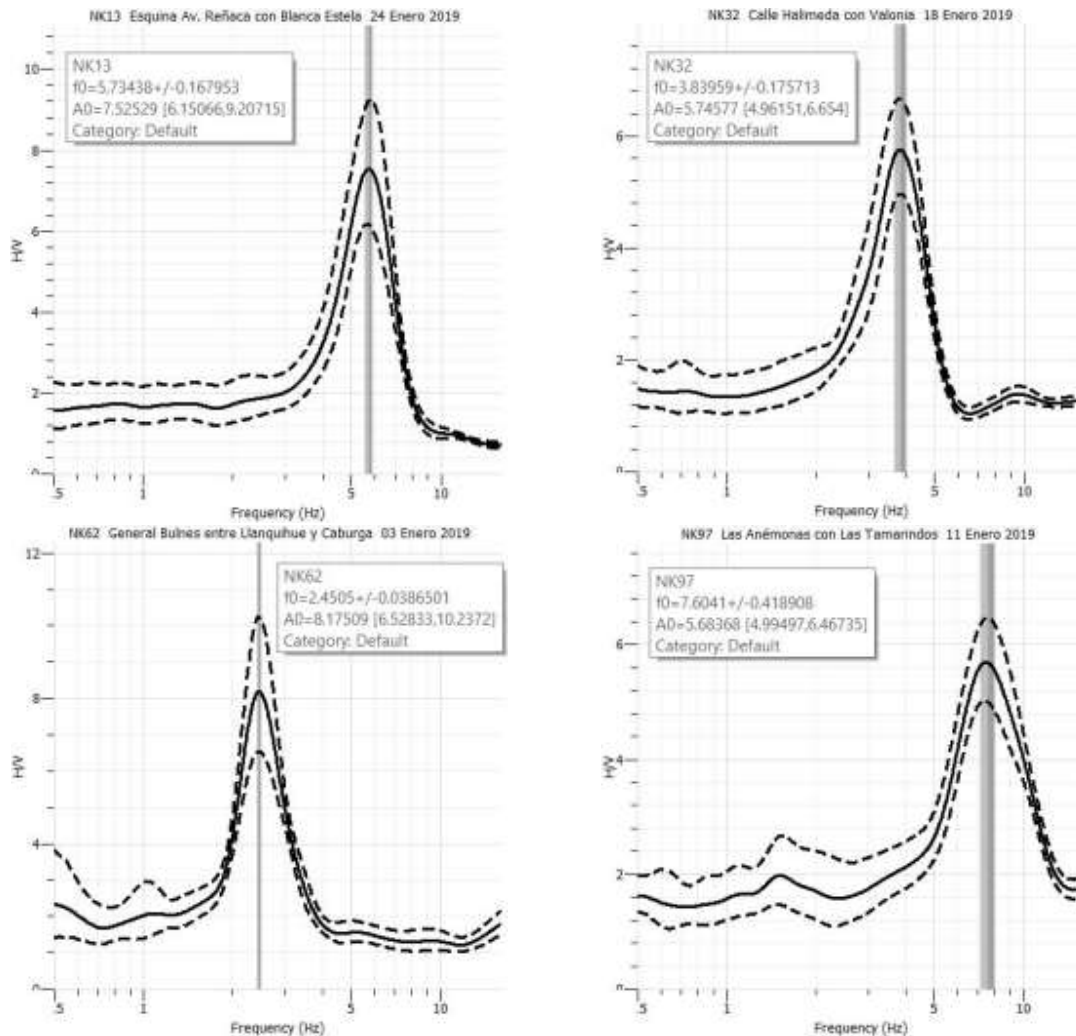


Figura 54: Algunas curvas H/V con peak claro.

5.1.2.2 Curvas con Peak levemente ancho

Durante el procesamiento de datos e interpretación de resultados, en 10 mediciones se obtuvieron curvas con un peak levemente ancho, y al analizar las curvas con los criterios SESAME para peak claro, no cumplen con los criterios iv) y v) de la Tabla 6, sin embargo, la gráfica no presenta mayores amplitudes en otros rangos de frecuencia, además el criterio iv) no se cumple por muy poco, y también los resultados de frecuencia son muy similares a mediciones vecinas. Por ende, se toma la decisión de considerar estos periodos predominantes del suelo en el análisis de isoperiodos y en el mapa de zonificación que se presentara posteriormente. En la Figura 55 se presentan algunas curvas que no cumplieron

a cabalidad con los criterios iv) y v) para peak claro, sin embargo, se puede ver que en los gráficos hay una claridad en que la curvatura tiene una prominencia considerable en un rango estrecho de frecuencias, por ende se puede considerar como peaks válidos para nuestro análisis, el criterio v) es el más difícil de cumplir en estos casos, ya que existe una desviación estándar de la frecuencia lo suficientemente mayor que los valores umbrales establecidos, y en segunda instancia, el criterio iv) es el segundo criterio más difícil de cumplir y es el criterio por el cual muchas mediciones no pudieron cumplir los 5 de 6 para ser considerado un peak claro. En el gráfico de la medición NK83 y NK64 (abajo izquierda y arriba derecha de Figura 55) se puede apreciar que los peaks de la desviación estándar f^- y f^+ están levemente separados del promedio f_0 que superan el valor de 5% de la frecuencia f_0 , con que alguna de las curvas (máxima o mínima) supere este valor, se da por incumplido el criterio iv).

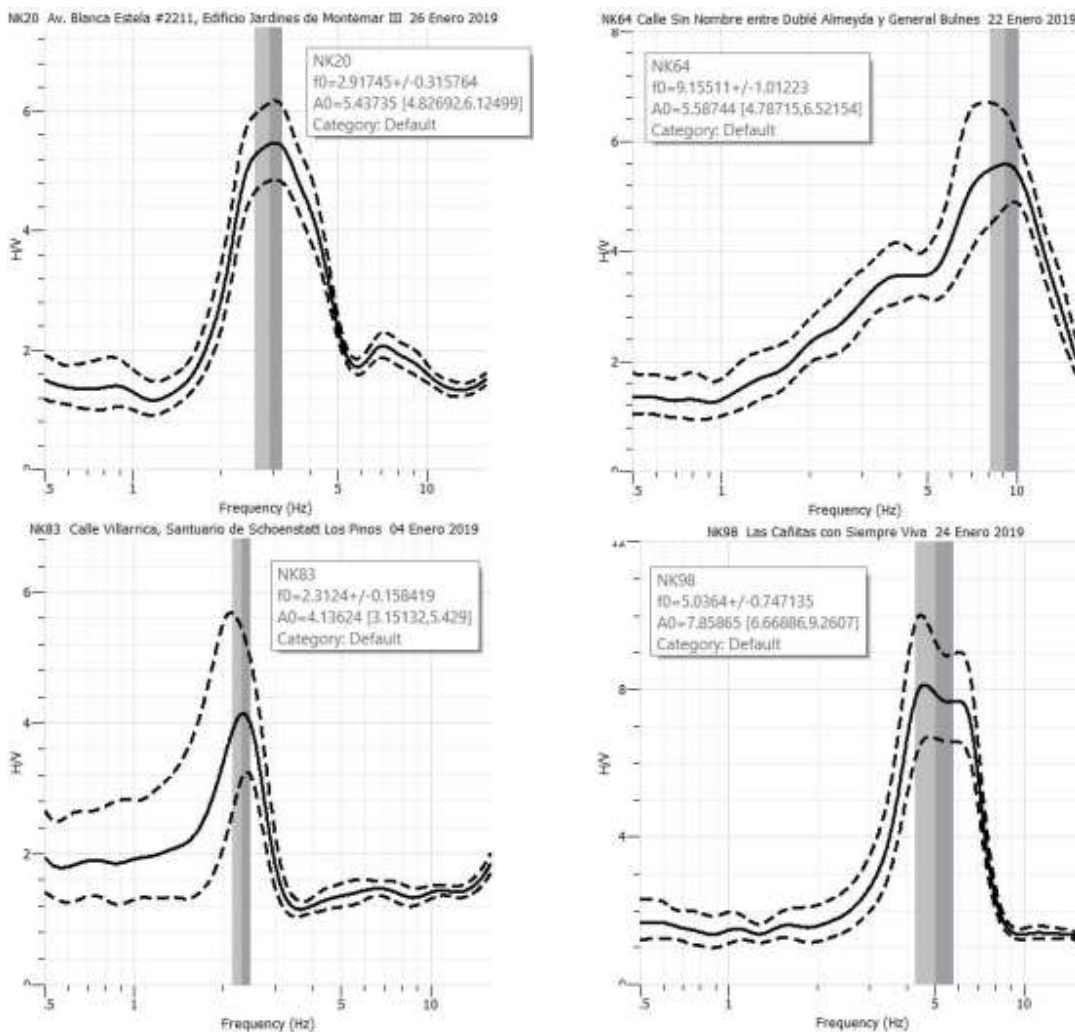


Figura 55: Algunas curvas H/V con peak levemente ancho.

5.1.2.3 Curva con peak ancho poco claro

Solo una medición (118) concluyó ser una curva con un peak relativamente ancho y que si fue considerada en el análisis de periodos y en el mapa de zonificación, esta curva solo cumple con 3 de los 6 criterios para peak claro, sin embargo, la gráfica no presenta mayor

amplitud H/V en ningún otro rango de frecuencia, tampoco era lo suficientemente plana para ser considerada como tal (además de tener amplitud mayor a 2), además el valor de frecuencia predominante obtenido era muy similar a resultados de periodos vecinos. Según lo indicado por la guía SESAME, esta medición al igual que las curvas de la sección anterior (5.1.2.2) se deben repetir durante más tiempo y/o durante la noche; es muy probable que para obtener los resultados esperados se tenga que realizar las mediciones durante la noche, ya que no habría mucho ruido que distorsione la señal, sin embargo, por los riesgos asociados y el alcance de este estudio, no era posible realizar dichas mediciones de noche.

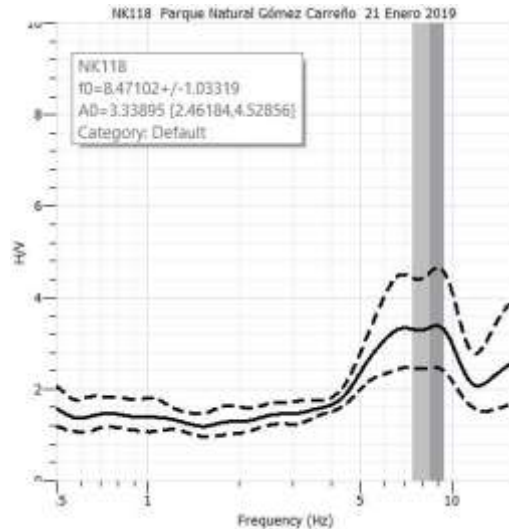


Figura 56: Curva H/V con peak ancho.

5.1.2.4 Curvas H/V Planas

Si bien estas curvas no pudieron ser analizadas bajo el criterio de confianza, por no presentar un valor de frecuencia predominante f_0 , la curva H/V resultante es lo suficientemente confiable ya que no presenta distorsión en la señal obtenida. Se obtiene este tipo de curvas cuando es muy probable que no exista ningún contraste de impedancia pronunciado en profundidad. Se puede ver que las 4 mediciones (25; 37; 47; 49) resultaron ser curvas H/V planas y con amplitud H/V menor a 2. Las características de estos sitios son que es muy probable que la roca se encuentre muy superficial, ya que en puntos 47 y 49 se encontraban ubicados en la cima de sus respectivos cerros, donde es muy probable que no exista un espesor de sedimento significativo por la forma del cerro que colinda con quebradas por ambos lados, el punto 118 también se encuentra posicionado muy cerca del punto 49 con un peak ancho y de baja amplitud, sin embargo, con una frecuencia bastante alta (8,47 Hz), por ende, asumiendo que en el punto 118 tiene un estrato superficial con una velocidad de onda de corte relativamente bajo (~250 m/s) del estrato superficial, y que la profundidad H según la ecuación (2-58), sería aproximadamente de ~7,40 m de espesor o profundidad hasta encontrar la roca, algo que puede ser muy real en un caso de roca a baja profundidad y que se espera baja amplificación sísmica.

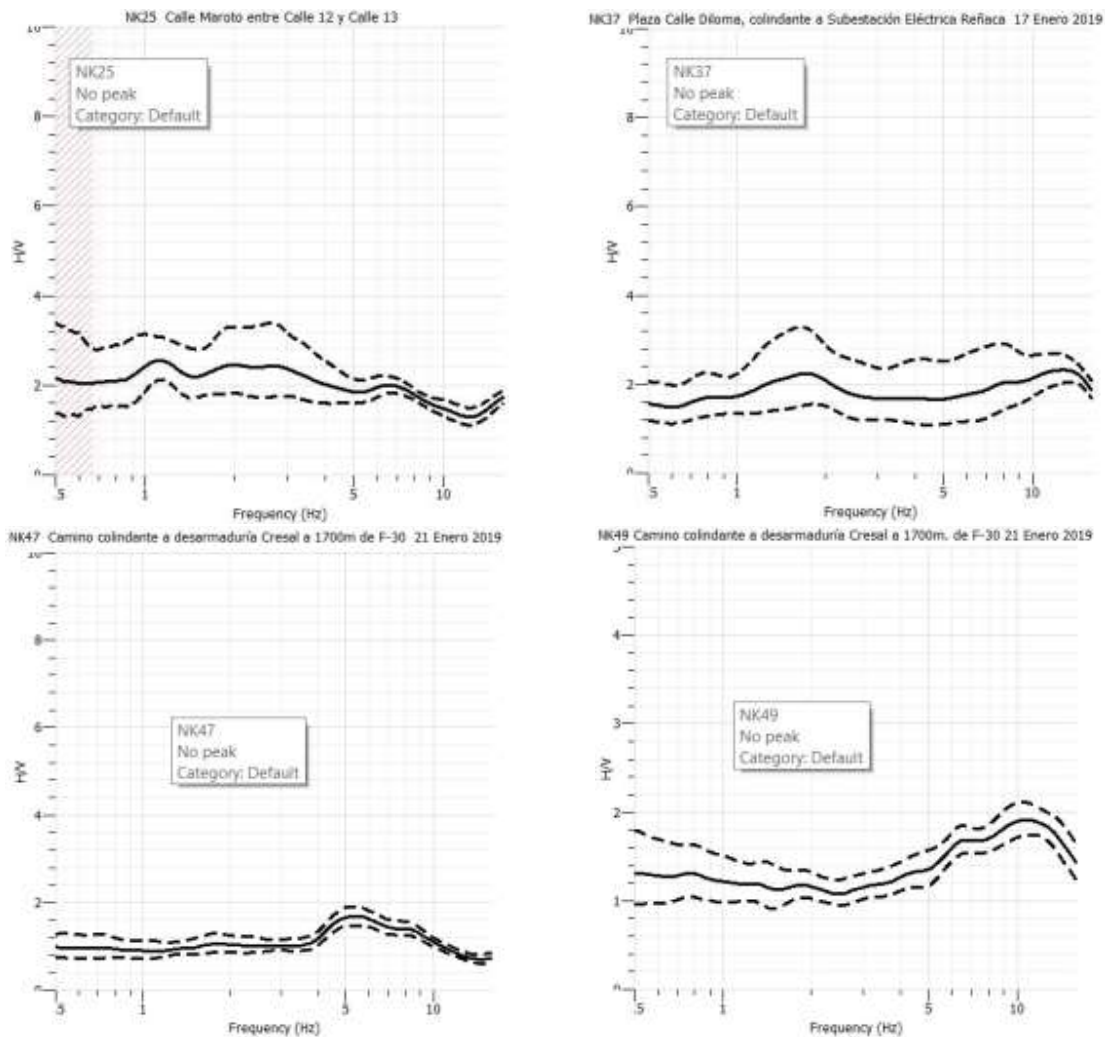


Figura 57: Curvas H/V Planas obtenidas:

5.1.2.5 Curvas de peaks no claros

También se obtuvieron 10 mediciones que resultaron con curvas H/V que no cumplieron con al menos 5 de los 6 criterios para peak claro, sin embargo, si presentaban uno o dos posibles peak(s) probable(s), pero que además, lamentablemente, la curva presentaba amplitudes H/V en otros rangos de frecuencia, lo que hacía muy difícil el procesamiento de datos y la interpretación de su resultado, independiente del análisis de los criterios para peak claro, que claramente no cumplieron con al menos 5 de los 6 criterios de la Tabla 6. Algunos de estos casos se presentan en la Figura 58, donde por ejemplo la medición NK42 no cumple con el criterio i) que indica que la curva por la izquierda no es suficientemente baja la amplitud para considerar que es un peak efectivo, tampoco cumple con criterio iv) sobre margen del 5% entre curva máxima o mínima de la desviación estándar de la frecuencia, y por último no cumple con el criterio v) sobre valores umbrales de la desviación estándar para la frecuencia establecida. Cabe destacar que pueden obtenerse curvas H/V con 2 peaks como la presentada para la medición NK136, donde se pueden ver dos frecuencias con amplificación, sin embargo, no fue posible descartar ninguna de las frecuencias ante una posibilidad de que alguna fuera de origen industrial, y además ninguno de los peaks cumplió con al menos 5 de los 6 criterios para peak claro de manera independiente, es por eso que se tuvo que descartar de incluirla en algún análisis.

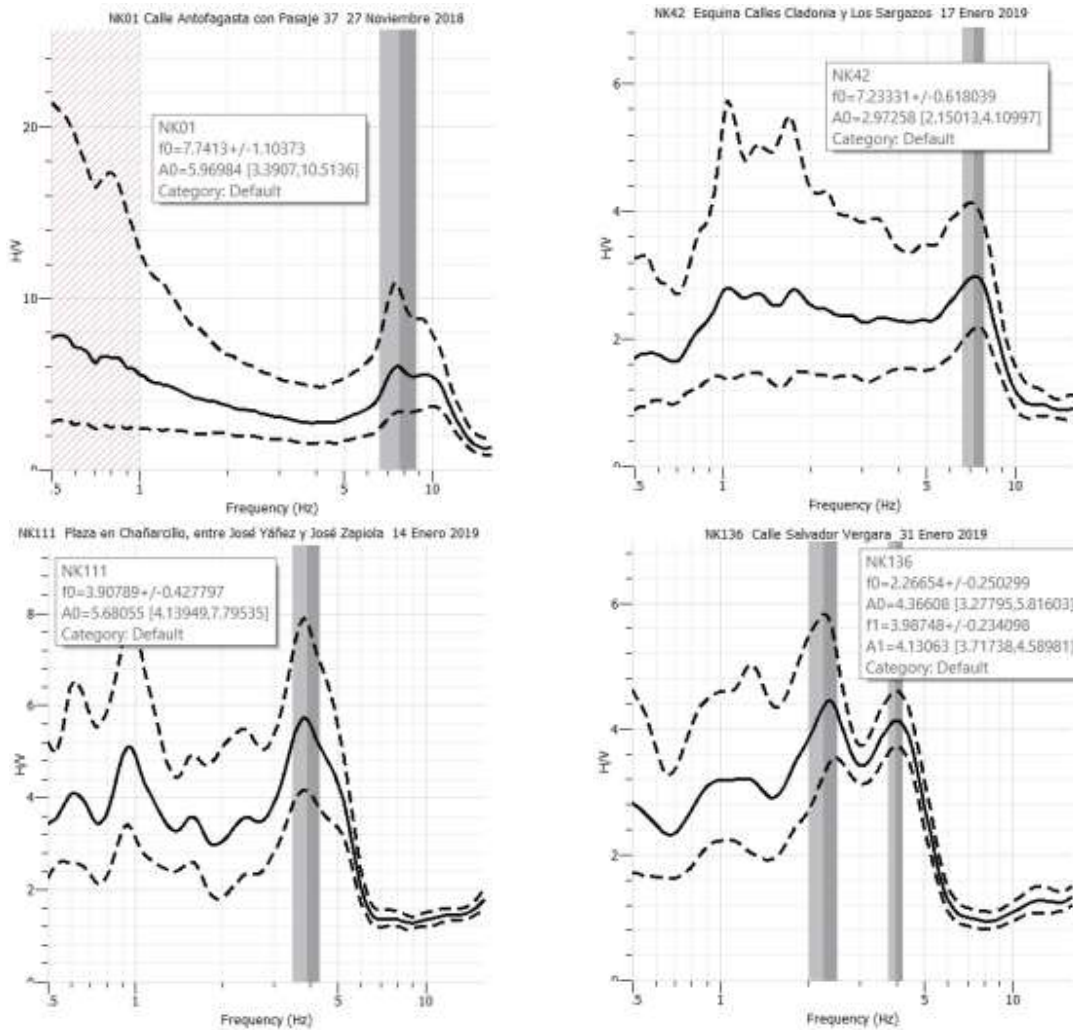


Figura 58: Algunas curvas H/V de Peaks no claros.

5.2 Emplazamiento de los tipos de curvas en la zona

En primera instancia, se emplaza en el mapa todos los puntos de mediciones con su respectiva categoría para entender mejor la situación de la campaña de mediciones, esto se puede visualizar en la Figura 59 y cuantificar en la Tabla 12.

Tabla 12: Resumen de mediciones procesadas mediante criterio SESAME.

Interpretación y resultado criterios SESAME de Curva H/V	Cantidad de mediciones [uni]	Porcentaje [%]	Criterios para Peak Claro	Incluidos en análisis
Peak Claro	103	79%	Cumple	Si
Peak levemente ancho	10	8%	No cumple	Si
Peak ancho poco claro	1	1%	No cumple	Si
Peak No claro	8	6%	No cumple	No
Curva H/V Plano	4	3%	-	No
No confiables	4	3%	-	No
Total	130			

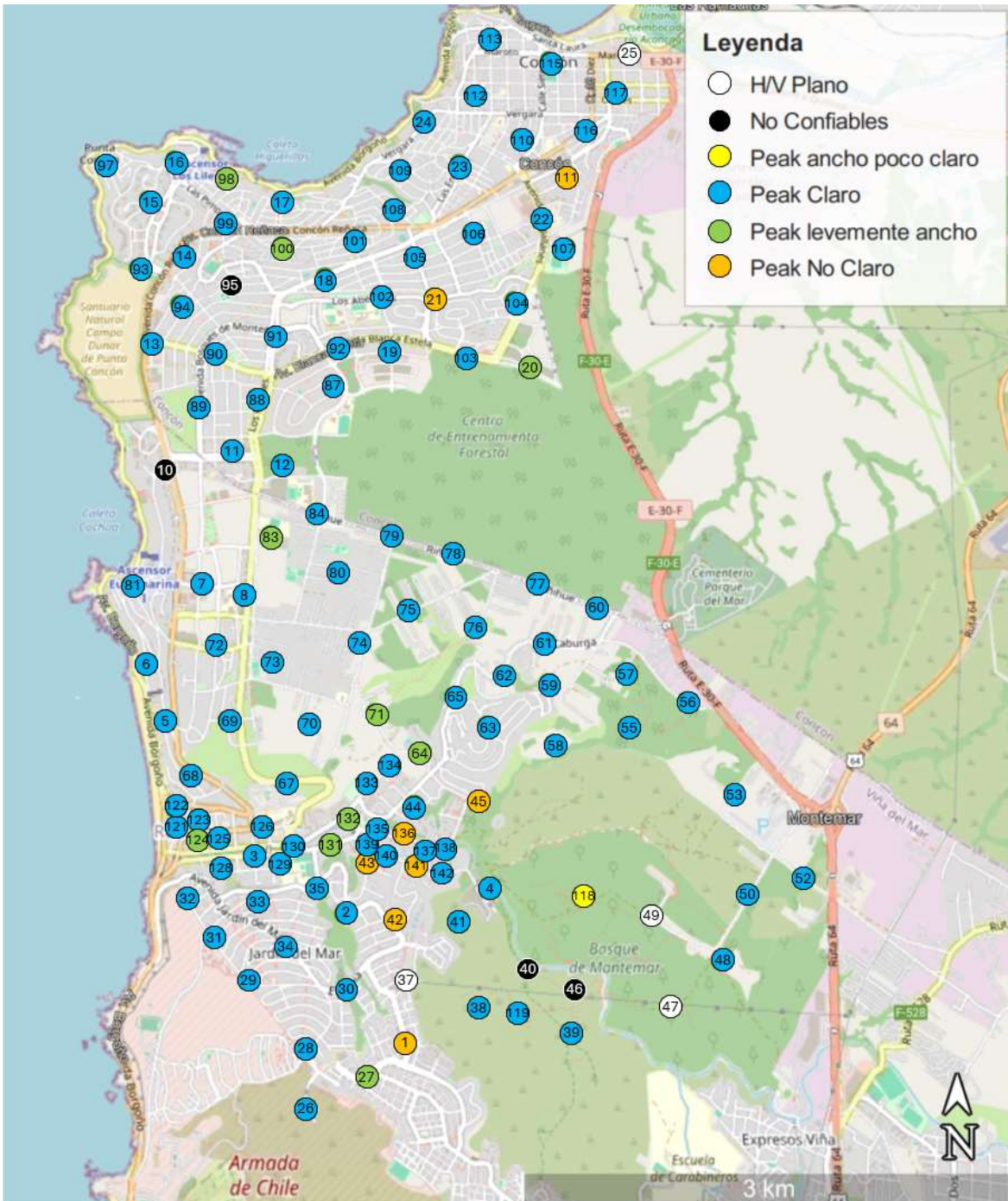
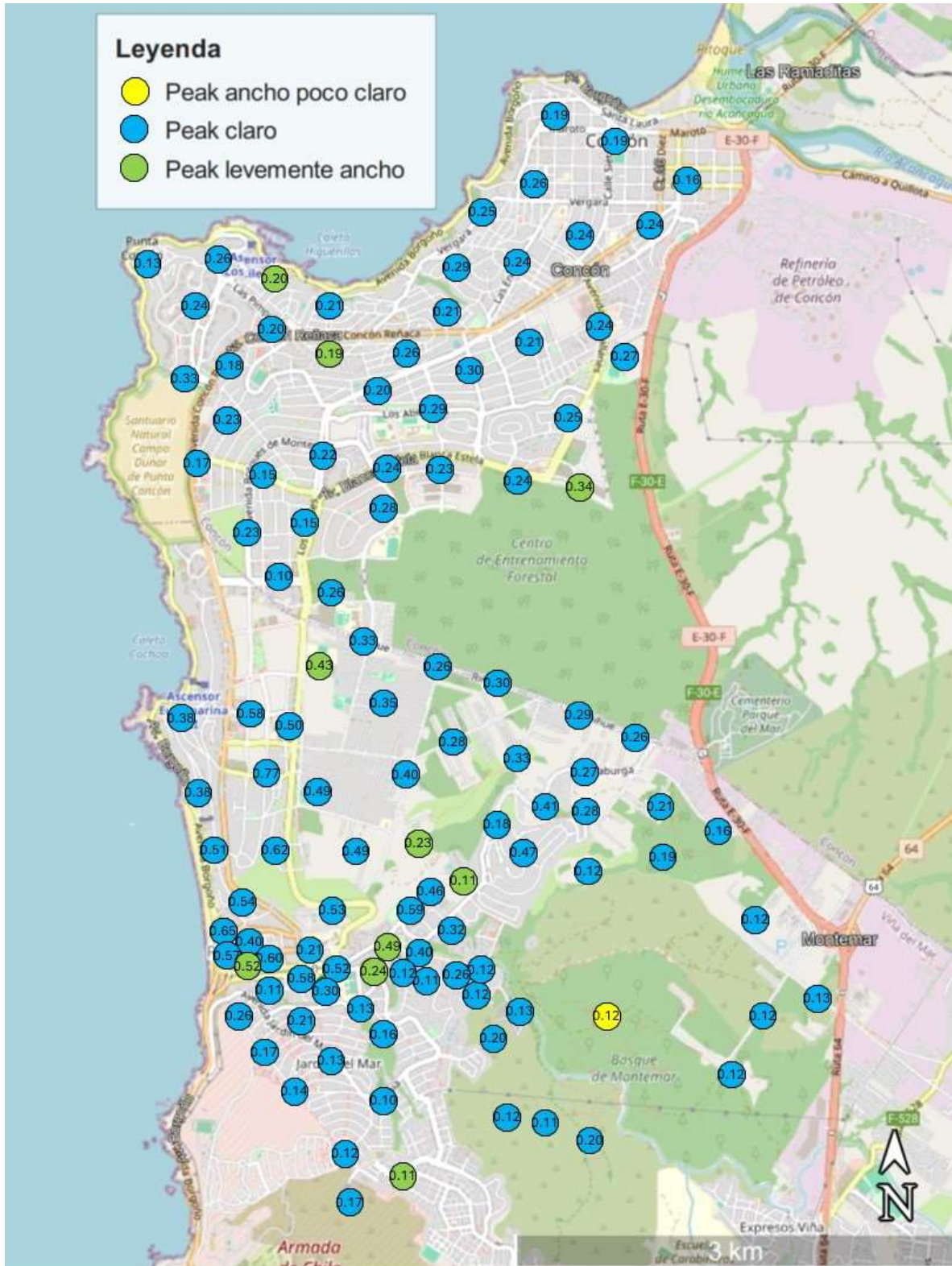


Figura 59: Emplazamiento de tipos de curvas H/V en zona de estudio.

Sobre las mediciones que obtuvieron curvas H/V no confiables, no hay forma de establecer razones específicas de porqué dichas curvas tuvieron ese resultado, sin embargo, si se puede identificar que todas tienen una amplitud H/V aproximadamente cercano a 3, lo que es un valor bastante bajo, ya que bajo 2 se considera que la curva es prácticamente plana. Por lo tanto, se puede inferir que en los puntos medidos, había muy poco ruido ambiente para identificar la amplificación del suelo o bien, por el contrario, tanto el espectro horizontal promedio como el espectro vertical tenían valores muy similares para el mismo valor de frecuencia.

5.3 Periodos obtenidos en la zona de estudio



Los periodos considerados para el análisis de este trabajo investigativo son 114 mediciones según lo indicado en la Tabla 12, en la Figura 60 se presenta en el mapa el resultado de los periodos fundamentales del suelo obtenidos por el método Nakamura e indica el tipo de peak de la curva H/V. Con estos resultados, se puede proceder a realizar curvas de isoperiodos y mapas de periodos fundamentales del suelo.

5.4 Curvas de isoperiodos y mapa de periodos fundamentales

Con los resultados de periodos fundamentales del suelo, mediante el uso del software MATLAB, se procede a elaborar una serie de curvas de isoperiodos dentro de la zona de estudio, con el propósito de poder abarcar los sitios que no pudieron ser medidos, y de esta forma se podrá obtener los valores aproximados de periodo fundamental del suelo mediante el principio de interpolación en sitios donde no existe la medición. La Figura 61 presenta la elaboración de curvas de isoperiodos en segundos, con curvas cada 0.05 segundos.

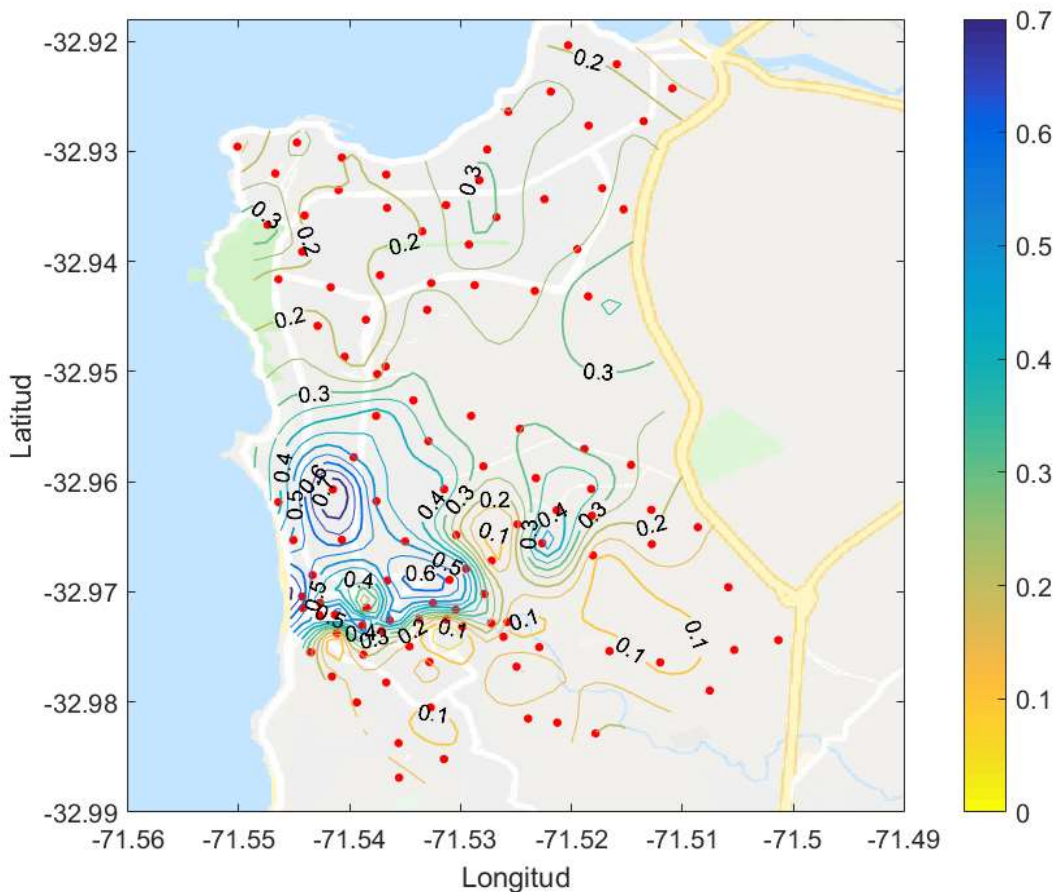


Figura 61: Curvas de Isoperiodos de T_g [s] en la zona de estudio (elaboración propia).

Por otro lado, también se generó con la misma información, un mapa encerrando estas mismas curvas (de superficie) para apreciar de mejor manera los sitios con periodo fundamental dentro de rangos de 0,05 segundos (ver Figura 62). Los sectores que tienen menor valor de periodo presentan sectores con presencia de suelos más compactos y rígidos, en cambio en sectores donde hay mayor valor de periodo, podemos encontrar depósitos de suelos más blandos y menos rígidos, estos se concentran en la zona del plan de Reñaca que incluye el Estero Reñaca, estos se constituyen de depósitos aluviales

recientes y sedimentos marinos; en la subida Ositos nos encontramos con suelos de depósitos eólicos antiguos o paleodunas (sectores más azulados). Hacia el lado sur, hay un cambio abrupto de zona azul a naranja-amarillo, este cambio se debe principalmente a un encuentro o paso de los depósitos del plan de Reñaca con roca de color gris claro, grano grueso y con equistosidad.

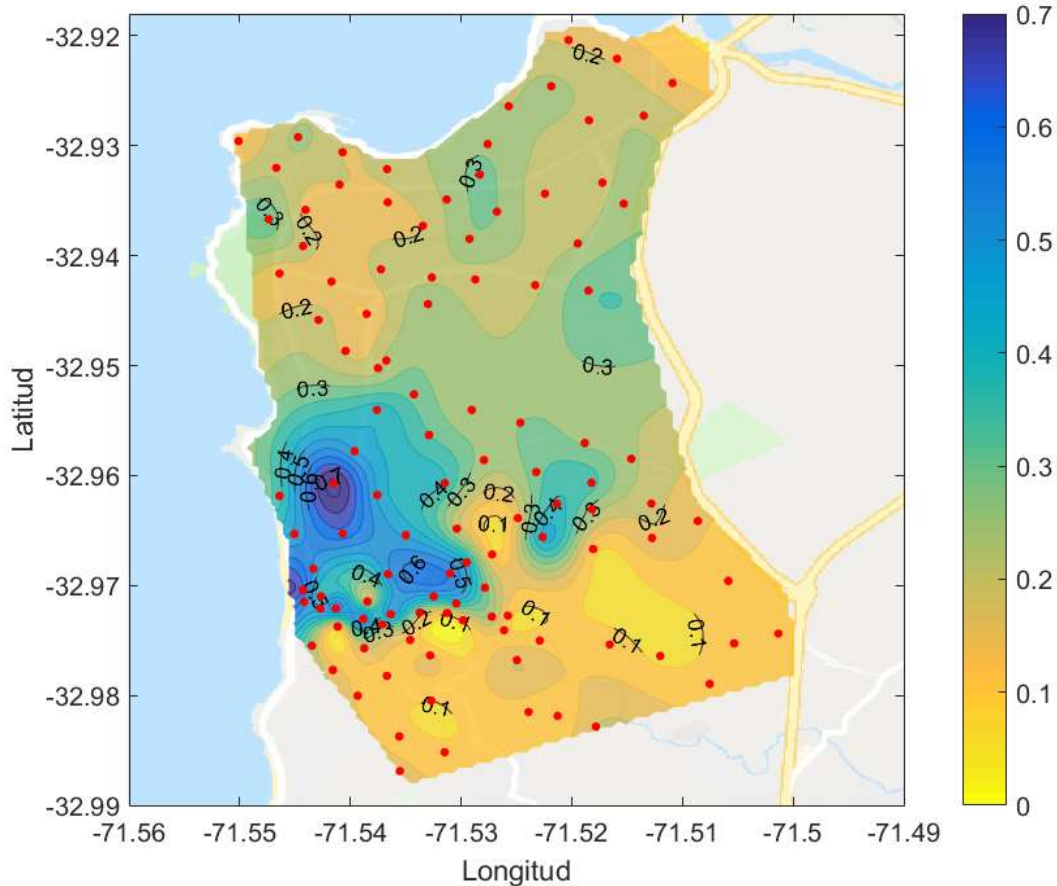


Figura 62: Mapa de periodos fundamentales del suelo (T_g [s]) en zona de estudio.

5.5 Mapas de zonificación

Para determinar mapas de microzonificación o zonificación, es necesario establecer valores límites para los rangos de periodo obtenidos en nuestro estudio. En esta sección se aplicará ciertos rangos establecidos por la nueva propuesta de clasificación sísmica de suelos (que actualmente se encuentra en consulta pública), y también para los rangos establecidos por Baquedano F. (2012), que se presenta en la sección 4.1.6, quien obtuvo la zonificación mediante un procedimiento iterativo de acuerdo a las magnitudes y representatividad con la geología del lugar.

5.5.1 Nueva propuesta de clasificación sísmica de suelos

Las modificaciones a la clasificación sísmica de suelos en la nueva propuesta del Comité NCh433, en donde el periodo fundamental del suelo T_g se incluye para clasificar sísmicamente un suelo, se establecieron distintos valores límites de T_g para cada tipo de suelo, según lo indicado en la Tabla 10. Tomando en cuenta estos rangos y las curvas de

nivel generadas con los periodos fundamentales, se procedió a elaborar un mapa de colores que zonificara la zona de estudio, el que se aprecia en la Figura 63.

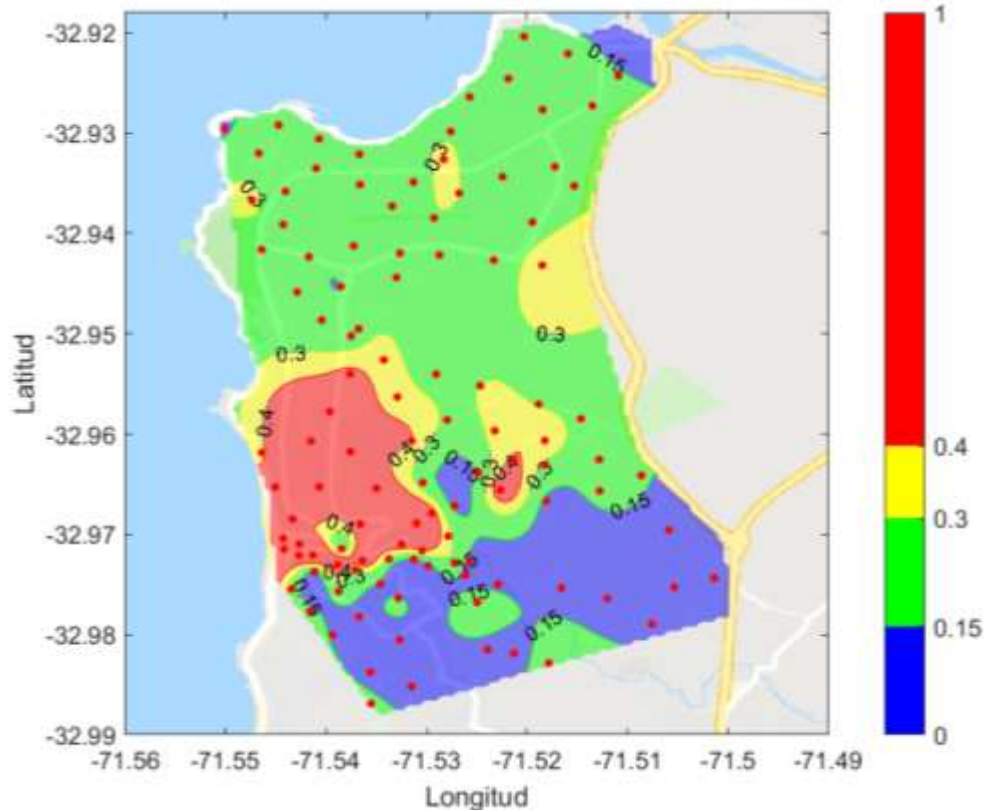


Figura 63: Mapa de zonificación de acuerdo con nueva propuesta de clasificación sísmica (solo categorización con periodo fundamental del suelo (T_g [s]))

Este mapa sirve para poder categorizar la variable de periodo fundamental del suelo T_g [s] en la clasificación sísmica, sin embargo, se requiere del valor de velocidad de onda de corte $V_{S_{30}}$ para poder establecer la nueva clasificación sísmica. Lo que, si se puede inferir de este mapa, es que el rango entre 0.30 – 0.40 segundos es una zona con muy poca superficie y que incluso se puede entender como una zona de transición solamente, esto puede deberse netamente a que la gran mayoría de las magnitudes de los periodos fundamentales se concentran en otros rangos de tiempo.

5.5.2 Propuesta preliminar de zonificación sísmica por Baquedano, F. (2012)

El estudio indicado anteriormente en la sección 4.1.6, que establece 4 zonas con su respectiva descripción geológica y rango de frecuencia correspondiente según la Tabla 13 también se tomó en consideración para realizar un análisis de la zonificación sísmica en base a los periodos fundamentales del suelo.

Tabla 13: Zonas con distinto comportamiento sísmico en base a frecuencias predominantes, Fuente: Elaboración propia en base a Baquedano F., 2012.

Zona	Descripción	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]
I	Rocas Intrusivas	$F_0 > 6.5$	$T_0 < 0.154$

II	Rocas intrusivas meteorizadas y depósitos de suelos blandos	$4.0 < F_0 < 6.5$	$0.250 < T_0 < 0.154$
III	Sedimentos Blandos	$2.4 < F_0 < 4.0$	$0.417 < T_0 < 0.250$
IV	Sedimentos sueltos o poco compactados	$F_0 < 2.4$	$T_0 > 0.417$

Tomando en cuenta este estudio previo, se elaboró con los mismos rangos de periodo un mapa con las mediciones realizadas en este estudio. En la Figura 64 se presenta el mapa de microzonificación sísmica utilizando los periodos de esta investigación con los rangos de la propuesta preliminar descrita anteriormente. En este caso, se pudo abarcar mejor la zona, y con una mayor densificación de puntos en la zona, que permitió establecer un mapa más certero.

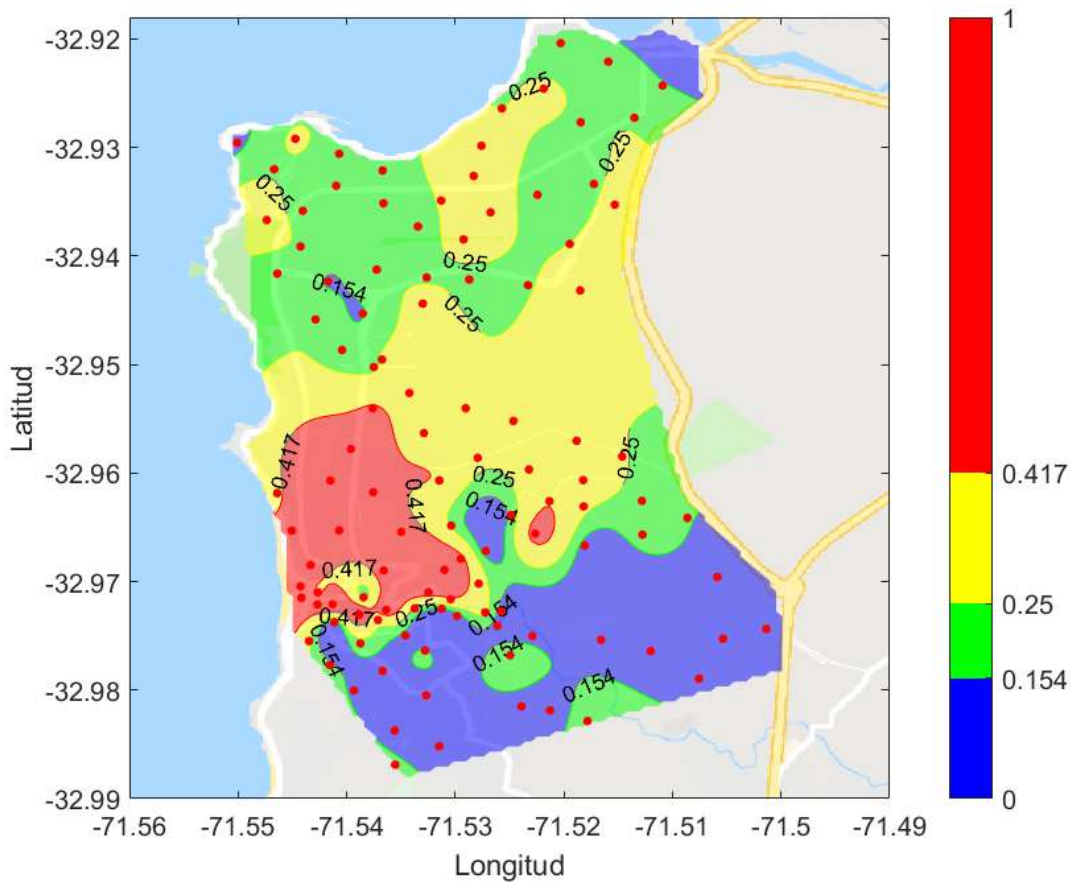


Figura 64: Mapa de zonificación sísmica de acuerdo con los límites de T_g [s] establecidos por microzonificación preliminar de Baquedano.

Se puede apreciar de la microzonificación sísmica propuesta en la Figura 64, que la superficie amarilla ya no es una transición como la presentada en la Figura 63, y abarca muchos más lugares, lo importante es que es capaz de encerrar los sedimentos blandos de suelo dunar pero que son más compactos que los sedimentos sueltos (zona roja). Además, estos sedimentos se encuentran efectivamente en la zona hasta cierto punto hacia el norte, donde se vuelve a encontrar depósitos de suelo más compactos sobre roca intrusiva (zonas

en verde del lado norte). Como microzonificación sísmica en base a periodos predominantes del suelo, esta propuesta es más representativa que los rangos propuestos para la nueva clasificación sísmica.

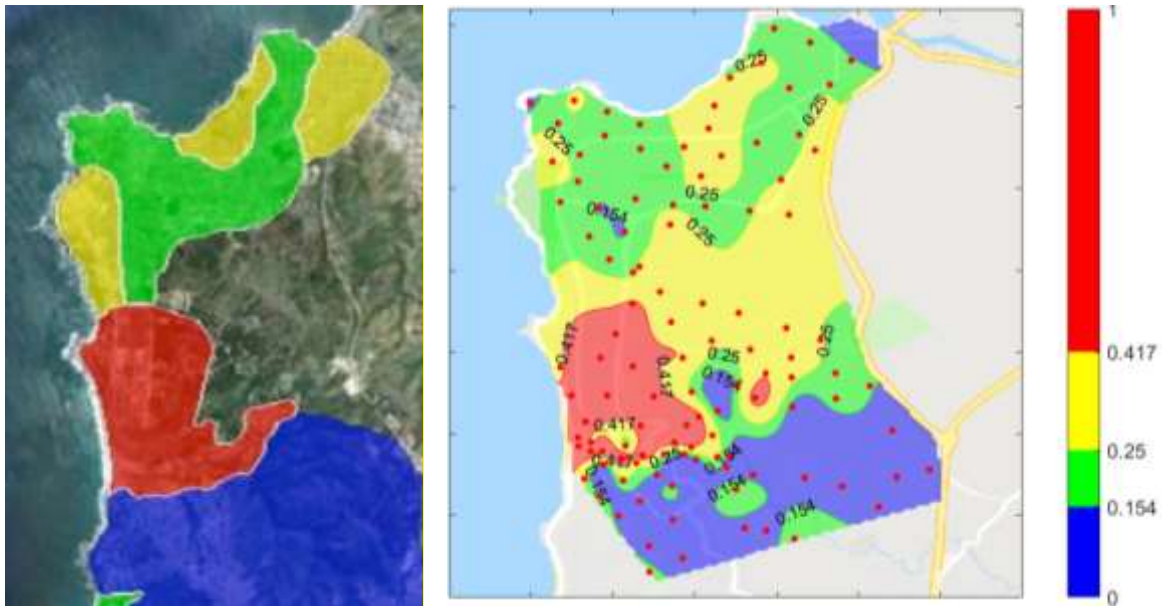


Figura 65: Comparativa de propuesta preliminar de microzonificación sísmica (izquierda) por Baquedano, F. (2012) y mapa de zonificación resultante de estudio.

5.6 Clasificaciones Sísmicas de Suelos

En esta sección se presentará el análisis comparativo entre el sistema actual de clasificación sísmica de suelos y la nueva propuesta de clasificación en 91 proyectos recopilados en la zona de estudio.

5.6.1 Periodos fundamentales en proyectos recopilados

Para el análisis comparativo mencionado anteriormente, se recopilaron 91 proyectos en la zona de estudio que contarán con un informe de mecánica de suelos emitido después de la entrada en vigor del Decreto 61 (MINVU, 2011). Las evaluaciones de mecánica de suelos de los proyectos fueron realizadas por 10 empresas especializadas en proyectos geotécnicos y mecánica de suelos. Estos informes no cuentan con el ensayo ni el valor de periodo fundamental del suelo en sus informes. Es por esto, que, en primera instancia, es necesario distribuir espacialmente las ubicaciones de estos proyectos en el mapa de curvas de isoperiodos (ver Figura 66) y de esta forma obtendremos el periodo fundamental para cada proyecto en cuestión.

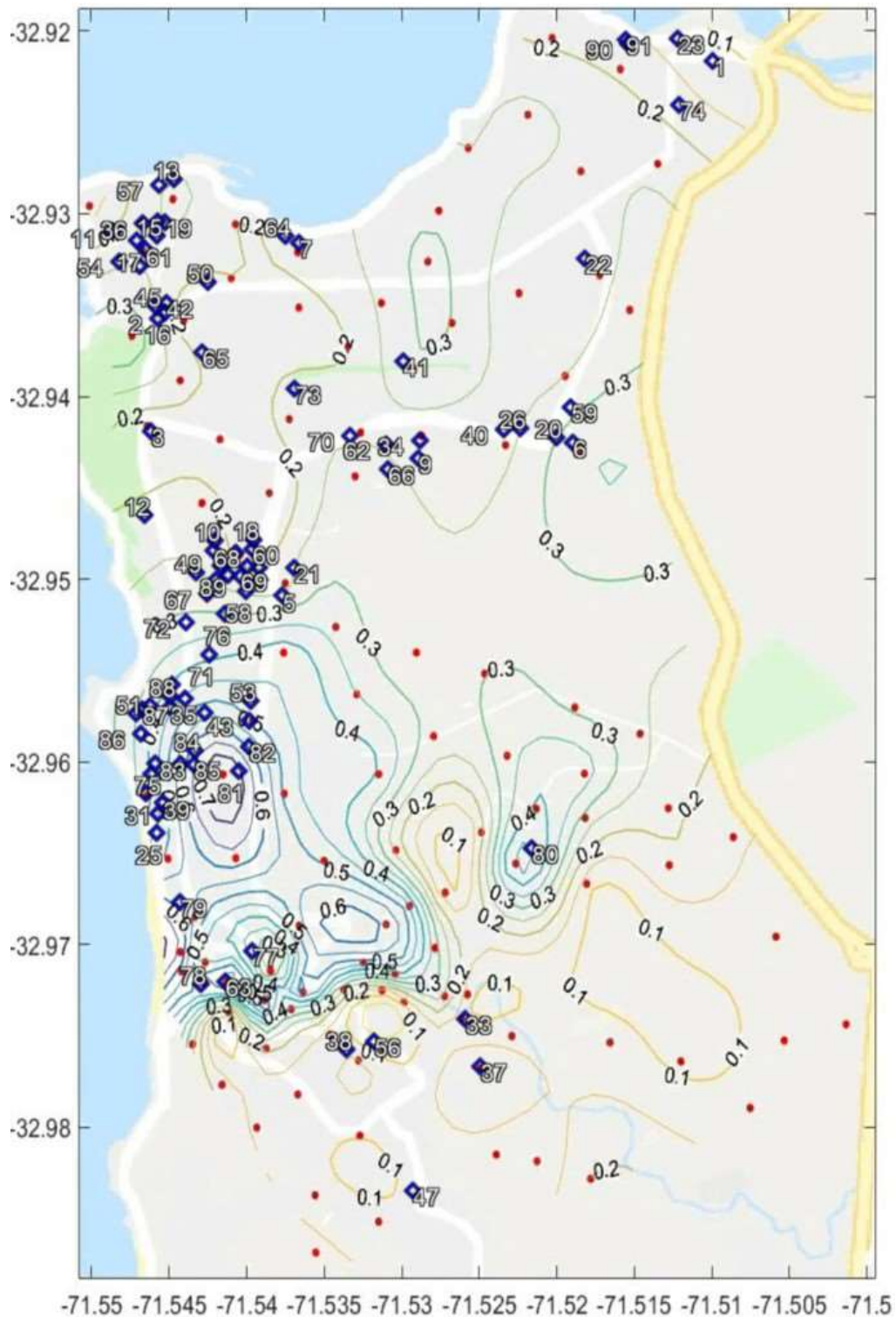


Figura 66: Proyectos recopilados emplazados en curvas de isoperiodos.

5.6.2 Análisis comparativo entre sistemas de clasificaciones sísmicas de suelos

Utilizando la información de velocidades de corte V_{s30} de los 91 proyectos y el valor estimado de T_g según la Figura 66, se procedió a clasificar sísmicamente cada proyecto siguiendo los criterios establecidos por la propuesta de normativa prNCh433 (INN, 2022). Se compararon las clasificaciones con las obtenidas al aplicar los nuevos criterios, y se analizaron las razones en los casos en que surgieron diferencias.

Es necesario aclarar que, en la propuesta de clasificación sísmica en comparación con la normativa actual, se simplificó el análisis al no considerar una condición particular que fue añadida al proyecto de normativa. Esta condición específica que si se encuentra roca o material con V_s superior a 900 m/s, a una profundidad menor de 30 metros medida desde la superficie del terreno, por ende, en este caso, el parámetro V_{s30} debe calcularse considerando únicamente el suelo existente hasta esa profundidad. En relación a los parámetros asociados al tipo de suelo, se mantuvieron en relación con el decreto 61 del año 2011, tanto los parámetros como sus valores, y se utilizaron para llevar a cabo este análisis comparativo.

Para los 91 proyectos analizados, se comparó la clasificación sísmica obtenida con la normativa vigente y la obtenida con los criterios de la nueva propuesta de clasificación.

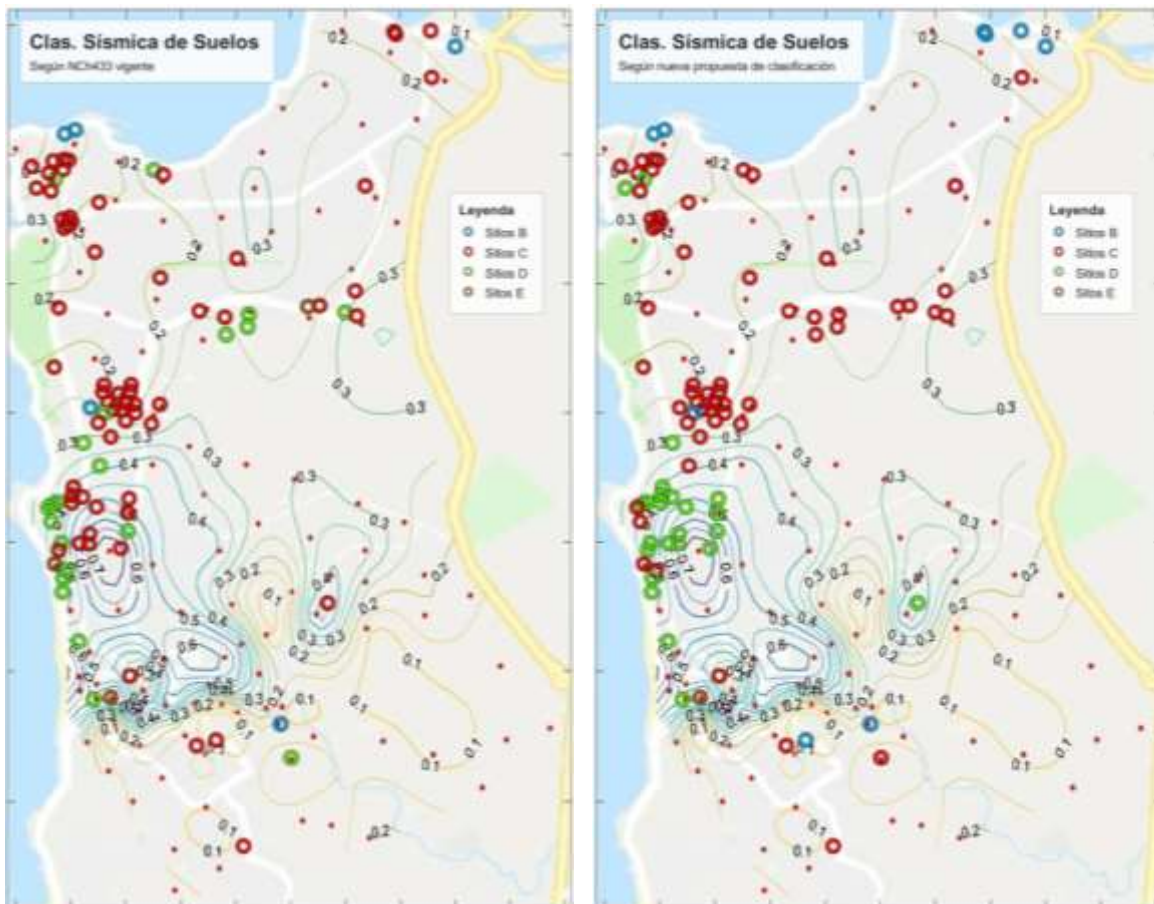


Figura 67: Comparación entre las clasificaciones sísmicas según normativa vigente y la nueva propuesta para 91 proyectos analizados.

A continuación, se presenta la Tabla 14 y un gráfico que resumen todos los cambios y mantenciones de clasificación que se dieron en este análisis, donde se observa que en la

mayoría de los proyectos mantuvieron su clasificación (64.84%), con respecto a los cambios, es similar los proyectos que subieron (18.68%) a los que bajaron clasificación (16.48%).

Tabla 14: Comparación de clasificaciones sísmicas en los 91 proyectos analizados.

Comparación	Cantidad	Porcentaje [%]	Cambio	Cantidad	Porcentaje [%]
Mantienen Clasificación	59	64,84	B -> B	4	4,40
			C -> C	44	48,35
			D -> D	10	10,99
			E -> E	1	1,10
Bajan 1 nivel	15	16,48	B -> C	1	1,10
			C -> D	14	15,38
Suben 1 nivel	14	15,38	C -> B	4	4,40
			D -> C	10	10,99
Suben 2 niveles	3	3,30	D -> B	1	1,10
			E -> C	2	2,20

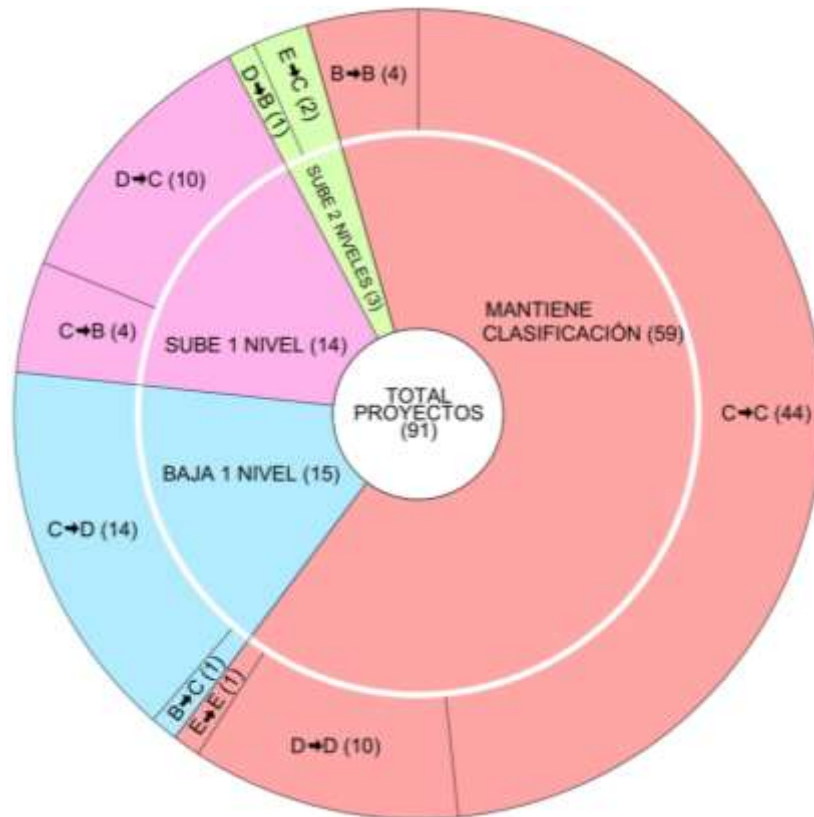


Figura 68: Representación gráfica de los cambios de clasificación.

Los proyectos que subieron de clasificación se explican por dos motivos:

- No se había realizado un sondaje del tipo SPT dentro de la exploración geotécnica cuando fueron clasificados con la normativa vigente, por lo que su clasificación sísmica se había realizado castigando la clasificación que se obtenía solamente con V_{S30} .

- Los valores de SPT presentaban bajos golpes en algunos estratos, lo que al seguir las indicaciones del decreto 61, hacía que la clasificación se vea altamente castigada por estos valores bajos de SPT. Esta fue la razón de los 3 casos en que la clasificación mejoró 2 niveles.

Los proyectos que bajaron clasificación se explican también por dos motivos:

- El periodo fundamental de suelo no es parte del rango de la clasificación sísmica original relacionado a V_{s30} , por lo que se deben castigar un nivel.
- En un caso, el valor de V_{s30} se encontraba mal calculado, al realizar el cálculo correcto automáticamente bajó un nivel de clasificación.

Para analizar los parámetros críticos de cada clasificación sísmica, se representaron gráficamente las clasificaciones obtenidas mediante la nueva propuesta (ver Figura 69). Cada uno de los 91 proyectos se graficó como un punto, utilizando el par (T_g, V_{s30}) , con colores distintos según su clasificación. Además, se incluyó una línea en el gráfico que representa el límite inferior de cada clasificación según la propuesta. De esta manera, un proyecto debe ubicarse sobre esta línea para obtener dicha clasificación. Si un punto está por debajo de la línea, significa que no cumple con el requisito de V_{s30} ; si está a la derecha, indica que no cumple con el requisito de T_g .

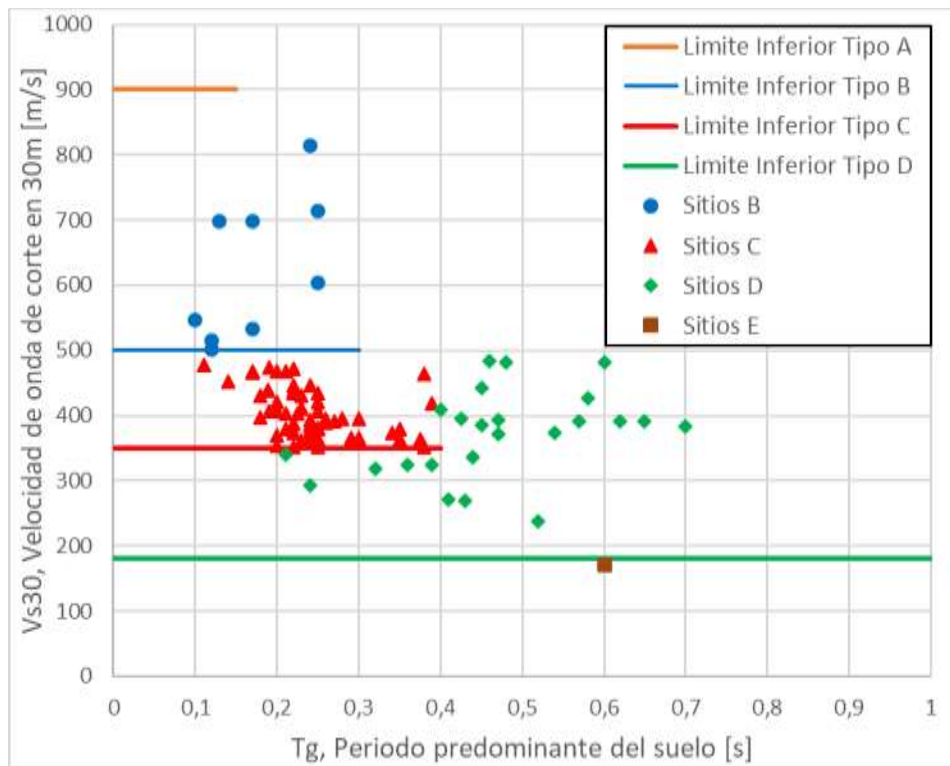


Figura 69: Análisis de clasificaciones sísmicas con propuesta de clasificación.

Se observa que, dependiendo de su clasificación, los sitios presentan distintas características:

- Sitios clasificados como B: Los puntos muestran una distribución heterogénea, con cerca de la mitad de los puntos cercanos al límite inferior de velocidad. No se

encuentran puntos en esta clasificación que tengan velocidad de suelo tipo A y que hayan sido castigados por el periodo.

- Sitios clasificados como C: Se observa una concentración de puntos cerca de los límites de clasificación de este tipo de suelo. Muchos puntos se sitúan cerca del límite inferior de velocidad, otros cerca del límite superior del periodo, y unos pocos en proximidad de ambos límites. No se encuentran puntos en esta clasificación que tengan velocidad de suelo tipo B y que hayan sido castigados por el periodo.
- Sitios clasificados como D: Los puntos se ubican alejados de ambos límites: límite inferior de velocidad y límite superior del periodo. La mayoría de los puntos en esta clasificación tiene velocidad de suelo tipo C, y fueron castigados por no cumplir con el criterio del periodo.
- Sitios clasificados como E: La clasificación del único punto con esta clasificación se ve influenciada por la velocidad, ya que la velocidad está en rango de suelo tipo E muy cerca del límite inferior de velocidad de suelo tipo D, y el periodo está en rango de suelo tipo D.

6 CONCLUSIONES

En el presente estudio investigativo se realizaron aportes importantes para una zonificación sísmica de las localidades de Reñaca y Concón, pertenecientes a la región de Valparaíso. Para llevar a cabo esto, se logró obtener la estimación de la frecuencia fundamental mediante el método Nakamura de 130 datos registrados en la zona de estudio. Esto permitió conformar un mapa de microzonificación sísmica. Los resultados fueron favorables, ya que se obtuvieron resultados concordantes con estudio previo de F. Baquedano (2012), quien elaboró un mapa de microzonificación sísmica preliminar para la zona y lo relacionó con la geología del superficial del lugar.

El mapa de microzonificación sísmica basada en los intervalos de período propuestos por F. Baquedano, ofrece una adaptación más precisa y una representación más fiel de la geología local que al utilizar los intervalos de la nueva propuesta de clasificación sísmica.

No existieron zonas con frecuencias bajo 1,0 Hz, ya que, si hubiesen existido, se habría tenido que corroborar las mediciones en aquellos lugares, porque el comportamiento dinámico sería muy particular.

Los mapas presentados no son suficientes por sí solos para clasificar sísmicamente un suelo según la nueva propuesta de clasificación sísmica, ya que se requiere analizar el valor de $V_{S_{30}}$ también. No obstante, son extremadamente útiles para establecer valores de T_g en sitios dentro del área de estudio y además para identificar zonas susceptibles de cambiar de clasificación sísmica con la nueva propuesta.

Con respecto del reprocesamiento de las señales de microvibraciones ambientales en la determinación de curvas H/V, fue posible deducir que entre los principales factores que condicionan las diferencias de las curvas, se encuentran los filtros pasa banda y anti-triggering, el eliminar ventanas manualmente y el suavizado aplicado a los espectros por componente.

El método Nakamura, como la medición misma para la obtención de periodo fundamental del suelo, es un ensayo fácil de aplicar, rápido y económico. Esto debería ser tenido en cuenta por la comunidad científica para fomentar y promover su aplicación en todo Chile, con el fin de producir más mapas y, como resultado, identificar públicamente las áreas afectadas por efectos de sitio.

La normativa chilena sobre clasificación sísmica ha sufrido constantes actualizaciones en casi un siglo desde el primer hito normativo en el año 1929. Los ajustes han sido influenciados principalmente por sismos de gran magnitud a lo largo del tiempo. En este estudio se ha realizado un análisis comparativo entre el sistema actual de clasificación

sísmica de suelos y la nueva propuesta de clasificación para 91 proyectos en la misma zona investigada.

De este análisis comparativo, se concluyó que el suelo con las características del tipo C, predominó en la zona de estudio, puesto que la mayoría de los sitios analizados en este estudio muestran valores de $V_{S_{30}}$ dentro del rango de clasificación tipo C, siendo el parámetro del período predominante del suelo el que confirma esta clasificación o provoca su penalización a tipo D. Con la nueva propuesta de clasificación, se espera que aumente el número de sitios clasificados como D en la zona analizada. Esto se debe a que, según el análisis realizado, aproximadamente un 15% de los sitios han descendido de la clasificación C a la D debido a un período predominante del suelo superior a 0,4 s. Mientras tanto, un 11% ha ascendido de D a C, lo que sugiere que su clasificación original carecía de datos de sondaje. En otras palabras, existe una alta probabilidad de que estos sitios hubieran sido clasificados previamente como C si se hubieran tenido en cuenta los resultados del SPT.

La clasificación sísmica de un sitio realizada exclusivamente mediante métodos geofísicos simplifica el proceso debido a su practicidad en la toma de mediciones y análisis de datos, así como por ser menos invasivo en comparación con ensayos como el SPT o la toma de muestras para ensayos de laboratorio, y sus resultados asociados. Además, la obtención directa de los valores de $V_{S_{30}}$ y del período predominante del suelo (T_g) a partir de estos análisis reduce la posibilidad de diferentes interpretaciones. Es importante destacar que los sondeos tipo SPT y los ensayos de laboratorio seguirán siendo valiosos para la construcción de estratigrafías, la medición directa o la estimación de parámetros de resistencia del suelo, así como para prever su comportamiento futuro.

En proyectos donde no se ha realizado un sondaje SPT debido a restricciones económicas, la normativa actual penaliza la clasificación basada en $V_{S_{30}}$. La introducción del parámetro T_g , más económico que el SPT y su inclusión en los requisitos, podría mantener la clasificación basada en $V_{S_{30}}$ sin castigarla. Además, algunos sitios con valores de $V_{S_{30}}$ cercanos al límite inferior de su rango pueden tener una alta probabilidad de estar cerca del límite superior del período, lo que podría afectar su clasificación.

7 BIBLIOGRAFÍA

1. Alvarado, D. (2012). Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles: *“Microzonificación sísmica de la ciudad de Valdivia. Etapa 1: Determinación del peligro uniforme y caracterización dinámica de los suelos empleando la técnica de la razón espectral de Nakamura”*.
2. Baquedano, F. (2012). Artículo para VII Congreso Chileno de Geotecnia: *“Frecuencia Predominante de los Suelos de Valparaíso-Viña del Mar y Propuesta de Microzonificación Preliminar”*.
3. Bard, P.-Y. and SESAME team (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations, measurements, processing and interpretation*. European research Project No EVG1-CT-2000-00026 SESAME.
4. Bard, P.-Y. and SESAME team (2003). *WP03 – H/V Technique: Data Processing*. Report on the Multiplatform H/V Processing Software J-SESAME. European research Project No EVG1-CT-2000-00026 SESAME.
5. Carrasco, O. y Nuñez, C. (2013). Memoria para optar al título de Ingeniero Civil: *“Microzonificación sísmica de la ciudad de Viña del Mar”*. Universidad Técnico Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
6. Chávez-García, F. y Montalva, G (2014). Efecto de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Obras y Proyectos* 16, 6-30.
7. González, D. (2017). Memoria para optar al título de Ingeniero Civil: *“Generación de espectros de respuesta con sismos Chilenos para suelos en función de su periodo fundamental y nivel de amplificación”*.
8. Grimme, K. y Álvarez, L. (1964). *El suelo de Fundación de Valparaíso y Viña del Mar, Geología del Área de Valparaíso - Viña del Mar*. Boletín N°16.
9. Ishihara, K. (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. Oxford University Press.
10. Lermo J. et F. J. Chávez-García, 1993. *Site effects ecaluation using spectral ratios with only one station*. Bulletin of the Seismological Society of America, 83-5, 1574-1594.
11. Lermo, J. and Chávez-García, F.J. (1994). *Are microtremors useful in site response evaluation?*. Bulletin of the Seismological Society of America 84(5), 1350-1364.
12. Momberg, D. (2018). Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil en Obras Civiles: *“Microzonificación sísmica de las ciudades de Machalí y Rengo, VI región del Libertador General Bernardo O’Higgins”*.
13. Nogoshi M. et T. Igarashi, 1971. *On the amplitude characteristics of microtremor (part 2)* (in japanese with english abstract). Journal of Seismological Society of Japan, 24, 26-40.
14. Pasten, C. (2007). Tesis para optar al grado de Msc de la Ingeniería, mención Ingeniería Geotécnica: *“Respuesta sísmica de la cuenca de Santiago”*.
15. Pinto, L. (2016). Memoria para optar al título de Ingeniero Civil: *“Determinación de efectos de sitio en las estaciones sísmológicas de la región de Tarapacá”*.

16. Raggi, S. (2011). Memoria para optar al título de Ingeniero Civil: “Comportamiento Sísmico de estructuras en el interior de cavernas”.
17. Lillie, R. J. (1999). *Whole Earth Geophysics, An Introductory Textbook for Geologists and Geophysicists*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall, Inc.
18. Saldivia, J. C. (2014). Proyecto de título para optar al título de Ingeniero Civil: “Determinación del periodo fundamental de vibración del suelo aplicando el criterio SESAME”.
19. Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H.B. (1972). “SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites”, Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
20. Serafini, F. (2017). Memoria para optar al título de Ingeniero Civil: “Aportes para una nueva zonificación geotécnica de Viña del Mar: Estimación de la profundidad del basamento rocoso en la cuenca del Marga Marga a partir de mediciones espectrales H/V”.
21. Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Yoshida, S., Fukushima, S. and Sudo, H. (1979): “Shear Modulus and Damping by Drained Tests on Clean Sand Specimens Reconstituted by Various Methods”, *Soils and Foundations*, Vol. 19, No. 1, pp. 39-54.
22. Toledo, G. (2017). Memoria para optar al título de Ingeniero Civil: “Aportes para una nueva zonificación geotécnica de Vila del Mar: Estimación de la amplificación sísmica en la cuenca del Marga-Marga”.
23. Yauri, S. (2006). “Microtremores”, Biblioteca del instituto de geofísica del Perú V.7, 43-56.

CAPÍTULO 8

8 ANEXOS

ANEXO A: Resumen de Resultados

Medición	Latitud [°]	Longitud [°]	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Amplitud H/V [-]	CRITERIO SESAME										Incluidos en Mapa	
						Confianza			Peak Claro						Resultado		
						(i)	(ii)	(iii)	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)	(vi)	Confianza		Peak Claro
NK 01	-32,9834	-71,5289	7,74	0,13	5,97	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	No	Ok	Si cumple	No cumple	No
NK 02	-32,9764	-71,5328	6,33	0,16	4,38	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 03	-32,9730	-71,5389	1,74	0,58	6,16	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 04	-32,9750	-71,5229	7,50	0,13	4,68	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 05	-32,9653	-71,5451	1,95	0,51	4,84	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 06	-32,9619	-71,5464	2,66	0,38	4,28	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 07	-32,9570	-71,5425	1,72	0,58	3,62	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 08	-32,9578	-71,5396	2,02	0,50	4,42	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 09	-32,9527	-71,5421				No se pudo ejecutar											
NK 10	-32,9499	-71,5452	Sin peak	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	No
NK 11	-32,9487	-71,5404	5,19	0,19	6,44	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 12A	-32,9502	-71,5375	4,43	0,23	8,43	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 12B	-32,9495	-71,5368	3,89	0,26	5,85	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 13	-32,9416	-71,5464	5,73	0,17	7,53	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 14	-32,9358	-71,5441	5,65	0,18	9,11	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 15	-32,9320	-71,5467	4,20	0,24	6,75	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 16	-32,9292	-71,5447	3,91	0,26	4,31	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 17	-32,9321	-71,5367	4,72	0,21	8,47	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 18	-32,9373	-71,5334	5,11	0,20	6,19	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 19	-32,9422	-71,5287	4,35	0,23	9,13	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 20	-32,9432	-71,5185	2,92	0,34	5,44	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	No	Ok	Si cumple	No cumple	Sí (*)
NK 21	-32,9387	-71,5254	2,24	0,45	6,00	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	No	Ok	Si cumple	No cumple	No
NK 22	-32,9334	-71,5172	4,24	0,24	4,36	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 23	-32,9295	-71,5232	4,13	0,24	7,14	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 24	-32,9264	-71,5257	3,95	0,25	9,20	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 25	-32,9216	-71,5095	H/V Plano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	No
NK 26	-32,9869	-71,5355	5,90	0,17	3,81	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 27	-32,9852	-71,5315	9,22	0,11	2,85	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	No cumple	Sí (*)
NK 28	-32,9837	-71,5356	8,39	0,12	4,29	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 29	-32,9800	-71,5393	7,07	0,14	6,25	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 30	-32,9805	-71,5327	10,33	0,10	4,02	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 31	-32,9777	-71,5416	5,73	0,17	5,10	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 32	-32,9755	-71,5435	3,84	0,26	5,75	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 33	-32,9757	-71,5387	4,77	0,21	5,71	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 34	-32,9782	-71,5367	7,47	0,13	3,77	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 35	-32,9750	-71,5346	7,92	0,13	4,84	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 36	-32,9780	-71,5330				No se pudo ejecutar											
NK 37	-32,9801	-71,5287	H/V Plano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	No
NK 38	-32,9815	-71,5239	8,10	0,12	3,34	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	SI
NK 39	-32,9828	-71,5178	5,08	0,20	3,80	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	SI
NK 40	-32,9795	-71,5205	Sin peak	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	No
NK 41	-32,9768	-71,5249	5,12	0,20	6,10	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 42	-32,9768	-71,5294	7,23	0,14	2,97	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	No	No	Ok	Si cumple	No cumple	No
NK 43	-32,9735	-71,5313	7,39	0,14	3,13	Ok	Ok	Ok	No	No	Ok	No	No	Ok	Si cumple	No cumple	No
NK 44	-32,9702	-71,5278	3,09	0,32	9,02	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 45	-32,9701	-71,5235	7,41	0,14	4,10	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	No	Ok	Si cumple	No cumple	No
NK 46	-32,9805	-71,5174	Sin peak	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	No
NK 47	-32,9815	-71,5110	H/V Plano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	No
NK 48	-32,9790	-71,5075	8,08	0,12	2,76	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 49	-32,9764	-71,5120	H/V Plano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	No
NK 50	-32,9753	-71,5053	8,56	0,12	2,68	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 51	-32,9723	-71,5095				No se pudo ejecutar											
NK 52	-32,9744	-71,5013	7,42	0,13	3,15	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 53	-32,9696	-71,5059	8,06	0,12	4,84	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 54	-32,9681	-71,5091				No se pudo ejecutar											

Medición	Latitud [°]	Longitud [°]	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Amplitud H/V [-]	CRITERIO SESAME										Incluidos en Mapa		
						Confianza			Peak Claro				Resultado					
						(i)	(ii)	(iii)	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)	(vi)	Confianza		Peak Claro	
NK 55	-32,9657	-71,5128	5,26	0,19	4,38	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 56	-32,9641	-71,5086	6,30	0,16	4,17	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 57	-32,9626	-71,5128	4,82	0,21	7,89	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 58	-32,9667	-71,5181	8,35	0,12	3,33	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 59	-32,9631	-71,5182	3,57	0,28	5,37	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 60	-32,9585	-71,5146	3,86	0,26	3,24	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 61	-32,9607	-71,5182	2,69	0,37	6,92	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 62	-32,9626	-71,5213	2,45	0,41	8,18	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 63	-32,9656	-71,5226	2,15	0,47	4,13	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 64	-32,9672	-71,5272	9,16	0,11	5,59	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	No	Ok	Si cumple	No cumple	Sí (*)
NK 65	-32,9639	-71,5249	5,63	0,18	5,54	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 66	-32,9684	-71,5328				No se pudo ejecutar												
NK 67	-32,9690	-71,5366	1,88	0,53	8,05	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 68	-32,9685	-71,5433	1,86	0,54	5,92	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 69	-32,9653	-71,5407	1,60	0,63	3,82	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 70	-32,9654	-71,5350	2,04	0,49	6,79	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 71	-32,9648	-71,5304	4,36	0,23	5,00	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	No	Ok	Si cumple	No cumple	Sí (*)
NK 72	-32,9607	-71,5415	1,30	0,77	2,88	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 73	-32,9618	-71,5376	2,06	0,49	5,06	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 74	-32,9607	-71,5315	2,51	0,40	9,60	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 75	-32,9586	-71,5279	3,53	0,28	6,69	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 76	-32,9597	-71,5232	3,02	0,33	9,61	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 77	-32,9570	-71,5188	3,42	0,29	10,63	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 78	-32,9552	-71,5247	3,38	0,30	7,46	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 79	-32,9540	-71,5290	3,78	0,26	5,55	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 80	-32,9563	-71,5329	2,90	0,35	5,00	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 81	-32,9572	-71,5476	2,66	0,38	3,59	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 82	-32,9542	-71,5462				No se pudo ejecutar												
NK 83	-32,9540	-71,5376	2,31	0,43	4,14	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	No	Ok	Ok	Si cumple	No cumple	Sí (*)
NK 84	-32,9526	-71,5342	3,02	0,33	5,47	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	No	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 85	-32,9489	-71,5328				No se pudo ejecutar												
NK 86	-32,9470	-71,5296				No se pudo ejecutar												
NK 87	-32,9444	-71,5330	3,54	0,28	6,73	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 88	-32,9453	-71,5385	6,60	0,15	4,26	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 89	-32,9458	-71,5429	4,37	0,23	6,45	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 90	-32,9423	-71,5417	6,65	0,15	7,04	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 91	-32,9412	-71,5372	4,45	0,22	6,56	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 92	-32,9420	-71,5326	4,15	0,24	5,39	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 93	-32,9367	-71,5474	2,99	0,33	8,41	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 94	-32,9391	-71,5443	4,35	0,23	8,13	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 95	-32,9378	-71,5405	Sin peak	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	No
NK 96	-32,9335	-71,5502				No se pudo ejecutar												
NK 97	-32,9296	-71,5501	7,60	0,13	5,68	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 98	-32,9306	-71,5407	5,04	0,20	7,86	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	No	Ok	Si cumple	No cumple	Sí (*)
NK 99	-32,9335	-71,5410	5,02	0,20	10,43	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 100	-32,9351	-71,5366	5,25	0,19	6,78	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	No	Ok	Si cumple	No cumple	Sí (*)
NK 101	-32,9349	-71,5313	3,86	0,26	8,40	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 102	-32,9385	-71,5292	3,46	0,29	8,56	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 103	-32,9427	-71,5233	4,16	0,24	10,88	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 104	-32,9389	-71,5195	4,05	0,25	6,62	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 105	-32,9360	-71,5268	3,36	0,30	6,22	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 106	-32,9344	-71,5224	4,66	0,21	5,70	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 107	-32,9353	-71,5153	3,73	0,27	4,86	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 108	-32,9326	-71,5283	3,25	0,31	7,02	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 109	-32,9298	-71,5276	3,43	0,29	8,00	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 110	-32,9277	-71,5184	4,14	0,24	6,15	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 111	-32,9304	-71,5151	3,91	0,26	5,68	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	No cumple	No
NK 112	-32,9246	-71,5219	3,89	0,26	6,32	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 113	-32,9204	-71,5203	5,23	0,19	5,99	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 114						No se pudo ejecutar												
NK 115	-32,9221	-71,5159	5,16	0,19	7,48	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 116	-32,9273	-71,5135	4,16	0,24	5,88	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 117	-32,9243	-71,5109	6,25	0,16	5,10	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 118	-32,9754	-71,5166	8,47	0,12	3,34	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	No	No	Ok	Ok	Si cumple	No cumple	Sí (**)
NK 119	-32,9819	-71,5213	9,37	0,11	3,99	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 120	-32,973	-71,5443				No se pudo ejecutar												
NK 121	-32,971	-71,5442	1,76	0,57	3,27	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 122	-32,97	-71,5443	1,54	0,65	3,64	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 123	-32,971	-71,5427	2,52	0,40	3,16	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 124	-32,972	-71,5427	1,91	0,52	3,51	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	No	Ok	Si cumple	No cumple	Sí (*)
NK 125	-32,972	-71,5413	1,66	0,60	4,87	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 126	-32,971	-71,5385	4,69	0,21	5,20	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 127	-32,973	-71,5402				No se pudo ejecutar												

Medición	Latitud [°]	Longitud [°]	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Amplitud H/V [-]	CRITERIO SESAME										Incluidos en Mapa		
						Confianza			Peak Claro						Resultado			
						(i)	(ii)	(iii)	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)	(vi)	Confianza		Peak Claro	
NK 128	-32,974	-71,5412	8,83	0,11	4,56	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 129	-32,974	-71,5371	3,31	0,30	4,41	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 130	-32,973	-71,5364	1,92	0,52	5,04	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí
NK 131	-32,972	-71,5337	4,12	0,24	2,61	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	No	Ok	Si cumple	No cumple	Sí (*)	
NK 132	-32,971	-71,5325	2,03	0,49	4,22	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	No	Ok	Si cumple	No cumple	Sí (*)	
NK 133	-32,969	-71,531	1,69	0,59	4,71	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí	
NK 134	-32,968	-71,5295	2,18	0,46	2,18	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí	
NK 135	-32,972	-71,5304	2,52	0,40	5,47	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí	
NK 136	-32,972	-71,5287	2 Peak	-	-	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	No	No	Ok	Si cumple	No cumple	No	
NK 137	-32,973	-71,5272	3,80	0,26	4,79	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí	
NK 138	-32,973	-71,5258	8,03	0,12	6,12	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí	
NK 139	-32,973	-71,5313	8,25	0,12	3,60	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí	
NK 140	-32,973	-71,5298	8,82	0,11	4,45	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí	
NK 141	-32,974	-71,528	6,90	0,14	4,42	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Si cumple	No cumple	No	
NK 142	-32,974	-71,5261	8,15	0,12	8,15	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Si cumple	Si cumple	Sí	

Notas:

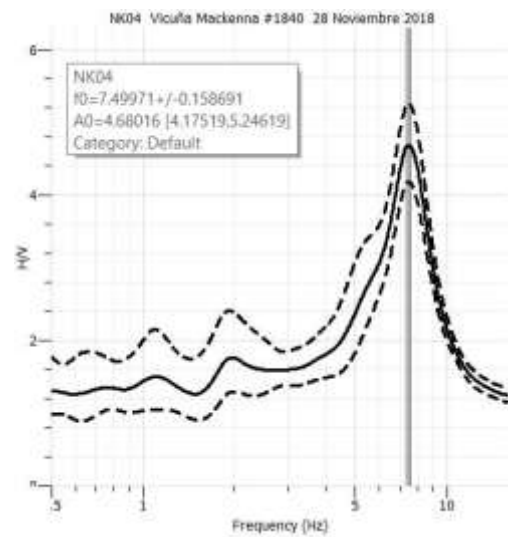
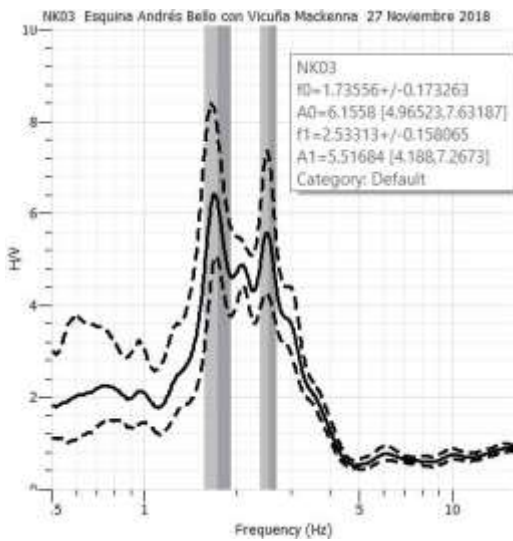
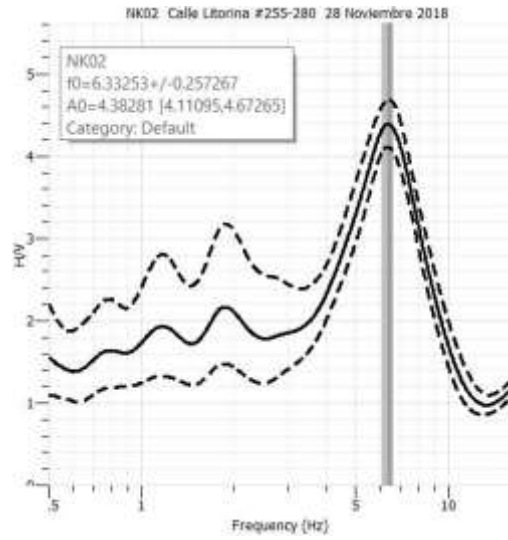
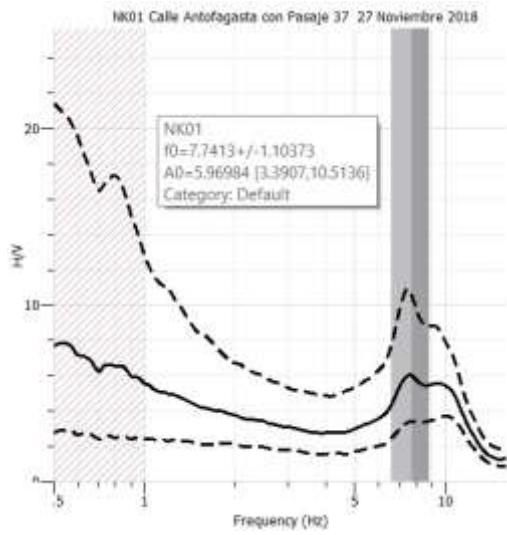
(*): Cumple con 4 de los 6 criterios de Peak Claro y hay una tendencia a ser la frecuencia fundamental.

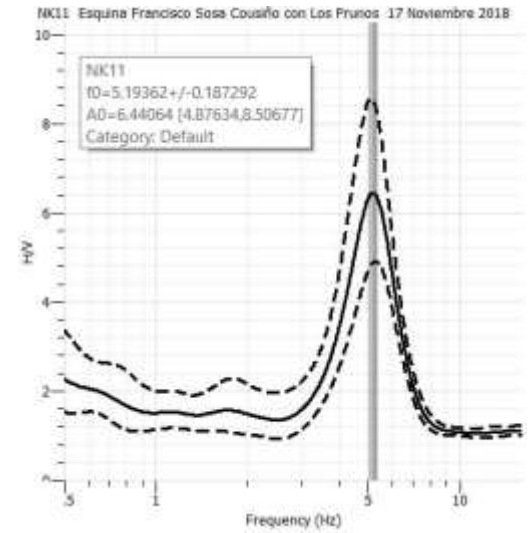
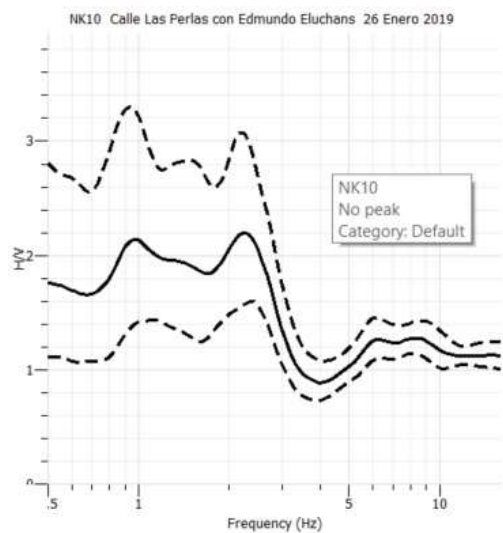
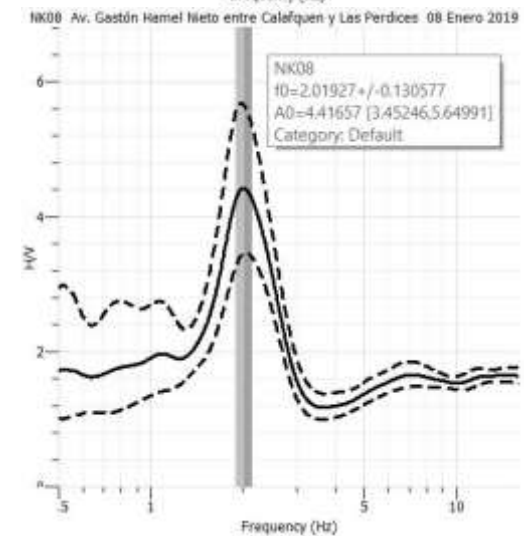
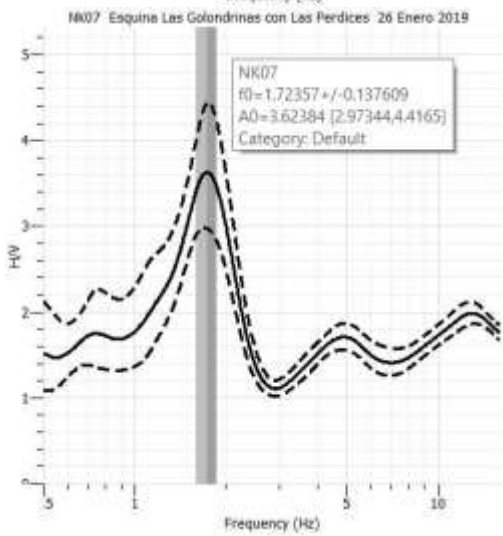
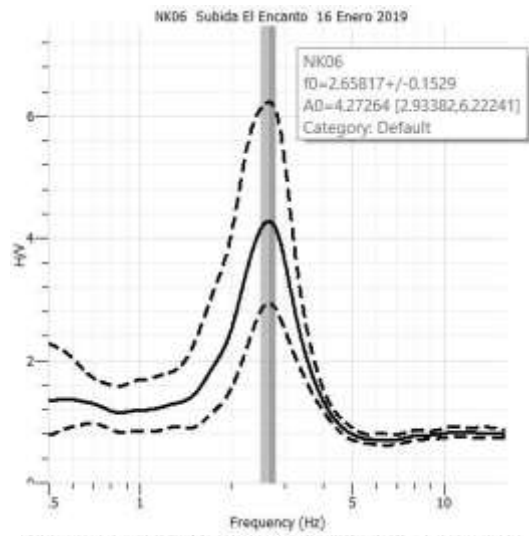
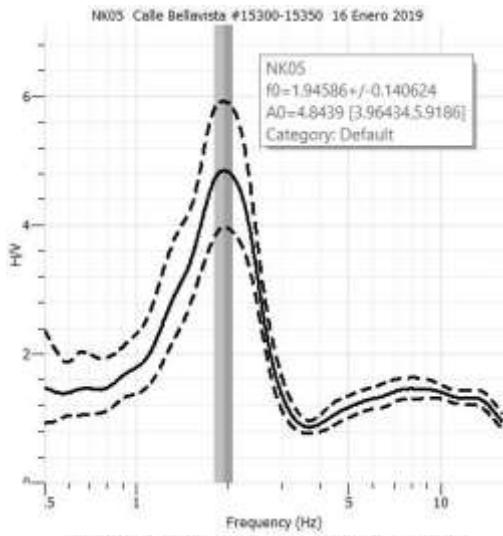
(**): Cumple con 3 de los 6 criterios de Peak Claro y hay una tendencia a ser la frecuencia fundamental.

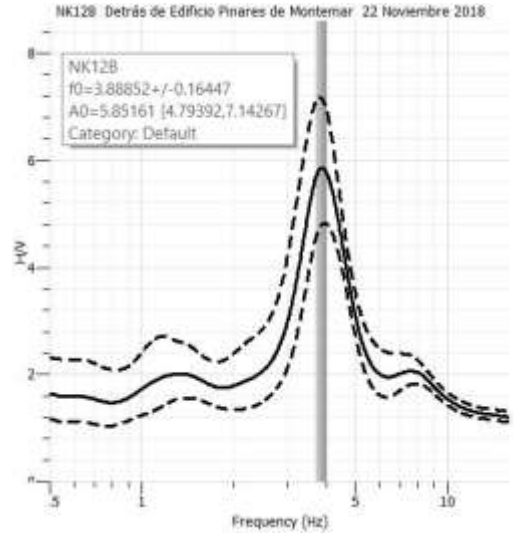
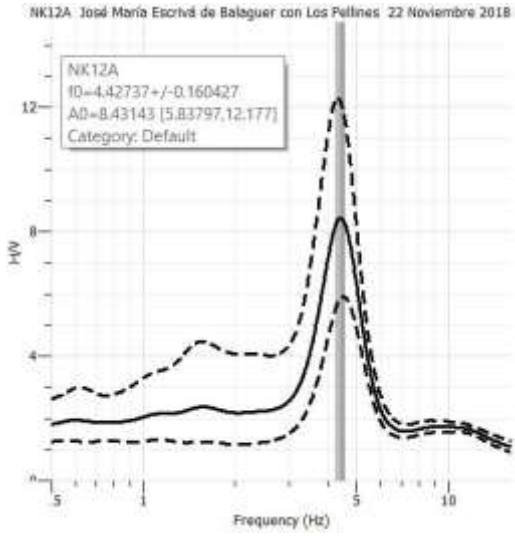
Puntos de grilla	Cantidad [uni]	Porcentaje [%]
Mediciones ejecutadas	130	92%
Mediciones no ejecutadas	12	8%
Total	142	

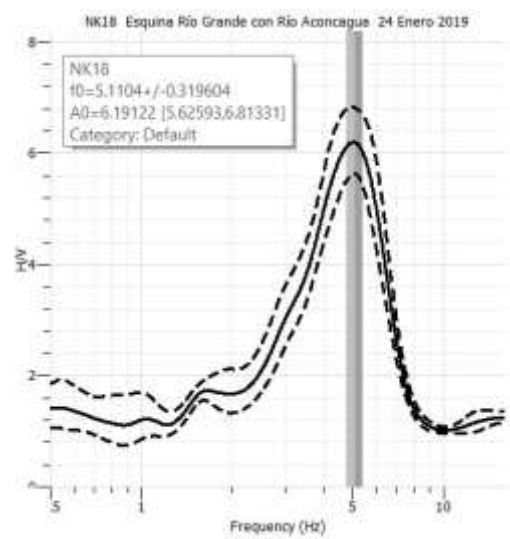
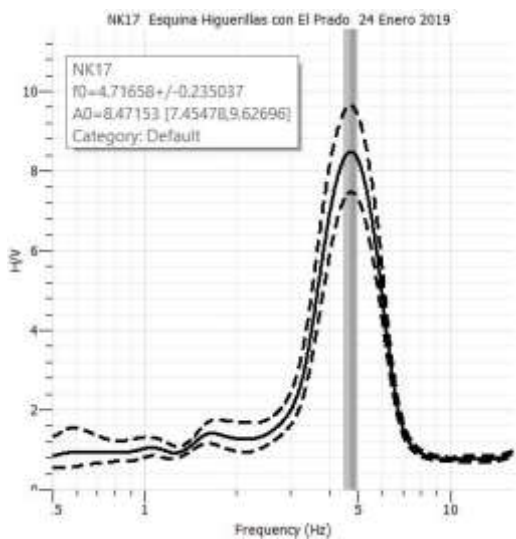
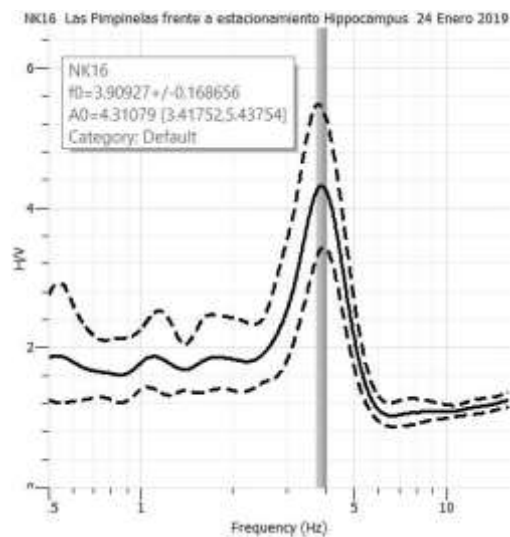
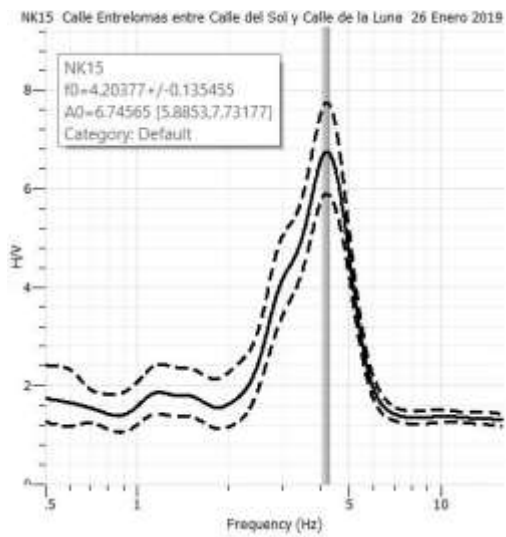
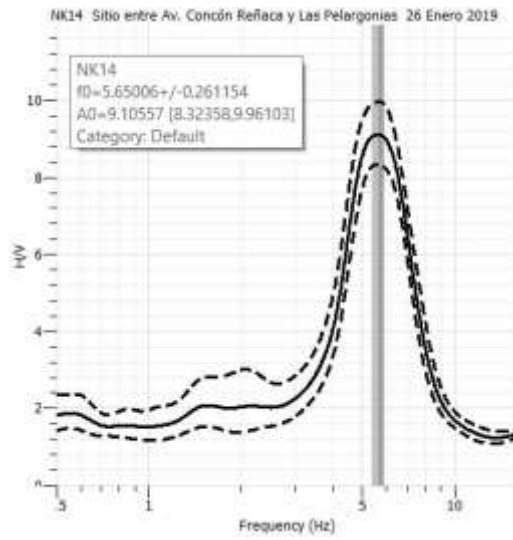
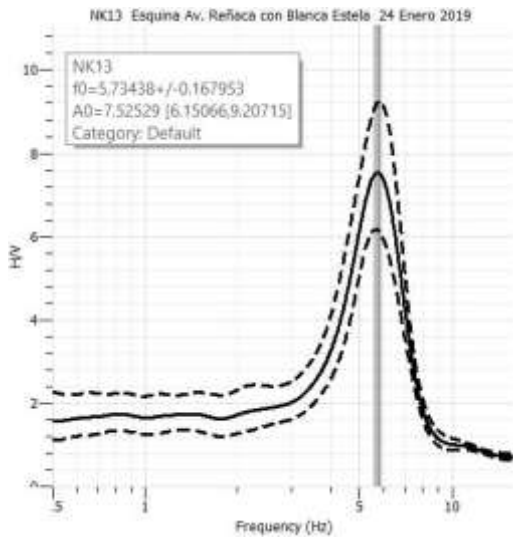
Interpretación y resultado criterios SESAME de Curva H/V	Cantidad de mediciones [uni]	Porcentaje [%]	Criterios para Peak Claro	Incluidos en análisis
Peak Claro	103	79%	Cumple	Si
Peak levemente ancho	10	8%	No cumple	Si
Peak ancho poco claro	1	1%	No cumple	Si
Peak No claro	8	6%	No cumple	No
Curva H/V Plano	4	3%	-	No
No confiables	4	3%	-	No
Total	130			

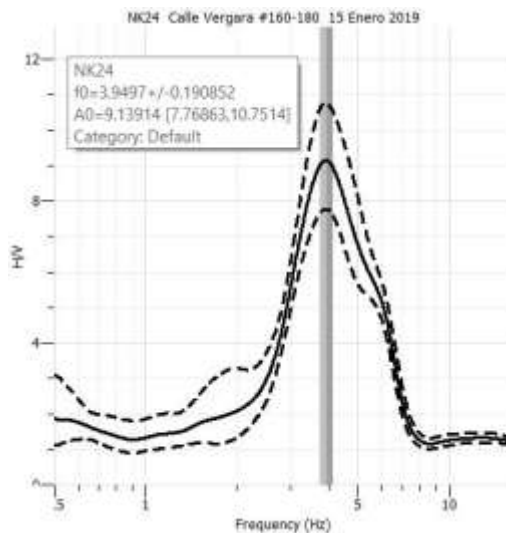
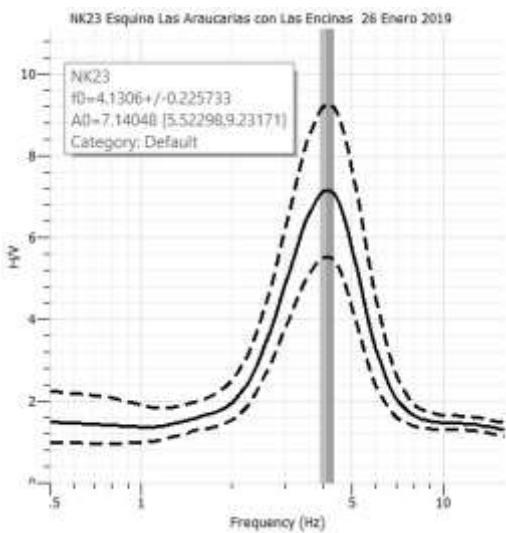
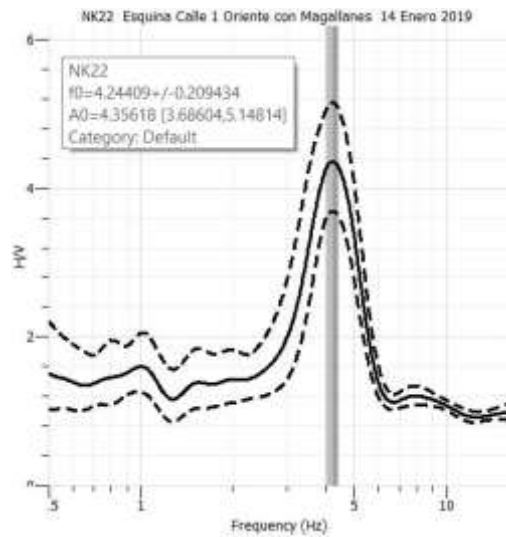
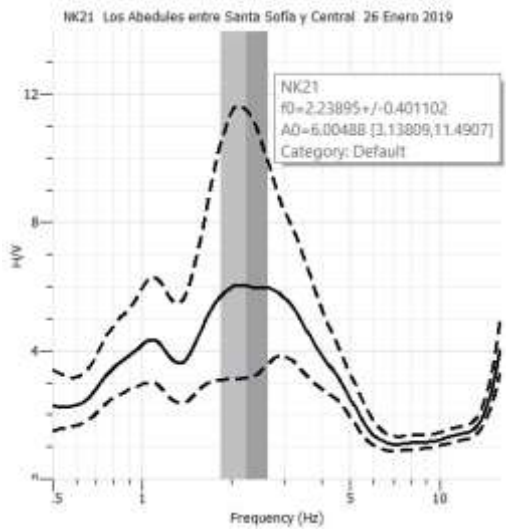
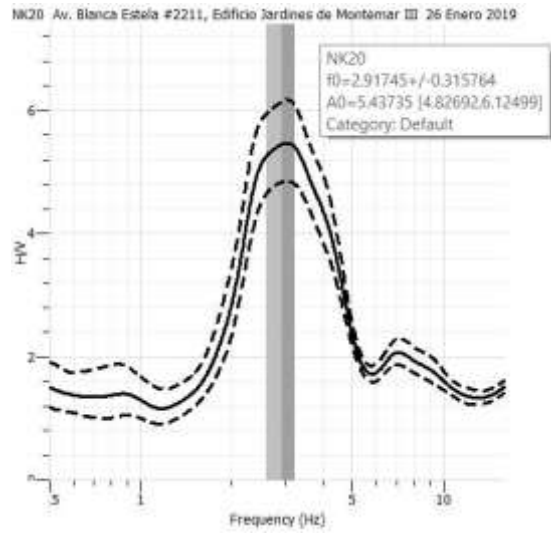
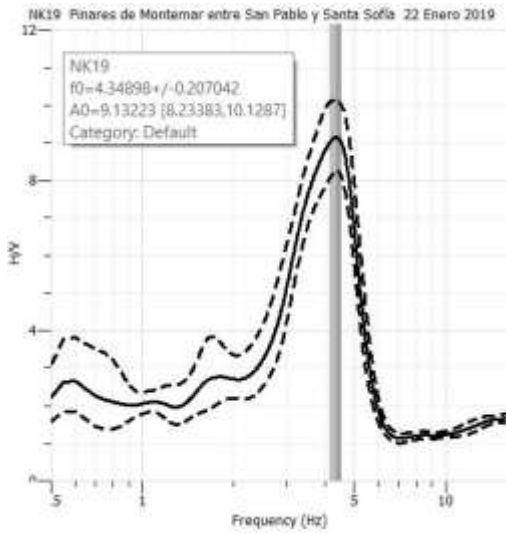
ANEXO B: Curvas de Espectro H/V Nakamura

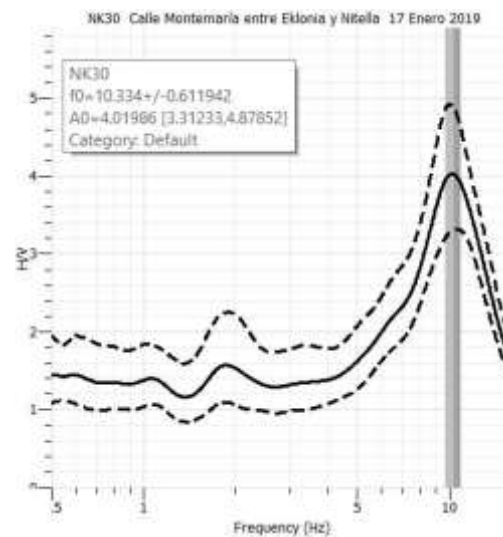
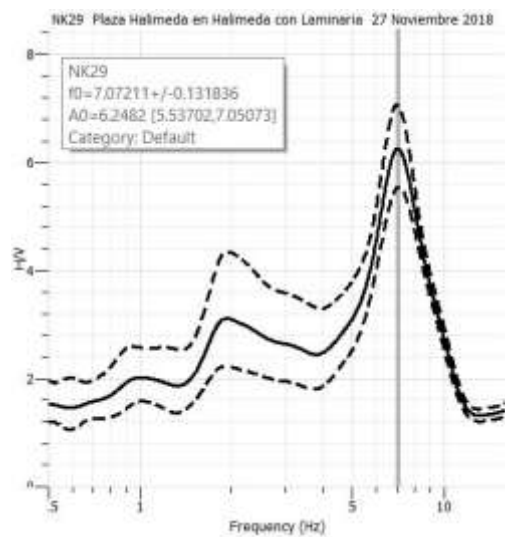
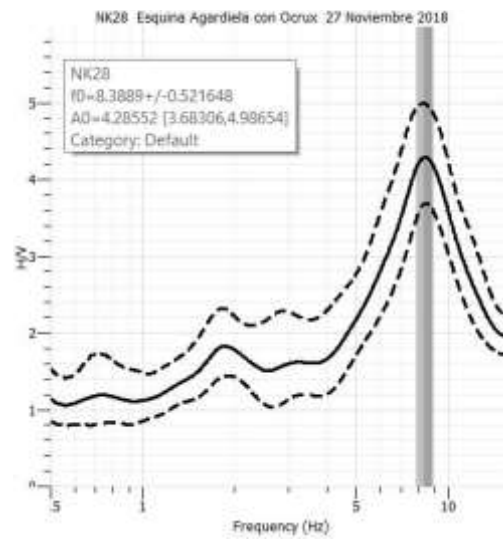
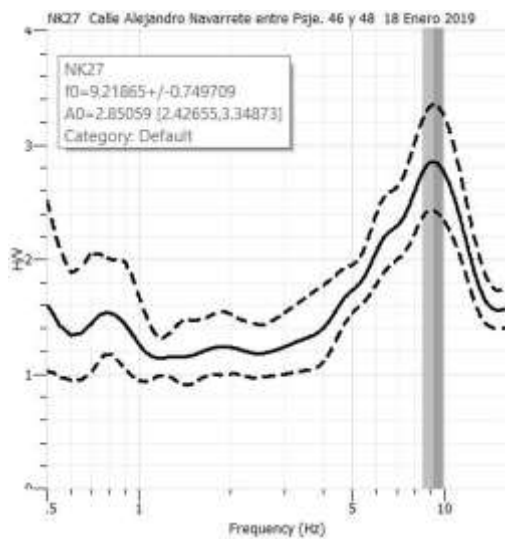
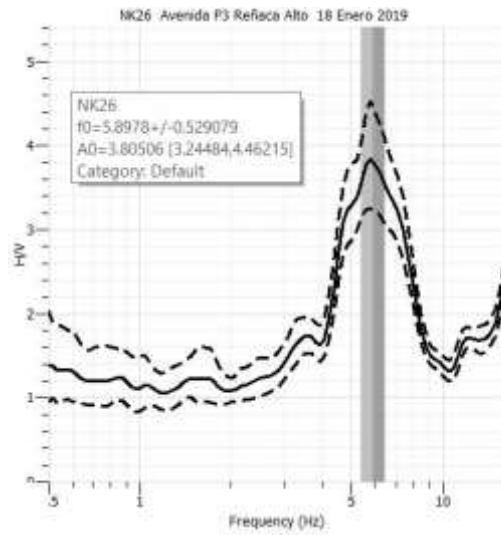
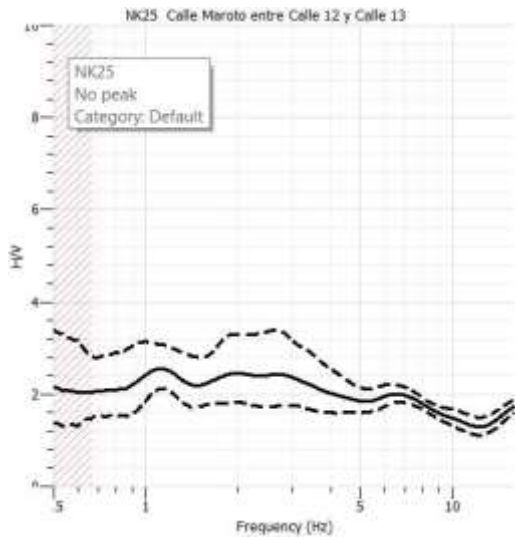


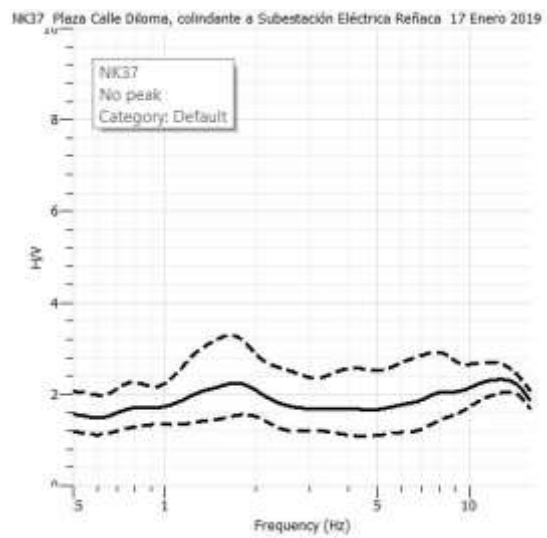
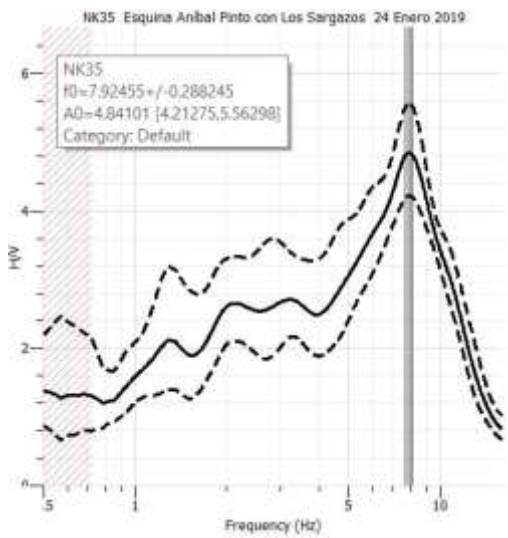
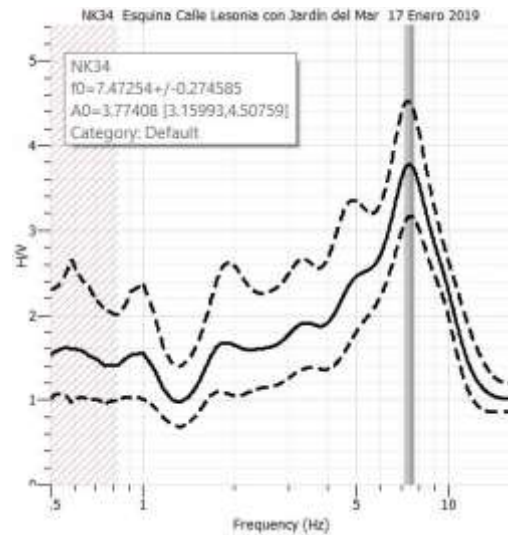
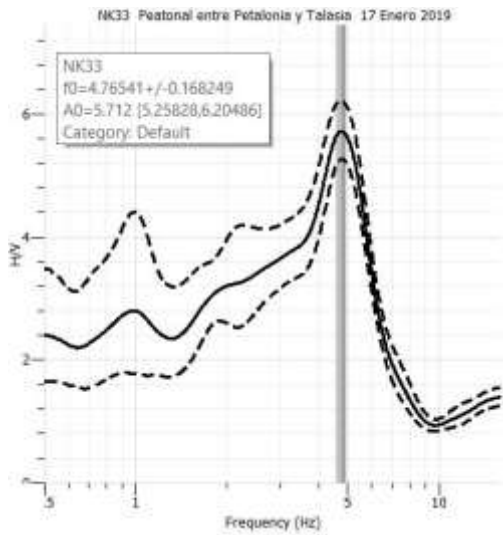
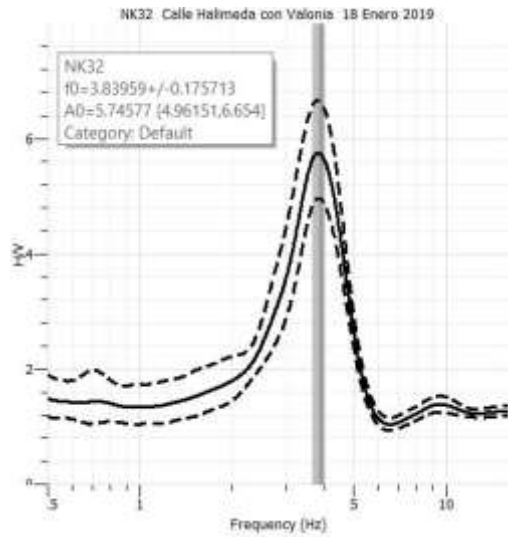
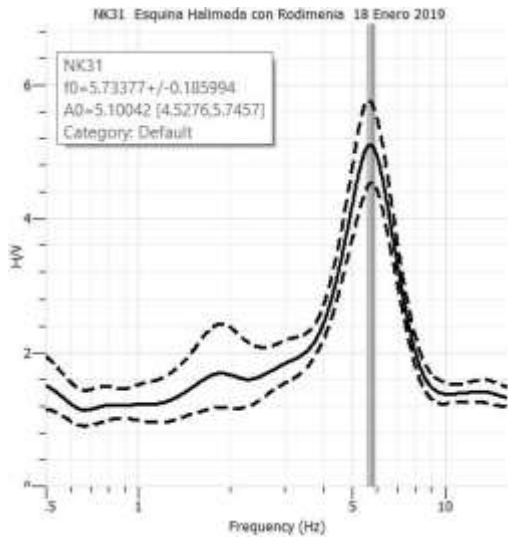


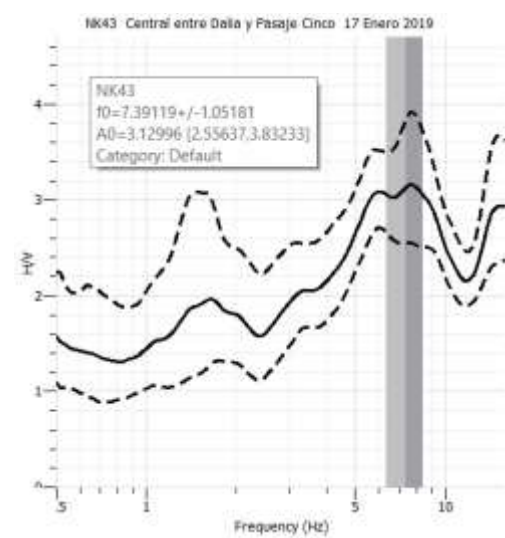
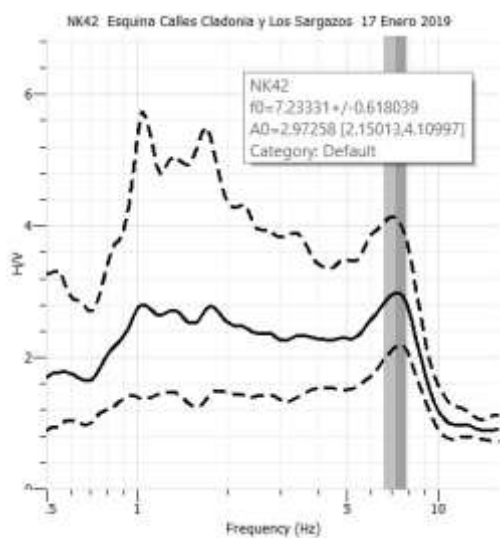
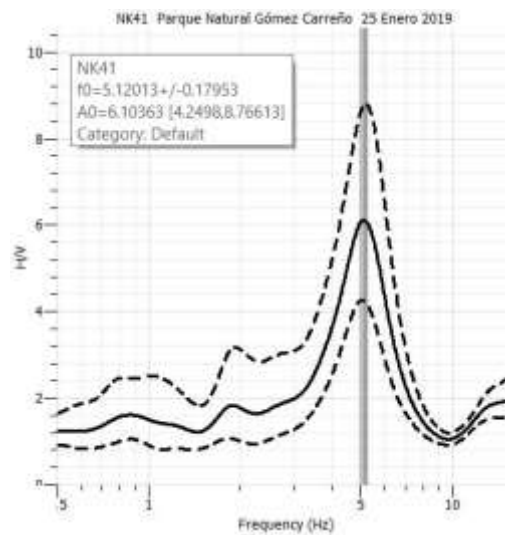
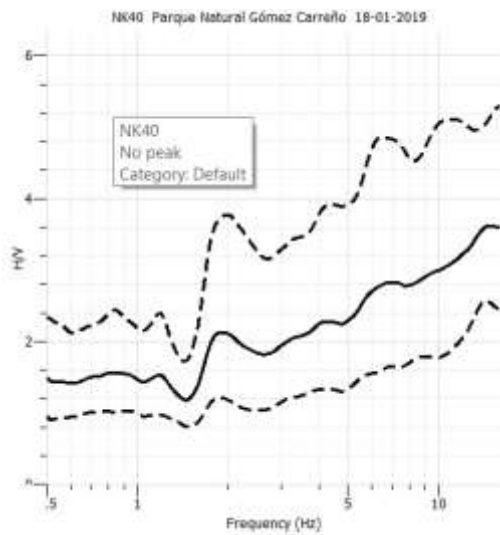
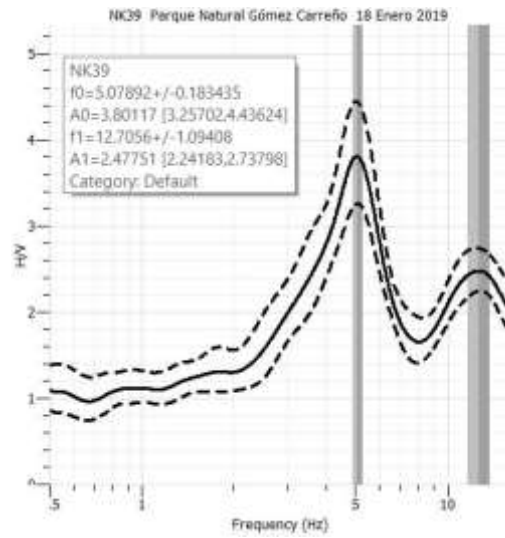
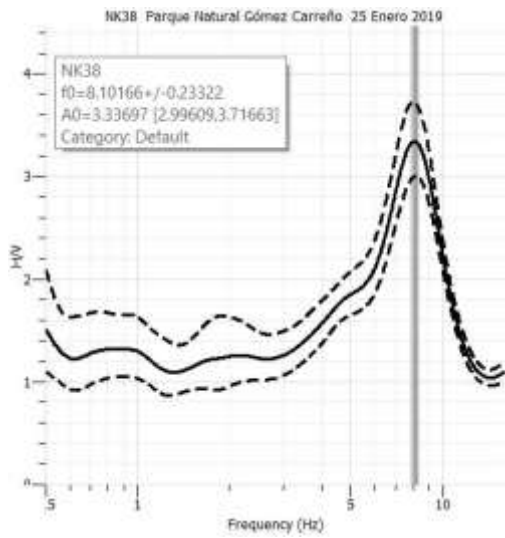


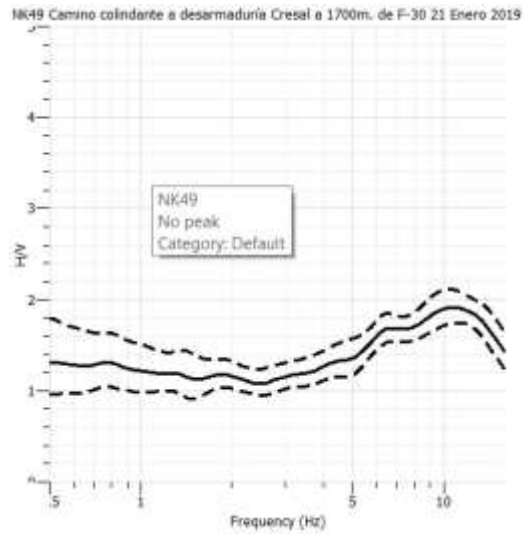
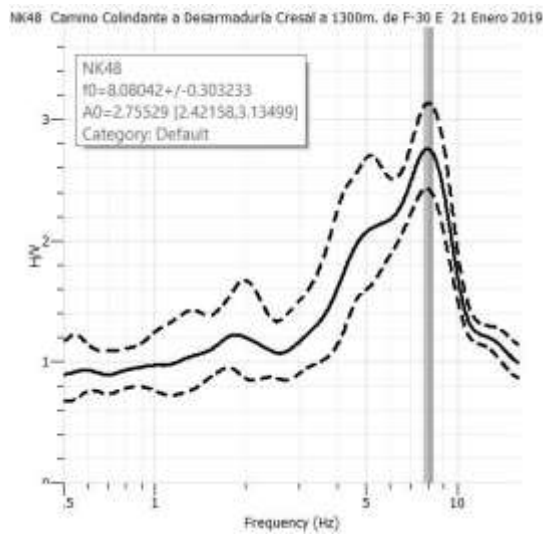
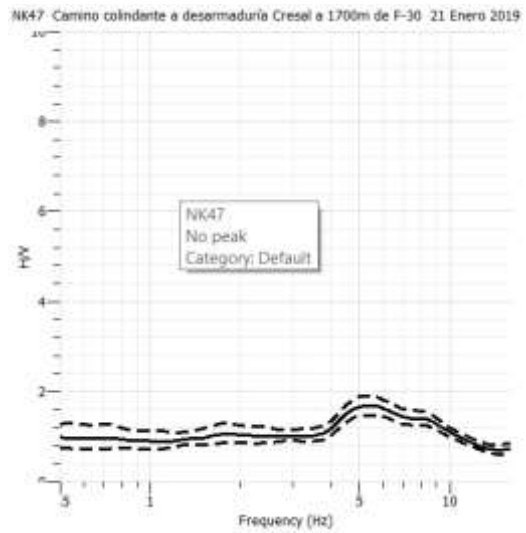
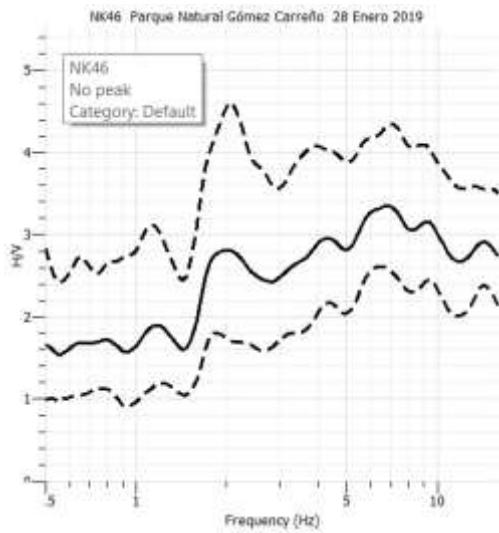
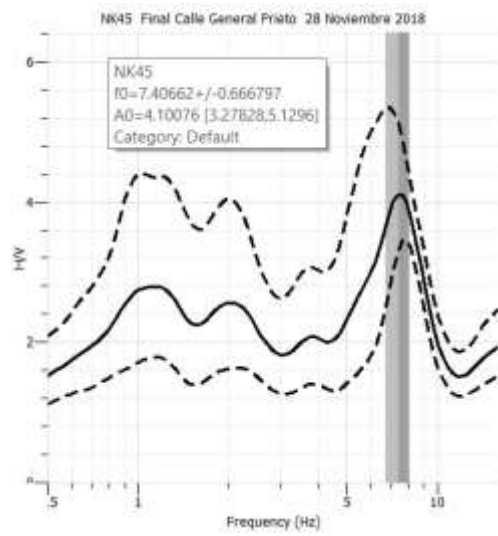
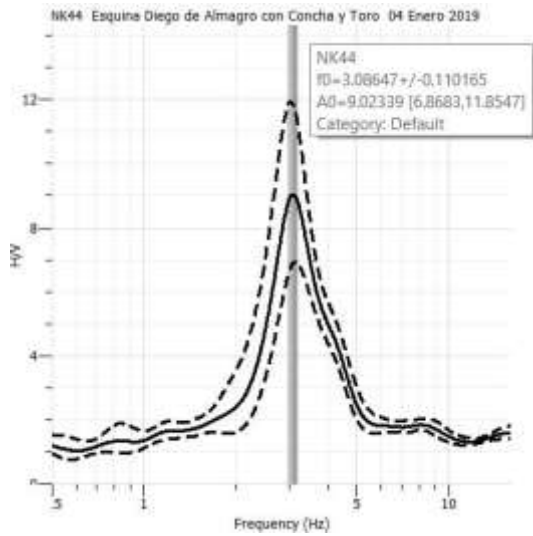




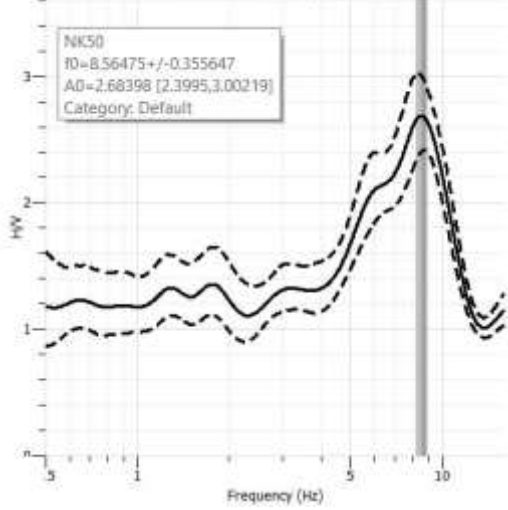




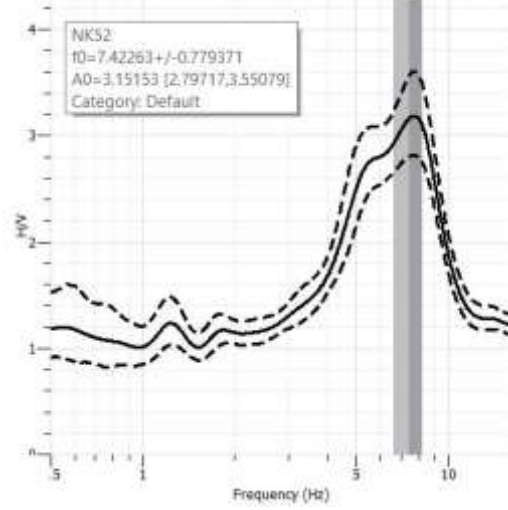




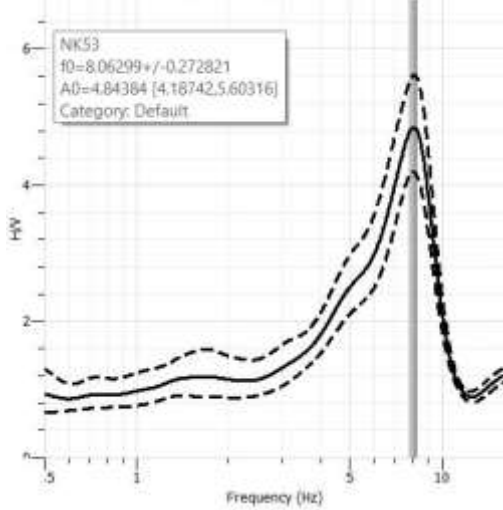
NK50 Camino Colindante a Desarmadura Cresal, 800m. de F-30 E 21 Enero 2019



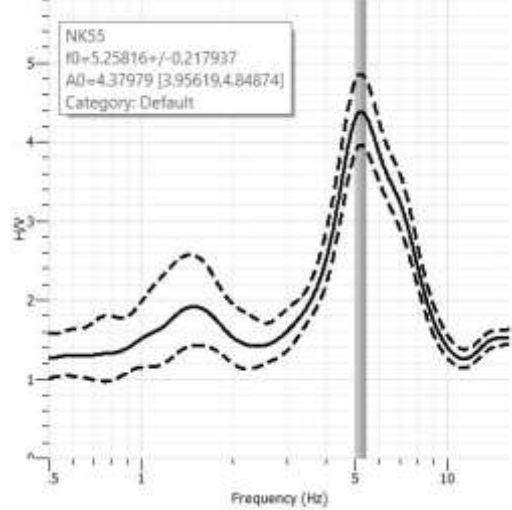
NK52 Camino a Rancho Casanova, a 170m. de Autopista F-30 E 22 Enero 2019



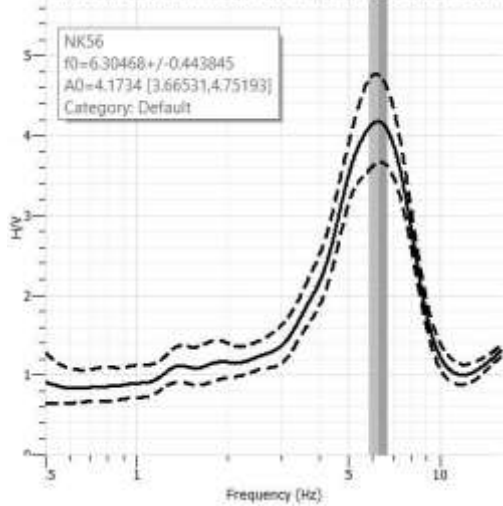
NK53 Calle detrás de Desarmadura Cresal 21 Enero 2019



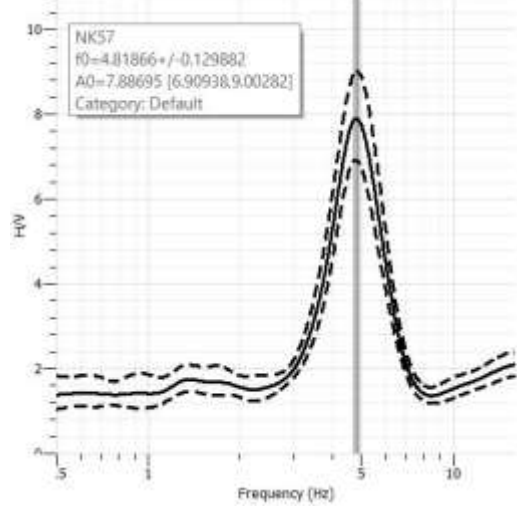
NK55 Cerro a 500m. de acceso General Buñes 21 Enero 2019

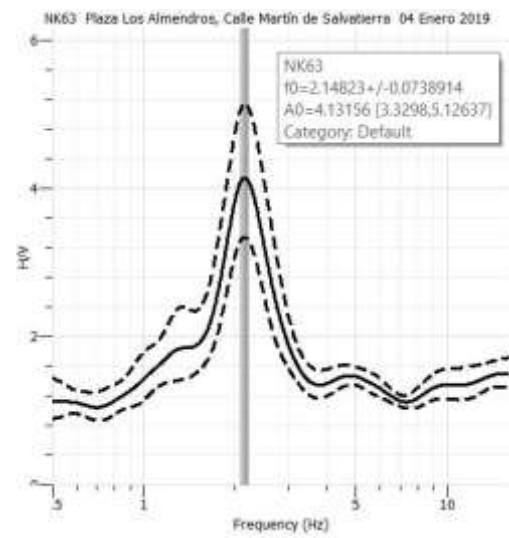
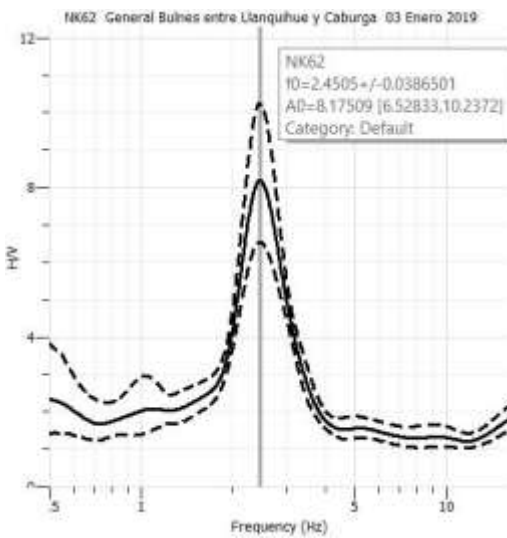
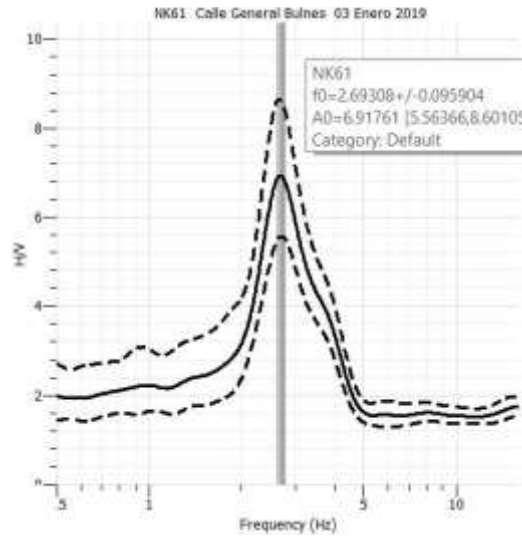
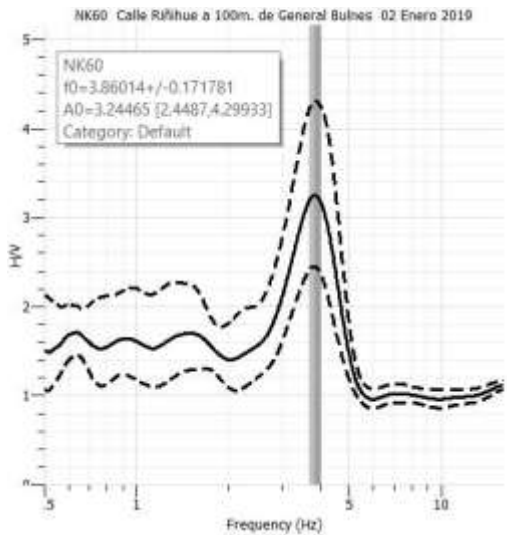
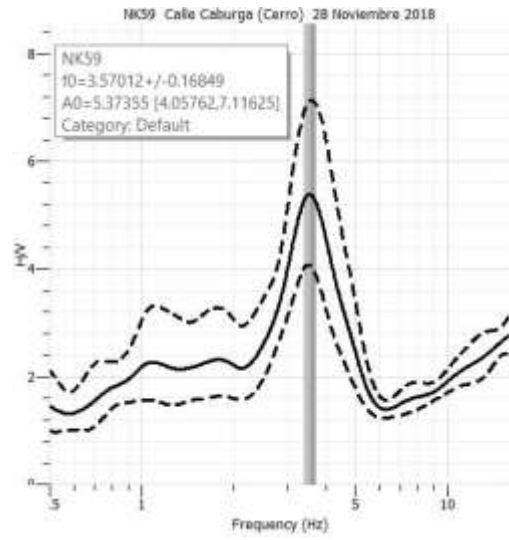
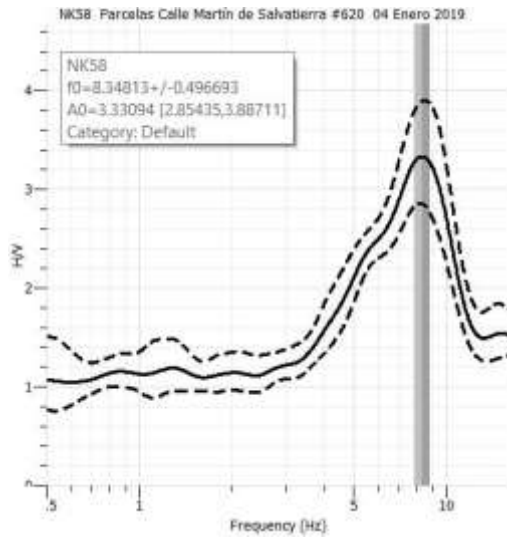


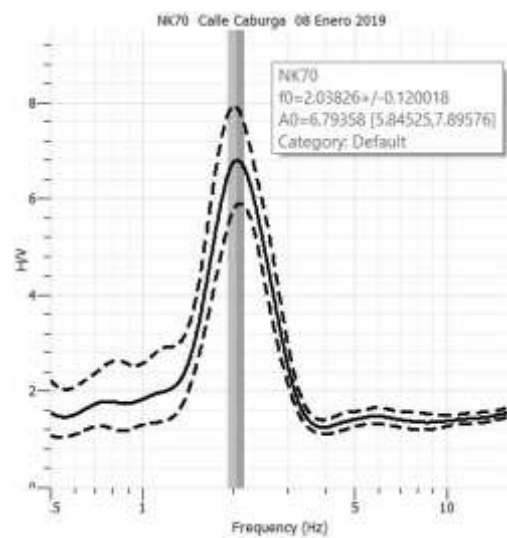
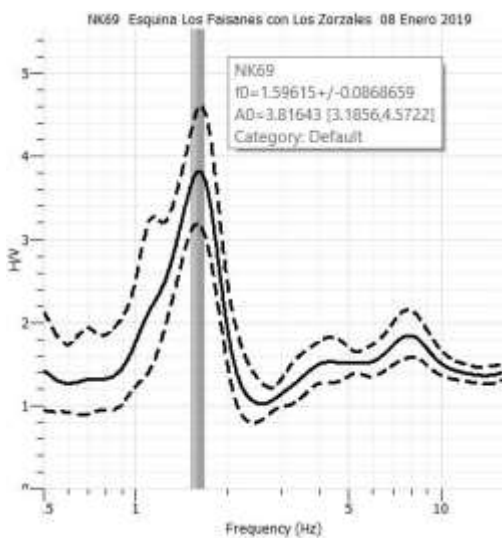
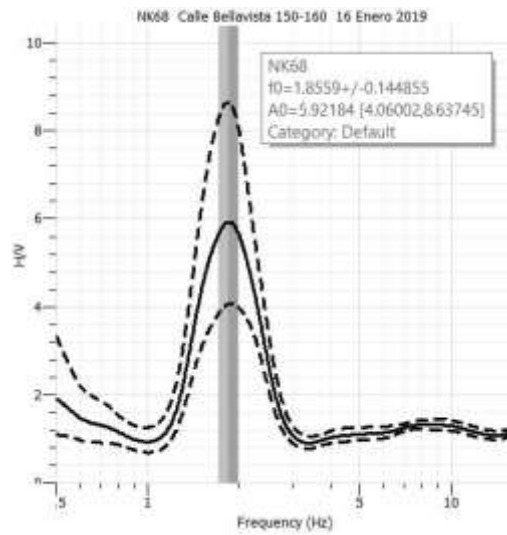
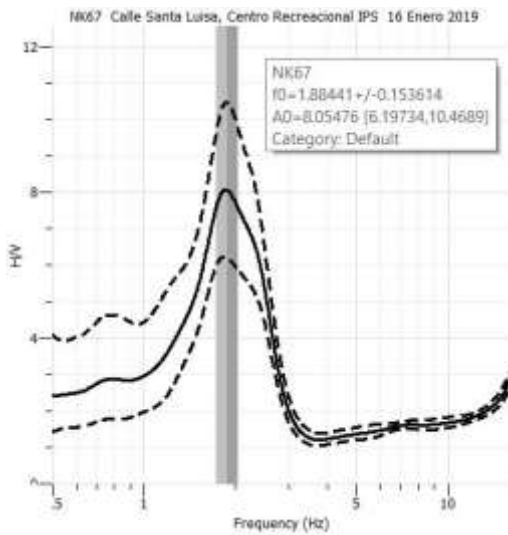
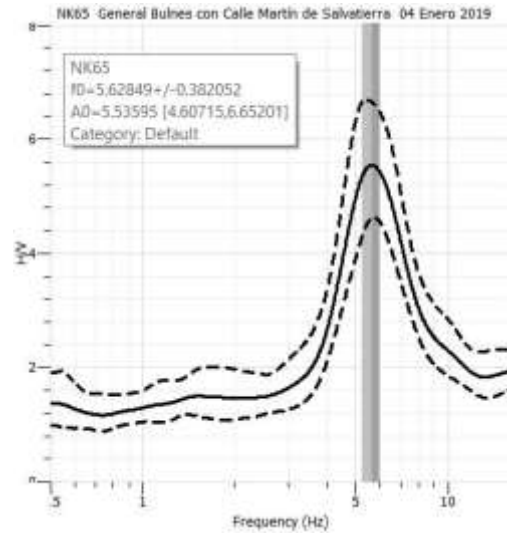
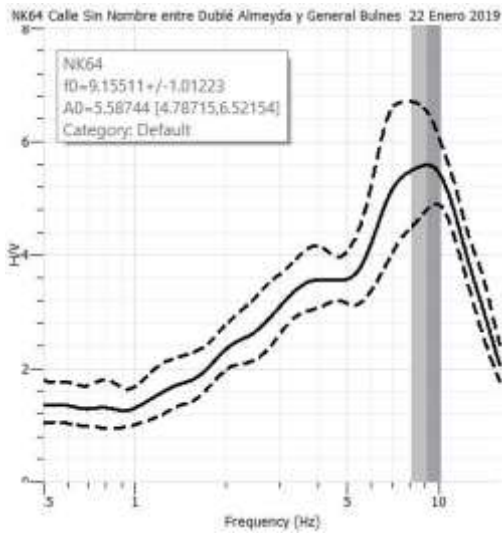
NK56 Calle General Buñes a 250m. de Autopista F-30 E 21 Enero 2019

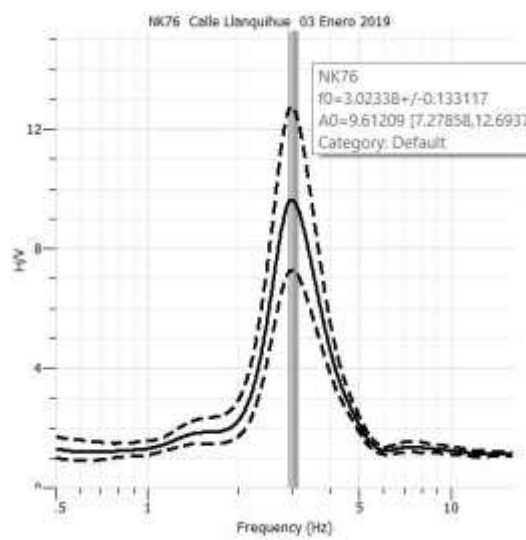
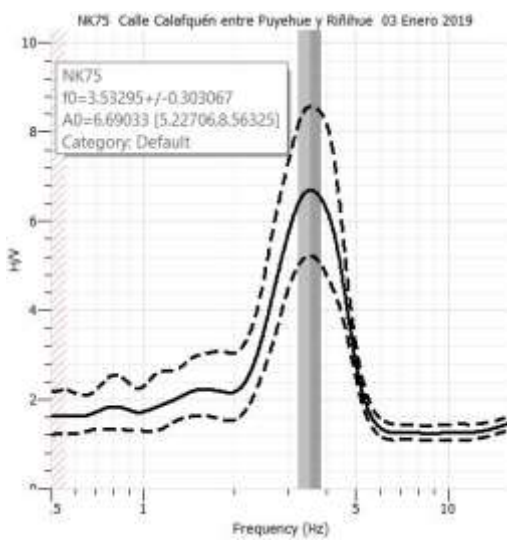
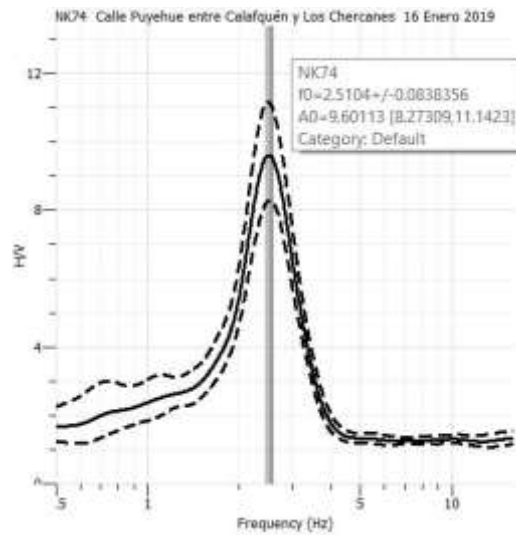
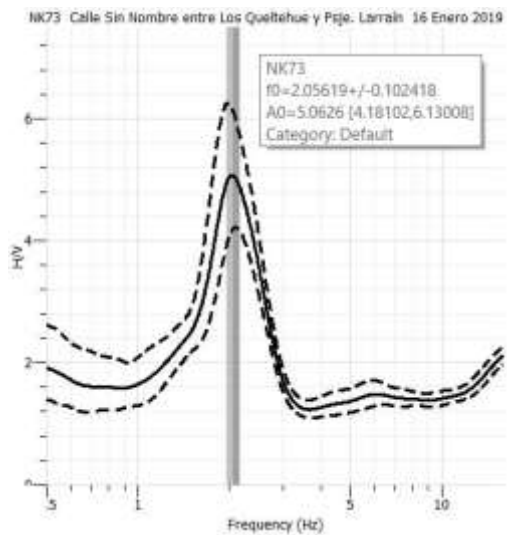
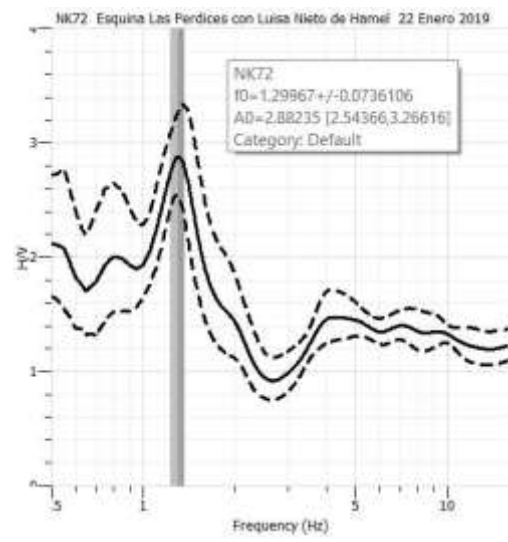
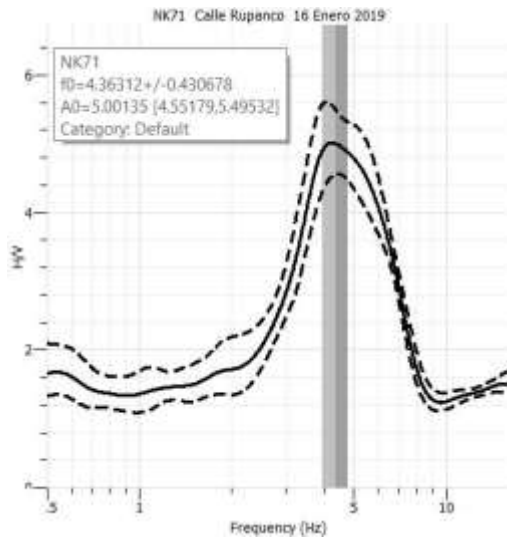


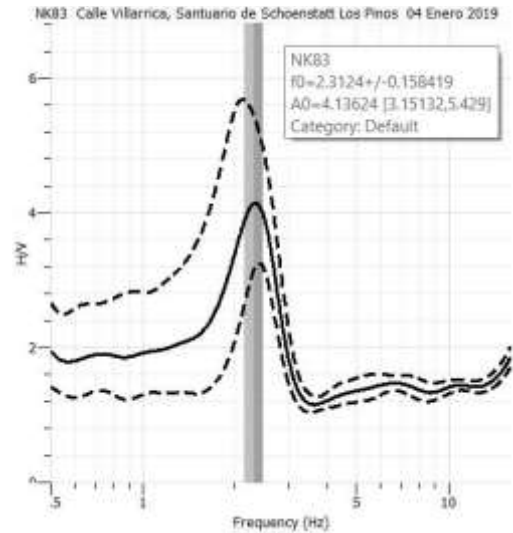
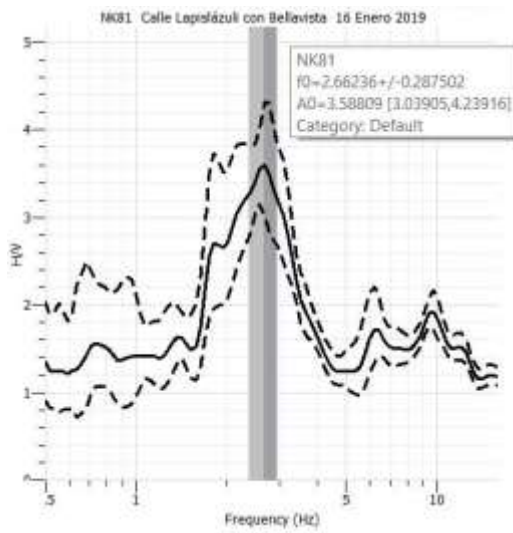
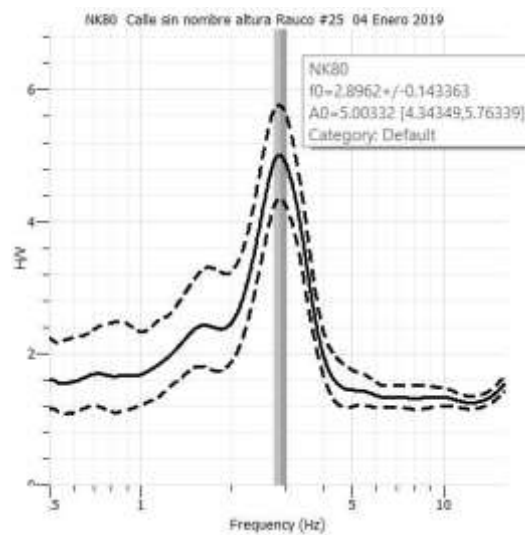
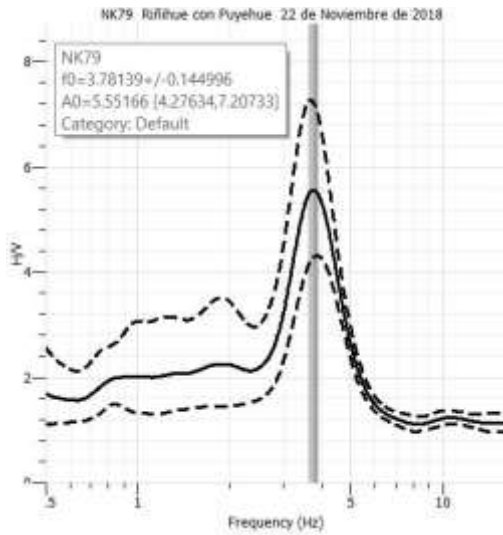
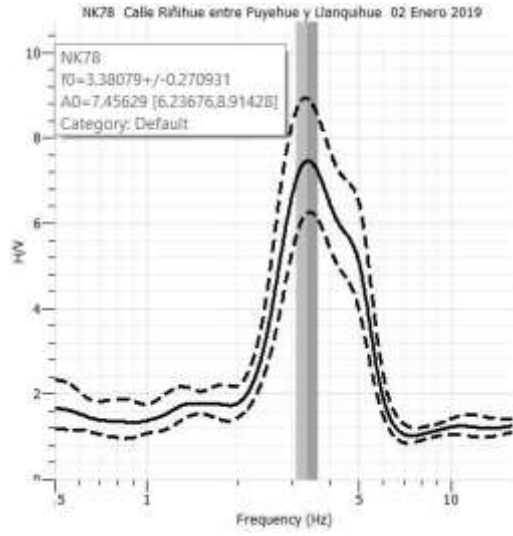
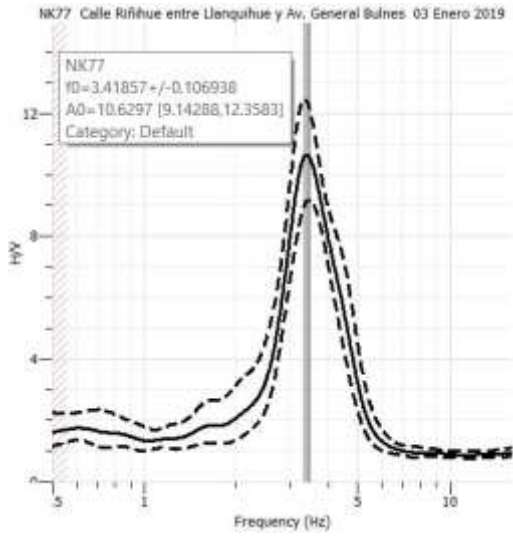
NK57 Parcelas #235-250 General Buñes 18 Enero 2019

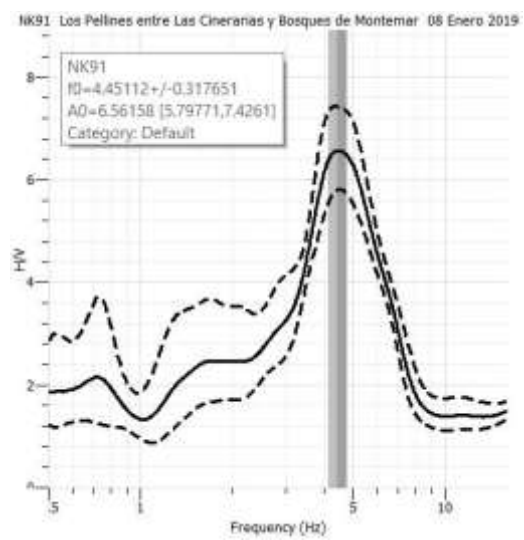
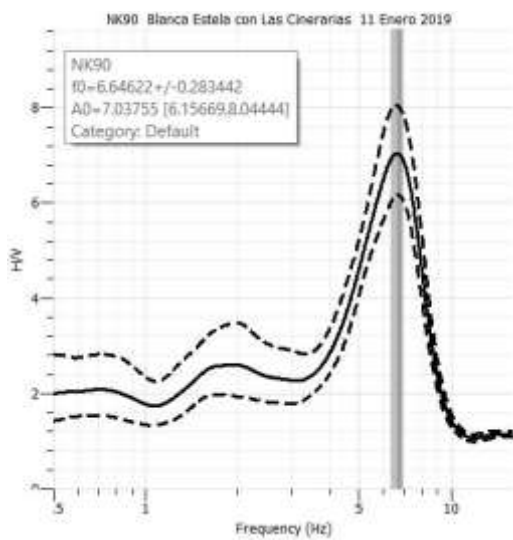
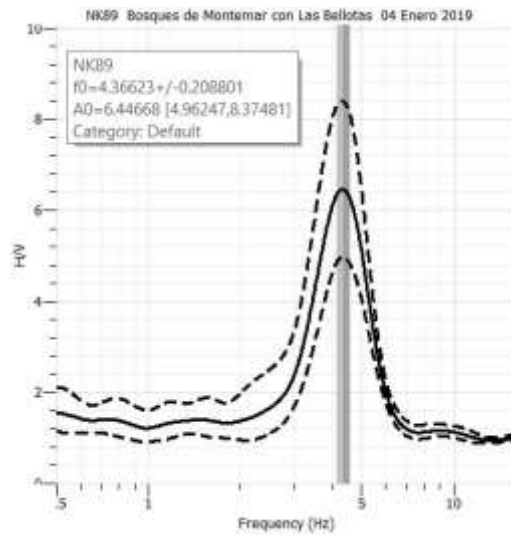
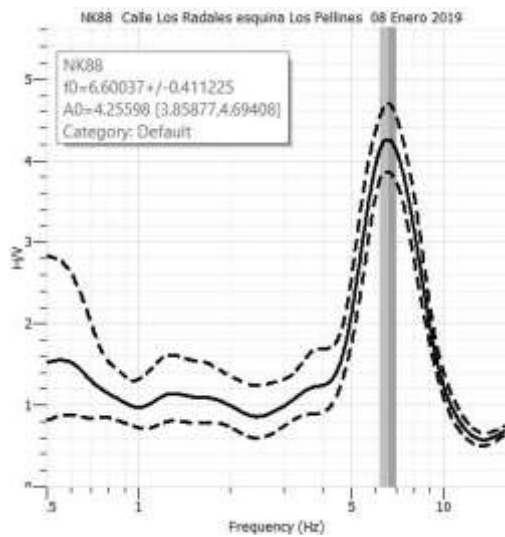
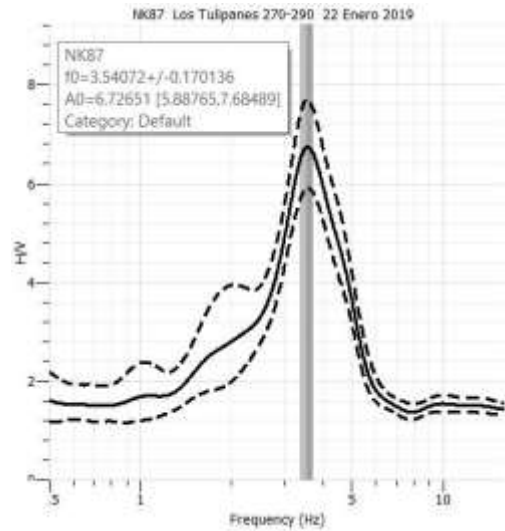
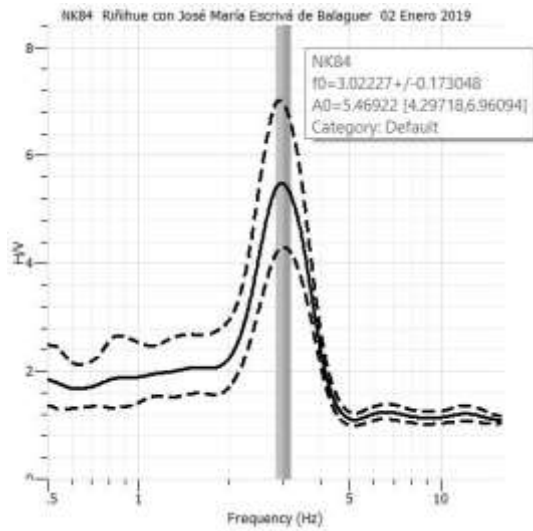


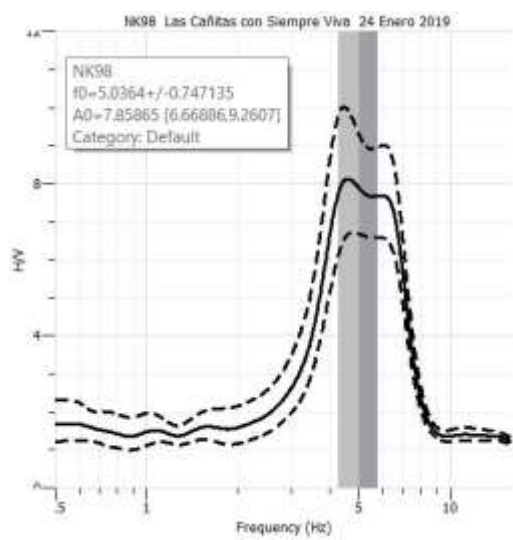
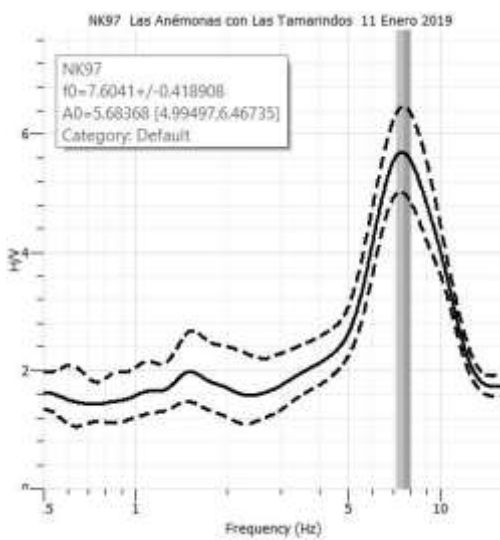
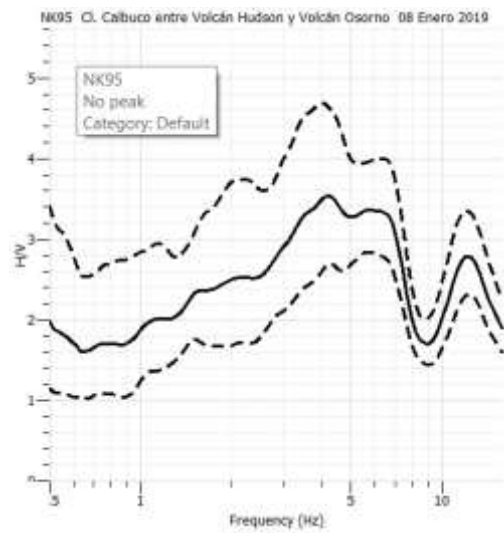
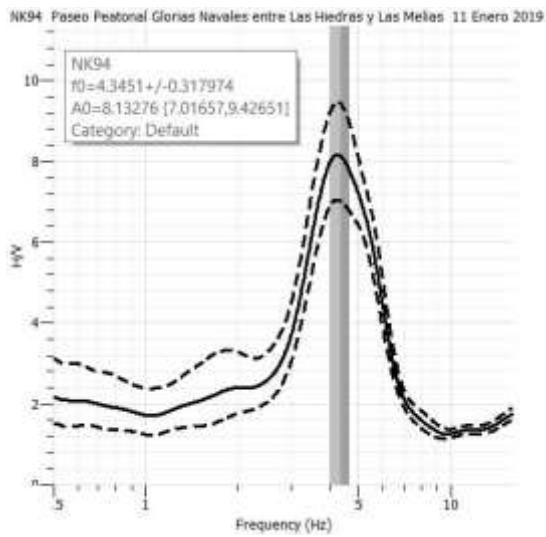
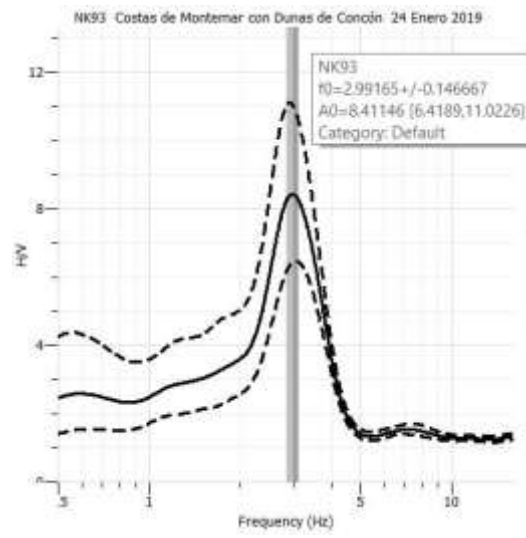
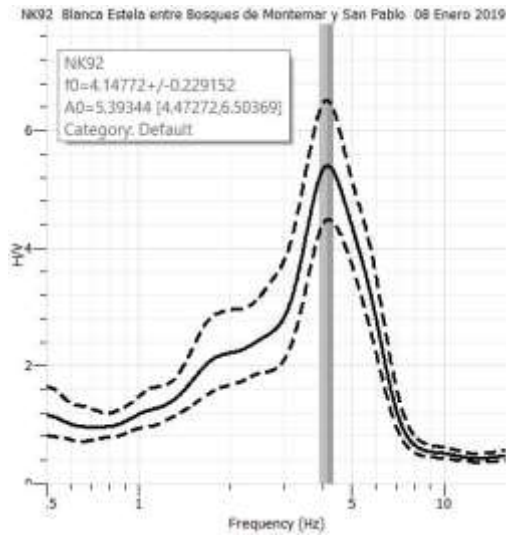


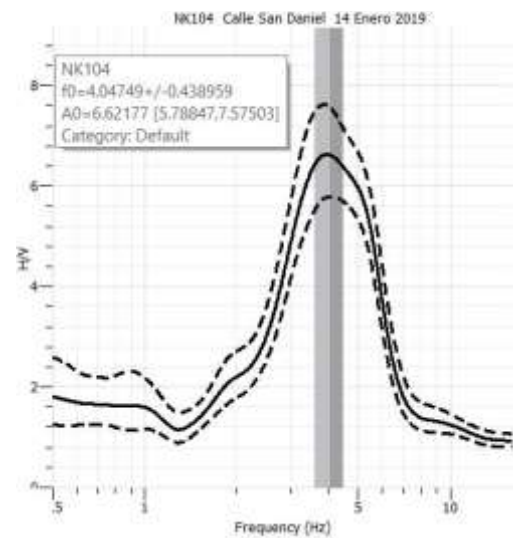
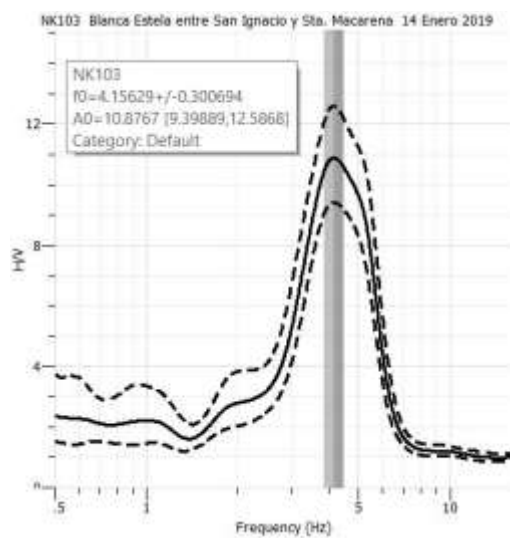
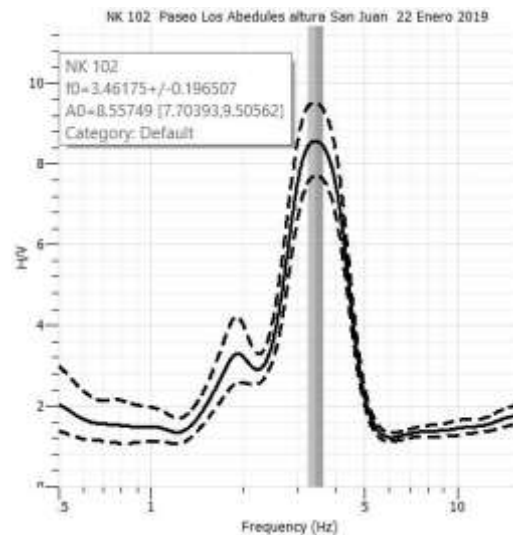
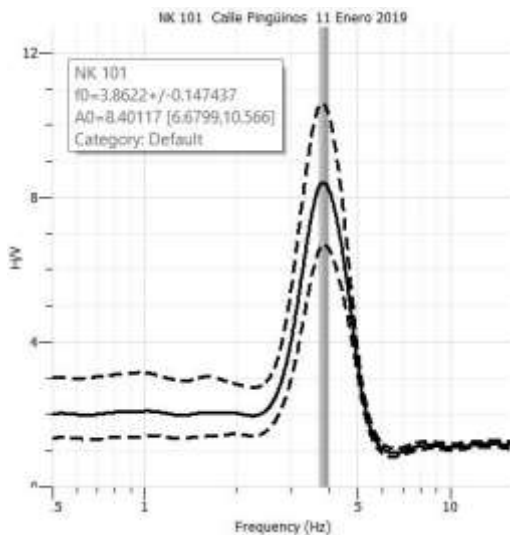
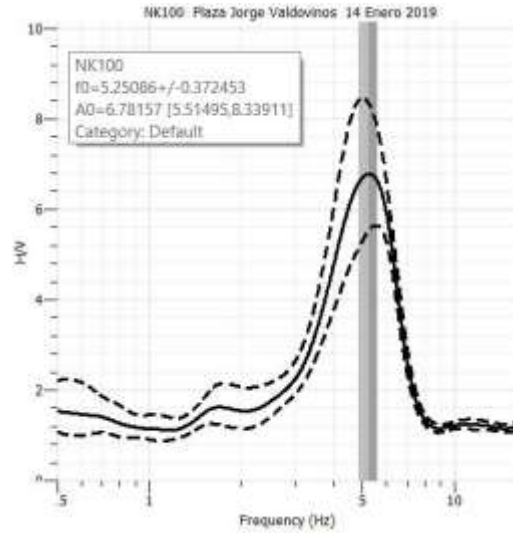
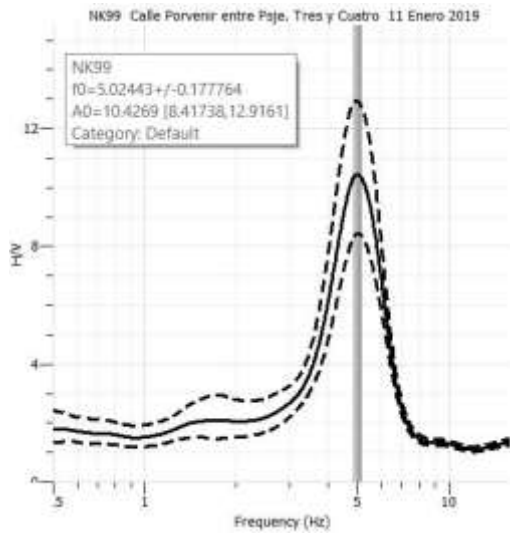


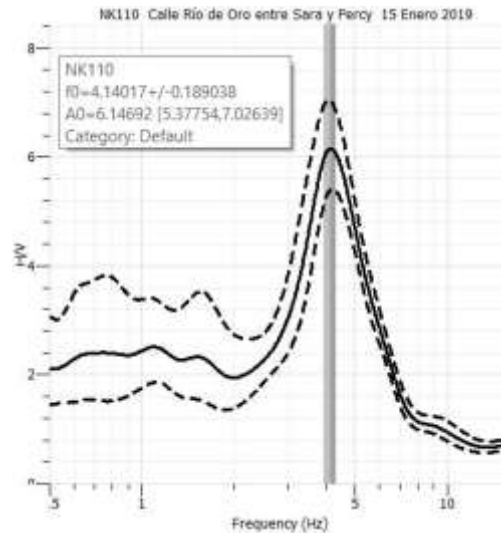
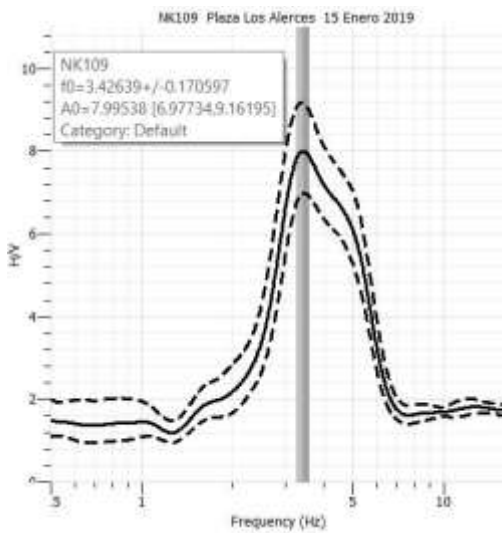
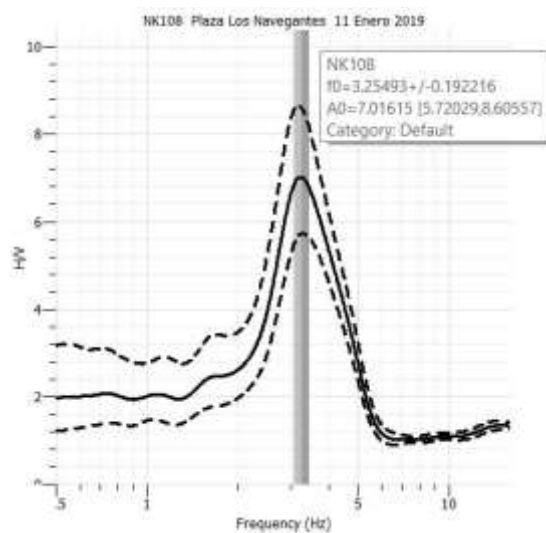
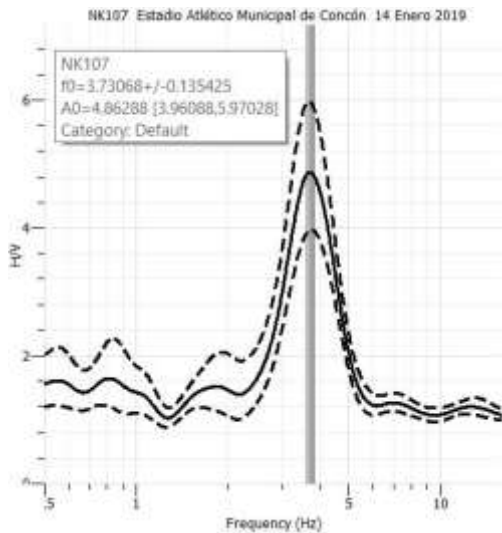
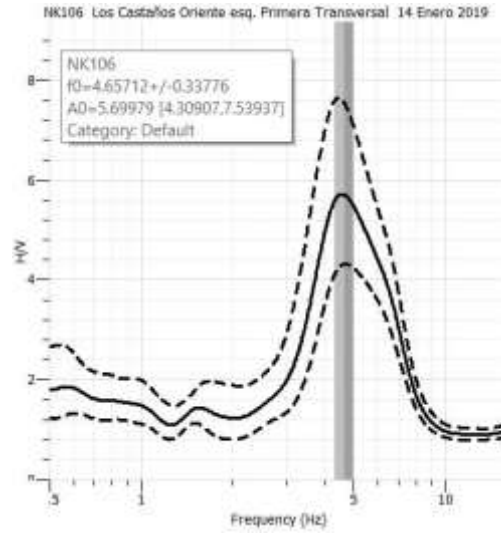
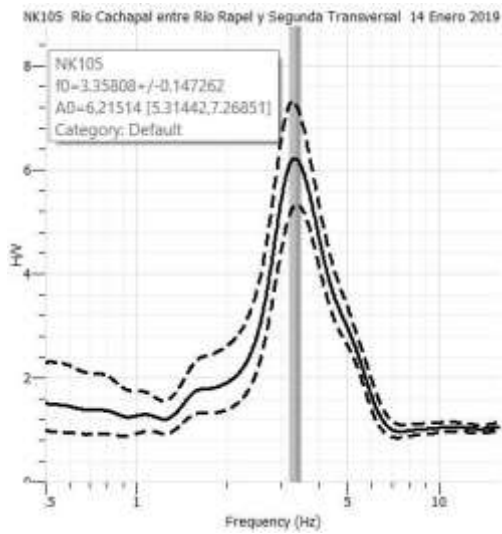




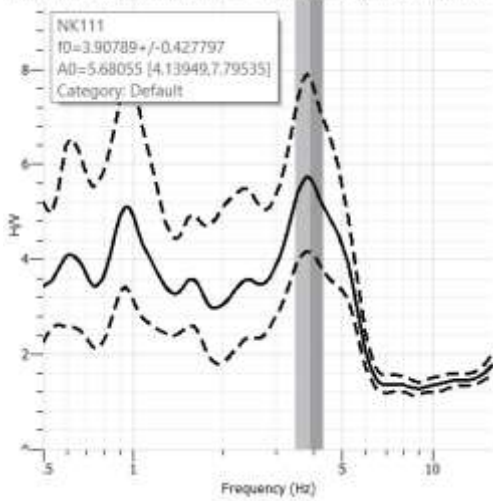




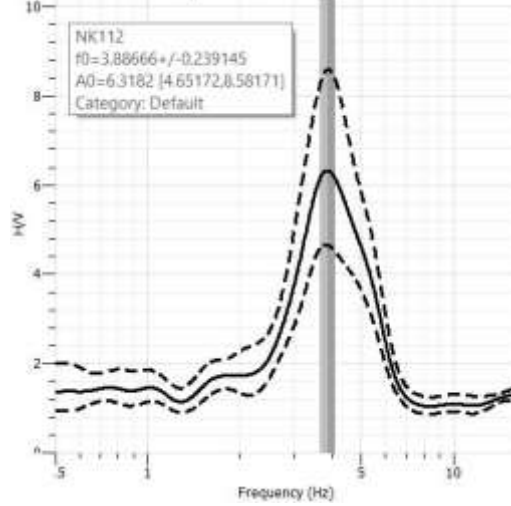




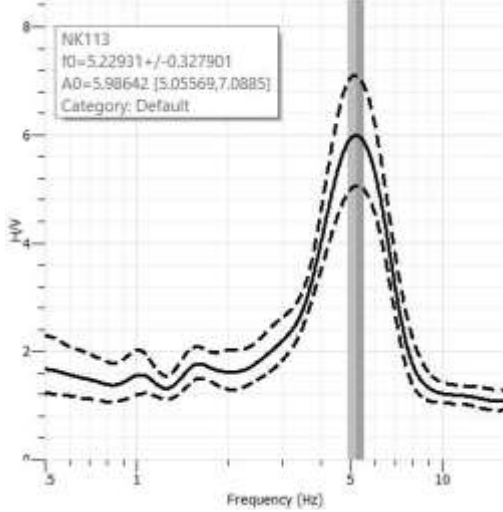
NK111 Plaza en Chaferolito, entre José Yáñez y José Zapola 14 Enero 2019



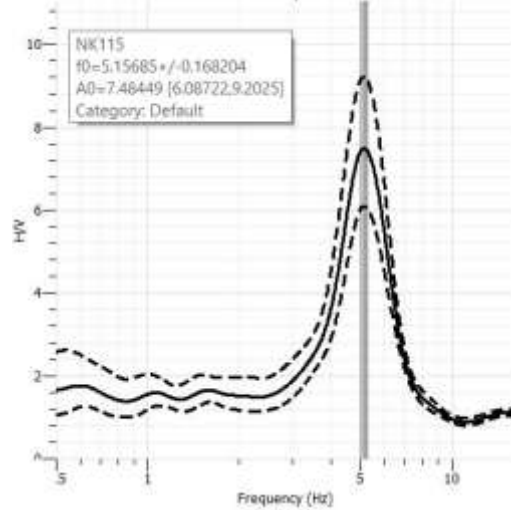
NK112 Esquina Calle 3 con Cortes 15 Enero 2019



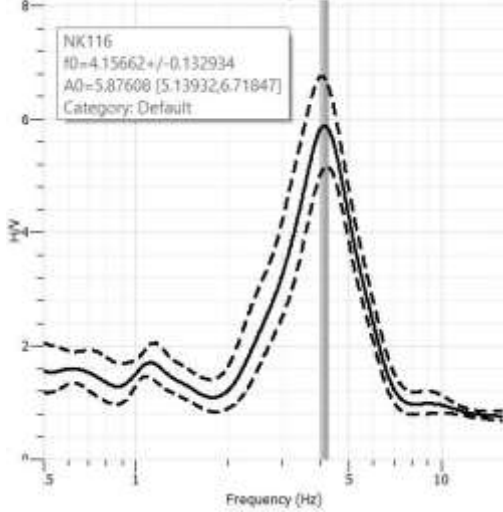
NK113 Sta. Elena con Calle 4 15 Enero 2019



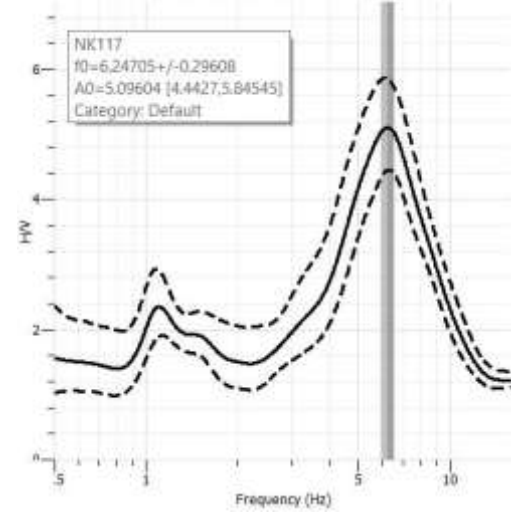
NK115 Plaza Patricio Lynch 15 Enero 2019

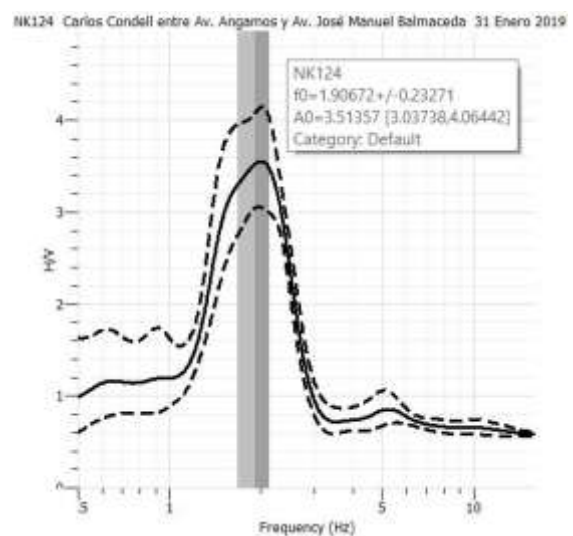
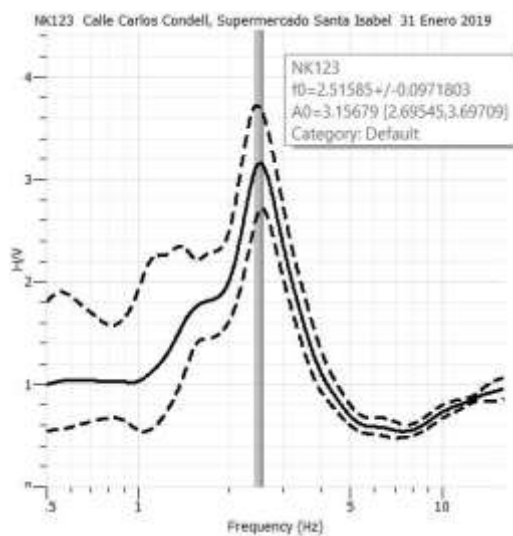
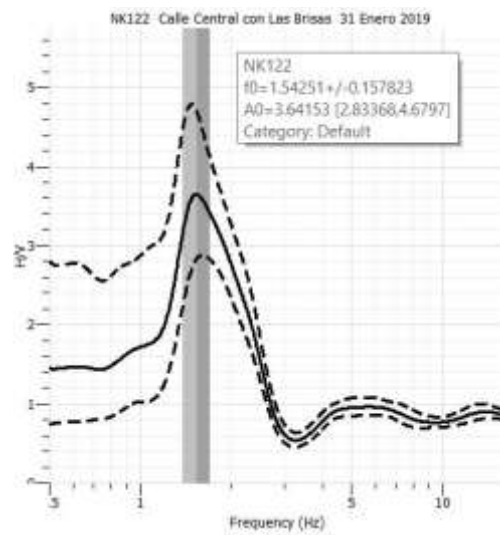
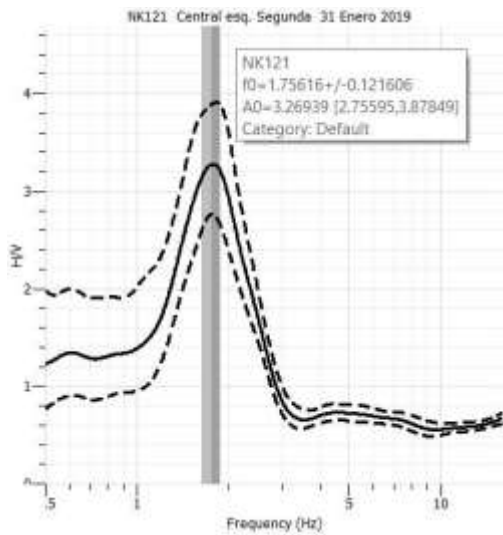
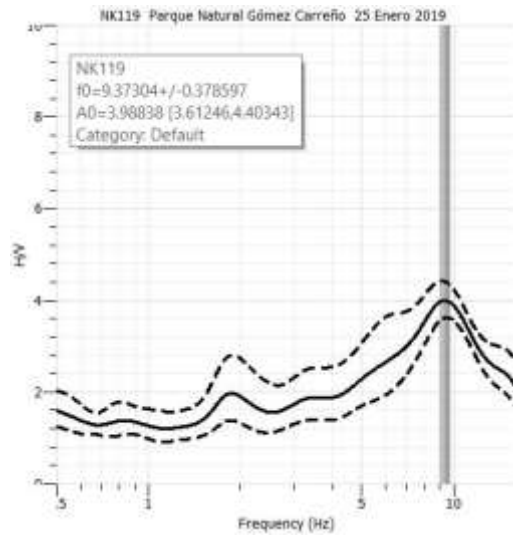
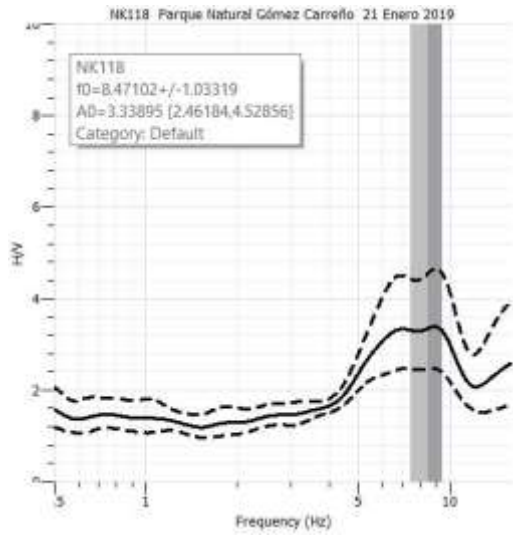


NK116 Los Manantiales con Paseje Dos 15 Enero 2019

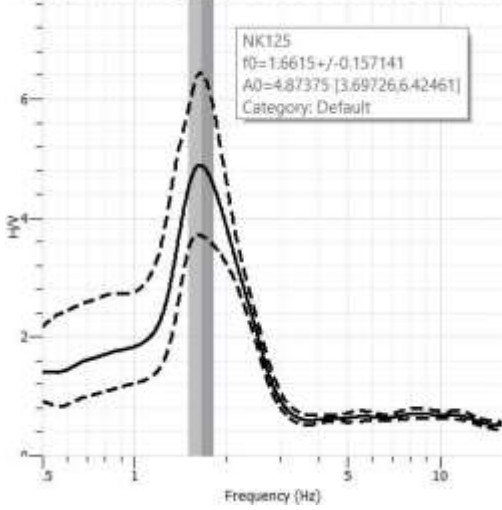


NK117 Plaza Laura Berros 15 Enero 2019

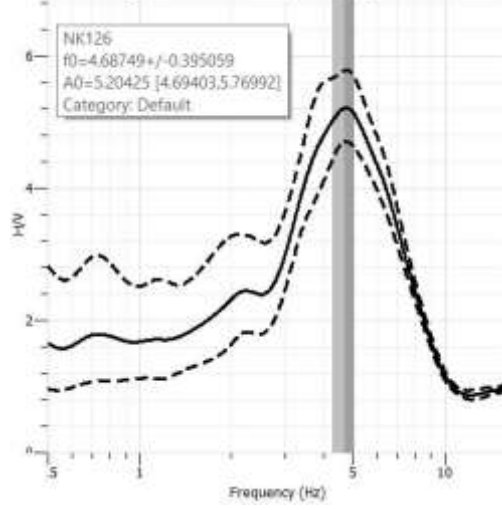




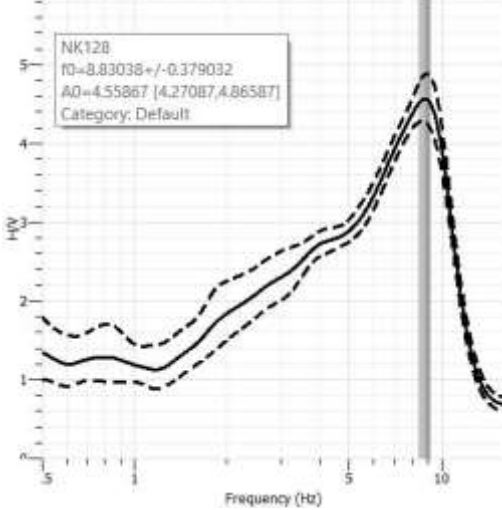
NK125 Lynch entre Av. Angamos y Av. José Manuel Balmaceda 31 Enero 2019



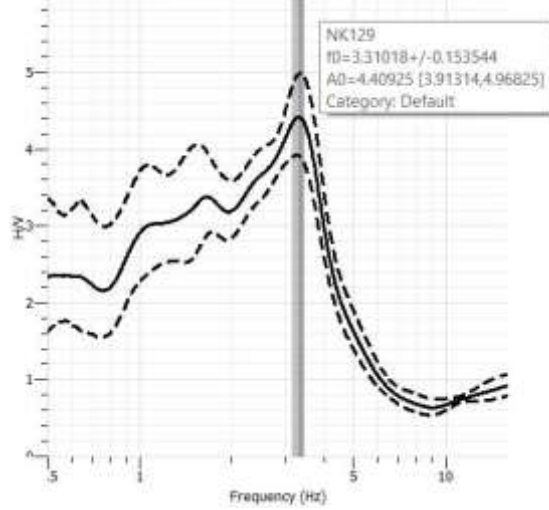
NK126 Calle Angamos entre Torreblanca y General Lagos 30 Enero 2019



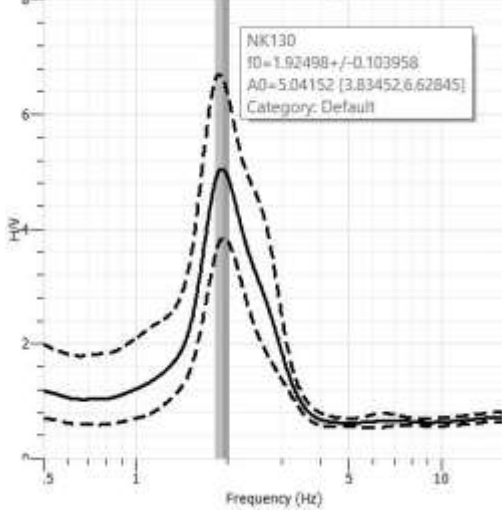
NK128 Esquina Almirante Simpson con General Carrera 31 Enero 2019



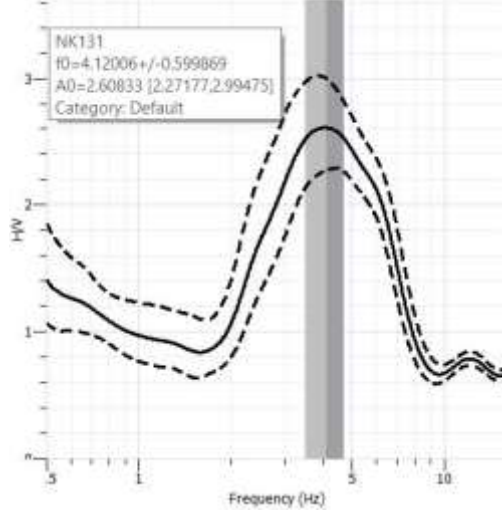
NK129 Calle General Carrera, entrada a The Mackay School 31 Enero 2019



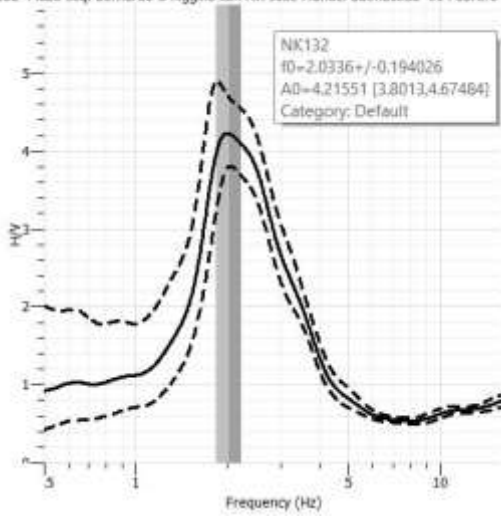
NK130 Vicuña Mackenna, frente a The Mackay School 01 Febrero 2019



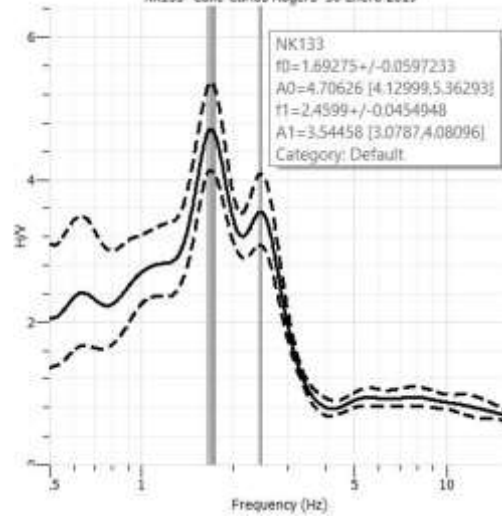
NK131 Vicuña Mackenna #835-880 01 Febrero 2019



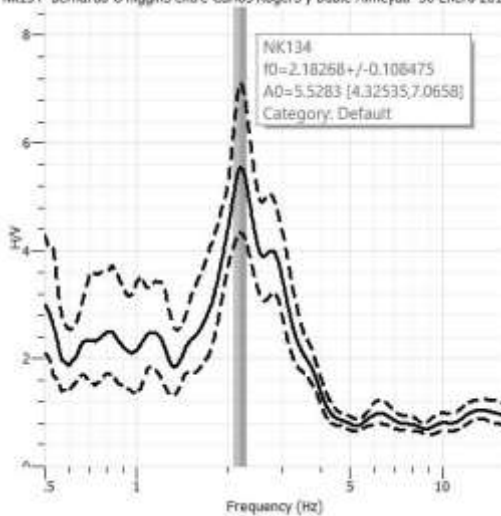
NK132 Plaza esq. Bernardo O'Higgins con Av. José Manuel Balmaceda 01 Febrero 2019



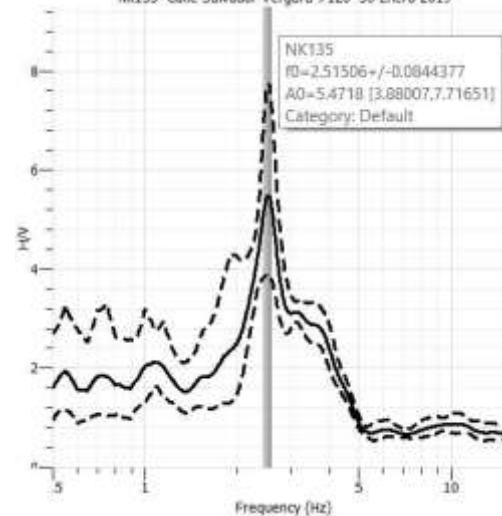
NK133 Calle Carlos Rogers 30 Enero 2019



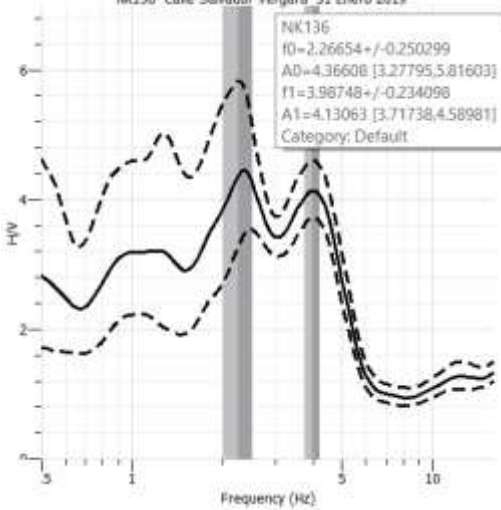
NK134 Bernardo O'Higgins entre Carlos Rogers y Dublé Almeyda 30 Enero 2019



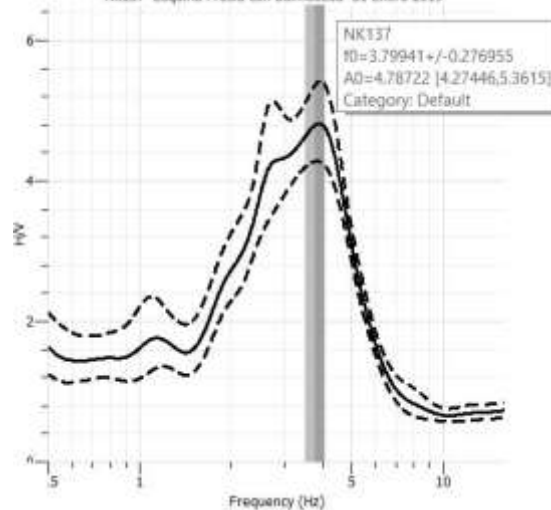
NK135 Calle Salvador Vergara #120 30 Enero 2019

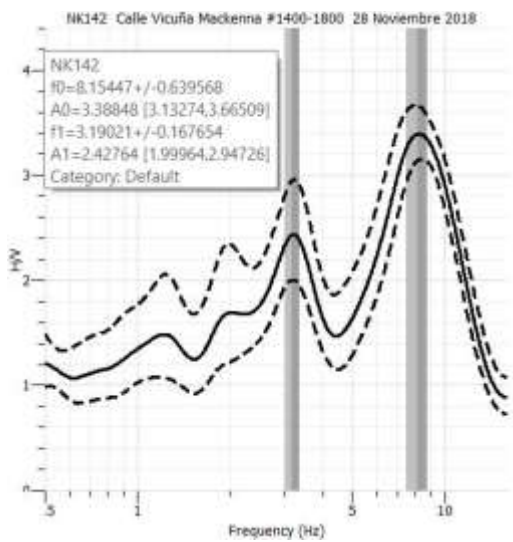
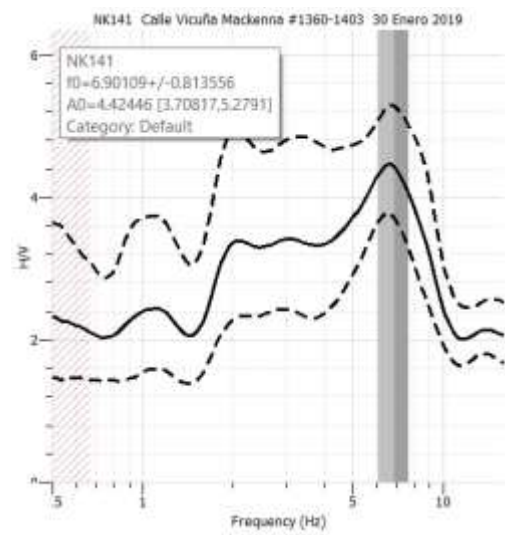
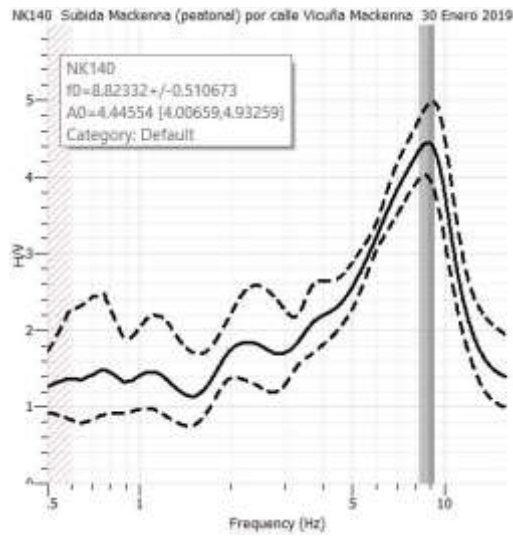
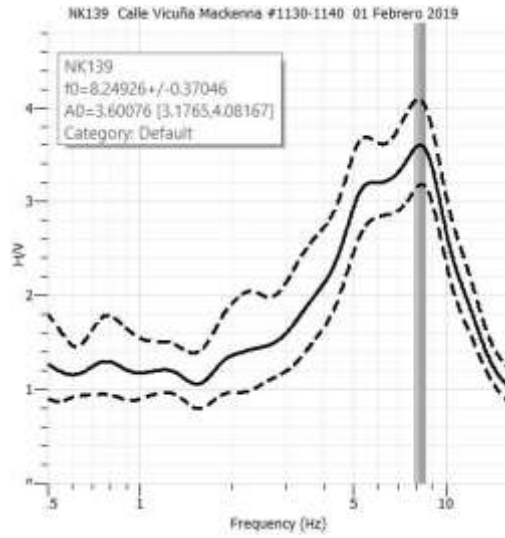
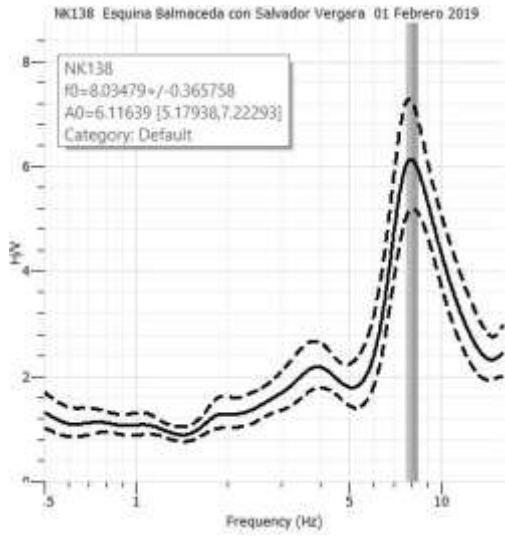


NK136 Calle Salvador Vergara 31 Enero 2019



NK137 Esquina Fresia con Balmaceda 31 Enero 2019





ANEXO C: Proyectos analizados

N° Proyecto	Latitud [°]	Longitud [°]	Vs30 [m/s]	Periodo Tg según mapa de curvas isoperiodos [s]	Clasificación Sísmica M.S. Actual	Clasificación Sísmica M.S. con Propuesta Nueva
1	-32,921783	-71,509494	516	0,12	B	B
2	-32,935841	-71,545562	364	0,25	C	C
3	-32,941990	-71,546027	466	0,17	C	C
4	-32,932977	-71,546752	363	0,25	C	C
5	-32,950946	-71,537493	382	0,25	C	C
6	-32,942619	-71,518584	374	0,34	C	C
7	-32,931708	-71,536398	380	0,21	C	C
8	-32,949437	-71,539011	406	0,20	C	C
9	-32,943471	-71,528639	411	0,23	D	C
10	-32,947954	-71,541867	404	0,21	C	C
11	-32,931056	-71,548536	353	0,20	C	C
12	-32,946562	-71,546436	351	0,22	C	C
13	-32,928234	-71,544521	714	0,25	B	B
14	-32,930539	-71,545592	420	0,25	C	C
15	-32,931313	-71,545635	394	0,24	C	C
16	-32,935508	-71,545103	373	0,22	C	C
17	-32,931575	-71,546947	360	0,24	C	C
18	-32,947915	-71,539353	397	0,18	C	C
19	-32,930584	-71,545112	370	0,20	C	C
20	-32,942336	-71,519656	365	0,30	D	C
21	-32,949447	-71,536712	395	0,26	C	C
22	-32,932572	-71,517807	385	0,24	C	C
23	-32,920565	-71,511768	698	0,13	C	B
24	-32,950105	-71,538955	472	0,22	C	C
25	-32,963908	-71,545661	483	0,46	D	D
26	-32,941828	-71,522005	379	0,25	C	C
27	-32,949838	-71,541012	430	0,23	C	C
28	-32,957354	-71,542532	374	0,54	C	D
29	-32,962864	-71,545578	443	0,45	D	D
30	-32,956579	-71,543814	385	0,45	C	D
31	-32,961748	-71,546369	465	0,38	E	C
32	-32,950110	-71,541811	603	0,25	D	B
33	-32,974072	-71,525596	501	0,12	B	B
34	-32,942499	-71,528525	411	0,23	D	C
35	-32,957055	-71,544791	337	0,44	C	D
36	-32,930636	-71,546557	361	0,23	C	C
37	-32,976662	-71,524621	467	0,20	D	C
38	-32,975728	-71,533313	453	0,14	C	C
39	-32,962257	-71,545261	352	0,38	D	C
40	-32,941897	-71,523076	370	0,24	E	C
41	-32,938176	-71,529611	395	0,28	C	C
42	-32,934987	-71,545013	438	0,22	C	C
43	-32,957791	-71,539646	394	0,47	C	D
44	-32,956984	-71,546083	325	0,39	D	D
45	-32,935153	-71,545724	351	0,25	C	C
46	-32,960691	-71,546007	272	0,41	C	D
47	-32,983444	-71,528997	477	0,11	C	C
48	-32,955814	-71,544659	408	0,40	C	D
49	-32,949696	-71,543093	434	0,25	B	C
50	-32,933851	-71,542318	438	0,19	C	C

N° Proyecto	Latitud [°]	Longitud [°]	Vs30 [m/s]	Periodo Tg según mapa de curvas isoperiodos [s]	Clasificación Sísmica M.S. Actual	Clasificación Sísmica M.S. con Propuesta Nueva
51	-32,957389	-71,546993	363	0,35	D	C
52	-32,949376	-71,539769	421	0,20	C	C
53	-32,956711	-71,539540	481	0,48	C	D
54	-32,932733	-71,548082	340	0,21	C	D
55	-32,948622	-71,540506	406	0,19	C	C
56	-32,975296	-71,531525	547	0,10	C	B
57	-32,928548	-71,545492	815	0,24	B	B
58	-32,950718	-71,539850	406	0,25	C	C
59	-32,940686	-71,518732	365	0,29	C	C
60	-32,948427	-71,539431	430	0,18	C	C
61	-32,932074	-71,546373	293	0,24	D	D
62	-32,942716	-71,530734	378	0,24	C	C
63	-32,972024	-71,541209	170	0,60	E	E
64	-32,931330	-71,537274	468	0,21	D	C
65	-32,937684	-71,542694	474	0,19	C	C
66	-32,944064	-71,530616	388	0,26	D	C
67	-32,950863	-71,542375	391	0,27	C	C
68	-32,948499	-71,541962	388	0,22	C	C
69	-32,949896	-71,540201	435	0,22	C	C
70	-32,942246	-71,533075	447	0,24	C	C
71	-32,954180	-71,542238	418	0,39	D	C
72	-32,952422	-71,543750	318	0,32	D	D
73	-32,939671	-71,536686	447	0,22	C	C
74	-32,924185	-71,511678	468	0,17	C	C
75	-32,960119	-71,545756	269	0,43	D	D
76	-32,951952	-71,541233	395	0,30	C	C
77	-32,970356	-71,539449	380	0,35	C	C
78	-32,972163	-71,542796	238	0,52	D	D
79	-32,967690	-71,544144	427	0,58	D	D
80	-32,964755	-71,521266	371	0,47	C	D
81	-32,960537	-71,540313	384	0,70	C	D
82	-32,959207	-71,539654	481	0,60	D	D
83	-32,960153	-71,544109	391	0,57	C	D
84	-32,959415	-71,543168	391	0,62	C	D
85	-32,960189	-71,543233	391	0,65	C	D
86	-32,958495	-71,546682	363	0,38	D	C
87	-32,957172	-71,546591	325	0,36	D	D
88	-32,956461	-71,544774	395	0,43	C	D
89	-32,949323	-71,541500	404	0,23	C	C
90	-32,920852	-71,514984	698	0,17	C	B
91	-32,920624	-71,515148	532	0,17	C	B