



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

**COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE PERFILES DE SUELO DE ESPESOR MENOR A  
30 METROS Y PERFILES CON INCLUSIONES DE ALTA O BAJA VELOCIDAD**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

GUILLERMO ANDRÉS GONZÁLEZ CASTILLO

PROFESOR GUÍA:

CÉSAR PASTÉN PUCHI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

SERGIO RUIZ TAPIA

MIGUEL SÁEZ ARIAS

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil con mención en  
Estructuras, Construcción y Geotecnia  
**POR:** Guillermo Andrés González Castillo  
**FECHA:** 01/04/2019  
**PROFESOR GUÍA:** César Pastén Puchi

## **COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE PERFILES DE SUELO DE ESPESOR MENOR A 30 METROS Y PERFILES CON INCLUSIONES DE ALTA O BAJA VELOCIDAD**

Este trabajo de título tiene por objetivo estudiar el comportamiento sísmico de perfiles de suelos de espesores menores a 30 metros y perfiles que poseen una inclusión de alta o baja velocidad de onda de corte. Para ello, se analizaron 19 estaciones sismológicas de la red japonesa KiK-net, de las cuales 4 poseen una inclusión de alta o baja velocidad, 11 tienen espesores menores a 30 metros y 4 cumplen con ambas características. Además, se consideró dentro del estudio la estación de Lolloo, estudiada por Sáez et al. (2018). Estas estaciones se caracterizan por tener un perfil de velocidades conocido a partir de ensayos downhole y por tener un acelerómetro en superficie y otro más profundo que en basamento rocoso. En cada una de estas estaciones, se obtuvieron razones espectrales a partir de registros sísmicos, calculadas como la razón entre las componentes horizontales en superficie y las horizontales en la base ( $H_s/H_B$ ) y razones espectrales entre las componentes horizontales y la vertical en superficie ( $H_s/V_s$ ). Estas razones espectrales fueron comparadas con la función de transferencia teórica obtenida mediante la teoría unidimensional de propagación de ondas de corte SH, concluyendo que las frecuencias predominantes obtenidas a partir de  $H_s/H_B$  y  $H_s/V_s$  difieren de la obtenida teóricamente. Al evaluar el coeficiente de correlación  $r$  de Pearson, se concluye que las diferencias en forma entre la función de transferencia teórica y las razones espectrales son mayores en los depósitos que poseen una inclusión de velocidad. Por otro lado, las frecuencias predominantes obtenidas con las razones espectrales  $H_s/H_B$  y  $H_s/V_s$  coinciden en 13 de las 19 estaciones analizadas, a pesar de que el sensor en la base no se encuentra exactamente en la interfaz entre el suelo y la roca. En los depósitos donde se presentan similitudes entre las razones espectrales  $H_B/V_B$  y  $H_s/V_s$ , se encontró un patrón que consiste en tener un estrato de suelo rígido, seguido de uno flexible – el cual coincide con la profundidad que requiere tener el depósito para que la frecuencia predominante coincida con la teórica – y bajo este un estrato de suelo más rígido, siendo más común este patrón en los perfiles de suelo con inclusión de alta velocidad. Por otro lado, se evaluó la clasificación sísmica que utiliza la norma NCh433 y se comparó con la propuesta por Idini et al. (2016), observándose que depósitos de suelo que tienen la misma clasificación según la norma NCh433, presentan clasificaciones distintas según la propuesta de Idini et al. (2016).

*“Sigue tu pasión y la vida te premiará”*

*Tío Iroh, Avatar The Last Airbender*

*A mi madre y abuela, ejemplos de esfuerzo*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo a mi familia. A mi madre Alejandra, quien siempre ha hecho lo posible por ayudarme a salir adelante. A mi abuela María Susana, quien me crió y ha preparado los mejores platos que he comido en la vida. A mis hermanas y a mi hermano, quienes me han entregado todo su apoyo y consejos para salir adelante con la carrera.

Quiero agradecer a mis compañeros de civil: Zárate, compañeros de plan común, estudiando los primeros dos años juntos hasta que te fuiste a Francia y luego volviste en forma de ficha; Matías, compañeros de sección y luego de civils, hasta que decidiste irte a hidráulica; Gato, a quien hice enojar en la práctica de topo, pero ahora se recuerda con risas aquella anécdota; Consu, compañera de todos los trabajos geotécnicos y la más apañadora en los últimos años de la carrera, tanto en el estudio como en la pasta; Monse, a quien también hice enojar en la práctica de topo y cuyos resúmenes siempre fueron una bendición; a Cata, con quien pasamos de largo para aquel recordado examen de fluidos. A Diego, cuya anécdota del teléfono en Valdivia no se olvidará jamás; al Lucho, quien siempre tuvo disposición a ayudarme con Matlab, pero nunca para enseñar cómo lo hacía para hacer trampa en los juegos de cartas; y a Meili, cuyo cuaderno tan ordenado me salvó más de una vez al momento de preparar mis clases.

Gracias a la geopecera, por hacer de mi último semestre en la u uno muy entretenido y agradable, donde hubo hartas risas, discusiones y pena (Aguante Toyoura-San!).

Quiero agradecer a mi profesor guía César Pastén, quien me mostró y enseñó esta hermosa área de la ingeniería civil. Gracias por la guía realizada a lo largo de este trabajo de título, por los consejos tanto académicos como de vida que me dio a lo largo de los años en que nos reunimos, desde aquel trabajo dirigido que se hizo hace unos años atrás.

Agradezco a los miembros de mi comisión Sergio Ruiz y Miguel Sáez, quienes siempre estuvieron dispuestos a ayudar, revisar y proponer mejoras en este trabajo. A Sergio por mostrarme que la sismología es un área interesante y que requiere ser estudiada cada vez más, y a Miguel por la disposición y buena onda, y por explicar con peras y manzanas cada una de las ideas que permitieron hacer de este trabajo uno mejor.

Agradecimiento especial a Javier Ojeda del departamento de geofísica, quien me facilitó algunos códigos que me permitieron agilizar este proceso.

Por último, agradecer a todas esas personas de otros departamentos (en especial de eléctrica) u otras carreras que me han brindado su apoyo a lo largo de estos largos y a la vez cortos años de carrera, estudio y esfuerzo.

# Tabla de Contenido

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos .....	2
1.1.1 Objetivo General.....	2
1.1.2 Objetivos Específicos.....	2
1.2 Estructura del Trabajo.....	2
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Modelo Unidimensional de Propagación de Ondas de Corte SH.....	3
2.2 Espectro de Respuesta de Aceleración.....	5
2.3 Método de Razones Espectrales HVSR o $H_S/V_S$ de Registros Sísmicos.....	5
2.4 Método de Razones Espectrales HHSR o $H_S/H_B$ de Registros Sísmicos .....	6
2.5 Razón espectral VVSR o $V_S/V_B$ de Registros Sísmicos .....	7
2.6 Técnicas de Estimación del Efecto de Sitio .....	7
2.7 Problemas con depósitos de suelos singulares.....	20
2.8 Norma Chilena NCh433 .....	24
2.9 Propuesta de Clasificación de Idini et al. (2016) .....	25
2.10 Propuesta de Clasificación de Verdugo et al. (2018) .....	26
2.11 Red Sismológica Japonesa KiK-net .....	26
2.12 Relación Entre Longitud de Onda, Frecuencia y Velocidad de Onda de Corte .....	28
<b>CAPÍTULO 3. PROCESAMIENTO DE REGISTROS SÍSMICOS .....</b>	<b>30</b>
3.1 Estaciones Sismológicas Japonesas.....	30
3.2 Estación de Lollole.....	32
3.3 Eventos Sísmicos Considerados.....	34
3.4 Cálculo de las Razones Espectrales $H_S/V_S$ y $H_S/H_S$ .....	35
3.5 Determinación de la Función de Transferencia Teórica .....	36
3.6 Variación de la Frecuencia Fundamental en Profundidad .....	37
3.7 Desarrollo de la Longitud de Onda en los Perfiles .....	37
3.8 Dispersión de la Frecuencia y su Relación con la Amplitud .....	38
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
4.1 Resultados de Razones Espectrales $H_S/H_B$ , $H_S/V_S$ y FT Teórica.....	40
4.2 Resultados de la Razón Espectrales $V_S/V_B$ .....	50
4.3 Resultados de razones espectrales $H_B/V_B$ .....	55

4.4 Resultados de razones espectrales HVSR/HHSR .....	60
4.5 Resultados Variación de la frecuencia fundamental en profundidad y Desarrollo de la Longitud de Onda .....	65
<b>CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>76</b>
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>87</b>
6.1 Conclusiones .....	87
6.2 Recomendaciones .....	88
<b>CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXO A.</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO B</b>	<b>102</b>

## Índice de Tablas

Tabla 2.1: Estación japonesa donde se observa el problema de la actual clasificación sísmica.	23
Tabla 2.2: Clasificación sísmica de suelos según norma NCh433 Of1996 Mod.09 considerando modificaciones del Decreto Supremo 61 (DS61, 2011).	24
Tabla 2.3: Clasificación sísmica de suelos en función del periodo predominante de vibración de HVRSR (Idini et al., 2016).	26
Tabla 2.4: Clasificación sísmica de suelos en función del $V_{s30-E}$ y el periodo predominante $H_s/V_s$ (Verdugo, 2018).	26
Tabla 3.1: Estaciones sismológicas utilizadas en el estudio.	31
Tabla 3.2: Frecuencia predominante, mínima (80% de la frecuencia predominante) y máxima (120% de la frecuencia predominante) utilizadas para el cálculo de la longitud de onda.	38
Tabla 5.1: Resumen de características de los perfiles asociados a las estaciones ABSH09 hasta IWTH04.	78
Tabla 5.2: Resumen de características de los perfiles asociados a las estaciones IWTH14 hasta SOYH09, incluyendo Lollole.	78
Tabla A: Sismos utilizados en el presente estudio	95

## Índice de Figuras

Figura 2.1: Modelo multicapas de un depósito de suelo.....	4
Figura 2.2: Función de transferencia teórica de un depósito de suelo de 50 (m) de profundidad, con una velocidad de onda de corte de 550 (m/s), densidad de 2000 (kg/m <sup>3</sup> ) y amortiguamiento del 2% obtenida mediante el modelo unidimensional de propagación de ondas de corte SH. El primer peak - cercano a los 2.8 (Hz) - corresponde a la frecuencia fundamental de vibración del depósito de suelo.....	5
Figura 2.3: Caso general para el estudio del efecto de sitio. $A_S(H_S, V_S)$ : Espectro de amplitud definido por las componentes horizontales (H) y vertical (V) del registro. $A_S$ : Sobre la superficie; $A_B$ : en el basamento rocoso; $A_R$ : Cerca del afloramiento rocoso. El símbolo “?” indica la incertidumbre de los efectos de trayectoria entre el sedimento y el sitio de referencia. (Rodríguez & Midorikawa, 2003).....	8
Figura 2.4: a) Ubicación de la ciudad de Yokohama, junto a la red sismológica de la zona, estaciones con un arreglo vertical de acelerómetros – utilizadas en el estudio – y epicentro de los eventos considerados en los estudios asociados a esta zona. b) Perfiles de suelo y modelo de velocidades de ondas de corte S de nueve sitios con arreglo vertical considerados en los estudios de la ciudad de Yokohama, junto al código de cada estación. (1) Relleno, (2) Limo, (3) Arena, (4) Arcilla, (5) Arena Gruesa, (6) Marga, (7) Roca Suave, (8) Piedra Barro, (9) Perfil Velocidad Onda de Corte, (10) Acelerómetro. (Rodríguez & Midorikawa, 2003). ....	9
Figura 2.5: a) Razones espectrales dependientes de un sitio de referencia. $H_S/H_B$ : Razón espectral entre el registro en superficie y en profundidad. $H_S/H_R$ : Razón espectral entre la superficie y un sitio de referencia. SH: Función de transferencia teórica considerando modelo unidimensional de propagación de ondas de corte SH. b) Resultados obtenidos de la aplicación de razones espectrales entre la componente sísmica horizontal y vertical en superficie utilizando registros sísmicos ( $H/V_S$ ), utilizando la coda del registro ( $H/V_C$ ) y mediante microvibraciones ( $H/V_M$ ) (Rodríguez & Midorikawa, 2003).....	10
Figura 2.6: Relación entre los periodos predominantes obtenidos en cada estación, según cada método. a) Gráfico del periodo predominante obtenido mediante microvibraciones ( $T_{H/V_M}$ ) v/s el obtenido mediante la razón espectral entre la superficie y un sitio de referencia ( $T_{H_S/H_R}$ ). b) Periodo predominante obtenido mediante el uso de la coda del registro ( $T_{H/V_C}$ ) v/s $T_{H_S/H_R}$ . c) Periodo predominante obtenido en superficie ( $T_{H/V_S}$ ) v/s $T_{H_S/H_R}$ (Rodríguez & Midorikawa, 2003). ....	11
Figura 2.7: a) Perfil de velocidades de la estación El Centro-Meloland. b) Función de transferencia empírica (línea negra) para la estación El Centro-Meloland y San Bernardino. Las líneas roja, azul y verde corresponden a funciones de transferencia teóricas considerando distintos modelos de curvas de amortiguamiento (Afshari & Stewart, 2015). ....	12
Figura 2.8: Perfil de velocidades de onda de corte las estaciones BRI (a-k) y K-NET (l-m). (Satoh et al., 2001). ....	13
Figura 2.9: Mapa de las estaciones utilizadas el estudio de Satoh et al. (2001). Los triángulos corresponden a diez de las once estaciones de BRI, los dos cuadrados a la red K-NET y los siete círculos a las estaciones SHIMZ (Satoh et al., 2001).....	14

Figura 2.10: Razones espectrales a) $H_S/V_S$ de las estaciones BRI b) $H_S/H_B$ de las estaciones BRI. Se grafican los siguientes casos: Registros completo desde la llegada de la onda S (S-wave) y considerando diez segundos a partir de la llegada de la onda S (10 sec after S-wave). Adicionalmente, para $H_S/V_S$ se adjunta el espectro obtenido mediante microvibraciones (microtremor) (Sato et al., 2001). .....	15
Figura 2.11: Resumen de frecuencias obtenidas en el estudio realizado por Sato et al. (2001). Los círculos en los gráficos $H_S/H_B$ v/s $H_S/V_S$ mediante microvibraciones y $H_S/H_B$ v/s $H_S/V_S$ utilizando ventana completa de la onda S representan a las estaciones BRI, mientras que las "x" representan las estaciones de la red K-NET y SHMZ. ....	16
Figura 2.12: a) Perfil de velocidades de las 14 estaciones utilizadas en el estudio. b) Gráfico de periodo obtenido mediante microvibraciones v/s periodo fundamental obtenido de la función de transferencia de ondas SH. (Konno & Ohmachi, 1998). .....	17
Figura 2.13: a) Comparación entre la frecuencia predominante obtenida mediante el método de Nakamura y la frecuencia fundamental utilizando la función de transferencia de una onda SH (Bard, 1995). b) Comparación entre el periodo predominante utilizando registros sísmicos y el método de Nakamura (Verdugo, 2018). .....	18
Figura 2.14: a) Perfil de velocidades normalmente dispersivo. b) Perfil de velocidades con HLV. c) Perfil de velocidades con LVL (Shen et al., 2016). .....	21
Figura 2.15: a) Perfil de velocidad del suelo estudiado en Lolloo. b) Función de transferencia empírica y teórica obtenida por Sáez et al. (2018). .....	22
Figura 2.16: Metodología utilizada para determinar inclusión de velocidad. ....	23
Figura 2.17: Funciones de transferencia de dos perfiles de suelo con idéntico $V_{S30}$ , pero con diferente orden estratigráfico (Verdugo, 2018). .....	25
Figura 2.18: Estaciones sismológicas de la red KiK-net. ....	27
Figura 2.19: Desplazamiento de partículas $u$ en función del (a) tiempo y (b) posición. ....	29
Figura 3.1: Ubicación de las estaciones sismológicas japonesas de la red KiK-NET utilizadas en el presente estudio. ....	32
Figura 3.2: a) Distribución de magnitudes de distintos terremotos ocurridos en Valparaíso, Chile. b) Ubicación de la estación de Lolloo (Sáez et al., 2018). .....	33
Figura 3.3: Propiedades geotécnicas del sitio en Lolloo (Verdugo, 2009). ....	34
Figura 3.4: Distribución en profundidad de los eventos sísmicos utilizados en el estudio. ....	35
Figura 3.5: Representación de la variación del sitio de referencia para la obtención de la función de transferencia teórica en profundidad. S representa el sensor en superficie, mientras que B el sensor en profundidad. R representa el lugar de referencia, el cual fue ubicado cada 2 metros en los primeros 10 metros de profundidad, para luego ir ubicándolo cada 10 metros, hasta llegar a la ubicación del sensor en profundidad B. ....	37
Figura 3.6: Metodología aplicada para el análisis de la dispersión de la frecuencia. a) Gráfico de la razón espectral v/s la frecuencia, obteniéndose una amplitud promedio $A$ y una frecuencia	

predominante promedio  $f_0$ . b) Obtención de la desviación estándar  $\sigma$  de la frecuencia predominante. c) Gráfico de la desviación estándar v/s amplitud espectral promedio..... 39

Figura 4.1: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus la frecuencia predominante  $H_S/H_B$  en estación ABSH09. .... 40

Figura 4.2: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus la frecuencia predominante  $H_S/H_B$  en estación ABSH14. .... 41

Figura 4.3: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus la frecuencia predominante  $H_S/H_B$  en estación FKSH05. .... 41

Figura 4.4: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus la frecuencia predominante  $H_S/H_B$  en estación FKSH07. .... 42

Figura 4.5: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus la frecuencia predominante  $H_S/H_B$  en estación FKSH09. .... 42

Figura 4.6: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus la frecuencia predominante  $H_S/H_B$  en estación FKSH17. .... 43

Figura 4.7: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus la frecuencia predominante  $H_S/H_B$  en estación FKSH19. .... 43

Figura 4.8: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus la frecuencia predominante  $H_S/H_B$  en estación GIFH21. .... 44

Figura 4.9: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus la frecuencia predominante  $H_S/H_B$  en estación IBRH15. .... 44

Figura 4.10: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus la frecuencia predominante  $H_S/H_B$  en estación IWTH01. .... 45

Figura 4.11: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus la frecuencia predominante  $H_S/H_B$  en estación IWTH04. .... 45

Figura 4.12: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus la frecuencia predominante  $H_S/H_B$  en estación IWTH14. .... 46

Figura 4.13: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales $H_S/V_S$ y $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante $H_S/V_S$ versus la frecuencia predominante $H_S/H_B$ en estación IWTH22. .....	46
Figura 4.14: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales $H_S/V_S$ y $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante $H_S/V_S$ versus la frecuencia predominante $H_S/H_B$ en estación IWTH23. .....	47
Figura 4.15: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales $H_S/V_S$ y $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante $H_S/V_S$ versus la frecuencia predominante $H_S/H_B$ en estación MIEH03. .....	47
Figura 4.16: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales $H_S/V_S$ y $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante $H_S/V_S$ versus la frecuencia predominante $H_S/H_B$ en estación NARH03. .....	48
Figura 4.17: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales $H_S/V_S$ y $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante $H_S/V_S$ versus la frecuencia predominante $H_S/H_B$ en estación NGNH18. .....	48
Figura 4.18: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales $H_S/V_S$ y $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante $H_S/V_S$ versus la frecuencia predominante $H_S/H_B$ en estación NGNH35. .....	49
Figura 4.19: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales $H_S/V_S$ y $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante $H_S/V_S$ versus la frecuencia predominante $H_S/H_B$ en estación SOYH09. .....	49
Figura 4.20: Razones espectrales $V_S/V_B$ en función de la frecuencia $f$ en las estaciones ABSH09, ABSH14, FKSH05 y FKSH07. ....	50
Figura 4.21: Razones espectrales $V_S/V_B$ en función de la frecuencia $f$ en las estaciones FKSH09, FKSH17, FKSH19 y GIFH21. ....	51
Figura 4.22: Razones espectrales $V_S/V_B$ en función de la frecuencia $f$ en las estaciones IBRH15, IWTH01, IWTH04 y IWTH14. ....	52
Figura 4.23: Razones espectrales $V_S/V_B$ en función de la frecuencia $f$ en las estaciones IWTH22, IWTH23, MIEH03 y NARH03. ....	53
Figura 4.24: Razones espectrales $V_S/V_B$ en función de la frecuencia $f$ en las estaciones NGNH18, NGNH35 y SOYH09. ....	54
Figura 4.25: Razones espectrales $H_B/V_B$ en función de la frecuencia $f$ en las estaciones ABSH09, ABSH14, FKSH05 y FKSH07. ....	55
Figura 4.26: Razones espectrales $H_B/V_B$ en función de la frecuencia $f$ en las estaciones FKSH09, FKSH17, FKSH19 y GIFH21. ....	56
Figura 4.27: Razones espectrales $H_B/V_B$ en función de la frecuencia $f$ en las estaciones IBRH15, IWTH01, IWTH04 y IWTH14. ....	57

Figura 4.28: Razones espectrales $H_B/V_B$ en función de la frecuencia $f$ en las estaciones IWTH22, IWTH23, MIEH03 y NARH03. ....	58
Figura 4.29: Razones espectrales $H_B/V_B$ en función de la frecuencia $f$ en las estaciones NGHN18, NGNH35 y SOYH09. ....	59
Figura 4.30: Cociente de las Razones espectrales HVSR/HHSR en función de la frecuencia $f$ de las estaciones ABSH09, ABSH14, FKSH05 y FKSH07. ....	60
Figura 4.31: Cociente de las Razones espectrales HVSR/HHSR en función de la frecuencia $f$ de las estaciones FKSH09, FKSH17, FKSH19 y GIFH21. ....	61
Figura 4.32: Cociente de las Razones espectrales HVSR/HHSR en función de la frecuencia $f$ de las estaciones IBRH15, IWTH01, IWTH04 y IWTH14. ....	62
Figura 4.33: Cociente de las Razones espectrales HVSR/HHSR en función de la frecuencia $f$ de las estaciones IWTH22, IWTH23, MIEH03 y NARH03. ....	63
Figura 4.34: Cociente de las Razones espectrales HVSR/HHSR en función de la frecuencia $f$ de las estaciones NGNH18, NGNH35 y SOYH09. ....	64
Figura 4.35: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación ABSH09. ....	66
Figura 4.36: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación ABSH14. ....	66
Figura 4.37: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación FHSK05. ....	67
Figura 4.38: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación FKSH07. ....	67
Figura 4.39: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación FKSH09. ....	68
Figura 4.40: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación FKSH17. ....	68
Figura 4.41: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación FKSH19. ....	69
Figura 4.42: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación GIFH21. ....	69

Figura 4.43: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación IBRH15. ....	70
Figura 4.44: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación IWTH01.....	70
Figura 4.45: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación IWTH04.....	71
Figura 4.46: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación IWTH14.....	71
Figura 4.47: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación IWTH22.....	72
Figura 4.48: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación IWTH23.....	72
Figura 4.49: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación MIEH03.....	73
Figura 4.50: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación NARH03.....	73
Figura 4.51: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación NGNH18. ....	74
Figura 4.52: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación NGNH35. ....	74
Figura 4.53: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación SOYH09.....	75
Figura 4.54: Velocidad de onda de corte $V_s$ [m/s]; Frecuencia fundamental $f_0$ junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato $(\lambda/H)_i$ junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación Llolleo. ....	75
Figura 5.1: a) Metodología aplicada para determinar el estrato predominante.....	77
Figura 5.2: Gráfico de la frecuencia fundamental considerando el depósito completo entre los dos sensores vs la frecuencia fundamental considerando solo el depósito de suelo. ....	79

Figura 5.3: Gráfico de coeficiente de correlación de Pearson para las funciones de transferencia teóricas y empíricas, considerando función empírica obtenida con cociente espectral $H_S/H_B$ y $H_S/V_S$ . La línea negra representa el umbral de buena correlación propuesto por Thompson et al. (2012). .....	81
Figura 5.4: Gráfico de la frecuencia fundamental obtenida mediante la teoría unidimensional de propagación de ondas de corte SH considerando el depósito entre los dos sensores versus las frecuencias predominantes obtenidas mediante las razones espectrales $H_S/H_B$ y $H_S/V_S$ .....	81
Figura 5.5: FT teóricas para ondas P, SV y SH para a) Lolloo b) SOYH09. ....	82
Figura 5.6: Gráfico de frecuencia predominante obtenida mediante la razón espectral $H_S/V_S$ versus la frecuencia predominante obtenida mediante $H_S/H_B$ , para todas las estaciones estudiadas. ....	83
Figura 5.7: Gráfico de Desviación Estándar $\sigma$ de la frecuencia predominante v/s Amplitud Espectral Promedio $A$ . Cada punto representa una estación. ....	85
Figura A: Perfil estratigráfico y modelo de velocidades de las estaciones japonesas utilizadas en el presente estudio .....	107

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Chile es conocido como uno de los países más sísmicos del mundo, el cual a lo largo de su historia ha experimentado grandes terremotos como el ocurrido en Valdivia el año 1960 ( $M_w = 9.5$ ), el del Maule en 2010 ( $M_w = 8.8$ ), el de Illapel en 2015 ( $M_w = 8.3$ ), entre otros. Debido a esto, el estudio sísmico de los suelos se ha vuelto una prioridad importante en los proyectos de ingeniería civil, incluyendo los proyectos de edificios habitacionales o industriales. Este tipo de proyectos al momento de realizar el diseño requiere de parámetros que dependen de la caracterización y clasificación sísmica del depósito de suelo en donde se construirá la estructura. Actualmente, la norma de diseño de edificios NCh433.Of1996 Mod.09 solo considera un parámetro para clasificar sísmicamente el suelo: la velocidad de onda de corte promedio de los 30 metros más superficiales  $V_{s30}$ . A pesar de que este parámetro también se utiliza en otros países como Estados Unidos o Italia (Mucciarelli et al., 2006; Boore et al., 2003; Castellaro et al., 2008; Castellaro & Mulargia, 2014), el problema de este índice es que no caracteriza bien aquellos sitios con un depósito de suelo somero, es decir, que tienen un espesor inferior a 30 metros, ya que puede considerar estratos de roca en el cálculo (Cadet et al., 2012). Por otro lado, la presencia de estratos dentro del perfil que poseen alta o baja velocidad son difíciles de detectar mediante métodos de ondas superficiales (Sáez et al., 2018) y su comportamiento sísmico puede ser complejo. Por lo tanto, es difícil que un solo parámetro pueda englobar todas las complejidades que estos casos presentan (Mucciarelli et al., 2006; Boore et al., 2011; Castellaro et al., 2008, 2014; Verdugo et al., 2018).

Debido a lo anteriormente dicho, se espera que la norma NCh433.Of1996 Mod.09 tenga modificaciones en la clasificación sísmica de los suelos, permitiendo utilizar el periodo – o frecuencia - predominante de este como un índice adicional con el que se tenga que realizar la clasificación del suelo (Idini et al., 2016; Verdugo et al., 2018). Es por ello que se requerirán de métodos geofísicos para la obtención de dicho parámetro (González, 2015). Sin embargo, como estos métodos trabajan con ondas superficiales es posible que presenten errores en su estimación, en especial si se trabaja con perfiles donde existen estratos que poseen una inclusión de alta o baja velocidad debido a que se desconoce el impacto que generan estas capas en la obtención de la frecuencia y, consecuentemente en el comportamiento sísmico del depósito (Xia et al., 2002).

De acuerdo a lo anterior, este trabajo se centra en el estudio del comportamiento sísmico de estos tipos de suelos, los cuales se denominarán “depósitos de suelos singulares”. Para ello, se utilizan estaciones sísmicas que tienen un sensor – acelerómetro - en superficie y otro en profundidad, con el objetivo de obtener razones espectrales en estos sitios. En base a esto, se ha decidido utilizar estaciones sísmicas de la red japonesa KiK-net, ya que una gran cantidad de ellas se encuentran sobre depósitos de suelos singulares, poseen una cantidad considerable de registros sísmicos y su perfil de velocidades de onda de corte es conocido.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo General**

El objetivo general de este trabajo es estudiar el comportamiento sísmico de depósitos de suelos que tienen espesores menores a 30 metros, o que poseen una inclusión de alta o baja velocidad de onda de corte.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos son:

1. Revisar estudios asociados al efecto de sitio y a los distintos métodos de estimación de dicho efecto en depósitos de suelos con las características señaladas.
2. Identificar estaciones sismológicas que posean acelerómetros en superficie y en profundidad, con registros sísmicos y el perfil de velocidades conocido.
3. Procesar los registros sísmicos de las estaciones para determinar los espectros de respuesta, las razones espectrales de las componentes horizontales sobre las verticales y horizontales en superficie sobre las horizontales en profundidad y obtener la función de transferencia teórica considerando un modelo unidimensional de propagación de ondas de corte SH.
4. Analizar las rigideces de los perfiles de suelo mediante la longitud de onda desarrollada en cada estrato del perfil de velocidades, considerando el espesor y frecuencia fundamental de cada estrato.
5. Analizar la variación de la frecuencia fundamental en profundidad, considerando el modelo unidimensional de propagación de ondas de corte SH y ver su relación con el desarrollo de la longitud de onda.

## **1.2 Estructura del Trabajo**

Para cumplir con los objetivos de este trabajo, este documento se estructura en 6 capítulos principales, además de la introducción, bibliografía y dos anexos complementarios. El capítulo 2 corresponde a la revisión bibliográfica realizada para el estudio. Posteriormente, en el capítulo 3 se muestra la metodología seguida para el procesamiento de los registros sísmicos. Luego, en el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos, para luego analizarlos en el capítulo 5. Finalmente, en el capítulo 6 se muestran las conclusiones obtenidas en el trabajo realizado, junto a recomendaciones para estudios futuros.

## **CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

El comportamiento sísmico del suelo ha sido estudiado por diversos autores en el último tiempo. Por lo general, se han realizado estudios en depósitos de suelo en que la velocidad de onda de corte crece en forma monótona en profundidad, lo que se conoce como un perfil normalmente dispersivo. (Rodríguez & Midorikawa, 2003, Castellaro & Mulargia, 2014; Afshari & Stewart, 2015; Humire et al., 2015), observándose que en este tipo de depósitos la frecuencia fundamental obtenida mediante la teoría unidimensional de propagación de ondas de corte SH coincide con la frecuencia predominante obtenida mediante métodos geofísicos, como por ejemplo con el uso de microvibraciones (Rodríguez & Midorikawa, 2003; Verdugo et al., 2018; Verdugo, 2018), y que existe una mayor variación en el factor de amplificación (Field & Jacobs, 1995; Lachet et al., 1996; Bonilla et al., 1997; Cadet et al., 2012). Sin embargo, en la norma NCh433 se menciona que el diseño de estructuras está basado en el periodo fundamental de la estructura y en las condiciones del suelo, por lo que tener variaciones entre el factor de amplificación sísmica obtenido de forma teórica y empírica en estos suelos no es un problema al momento de diseñar.

Las modificaciones propuestas a de la norma NCh433 Of1996 Mod.09 están basadas en estudios realizados en perfiles de suelos que poseen las características mencionadas anteriormente (Idini et al, 2016; Verdugo et al., 2018; Verdugo, 2018), sin necesariamente considerar aquellos perfiles de suelos singulares, como lo son los que poseen una inclusión de alta o baja velocidad o los que tienen un depósito de suelo con espesor menor a los 30 metros.

El estudio de las características dinámicas del depósito de suelo en un sitio ayuda a predecir los efectos que puede generar un terremoto en dicho sitio. Es por ello que se han propuesto diversas técnicas que permiten estimar el efecto de sitio que se puede generar en alguna localidad, entre las cuales se encuentra la razón espectral con respecto a un sitio de referencia (Borcherdt, 1970), el uso de microvibraciones (Tsuboi et al., 2001; Rodríguez & Midorikawa, 2003; Rong et al., 2017), y el espectro de razones espectrales entre las componentes horizontales y verticales superficiales  $H_s/V_s$  (Kanai & Tanaka, 1960; Nakamura, 1989; Field and Jacob, 1995; Lachet et al., 1996).

### **2.1 Modelo Unidimensional de Propagación de Ondas de Corte SH**

El modelo unidimensional de propagación de ondas de corte SH se estudia mediante la función de transferencia de este tipo de ondas, la cual se obtiene al realizar un equilibrio dinámico en un elemento diferencial de suelo, considerando además la compatibilidad de desplazamientos entre los distintos estratos de suelo.

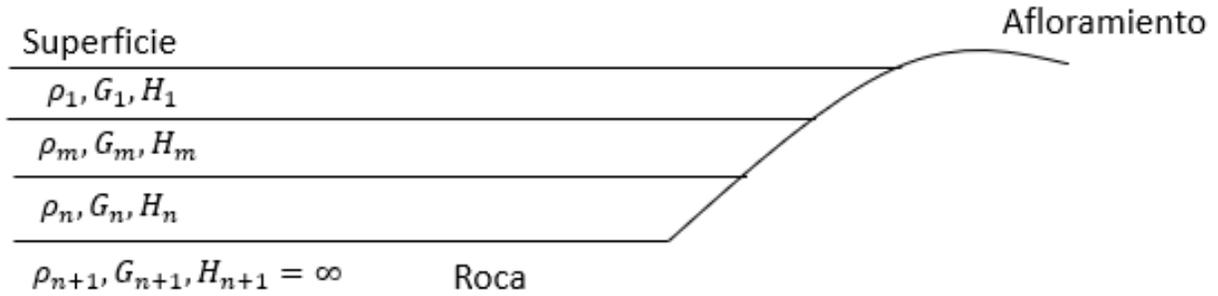


Figura 2.1: Modelo multicapas de un depósito de suelo.

Considerando un depósito de suelos multicapas como el que se muestra en la Figura 2.1, la función de transferencia  $FT_{i,j}$  dependiente de la frecuencia  $f$  entre los estratos  $i$  y  $j$  se define como:

$$FT_{i,j}(f) = \frac{E_i(f) + F_i(f)}{E_j(f) + F_j(f)} \quad (1)$$

Donde  $E_j(f)$ ,  $F_j(f)$  están dados por las expresiones:

$$E_j(f) = \frac{1}{2} (E_{j-1}(f) \cdot (1 + \Delta_{j-1}) \exp(ia_{j-1}H_{j-1}) + F_{j-1}(f) \cdot (1 - \Delta_{j-1}) \exp(-ia_{j-1}H_{j-1})) \quad (2)$$

$$F_j(f) = \frac{1}{2} (E_{j-1}(f) \cdot (1 - \Delta_{j-1}) \exp(ia_{j-1}H_{j-1}) + F_{j-1}(f) \cdot (1 + \Delta_{j-1}) \exp(-ia_{j-1}H_{j-1})) \quad (3)$$

Donde  $H_k$  es el espesor del estrato  $k$  y:

$$\Delta_j = \frac{\rho_j \cdot V_{s_j}}{\rho_{j+1} \cdot V_{s_{j+1}}} \cdot \sqrt{\frac{1 + i \cdot 2D_j}{1 + i \cdot 2D_{j+1}}} \quad (4)$$

Corresponde al contraste de impedancia, donde  $\rho_k$  es la densidad del estrato  $k$ ,  $G_k$  su módulo de corte y  $D_k$  su amortiguamiento. Cuando se considera que la densidad entre estratos no varía tanto, y el amortiguamiento es casi constante en todo el perfil de suelo, se considera válido trabajar con la razón de velocidades  $V_{s_j}/V_{s_{j+1}}$ , el cual representa de una manera simplificada el contraste de impedancia que existe entre los estratos.

Al graficar la función de transferencia  $FT$  entre el basamento rocoso y la superficie en función de la frecuencia, se obtiene un gráfico como el observado en la Figura 2.2, donde la frecuencia asociada al primer y más alto peak se conoce como frecuencia fundamental de vibración del depósito de suelo  $f_0$ .

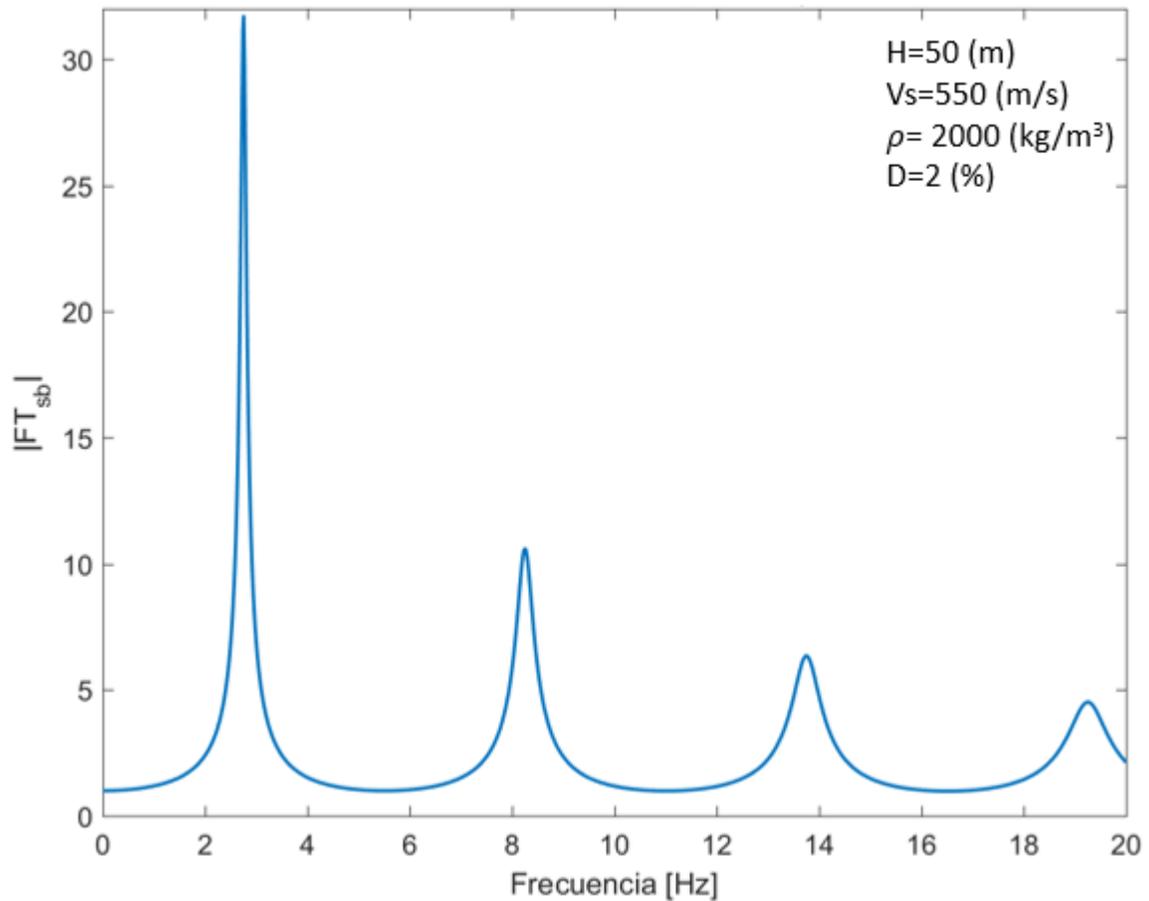


Figura 2.2: Función de transferencia teórica de un depósito de suelo de 50 (m) de profundidad, con una velocidad de onda de corte de 550 (m/s), densidad de 2000 (kg/m<sup>3</sup>) y amortiguamiento del 2% obtenida mediante el modelo unidimensional de propagación de ondas de corte SH. El primer peak - cercano a los 2.8 (Hz) - corresponde a la frecuencia fundamental de vibración del depósito de suelo.

## 2.2 Espectro de Respuesta de Aceleración

Se define el espectro de respuesta de aceleración  $S_a(f, \beta)$  como el conjunto de las máximas respuestas de aceleración que presenta un sistema de un grado de libertad para una frecuencia y amortiguamiento dado:

$$S_a(f, \beta) = \text{máx}|\ddot{u}(t)| \quad (5)$$

Donde  $f$  es la frecuencia,  $\beta$  el amortiguamiento y  $\ddot{u}(t)$  el registro de aceleraciones totales en función del tiempo.

## 2.3 Método de Razones Espectrales HVSR o H<sub>s</sub>/V<sub>s</sub> de Registros Sísmicos

El método de razones espectrales H<sub>s</sub>/V<sub>s</sub>, o método de Nakamura (Nakamura, 1989) permite estimar la frecuencia predominante de vibración del depósito de suelo mediante la determinación de una función  $S_{TT}$ , la cual se calcula a partir de los movimientos horizontales y verticales en superficie del depósito, definido como:

$$S_{TT} = \frac{H_S}{V_S} = HVSR \quad (6)$$

Donde  $H_S$  es la amplitud espectral del movimiento horizontal en superficie y  $V_S$  es la amplitud espectral del movimiento vertical en superficie.

Nakamura (1989) propuso esta razón haciendo uso de registros de ruido ambiental, el cual se propaga como ondas del tipo superficial. Sin embargo, se puede realizar una equivalencia de este método utilizando los espectros de respuesta de registros sísmicos (Rodríguez & Midorikawa, 2003). Esta razón espectral se conoce como razón espectral  $H_S/V_S$  o HVSR y la frecuencia en que la curva presenta su mayor peak se conoce como frecuencia predominante del suelo. Es importante destacar que uno de los supuestos que posee el método de Nakamura, es que la amplitud espectral en el espacio de las frecuencias de la componente horizontal en el basamento  $H_B$  es similar a la componente vertical  $V_B$  en el mismo lugar:

$$\frac{H_B}{V_B} \approx 1 \quad (7)$$

Con registros sísmicos, Lermo y Chávez (1993) utilizaron este método por primera vez, en tres ciudades de México. Según sus resultados, la razón espectral  $H_S/V_S$  obtenida de registros sísmicos entrega valores de frecuencias predominantes y amplificaciones de los depósitos de suelos que coinciden con los obtenidos mediante el método de razones espectrales estándares, y que el método no es capaz de identificar frecuencias armónicas superiores.

#### 2.4 Método de Razones Espectrales HHSR o $H_S/H_B$ de Registros Sísmicos

El método de razones espectrales HHSR o  $H_S/H_B$  permite, al igual que el método  $H_S/V_S$ , estimar la frecuencia predominante del depósito de suelo mediante la determinación de una función  $S_{TH}$ , la cual se calcula a partir de los movimientos horizontales en la superficie y en la base, definido como (Borcherdt, 1970):

$$S_{TH} = \frac{H_S}{H_B} = HHSR \quad (8)$$

Donde  $H_S$  es la amplitud espectral del movimiento horizontal en superficie.

Este método considera como referencia el basamento rocoso.

Ahora bien, para ver las similitudes en amplitud de las curvas obtenidas mediante HVSR y HHSR, se puede realizar el cociente entre estos dos:

$$\frac{HVSR}{HHSR} = \frac{H_S/V_S}{H_S/H_B} = \frac{H_B}{V_S} \quad (9)$$

## 2.5 Razón espectral VVSR o $V_s/V_B$ de Registros Sísmicos

Satoh et al. (2001) menciona que la amplificación de la componente vertical ha sido poco estudiada. Por otro lado, Tsuboi et al. (2001) concluye que esta componente no debiese amplificar en el rango de frecuencias bajas.

$$S_{VT} = \frac{V_S}{V_B} = VVSR \quad (10)$$

## 2.6 Técnicas de Estimación del Efecto de Sitio

El espectro de movimiento del suelo  $A_{ij}(f)$  puede ser representado en una estación  $j$  producto de un evento sísmico  $i$  como una convolución de funciones asociada a la fuente, la trayectoria, el efecto de sitio y la respuesta instrumental (Bonilla et al., 1997; Satoh et al., 2001; Boore, 2003; Afshari & Stewart, 2015):

$$A_{ij}(f) = S_i(f)P_{ij}(f)G_j(f)I_j(f) \quad (11)$$

Donde  $S_i(f)$  es el término correspondiente a la fuente del  $i$ -ésimo evento,  $P_{ij}(f)$  al de la trayectoria entre el  $i$ -ésimo evento a la  $j$ -ésima estación,  $G_i(f)$  es el término asociado al efecto de sitio para la  $j$ -ésima estación, y finalmente el término  $I_j(f)$  determinado por la respuesta del instrumento en la  $j$ -ésima estación.

Si se considera un sitio de referencia, la metodología consiste en realizar el cociente entre el espectro de respuesta que se obtiene en la estación  $j$  con respecto al de la estación  $k$ . Al remover la respuesta del instrumento en cada estación, el término  $I_j(f)$  deja de tener relevancia si los sensores son los mismos. Por otro lado, el término asociado a la fuente no es necesariamente el mismo entre la estación  $j$  y  $k$  debido al mecanismo focal y a los efectos de directividad. Sin embargo, si se utiliza una cantidad razonable de eventos sísmicos, se espera que estos efectos se promedien. Por último, si la separación entre la estación  $j$  y  $k$  es menor que la distancia hipocentral, es razonable asumir que la trayectoria para ambas estaciones sea la misma (Bonilla et al., 1997). Dicho lo anterior, la razón espectral es solo dependiente de la componente asociada al efecto de sitio:

$$\frac{A_{ij}(f)}{A_{ik}(f)} = \frac{G_j(f)}{G_k(f)} \quad (12)$$

Los diversos estudios que se han realizado respecto a los métodos de estimación del efecto de sitio utilizando razones espectrales se dividen en dos grupos. El primero de ellos son los dependientes de un sitio de referencia, mientras que los segundos son los independientes de un sitio de referencia. La Figura 2.3 muestra el caso general de un sitio considerando que existen sensores que permiten registrar:

- a) Registros sísmicos de dos componentes en la superficie, en la parte superior del sedimento ( $H_s$ ,  $V_s$ ).

- b) Registros sísmicos con dos componentes en el basamento rocoso ( $H_B, V_B$ ). Steidl et al. (1996) mostraron que el basamento rocoso puede ser considerado como un buen sitio de referencia.
- c) Registros sísmicos con dos componentes en afloramiento rocoso ( $H_R, V_R$ ). Este se considera generalmente como el sitio de referencia para la estimación del efecto de sitio, ya que considera que el efecto de sitio que se tiene en la roca es nulo (Borcherdt, 1970).

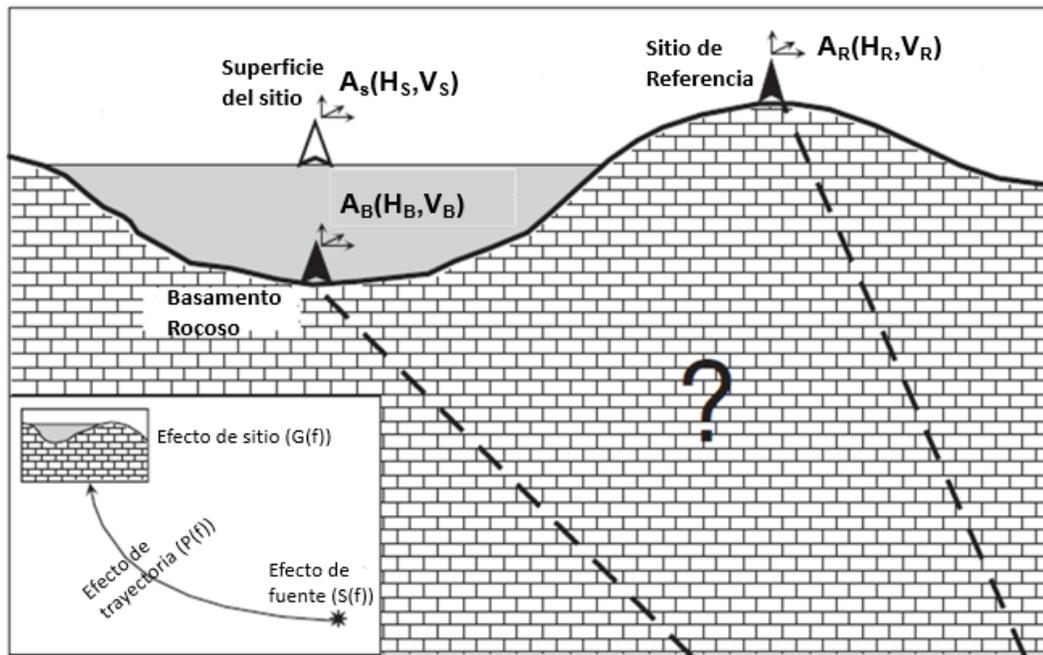


Figura 2.3: Caso general para el estudio del efecto de sitio.  $A_S(H_S, V_S)$ : Espectro de amplitud definido por las componentes horizontales (H) y vertical (V) del registro.  $A_S$ : Sobre la superficie;  $A_B$ : en el basamento rocoso;  $A_R$ : Cerca del afloramiento rocoso. El símbolo “?” indica la incertidumbre de los efectos de trayectoria entre el sedimento y el sitio de referencia. (Rodríguez & Midorikawa, 2003).

Considerando los registros que se pueden obtener, se consideran como técnicas dependientes del sitio de referencia aquellos que dependen del registro en otra zona para la obtención de la razón espectral, por lo que las razones espectrales  $H_S/H_B$  y  $H_S/H_R$  entran en esta clasificación. Es por ello, que el método dependiente de un sitio de referencia propuesto por Borcherdt (1970) requiere que el afloramiento rocoso se encuentre cerca del sitio de interés, con el objetivo de disminuir la incertidumbre de los efectos de trayectoria entre el sedimento y el afloramiento (representado en la Figura 2.3 por el signo “?”). Sin embargo, Steidl et al. (1996) menciona que es difícil obtener un buen sitio de referencia en afloramiento rocoso, debido a las distancias a las que se puede encontrar esta. Por otro lado, las técnicas independientes de un sitio de referencia son aquellas que dependen solo del registro en la zona estudiada, sin necesidad de requerir de registros sísmicos en otro lugar para la obtención del cociente espectral, por lo que todos los cocientes espectrales asociados a la razón  $H_S/V_S$  – como

lo es la  $H_s/V_s$  utilizando un registro sísmico, microvibraciones o la coda - entran en esta clasificación.

Tsuboi et al. (2001) y Rodríguez & Midorikawa (2003) realizaron un estudio en que compararon distintas técnicas para estimar el efecto de sitio. Para ello, consideraron la red japonesa Yokohama, la cual se encuentra localizada en la parte central-este de Honshu y se caracteriza por tener acelerómetros triaxiales en estructuras de altura (<http://smo.kenken.go.jp/index.php/smn/bri-anx>). En la Figura 2.4 a) se muestran los distintos sismos considerados en el estudio (estrellas negras) como también aquellas estaciones de la red Yokohama que poseen un arreglo vertical de acelerómetros, que corresponden a nueve sitios distintos (puntos negros) y cuyo modelo de velocidades se presenta en la Figura 2.4 b).

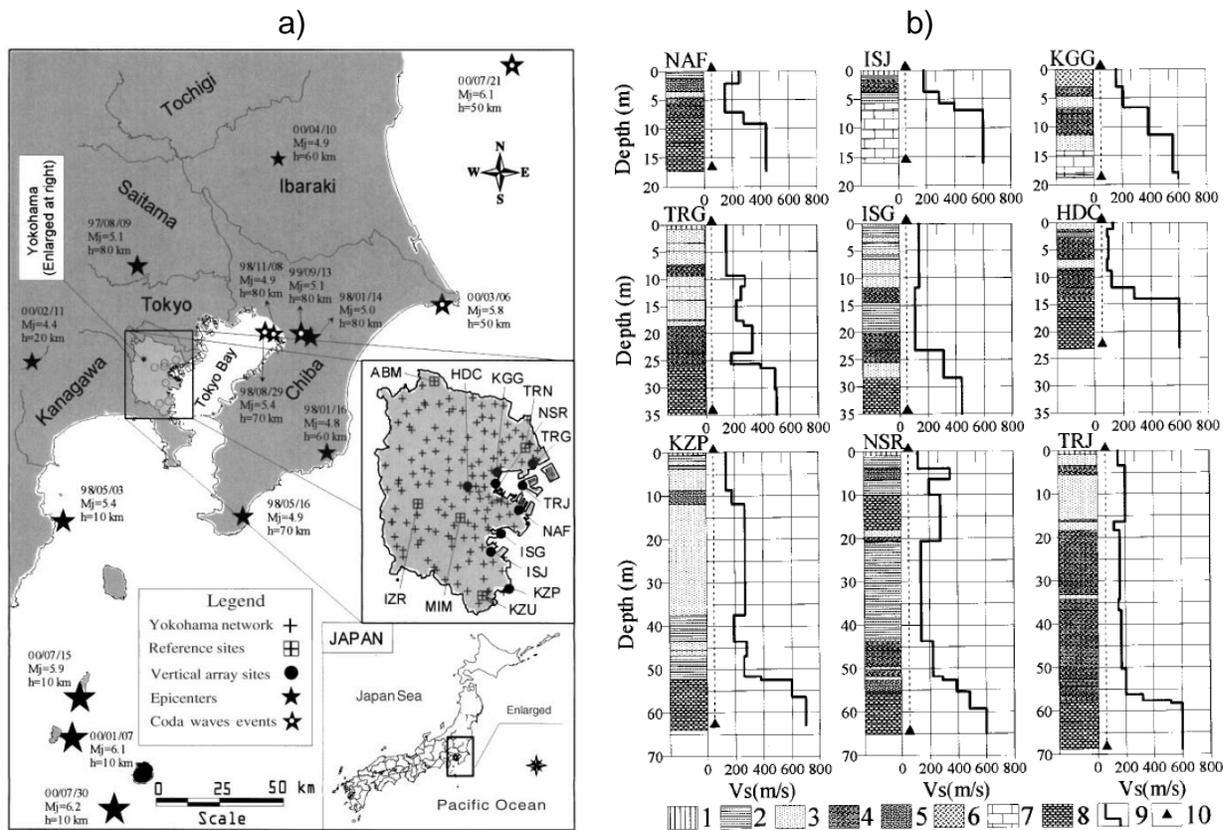


Figura 2.4: a) Ubicación de la ciudad de Yokohama, junto a la red sísmológica de la zona, estaciones con un arreglo vertical de acelerómetros – utilizadas en el estudio – y epicentro de los eventos considerados en los estudios asociados a esta zona. b) Perfiles de suelo y modelo de velocidades de ondas de corte S de nueve sitios con arreglo vertical considerados en los estudios de la ciudad de Yokohama, junto al código de cada estación. (1) Relleno, (2) Limo, (3) Arena, (4) Arcilla, (5) Arena Gruesa, (6) Marga, (7) Roca Suave, (8) Piedra Barro, (9) Perfil Velocidad Onda de Corte, (10) Acelerómetro. (Rodríguez & Midorikawa, 2003).

Los resultados obtenidos por Rodríguez & Midorikawa (2003) se resumen en la Figura 2.5. La Figura 2.5 a) muestra los resultados obtenidos utilizando técnicas dependientes del sitio de referencia, junto a la función de transferencia teórica obtenida mediante el

modelo de propagación de ondas de corte SH, mientras que la Figura 2.5 b) muestra los resultados obtenidos utilizando técnicas dependientes e independientes del sitio de referencia.

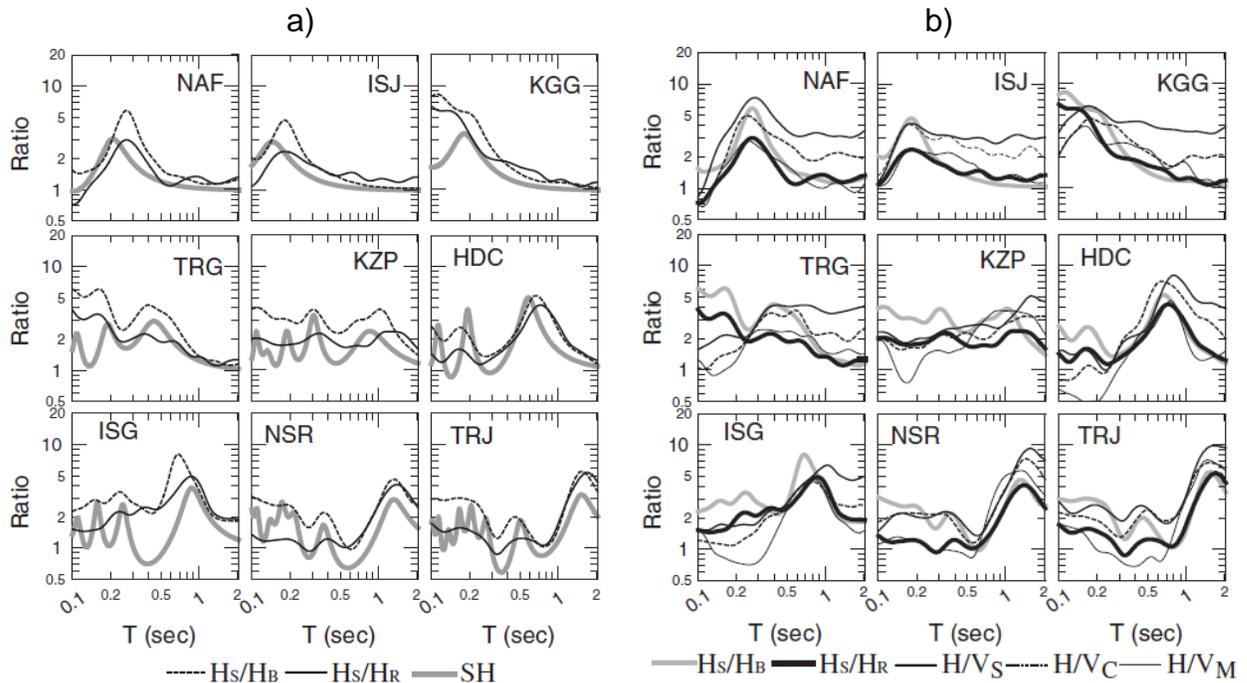


Figura 2.5: a) Razones espectrales dependientes de un sitio de referencia.  $H_s/H_B$ : Razón espectral entre el registro en superficie y en profundidad.  $H_s/H_R$ : Razón espectral entre la superficie y un sitio de referencia. SH: Función de transferencia teórica considerando modelo unidimensional de propagación de ondas de corte SH. b) Resultados obtenidos de la aplicación de razones espectrales entre la componente sísmica horizontal y vertical en superficie utilizando registros sísmicos ( $H/V_S$ ), utilizando la coda del registro ( $H/V_C$ ) y mediante microvibraciones ( $H/V_M$ ) (Rodríguez & Midorikawa, 2003).

De la Figura 2.5 b) los autores concluyen que, considerando el espectro  $H_s/H_R$  como la piedra angular del control de confiabilidad, las distintas razones espectrales utilizadas revelan el mismo peak de frecuencia predominante para todos los sitios, a excepción de los sitios TRG y KZP (Figura 2.6). Para encontrar una posible explicación para estas dos estaciones se analizó una posible relación entre el suelo y el perfil de velocidades de ondas de corte  $V_s$ . Se observó que los sitios donde los resultados de los métodos coinciden tienen un perfil de velocidades en forma de L (se puede considerar normalmente dispersivo), indicando un fuerte contraste de impedancia entre la roca más superficial y la parte superior del sedimento, como se observa en los sitios NAF, ISJ, KGG, HDC, ISG, NSR y TRJ. Por otro lado, los sitios TRG y KZP presentan un perfil de suelos más complejo, con intercalaciones de arenas de mayor o menor velocidad que el resto del perfil, por lo que se observan inclusiones de alta o baja velocidad (Figura 2.4 b))

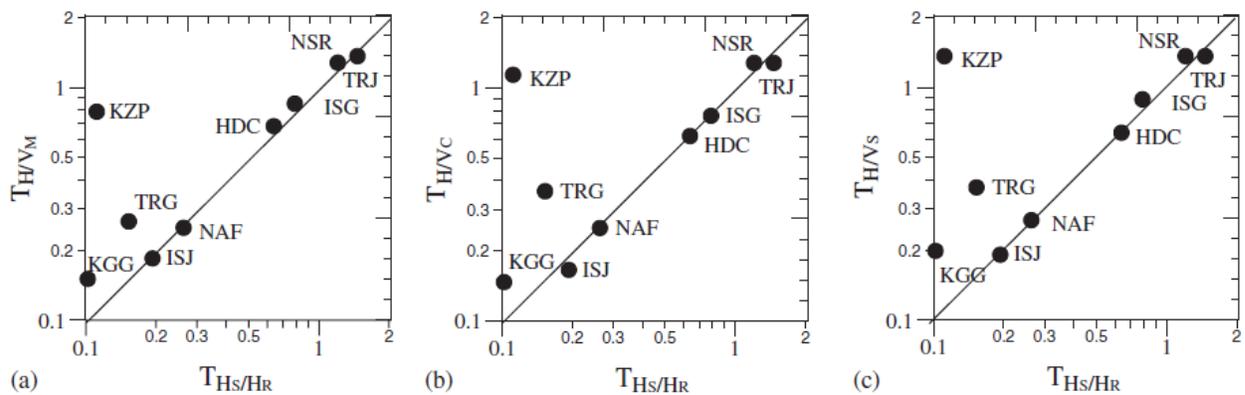


Figura 2.6: Relación entre los periodos predominantes obtenidos en cada estación, según cada método. a) Gráfico del periodo predominante obtenido mediante microvibraciones ( $T_{H/V_M}$ ) v/s el obtenido mediante la razón espectral entre la superficie y un sitio de referencia ( $T_{H_s/H_r}$ ). b) Periodo predominante obtenido mediante el uso de la coda del registro ( $T_{H/V_C}$ ) v/s  $T_{H_s/H_r}$ . c) Periodo predominante obtenido en superficie ( $T_{H/V_S}$ ) v/s  $T_{H_s/H_r}$  (Rodríguez & Midorikawa, 2003).

Con lo anteriormente expuesto, Rodríguez & Midorikawa (2003) concluyen que:

- Desde el punto de vista físico, entre las técnicas de razones espectrales estudiadas, la razón  $H_s/H_B$  parece proporcionar una representación directa del efecto real del movimiento en el depósito de suelo situado entre el acelerómetro en profundidad y el ubicado en superficie.
- Teóricamente, las razones espectrales  $H_s/H_r$  no reciben la influencia contaminante de las ondas reflejadas y refractadas descendentes.
- La razón espectral  $H_s/H_r$  muestra una curva bastante parecida a la obtenida mediante la razón espectral  $H_s/H_B$ .
- Para depósitos de suelo normalmente dispersivos, se observa una gran coincidencia entre las curvas  $H_s/H_B$  y  $H_s/H_r$  con la función de transferencia teórica obtenida mediante el modelo unidimensional de propagación de ondas de corte SH.

Diversos autores han realizado análisis de razones espectrales considerando ventanas temporales de registros sísmicos. Por ejemplo, Lermo y Chávez (1993) en su trabajo analizaron una ventana temporal de diez segundos correspondientes a la parte fuerte del movimiento. Por otro lado, Satoh et al., (2001) compararon las razones espectrales de las ventanas correspondientes a la llegada de la onda P y la coda con la ventana correspondiente a la onda S de los registros, estudio que se detalla más adelante. Tsujiura (1978) mostró que la razón espectral entre dos sitios rocosos obtenida utilizando la coda de las ondas S es similar a la obtenida utilizando la ventana completa de ondas S. Field & Jacob (1995) y Bard (1995) mencionan que utilizar una ventana asociada solo a la onda P no es correcto, por lo que es necesario considerar una ventana en que se encuentre la onda S, lo cual es corroborado por Dimitriu et al. (1998), quienes muestran que la frecuencia predominante en los espectros de respuesta es más clara al utilizar una ventana de tiempo que comprenda tanto la onda S como la P, y no solo una de ellas.

Afshari & Stewart (2015) estudiaron la efectividad de la teoría unidimensional de propagación de ondas de corte utilizando el modelo lineal equivalente implementado en el programa DEEPSOIL (Hashash et al., 2016). Este programa permite incorporar la no linealidad de la respuesta del suelo a través del uso de propiedades compatibles con el nivel de deformación de cada estrato, y para ello hace uso de curvas de reducción de módulo de corte y amortiguamiento. El estudio fue realizado utilizando 10 estaciones en California, Estados Unidos. Los cálculos de las funciones de transferencia empíricas fueron realizados utilizando registros sísmicos, considerando una media geométrica entre las componentes horizontales de los registros procesados. Dentro de los resultados que obtuvieron, adjuntan el perfil de velocidades de la estación ubicada en El Centro-Meloland (Figura 2.7 a)), junto a su respectiva comparación entre la función de transferencia teórica y empírica. Además, adjuntan los resultados obtenidos en la estación San Bernardino (Figura 2.7 b)). Lamentablemente, no hay más resultados adjuntos en este trabajo, pero ellos mencionan que, para la estación de El Centro-Meloland, la función de transferencia empírica y teórica son bastante parecidas debido a que el valor del coeficiente de correlación utilizado por Thompson et al. (2012), que cuantifica la similitud entre funciones de transferencia, es  $\bar{r}=0.30$ , mientras que en la estación San Bernardino,  $\bar{r}=0.06$ , lo que se asocia a una mala correlación entre ambas funciones de transferencia.

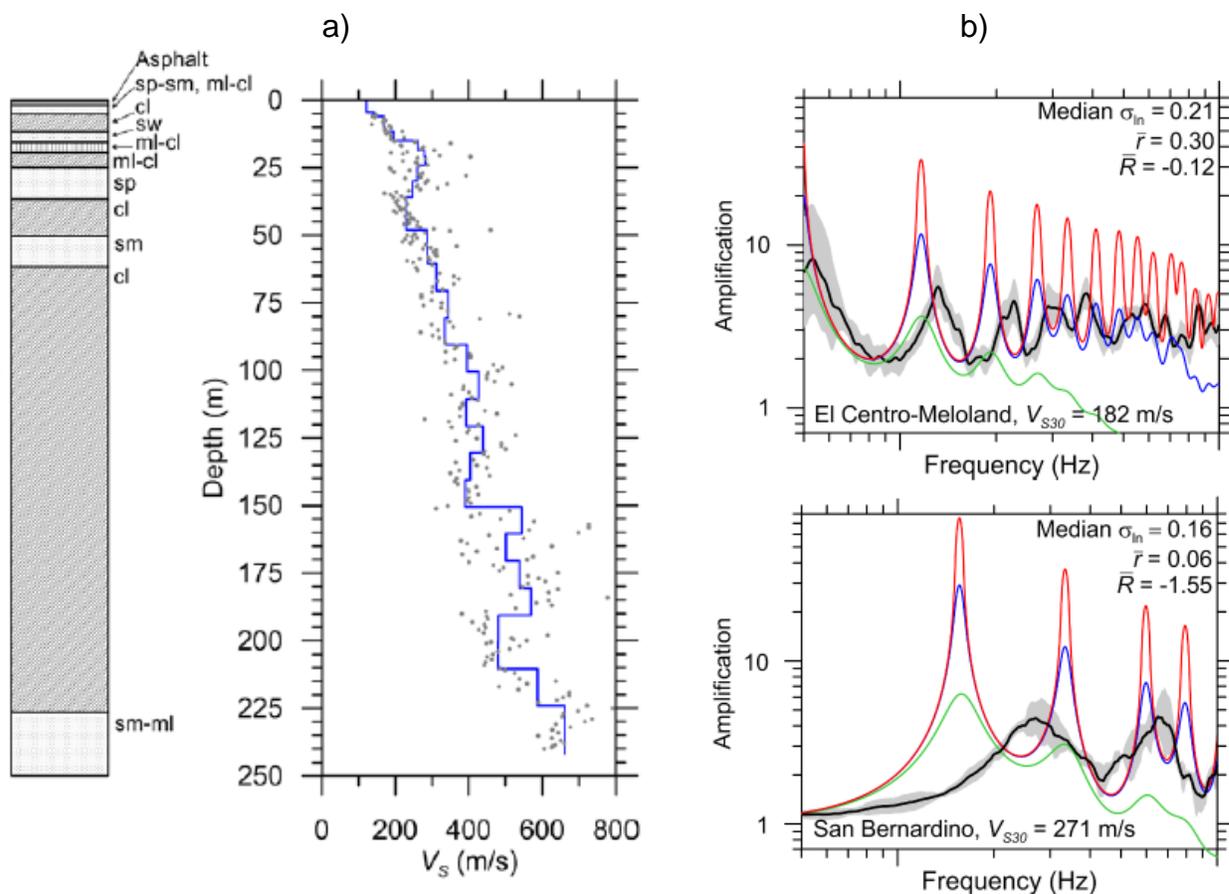


Figura 2.7: a) Perfil de velocidades de la estación El Centro-Meloland. b) Función de transferencia empírica (línea negra) para la estación El Centro-Meloland y San Bernardino. Las líneas roja, azul y verde corresponden a funciones de transferencia teóricas considerando distintos modelos de curvas de amortiguamiento (Afshari & Stewart, 2015).

Los autores concluyen que el análisis de respuesta sísmica utilizando un modelo lineal equivalente para los arreglos que se encuentran en California son bastante precisos. La posible explicación de esto es que estos arreglos se encuentran sobre cuencas sedimentarias, donde el depósito de suelo es técnicamente normalmente dispersivo y bastante profundo, exceptuando la estación San Bernardino, la cual se encuentra cerca de los bordes de la cuenca, donde es probable que exista una estructura de velocidades heterogénea. Por lo tanto, en el caso de la teoría unidimensional de propagación de ondas de corte SH o en los análisis de respuesta sísmica mediante modelos como el lineal equivalente, hay que tener en cuenta que solo simulan una porción física de la respuesta del sitio, por lo que hay imprecisión al momento de predecir con exactitud el efecto de sitio debido a condiciones de borde o efectos topográficos.

Satoh et al. (2001) realizaron un estudio similar al que realizaron Rodríguez & Midorikawa (2003) pero utilizando las estaciones sismológicas del Building Research Institute (BRI) compuesta por once sitios; dos estaciones de la red K-NET y siete estaciones de la Corporación Shimizu (SHIMZ), todas ubicadas en Japón. La Figura 2.8 muestra el perfil de velocidades de las estaciones BRI y K-NET, mientras que la Figura 2.9 muestra la distribución de las estaciones sismológicas utilizadas en este estudio. Se observa que la mayoría de las estaciones presenta un perfil con un modelo de velocidades normalmente dispersivo, exceptuando algunas donde se presenta una leve inclusión de alta o baja velocidad, como en la estación OKIN, TRGA y TRMA.

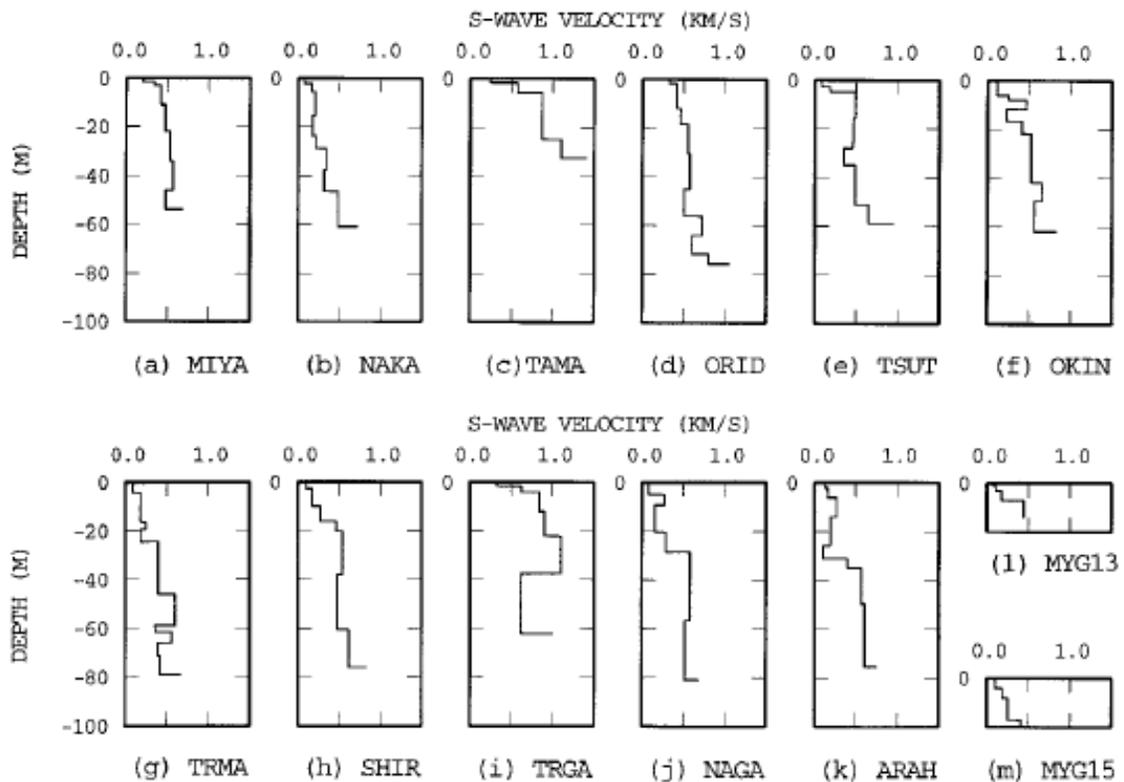


Figura 2.8: Perfil de velocidades de onda de corte las estaciones BRI (a-k) y K-NET (l-m). (Satoh et al., 2001).

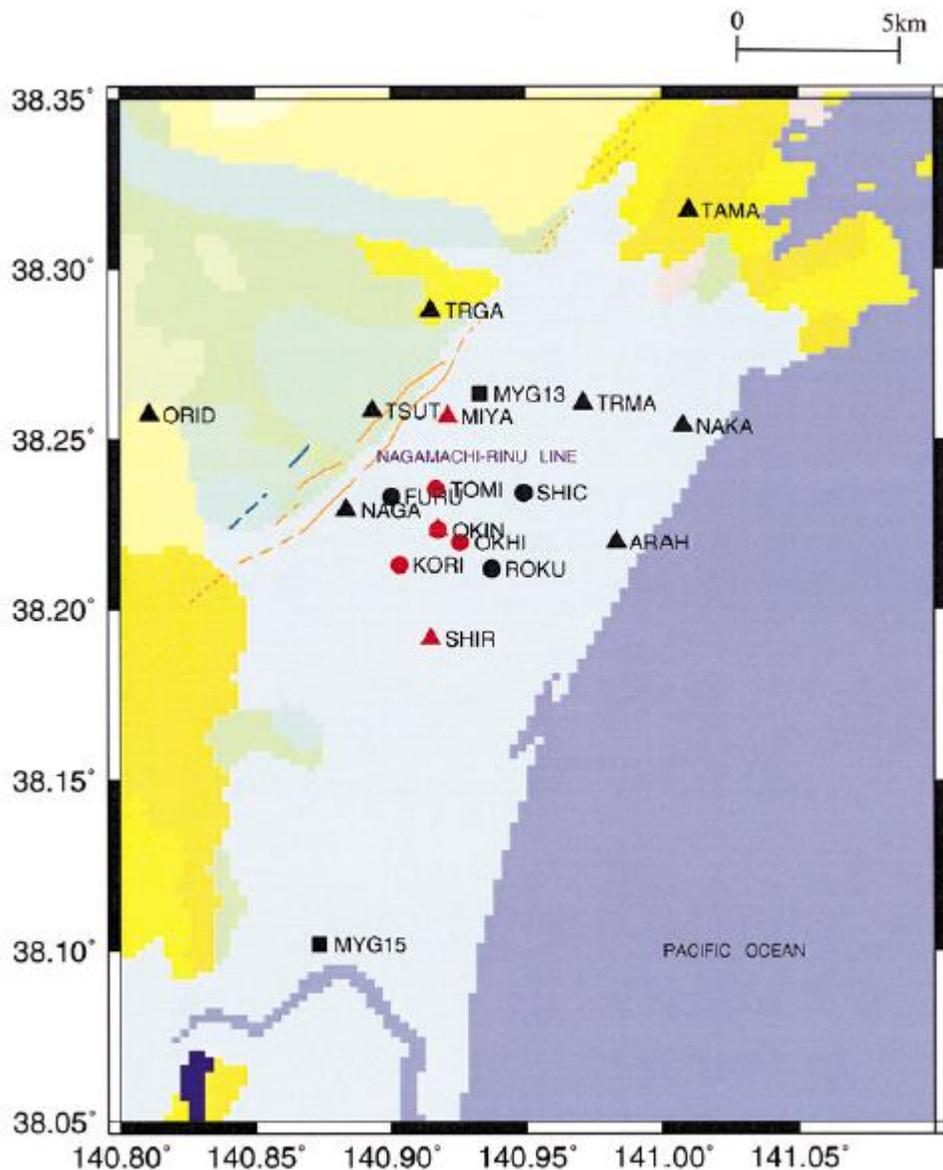


Figura 2.9: Mapa de las estaciones utilizadas el estudio de Satoh et al. (2001). Los triángulos corresponden a diez de las once estaciones de BRI, los dos cuadrados a la red K-NET y los siete círculos a las estaciones SHIMZ (Satoh et al., 2001).

Este trabajo consideró las razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ , utilizando registros sísmicos y microvibraciones, y dos ventanas temporales para la onda S, siendo una los diez segundos después de la llegada de la onda S, y otra considerando la ventana completa de la onda S (Figura 2.10). Para el cálculo de las razones espectrales  $H_s/H_B$ , se tomó como referencia la estación TAMA.

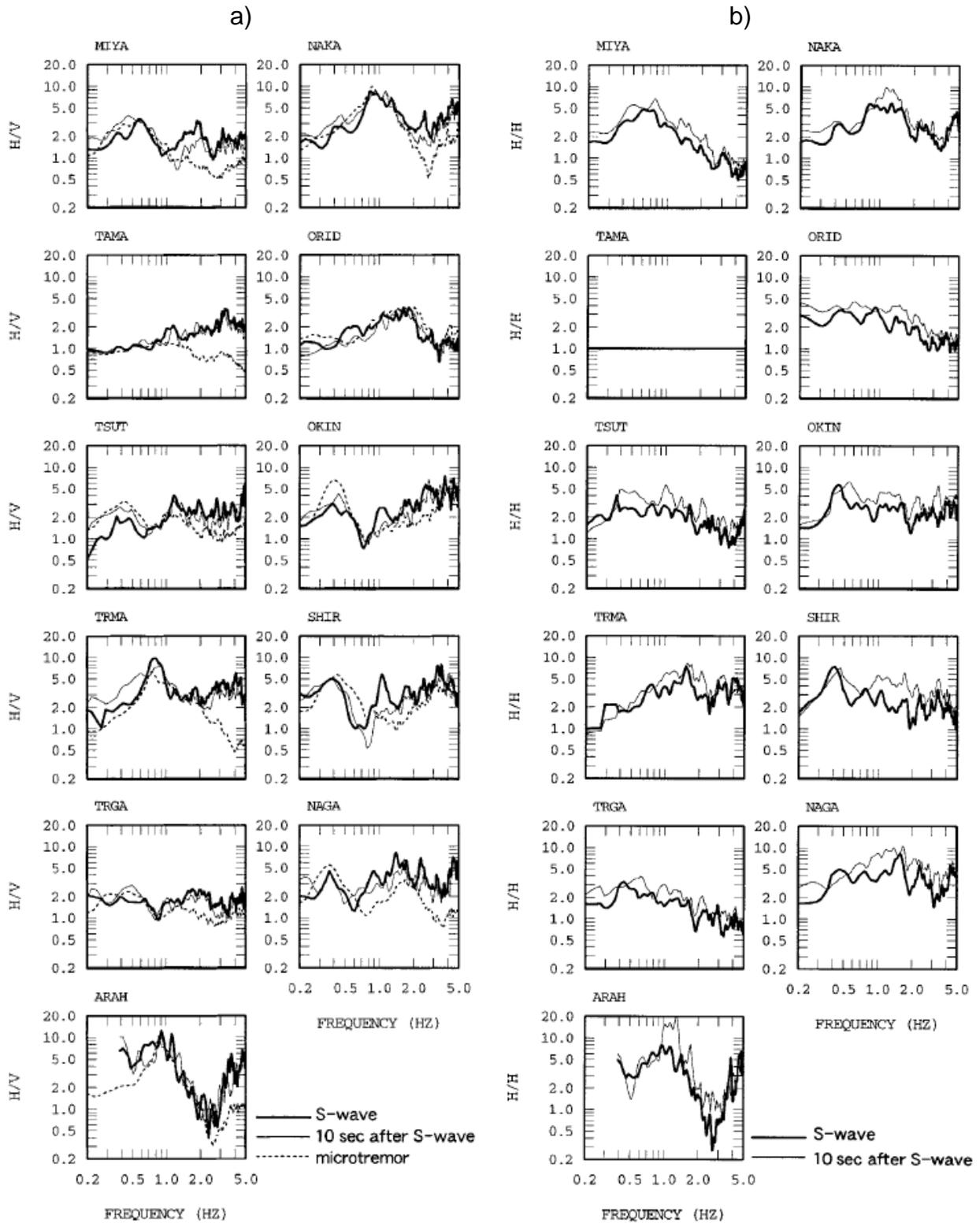


Figura 2.10: Razones espectrales a)  $H_s/V_s$  de las estaciones BRI b)  $H_s/H_B$  de las estaciones BRI. Se grafican los siguientes casos: Registros completo desde la llegada de la onda S (S-wave) y considerando diez segundos a partir de la llegada de la onda S (10 sec after S-wave). Adicionalmente, para  $H_s/V_s$  se adjunta el espectro obtenido mediante microvibraciones (microtremor) (Sato et al., 2001).

Los resultados que obtuvieron los autores se resumen en la Figura 2.11, donde se comparan las frecuencias de los peaks obtenidos mediante microvibraciones y razones espectrales  $H_s/H_B$  y  $H_s/V_s$  – las cuales se muestran de forma individual en la Figura 2.10. De esta figura se concluye que para las estaciones BRI el  $H_s/H_B$  y  $H_s/V_s$  utilizando la ventana completa de onda S son bastante similares, aunque existen algunas estaciones que se alejan de la tendencia. Por otro lado, las estaciones de la red SHIMZ y K-NET no siguen esta tendencia, lo cual puede estar asociado a una elección poco precisa del sitio de referencia debido a la lejanía o a la posible influencia de efectos topográficos. Por último, la relación entre el  $H_s/V_s$  obtenida utilizando una ventana completa de la onda S, y la razón  $H_s/V_s$  mediante microvibraciones no presentan una buena correlación.

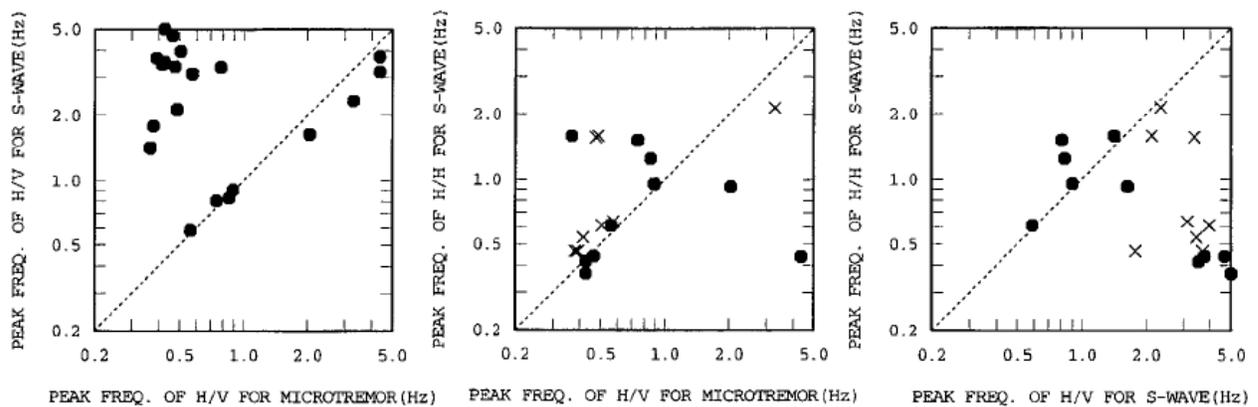


Figura 2.11: Resumen de frecuencias obtenidas en el estudio realizado por Satoh et al. (2001). Los círculos en los gráficos  $H_s/H_B$  v/s  $H_s/V_s$  mediante microvibraciones y  $H_s/H_B$  v/s  $H_s/V_s$  utilizando ventana completa de la onda S representan a las estaciones BRI, mientras que las "x" representan las estaciones de la red K-NET y SHMZ.

Konno & Ohmachi (1998) realizaron una comparación de razón espectral  $H_s/V_s$  utilizando microvibraciones y la función de transferencia teórica para ondas SH, considerando los perfiles de velocidad que se muestran en la Figura 2.12 a), obteniendo los resultados mostrados en la Figura 2.12 b). La correlación entre estos dos métodos es bastante precisa, exceptuando las estaciones 7 y 10, las cuales poseen una inclusión de velocidad. En el caso de la estación 12, que tampoco presenta buena correlación, los autores mencionan que se debe a que el peak que exhibe no es tan marcado debido al bajo contraste de impedancia.

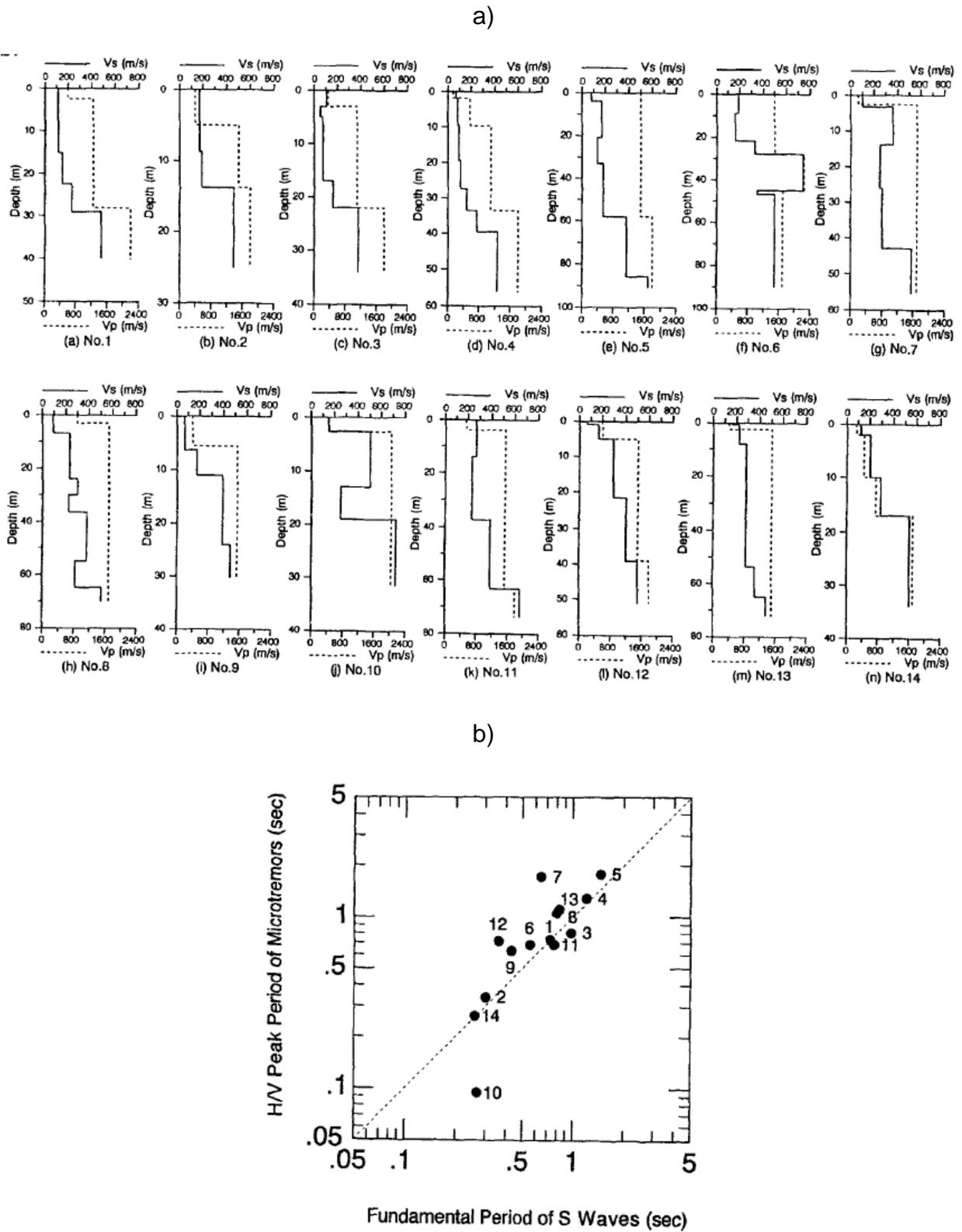


Figura 2.12: a) Perfil de velocidades de las 14 estaciones utilizadas en el estudio. b) Gráfico de periodo obtenido mediante microvibraciones v/s periodo fundamental obtenido de la función de transferencia de ondas SH. (Konno & Ohmachi, 1998).

Bard (1995) comparó la frecuencia predominante obtenida mediante el método de Nakamura HVSR con respecto a la obtenida considerando la función de transferencia de una onda SH utilizando un modelo numérico 1-D, obteniendo como resultado una buena correlación entre estos dos parámetros (Figura 2.13.a)). Por otro lado, Verdugo (2018) realizó una comparación entre el periodo predominante obtenido mediante el método de razones espectrales  $H_s/V_s$  considerando registros sísmicos y el obtenido con el método de Nakamura, considerando el terremoto  $M_w=8.8$  del Maule (Astroza et al., 2012) y  $M_w=8.3$  de Illapel (Ruiz et al., 2016) ocurrido en Chile el año 2010 y 2015, respectivamente (Figura 2.13 b)). En ambos estudios los resultados muestran que el método de Nakamura es un buen método para estimar la frecuencia predominante de un depósito de suelo.

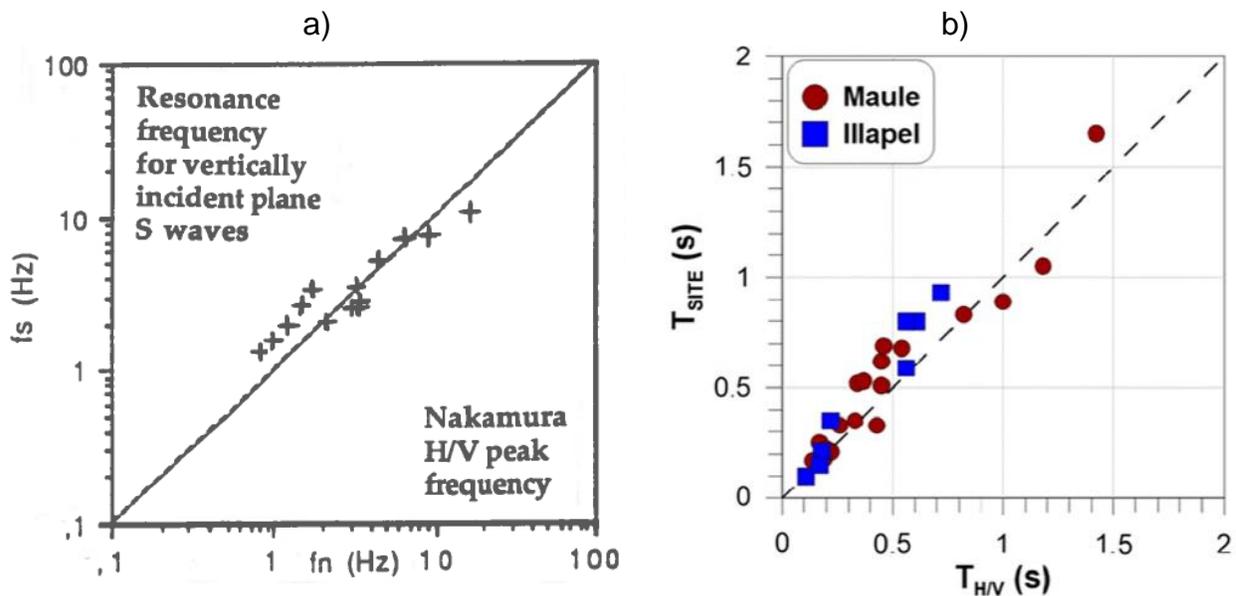


Figura 2.13: a) Comparación entre la frecuencia predominante obtenida mediante el método de Nakamura y la frecuencia fundamental utilizando la función de transferencia de una onda SH (Bard, 1995). b) Comparación entre el periodo predominante utilizando registros sísmicos y el método de Nakamura (Verdugo, 2018).

Tsuboi et al. (2001) concluyen que, al momento de realizar simulaciones numéricas o estudios teóricos, el amortiguamiento  $D$  es un factor bastante influyente en la amplificación, en especial a altas frecuencias. Sin embargo, no influye en la frecuencia fundamental. Además, muestran que la componente vertical  $V$  en superficie, considerando una ventana de onda  $S$  de los registros se encuentra libre de amplificación a frecuencias menores a 4 (Hz); por lo tanto, ellos mencionan que el método  $H_s/V_s$  puede ser confiable para frecuencias menores a 4 (Hz), ya que la razón espectral de las componentes verticales en este rango de frecuencias es generalmente menor a 2, corroborando lo mencionado por Wakamatsu & Yasui (1996) y Konno-Ohmachi (1998), quienes apoyan el método de Nakamura aplicado en bajas frecuencias.

Castro et al. (1997) muestra que, una de las hipótesis del método  $H_s/V_s$  – especialmente evidenciado en el método de Nakamura (1989) – es que propone que la componente vertical del registro sísmico contiene principalmente los efectos asociados a la fuente, y es técnicamente insensible al efecto de sitio, por lo tanto, si se realiza un cambio importante en la fuente, el modelo  $H_s/V_s$  pierde precisión. Esto es corroborado por Dimitriu et al. (1998), el cual realizó un estudio del efecto de sitio en Grecia en un ambiente sedimentario y con un perfil de velocidades normalmente dispersivo, concluyendo que la función de transferencia teórica y empírica son bastante similares, y las diferencias entre ellas las asocia a la fuente. Por otro lado, Steidl et al. (1996) menciona que el basamento rocoso se puede considerar como un sitio de referencia, por lo tanto, al hacer la razón espectral  $H_s/V_s$ , se está asumiendo que la componente horizontal en el basamento es igual a la vertical en superficie. Sin embargo, esto es válido solo si el registro de ondas S no está contaminado por ondas superficiales (Castro et al., 1997; Tsuboi et al., 2001). Rong et al. (2017) dentro de sus conclusiones menciona que el método de Nakamura, a pesar de que asume que las microvibraciones están compuestas de ondas de cuerpo, es además teóricamente inconsistente con los resultados que muestran estas, las cuales están compuestas de ondas superficiales.

Por último, otras conclusiones que se han obtenido de otros estudios son las siguientes:

- a) En general, los métodos de razones espectrales  $H_s/V_s$  entregan buenos resultados en términos de frecuencia predominante (Lachet et al., 1996; Bonilla et al., 1997; Konno & Ohmachi, 1998; Tsuboi et al., 2001; Rong et al., 2017; Verdugo, 2018) especialmente si el depósito de suelo presenta un comportamiento normalmente dispersivo (Dimitriu et al., 1998; Rong et al., 2017) incluso llega a coincidir con la función de transferencia obtenida con un modelo unidimensional de propagación de ondas de corte SH (Konno & Ohmachi, 1998; Rodríguez & Midorikawa, 2003). Bard (1995) menciona que el método de Nakamura permite estimar la frecuencia predominante de un sitio sedimentario, ya que es sencillo de realizar y a un bajo costo.
- b) Lachet & Bard (1994) realizaron una comparación entre la frecuencia obtenida mediante la razón espectral  $H_s/V_s$  utilizando una simulación de ruido y la obtenida mediante la función de transferencia de ondas SV, considerando distintos ángulos de incidencia. La conclusión a la que llegan es que, independiente de este ángulo, la frecuencia fundamental no varía.
- c) El parámetro que presenta mayor variación entre los distintos métodos existentes para la medición del efecto de sitio es la amplitud (Bonilla et al., 1997; Rong et al., 2017; Lachet et al., 1996)
- d) Un gran contraste de impedancia con respecto al sitio de referencia significa una mayor amplificación de la respuesta sísmica del depósito de suelo (Bonilla et al., 1997; Verdugo, 2018). Además, Rong et al. (2017) mencionan que la discrepancia en la forma de la función de transferencia empírica entre el afloramiento y el basamento rocoso disminuye cuando aumento la profundidad, por lo que el efecto de ondas descendentes disminuye con la profundidad. Dicho esto, mencionan que es importante considerar el efecto de ondas descendentes, especialmente cuando se tiene presencia de depósitos de suelo someros.

## 2.7 Problemas con depósitos de suelos singulares

### Suelos con Inclusión de Velocidad

Los métodos geofísicos se utilizan para la obtención de características geotécnicas de un terreno mediante el uso de métodos invasivos y no invasivos (Xia et al., 2002). Uno de los parámetros de interés sísmico es el modelo de velocidades de propagación de ondas de corte del sitio el cual, a partir de un set de datos, se obtiene mediante una inversión sísmica para así calcular curvas de dispersión de modelos propuestos, y mediante algoritmos de búsqueda encontrar aquellos modelos que tengan el mejor ajuste con las curvas de dispersión medidas (Luke et al., 2007; Shen et al., 2016; Sáez, 2016). Sin embargo, el hecho de que no exista una solución única el proceso de inversión se transforma en un problema complejo (Tarantola, 1987; Sambridge, 2001).

Dentro de todos los modelos de velocidad existentes, se observa la presencia de modelos de perfiles que poseen una inclusión de baja velocidad (LVL) o de alta velocidad (HVL), los cuales son los más comunes e irregulares en aplicaciones geofísicas superficiales. Estos estratos son distinguibles de acuerdo con el tipo de capa intermedia irregular más superficial. Un modelo LVL se refiere a aquel en que la capa intermedia irregular más superficial es un LVL. De manera análoga, un modelo HVL se refiere a aquel en que la capa intermedia irregular más superficial es un HVL (Shen et al., 2016). La Figura 2.14 presenta tres perfiles de velocidades, donde uno de ellos es normalmente dispersivo, otro posee una HVL y el otro un LVL.

Shen et al. (2016) hizo un estudio de sensibilidad de las curvas de dispersión de la velocidad de fase de ondas Rayleigh y Love, donde concluyó que los estratos HVL y LVL pueden afectar de forma drástica en ellas. Además, ambas son insensibles a los estratos que se encuentran por debajo de un HVL o LVL. Finalmente, menciona que, al incrementar el contraste de velocidades entre el estrato irregular y sus capas adyacentes, la sensibilidad se ve amplificada, por lo que los algoritmos de inversión deben ser tratados con cuidado cuando se trabaja con estos perfiles de suelo.

Xia et al. (2002) menciona que generalmente los estudios de perfiles con irregularidades se han enfocado en detectar las propiedades de los LVL y HVL, buscando principalmente la generación de modelos de velocidades de propagación de ondas de corte. Sin embargo, la influencia de estos estratos en la respuesta sísmica en la superficie del sitio ha sido escasamente estudiada (Farrugia et al., 2016) debido a los altos costos que genera la obtención de funciones de transferencia empírica entre el sitio estudiado y uno de referencia.

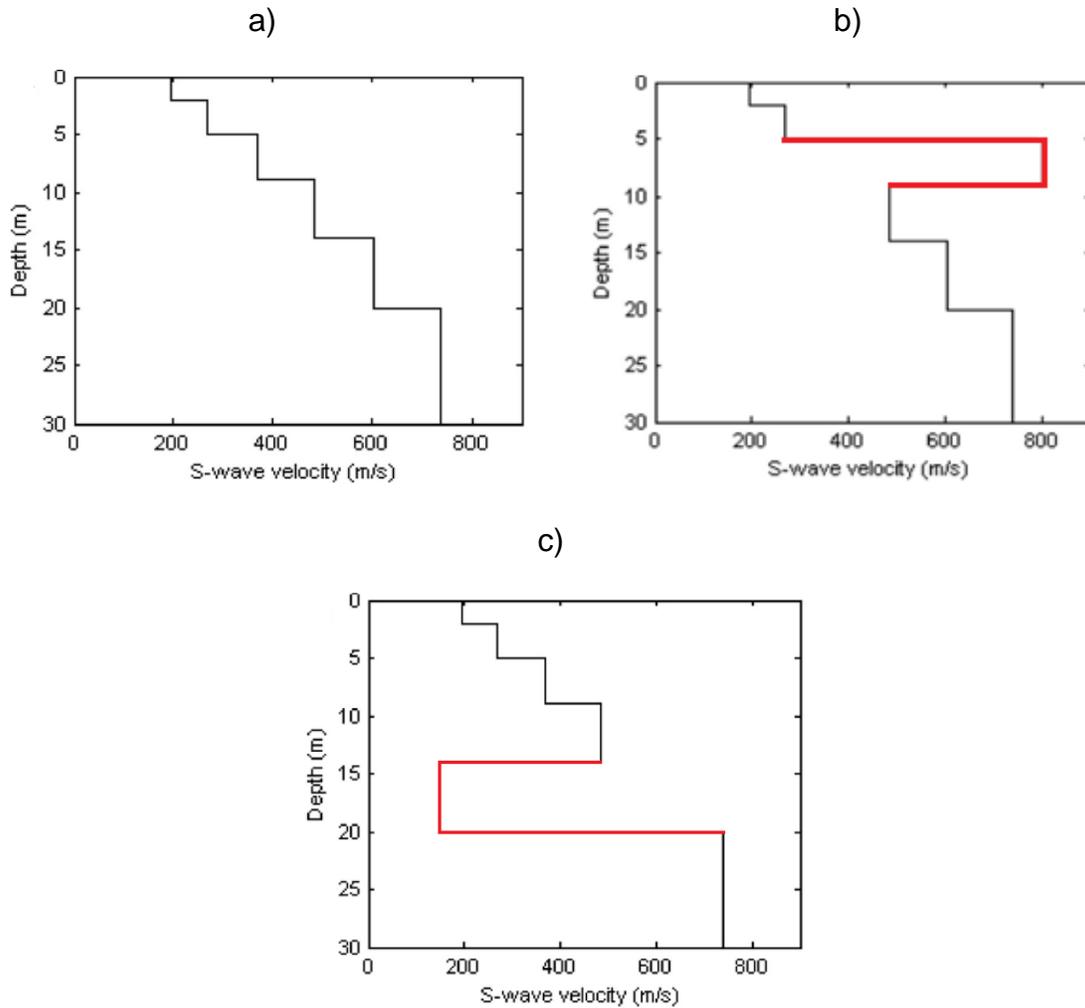


Figura 2.14: a) Perfil de velocidades normalmente dispersivo. b) Perfil de velocidades con HLV. c) Perfil de velocidades con LVL (Shen et al., 2016).

Sáez et al. (2018) observaron que en aquellos depósitos de suelo en que se presentan una inclusión de alta velocidad (HVL) existe una variación entre la frecuencia fundamental obtenida de forma teórica – utilizando el modelo de propagación de onda de cortes unidimensional de ondas SH– y la frecuencia predominante obtenida de forma empírica. El estudio fue realizado en la zona de Lolloe, en un sitio con un depósito de suelo que posee un modelo de velocidades como el que se observa en la Figura 2.15 a). Los autores variaron la velocidad de onda de corte del estrato HVL – ubicado a unos 20 metros de profundidad – y calcularon la función de transferencia teórica variando la velocidad de onda de corte de dicho estrato entre 200 m/s a 720 m/s. Los resultados muestran que la función de transferencia teórica se mantuvo casi constante (Figura 2.15.b, línea continua) con una frecuencia fundamental de 1.35 Hz, mientras que la frecuencia predominante corresponde a 2.07 Hz (línea discontinua), lo que deja en evidencia que este tipo de depósitos de suelo poseen un comportamiento que no se ajusta de manera correcta a la teoría unidimensional de propagación de ondas de corte SH.

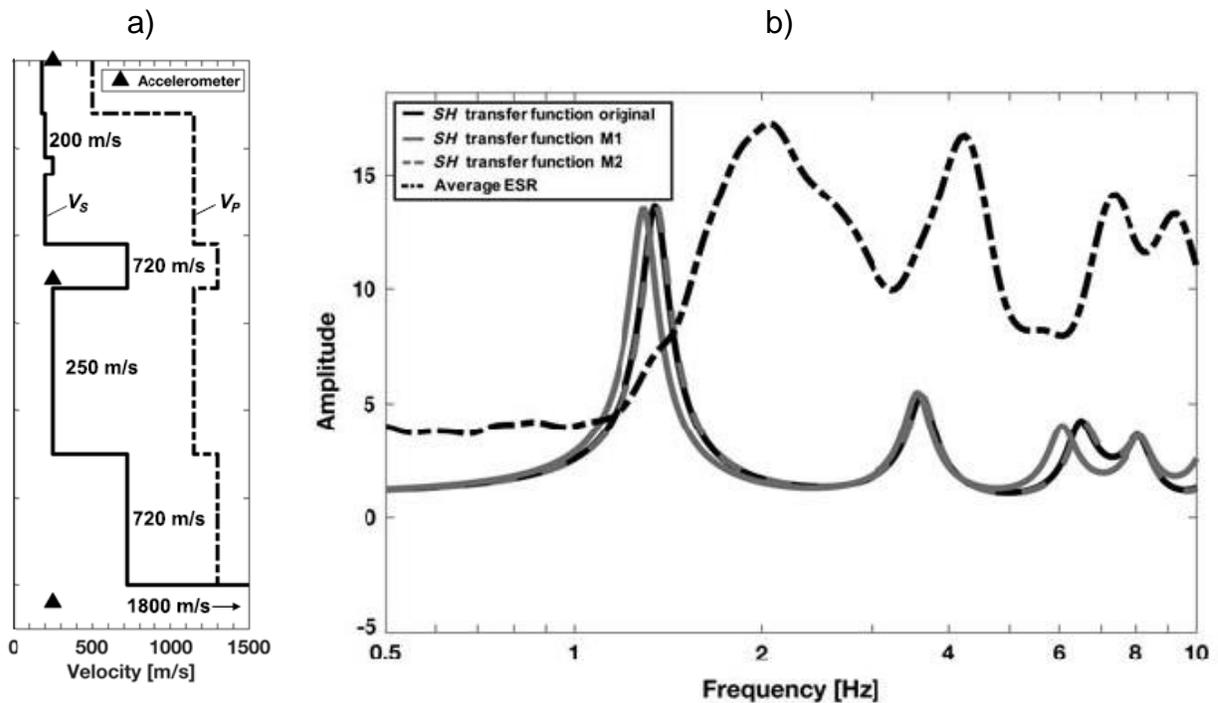


Figura 2.15: a) Perfil de velocidad del suelo estudiado en Lolloo. b) Función de transferencia empírica y teórica obtenida por Sáez et al. (2018).

Para el presente estudio, se consideró como inclusión de velocidad aquellos perfiles que cumplierse con la siguiente metodología:

- Por inspección visual, observar que el perfil no es normalmente dispersivo. Si no lo es, la posibilidad de la existencia de un LVL o HVL es mayor.
- Calcular la razón de velocidades  $V_i/V_{i+1}$ , donde  $i=1$  representa al estrato más superficial. Estos valores se grafican en profundidad.
- Se calcula el valor absoluto de la diferencia entre  $V_{i-1}/V_i$  y  $V_i/V_{i+1}$  siendo  $i$  el estrato de interés (el que puede representar un LVL o HVL). De esta forma se determina la variación con respecto al estrato superior e inferior.
- Se concluye que el estrato corresponde a una inclusión de velocidad si el valor obtenido en c) representa una variación de al menos el 30% (0.3). Si existen dos posibles inclusiones de velocidad, se opta por trabajar con aquel que presenta mayor variación.

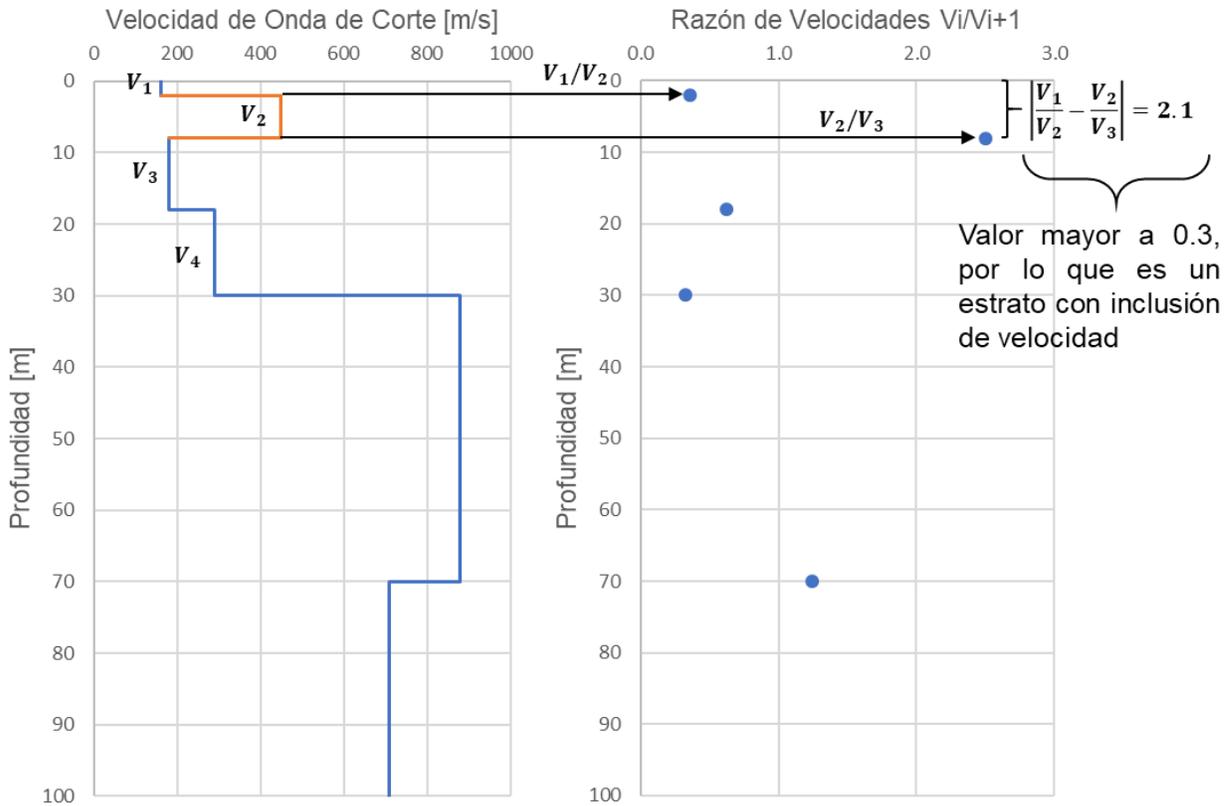


Figura 2.16: Metodología utilizada para determinar inclusión de velocidad.

### Depósitos de Suelo de Espesor Inferior a 30 metros

Régnier et al. (2013) y Ruz & Finn (2016) realizaron el cálculo de la velocidad de onda de corte promedio de los 30 metros más superficiales  $V_{s30}$  en 55 y 24 estaciones japonesas de la red KiK-net, respectivamente. Al calcular este parámetro, en los casos en que el depósito de suelo era menor a 30 metros de espesor, se consideró estratos de roca en el cálculo (considerando roca cuando  $V_s > 800$  m/s), lo cual se traduce en un aumento del  $V_{s30}$ , lo que según la norma NCh433, corresponde a un suelo más competente. Sin embargo, al clasificar el depósito de suelo según la clasificación sísmica propuesta por Verdugo et al. (2018), el periodo predominante del suelo puede disminuir en una clase la competencia del sitio. La Tabla 2.1 muestra un ejemplo de una estación con un depósito de suelo de 8 metros de espesor en la que se observa la situación descrita anteriormente.

Tabla 2.1: Estación japonesa donde se observa el problema de la actual clasificación sísmica.

Estación	$V_{s30}$ (m/s)	$f_{pred.}$ (Hz)	Clasificación según NCh433	Clasificación según Verdugo et al. (2018)
EHHM05	795	3.1	B	C

## 2.8 Norma Chilena NCh433

La normativa actual en Chile de clasificación de suelos para el diseño sísmico de edificios corresponde a la norma NCh 433.Of1996 Mod.09. La norma define los tipos de suelo en función de propiedades que posteriormente tienen una implicancia en la definición de un espectro de diseño. Luego del terremoto del Maule 2010 se introdujeron algunas modificaciones a la norma, particularmente en la clasificación de suelos, mediante el Decreto Supremo N° 61 (2011). La Tabla 2.2 muestra la clasificación que se encuentra en el DS61. El parámetro dinámico que define la clasificación sísmica corresponde a la velocidad de onda de corte promedio de los 30 metros más superficiales del sitio  $V_{s30}$ .

Tabla 2.2: Clasificación sísmica de suelos según norma NCh433 Of1996 Mod.09 considerando modificaciones del Decreto Supremo 61 (DS61, 2011).

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

**Nota:**  $V_{s30}$ : Velocidad de onda de corte promedio de los 30 metros más superficiales. **RQD**: Rock Quality Designation, según norma ASTM D 6032,  $q_u$ : Resistencia a la compresión simple del suelo.  $\epsilon_{qu}$ : Deformación unitaria desarrollada cuando se alcanza la resistencia máxima en el ensayo de compresión simple.  $N_1$ : Índice de penetración estándar normalizado por presión de confinamiento de 0,1 MPa. Aplicable suelo a suelos que clasifican como arenas.  $S_u$ : Resistencia al corte no-drenada del suelo.

Un aspecto importante que se debe mencionar es que el orden en que se encuentran los estratos influye bastante en la respuesta sísmica que puede presentarse en la superficie del suelo, y el  $V_{s30}$  no refleja estas diferencias (Verdugo, 2018). La Figura 2.17 muestra un ejemplo claro de esta situación: Considérese dos perfiles estratigráficos con  $V_{s30}$  idéntico (267 m/s) y ambos con una capa blanda de cinco metros de espesor con velocidad de onda de corte de 100 m/s. En un perfil, la capa blanda está en la superficie, mientras que en el otro se encuentra a una profundidad de 25 metros, bajo un suelo más competente. Se puede observar que cuando la capa blanda se encuentra debajo del suelo más competente ( $V_s = 400$  m/s) – prácticamente está actuando como un aislador sísmico – función de transferencia roja - mientras que

en la superficie amplifica la respuesta debido al gran contraste de impedancia (ver función de transferencia negra). Con esto, se puede observar que el  $V_{s30}$  no es un parámetro suficiente ya que no captura las características fundamentales asociadas a la respuesta sísmica del suelo (Verdugo, 2018).

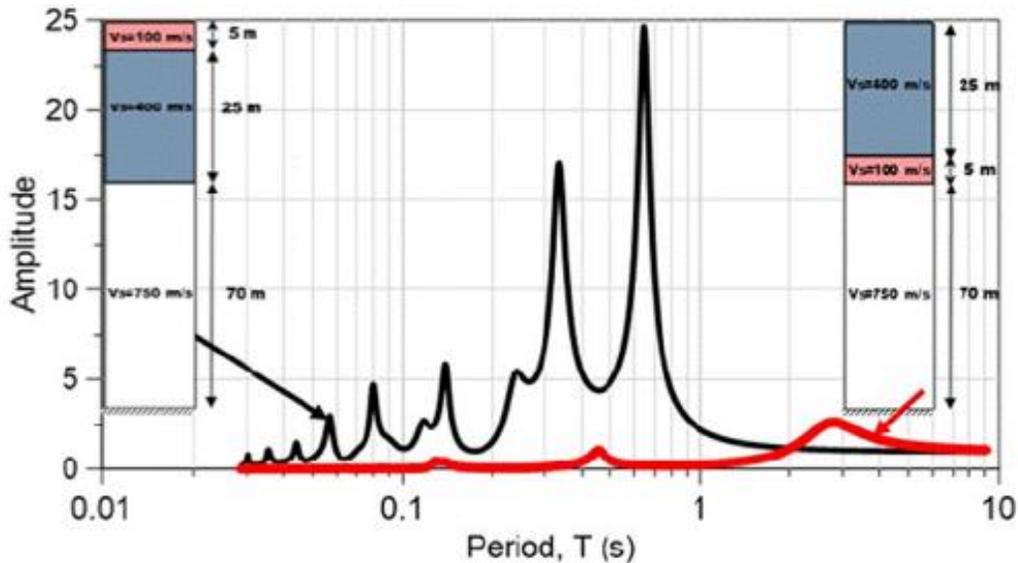


Figura 2.17: Funciones de transferencia de dos perfiles de suelo con idéntico  $V_{s30}$ , pero con diferente orden estratigráfico (Verdugo, 2018).

Cabe destacar, además, que otros autores como Luzi et al. (2011) o Castellaro & Mulargia (2014) han propuesto su propia clasificación sísmica. En el caso de estos últimos, la propuesta que ellos entregan es utilizar una matriz compuesta por la velocidad de onda de corte del estrato superior de suelo ( $V_s$ ), de la frecuencia de resonancia del subsuelo  $f_0$  y del contraste de impedancia entre la superficie y el basamento rocoso  $Z$ . Lo anterior da a entender que diversos autores dan a conocer que el uso de una velocidad de onda de corte a cierta profundidad fija – como el  $V_{s30}$  – no es un parámetro suficiente para clasificar sísmicamente el suelo, lo cual es confirmado por Farrugia et al. (2016), quienes concluyen en su estudio que el  $V_{s30}$  no es un parámetro adecuado para la clasificación sísmica.

## 2.9 Propuesta de Clasificación de Idini et al. (2016)

La propuesta hecha por Idini et al. (2016) fue realizada en el contexto de la formulación de ecuaciones de predicción de movimiento fuerte del suelo para la subducción chilena. Para el desarrollo de esta propuesta, fue necesario considerar el efecto de sitio, el cual se abordó creando una clasificación sísmica de suelos basada en el método HVSR de Nakamura (1989) para la determinación del periodo predominante, junto a su amplificación sísmica. La Tabla 2.3 muestra la clasificación propuesta por Idini et al. (2016).

Tabla 2.3: Clasificación sísmica de suelos en función del periodo predominante de vibración de HVSR (Idini et al., 2016).

Clase	Periodo Predominante $T_p^*$ (s)
<b>S<sub>I</sub></b>	No identificable: $HVSR \leq 2$
<b>S<sub>II</sub></b>	$T_p^* \leq 0.2$
<b>S<sub>III</sub></b>	$0.2 < T_p^* \leq 0.4$
<b>S<sub>IV</sub></b>	$0.4 < T_p^* \leq 0.8$
<b>S<sub>V</sub></b>	$0.8 < T_p^*$
<b>S<sub>VI</sub></b>	No identificable: Ancho de Banda o 2+ peaks

## 2.10 Propuesta de Clasificación de Verdugo et al. (2018)

Verdugo et al. (2018) propusieron su propia clasificación sísmica de suelos, la cual fue basada en los espectros de respuesta del terremoto  $M_w=8.8$  ocurrido en el Maule y al terremoto  $M_w=8.3$  de Illapel (Verdugo, 2018). En esta propuesta mencionan el uso de dos parámetros nuevos. El primero de ellos es el parámetro principal, el cual corresponde al  $V_{S30-E}$  que, a diferencia del  $V_{S30}$ , reproduce la rigidez lateral del terreno en los 30 metros superiores, capturando de mejor manera la amplificación sísmica. El segundo parámetro serviría solo como uno adicional, y corresponde al periodo predominante  $T_{H/V}$ , el cual se puede obtener mediante el método HVSR de Nakamura (1989).

Tabla 2.4: Clasificación sísmica de suelos en función del  $V_{S30-E}$  y el periodo predominante  $H_s/V_s$  (Verdugo, 2018).

Clasificación	Descripción general del suelo	$V_{S30-E}$ (m/s)	$T_{H_s/V_s}$ (s)
A	Roca	$\geq 800$	/
B	Suelo Muy Denso	$\geq 500$	$< 0.30$ (o plano)
C	Suelo Denso, Suelo Firme	$\geq 300$	$< 0.50$ (o plano)
D	Suelo Medio-Denso o Medio Firme	$\geq 180$	$< 0.80$
E	Suelos Blandos	$< 180$	/
F	Suelos Especiales	-	

## 2.11 Red Sismológica Japonesa KiK-net

Japón es uno de los países más sísmicos del mundo, lo cual ha motivado el desarrollo de diversas redes sismológicas para obtener registros sísmicos de terremotos. Dentro de estas redes, se logra identificar a las más importantes, siendo la primera de ellas la red K-NET (Kyoshin network) la cual está compuesta de sismógrafos de movimiento fuerte con más de mil estaciones de observación distribuidas cada 20 km, cubriendo de forma uniforme al país. Esta red ha sido operada por el Instituto Nacional de Investigación de Ciencias de la Tierra y Resiliencia ante Desastres (NIED) desde junio de 1996. En cada una de las estaciones K-NET, se instala un sismógrafo en la superficie del suelo con instalaciones de observación estandarizadas. La segunda red importante que existe en Japón es la red KiK-net (Kiban Kyoshin Network, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>), la cual posee 689 estaciones equipadas con un sensor en superficie y otro en profundidad, con una amplia cantidad de registros sísmicos y con

el perfil de velocidades conocido para cada estación (Kinoshita, 1998; Aoi et al., 2004; Fujiwara et al., 2004; Pousse, 2005; Cadet et al., 2012; Régnier et al., 2013), las cuales se encuentran distribuidas a lo largo de todo el país (Figura 2.18). La profundidad de estos instrumentos varía desde los 99 metros hasta los 350 metros aproximadamente, con un promedio de 222 metros (Cadet et al., 2012). La frecuencia de muestro es de 100 a 200 Hz, y la resolución es de  $10^{-3}$  cm/s<sup>2</sup> (Fujiwara et al, 2004). Los sensores corresponden a acelerómetros triaxiales, que miden en las componentes E-W (Este-Oeste), N-S (Norte-Sur) y Z (Vertical). Los acelerómetros tienen un gatillo definido a 0.2 cm/s<sup>2</sup>, y se detienen luego de la última medición de 0.1 cm/s<sup>2</sup>. El largo mínimo de cada registro es de 120 segundos (Fujiwara et al., 2004; Cadet et al., 2012).

Cadet et al. (2012) y Ghofrani et al. (2013) mencionan en su estudio sobre el efecto de sitio de la red KiK-net que no existen afloramientos rocosos en ella. Es por ello, que Cadet et al. (2012) definen un sitio de roca estándar como afloramiento rocoso – vale decir, que se pueda considerar como un sitio de referencia – aquél que cumpla con los siguientes criterios:

- 1) Velocidad de onda de corte a los 30 metros de profundidad  $V_{s30}$  mayor a 800 (m/s)
- 2) Frecuencia predominante superior a los 8 (Hz)
- 3) Amplitud de la razón espectral  $H_s/V_s$  inferior a 2.

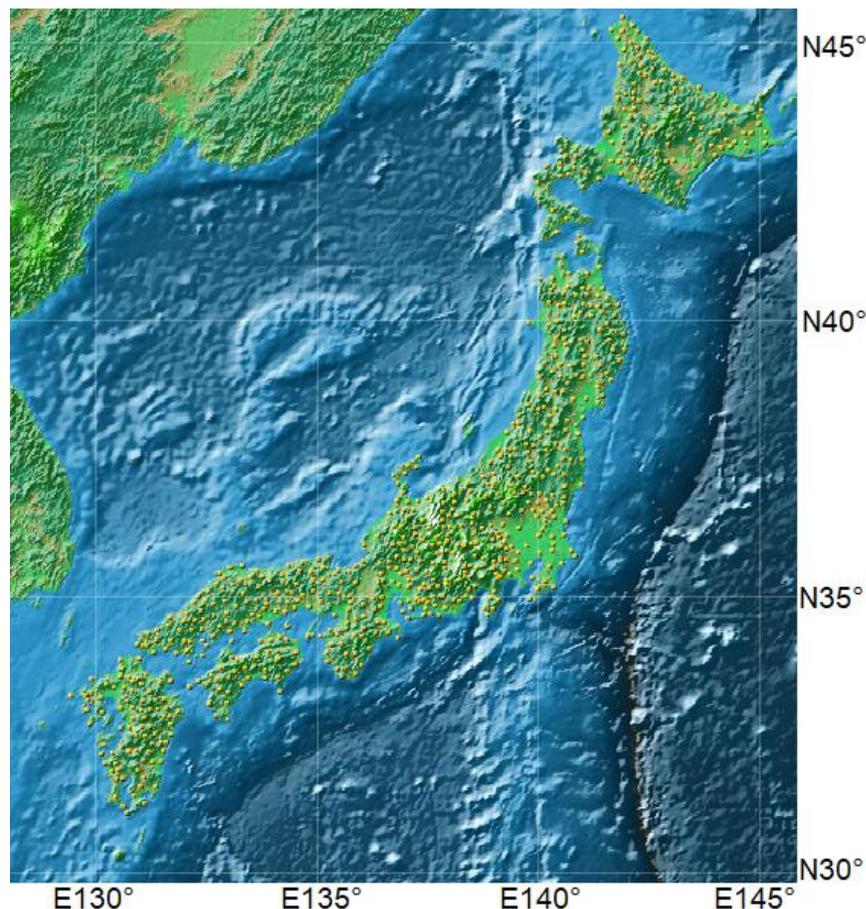


Figura 2.18: Estaciones sismológicas de la red KiK-net.

Cadet et al. (2012) mencionan que los registros que se obtiene en la roca – en profundidad, o borehole – es diferente al obtenido en superficie debido a las diferencias que existen en la litología y a los efectos de la propagación de ondas: las ondas ascendentes y descendentes interfieren de manera constructiva en la superficie libre, mientras que en profundidad estas pueden interferir de forma destructiva, dependiendo de la frecuencia y el perfil de velocidades de ondas de corte. Debido a esto, las diferencias en los registros se asocian a tres efectos principalmente:

1. Interferencia de las ondas ascendentes y descendentes que conducen a interferencias destructivas en profundidad
2. Efectos de la superficie libre (interferencia constructiva en superficie)
3. Atenuación (efecto del amortiguamiento durante la propagación, la cual es más fuerte a altas frecuencias)

Estos tres efectos son conocidos como los efectos debido a la profundidad. Dicho esto, Cadet et al. (2012) mencionan que, si se trabaja con este tipo de registros, es necesario corregir debido a los efectos mencionados previamente, lo cual modifica la amplitud de las razones espectrales. Sin embargo, dentro de los resultados que ellos obtienen se observa que la frecuencia que se puede denominar como predominante es la misma independiente de la corrección realizada.

## 2.12 Relación Entre Longitud de Onda, Frecuencia y Velocidad de Onda de Corte

La solución de la ecuación diferencial de la propagación unidimensional de ondas es de la forma:

$$u(x, t) = A \cdot e^{i(\omega t + kx)} + B \cdot e^{i(\omega t - kx)} \quad (13)$$

Kramer (1996) señala que el primer y segundo término describen ondas armónicas que se propagan en las direcciones  $x$  positiva y negativa, respectivamente. El término  $k$  corresponde al número de onda, y se define como:

$$k = \frac{\omega}{V} \quad (14)$$

Siendo  $\omega$  la frecuencia angular y  $V$  la velocidad de fase. Este número de ondas se encuentra relacionado con la longitud de onda  $\lambda$ , la cual se encuentra dada por:

$$\lambda = V \cdot T = \frac{V}{f} = \frac{2\pi}{\omega} \cdot V = \frac{2\pi}{k} \quad (15)$$

Donde  $T$  corresponde al periodo de la onda,  $f$  es la frecuencia y corresponde al inverso multiplicativo del periodo. De la relación obtenida anteriormente, se concluye que el número de onda es a la longitud de onda, como la frecuencia angular es al periodo de vibración – Figura 2.19. Es importante observar que, dada una frecuencia, la longitud de onda es proporcional a la velocidad de propagación de la onda.

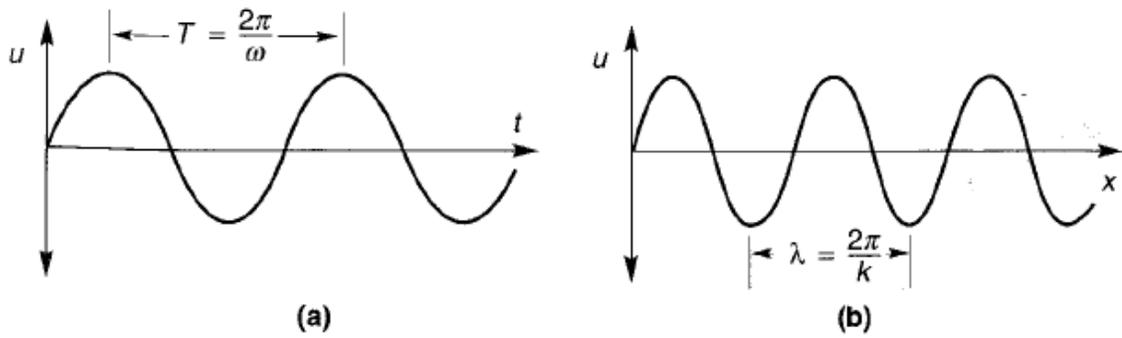


Figura 2.19: Desplazamiento de partículas  $u$  en función del (a) tiempo y (b) posición.

Para el presente estudio, las ondas sísmicas asociadas a la onda S se desplazan a una velocidad de propagación de onda de corte  $V_s$ , con una frecuencia predominante  $f$ , la cual se obtiene mediante el cálculo de las razones espectrales, y utilizando la fórmula (15) es posible obtener las longitudes de ondas  $\lambda$ .

## CAPÍTULO 3. PROCESAMIENTO DE REGISTROS SÍSMICOS

En este capítulo se describe la caracterización sísmica de los suelos. En primer lugar, se mencionan las estaciones sismológicas japonesas utilizadas en el estudio, junto a los eventos sísmicos que fueron considerados. Luego, se detalla la metodología empleada para transformar los registros de aceleración a unidades de porcentaje de [g] debido a que los acelerogramas que registran los eventos sísmicos lo hacen unidades dadas por el sensor. Posteriormente se explica la metodología empleada para realizar las razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$  con la finalidad de estimar la frecuencia predominante de vibración de los depósitos de suelo de las estaciones sismológicas usando registros sísmicos (Ghofrani et al., 2013), para posteriormente mostrar los resultados obtenidos utilizando dicha metodología. Más tarde, utilizando la teoría unidimensional de propagación de ondas de corte SH se realiza una estimación de la frecuencia fundamental del depósito de suelo para distintas profundidades, para finalmente obtener el desarrollo de las longitudes de onda de los eventos sísmicos en cada una de las estaciones sismológicas estudiadas.

### 3.1 Estaciones Sismológicas Japonesas

De las 689 estaciones que conforman la red KiK-net, se utilizaron aquellas estaciones sismológicas que cumplieran con las siguientes condiciones:

- 1) El criterio más importante es que el depósito de suelo cumpla con alguna de las condiciones que se desea analizar, es decir, que posea un depósito de espesor inferior a los 30 metros, o que posea una inclusión de alta o baja velocidad.
- 2) Perfil de velocidad de onda de corte conocido. Estos se obtuvieron de la misma página web de la red (Kiban Kyoshin Network, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>). Uno de los requerimientos que se consideró fue que se hubiesen obtenido mediante algún método geofísico como downhole o crosshole, evitando la obtención de perfiles de velocidad mediante correlaciones de ensayos SPT o CPT. En el caso de las estaciones estudiadas, los perfiles fueron obtenidos mediante ensayos downhole (Cadet et al., 2012)
- 3) La profundidad a la que se ubica el sensor debe ser conocida. Además, tanto el sensor en profundidad como en superficie debe ser un acelerómetro del tipo triaxial.
- 4) La estación sísmica debe haber registrado al menos siete eventos sísmicos, los cuales deben haber presentado un PGA superior al 0,1% g en superficie, esto con el objetivo de que los peaks sean más fáciles de observar al momento de realizar los análisis espectrales.

Dicho lo anterior, con la primera condición se obtuvo que solo 60 de las 689 estaciones cumplieron con ella. De las estaciones que quedaron, el segundo y tercer punto eran cumplidos por todas ellas. Sin embargo, con el cuarto criterio la cantidad de estaciones se redujo a un total de 19 estaciones, las cuales se presentan junto a sus principales características (código de la estación, nombre del sitio, ubicación, profundidad del sensor, frecuencia de muestreo, tipo de perfil y cantidad de registros) en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Estaciones sismológicas utilizadas en el estudio.

<b>Código Estación</b>	<b>Nombre del Sitio</b>	<b>Prefectura</b>	<b>Latitud (°)</b>	<b>Longitud (°)</b>	<b>Profundidad sensor (m)</b>	<b>Frecuencia de muestro (Hz)*</b>	<b>Tipo de perfil</b>	<b>Cantidad registros</b>
ABSH09	Shari-S	Hokkaido	43.9269	144.8071	157	100/200	LVL	12
ABSH14	Bihoro	Hokkaido	43.7228	144.1835	103	100/200	HVL	11
FKSH05	Shimogo	Fukushimaken	37.2544	139.8725	105	100	Somero y HVL	9
FKSH07	Hinoemata	Fukushimaken	37.0103	139.3755	200	100	Somero	9
FKSH09	Koriyama	Fukushimaken	37.3530	140.4264	200	100	Somero y HVL	14
FKSH17	Kawamata	Fukushimaken	37.6636	140.5974	100	100	Somero	14
FKSH19	Miyakoji	Fukushimaken	37.4703	140.7227	100	100	Somero	10
GIFH21	Minami	Gifuken	35.6665	136.9618	200	100	Somero	9
IBRH15	Gozenyama	Ibarakiken	36.5566	140.3013	107	100	Somero	14
IWTH01	Ninohe-E	Iwateken	40.2383	141.3423	200	100	Somero y HVL	14
IWTH04	Sumita	Iwateken	39.1809	141.3909	106	100	Somero	12
IWTH14	Taro	Iwateken	39.7435	141.9087	100	100	Somero	7
IWTH22	Towa	Iwateken	39.3340	141.3015	100	100	Somero	12
IWTH23	Kamaishi	Iwateken	39.2741	141.8233	103	100	Somero y HVL	15
MIEH03	Ureshino	Mieken	34.5470	136.3692	100	100/200	Somero	12
NARH03	Kawakami	Naraken	34.2925	136.0022	101	100/200	Somero	12
NGNH18	Kaida	Naganoken	35.9324	137.5950	100	100	LVL	10
NGNH35	Hotaka	Naganoken	36.3824	137.8201	105	100	Somero	12
SOYH09	Utanobori-N	Hokkaido	44.8570	142.4868	100	100	HVL	13

\*: Aquellas que presentan dos frecuencias es debido a que hay sismos antes del año 2005 que fueron registrados con sensores con una frecuencia de muestro mayor. La cantidad de registros corresponde al número de registros utilizados en este estudio.

La Figura 3.1 muestra la ubicación de las estaciones sismológicas.

Se buscaron estaciones en otras partes del mundo – como Turquía, Italia, Estados Unidos y Chile – pero no se encontraron estaciones que cumplieran con los cuatro puntos anteriores y que permitiesen el uso de los datos registrados en dichas estaciones – exceptuando Llolleo. Es por esto, que solo se trabajará con las estaciones ya mencionadas.

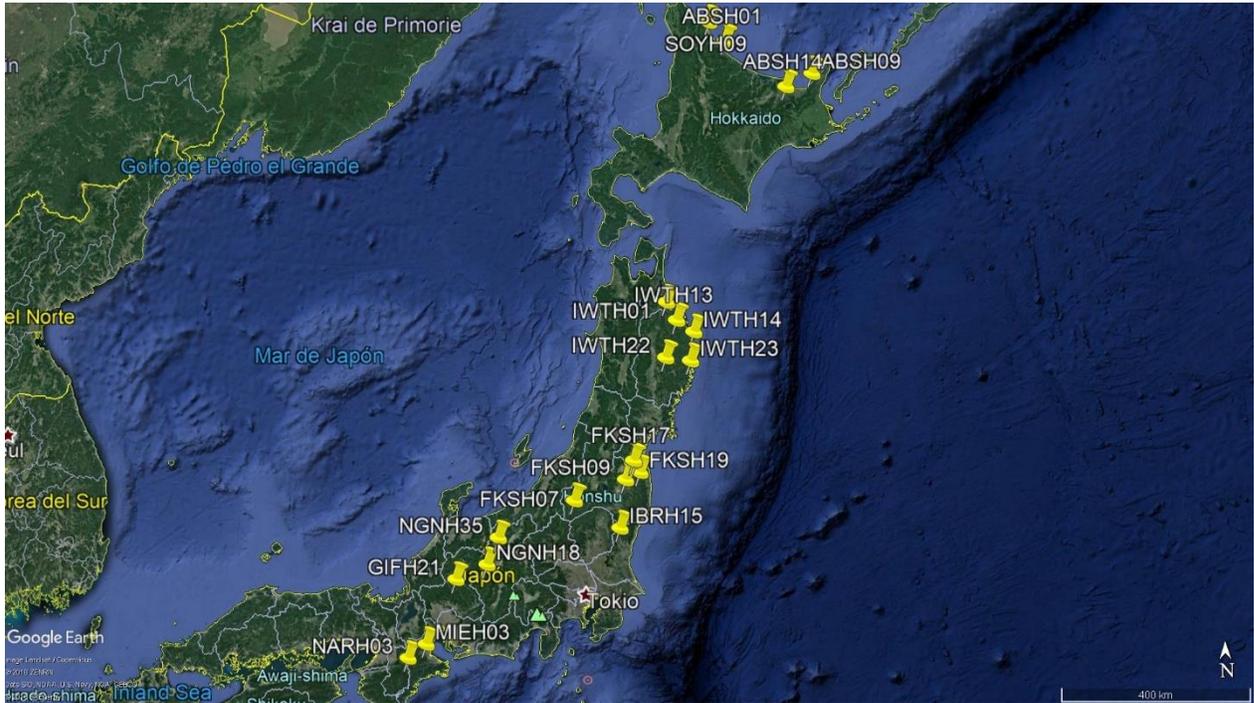


Figura 3.1: Ubicación de las estaciones sismológicas japonesas de la red KiK-NET utilizadas en el presente estudio.

### 3.2 Estación de Llolleo

Además de las estaciones sismológicas japonesas, se analizó el arreglo instalado en Llolleo por Verdugo (2009) el cual se reestudió por Sáez et al. (2018). El arreglo sísmico instalado en Llolleo se encuentra en una zona bastante plana cerca de la costa del Pacífico, al oeste de la ciudad de Llolleo, aproximadamente a 91 km al oeste de Santiago – Figura 3.2. El arreglo sísmico consta de tres acelerómetros del tipo triaxial, con dos piezómetros de alta respuesta y un GPS. El primer acelerómetro fue instalado en superficie, el segundo a 24 metros de profundidad, mientras que el tercero a 62 metros, donde se encontraría el basamento rocoso. Las componentes horizontales de los acelerómetros se alinearon con una brújula electrónica en las direcciones Norte-Sur (N-S) y Este-Oeste (E-W).

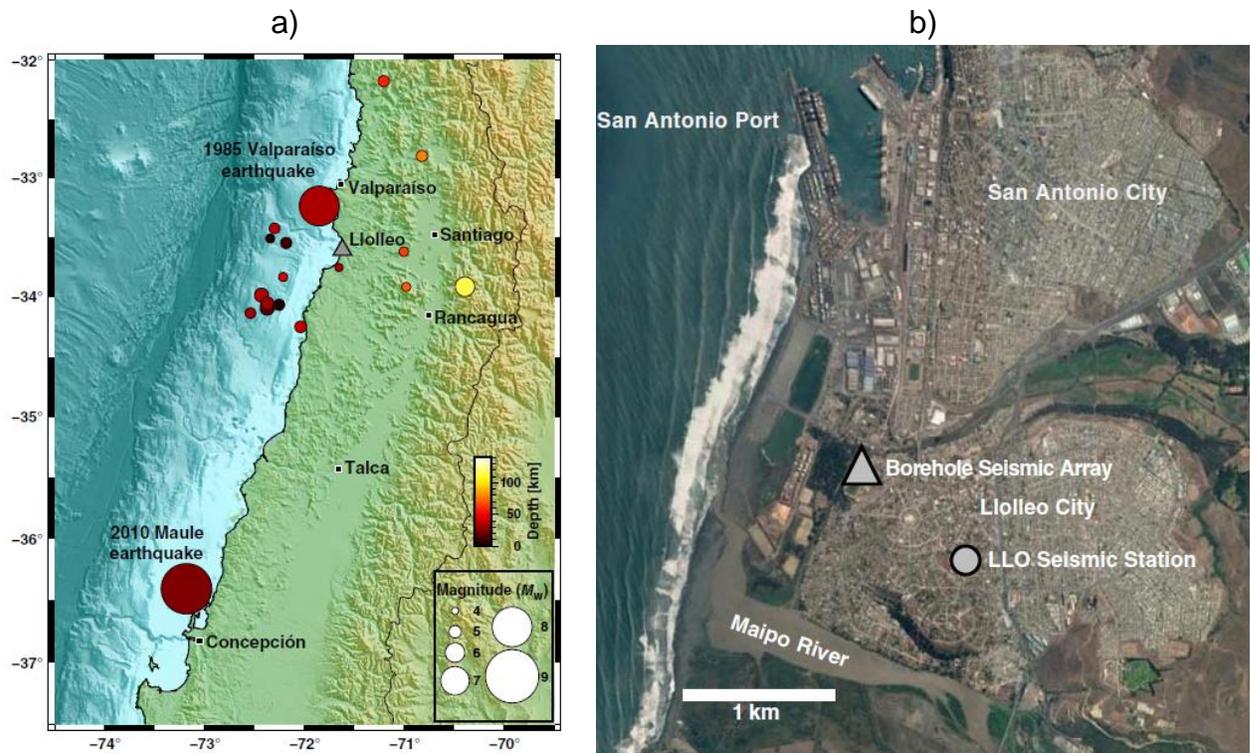


Figura 3.2: a) Distribución de magnitudes de distintos terremotos ocurridos en Valparaíso, Chile. b) Ubicación de la estación de Lloleco (Sáez et al., 2018).

Las condiciones del suelo en el sitio fueron investigadas utilizando pozos para instalar los sensores. Se realizaron ensayos de penetración estándar (SPT) para evaluar las propiedades geotécnicas y las muestras “no perturbadas” se recuperaron por medio de tubos Shelby para la realización de ensayos de laboratorio. Para obtener el perfil de velocidades de ondas de corte a un bajo nivel de deformación, se realizaron ensayos downhole cada cinco metros, hasta el basamento rocoso. Además, se efectuó un ensayo crosshole a una profundidad de 20 metros, obteniendo valores muy similares a los que se obtuvieron con el ensayo previo. La Figura 3.3 entrega el perfil estratigráfico, junto a los resultados del ensayo SPT, el contenido de finos, el límite líquido (LL), límite plástico (LP), contenido de humedad ( $\omega$ ) y el modelo de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) y compresionales ( $V_p$ ) obtenidos con las pruebas realizadas en el lugar (Verdugo, 2009).

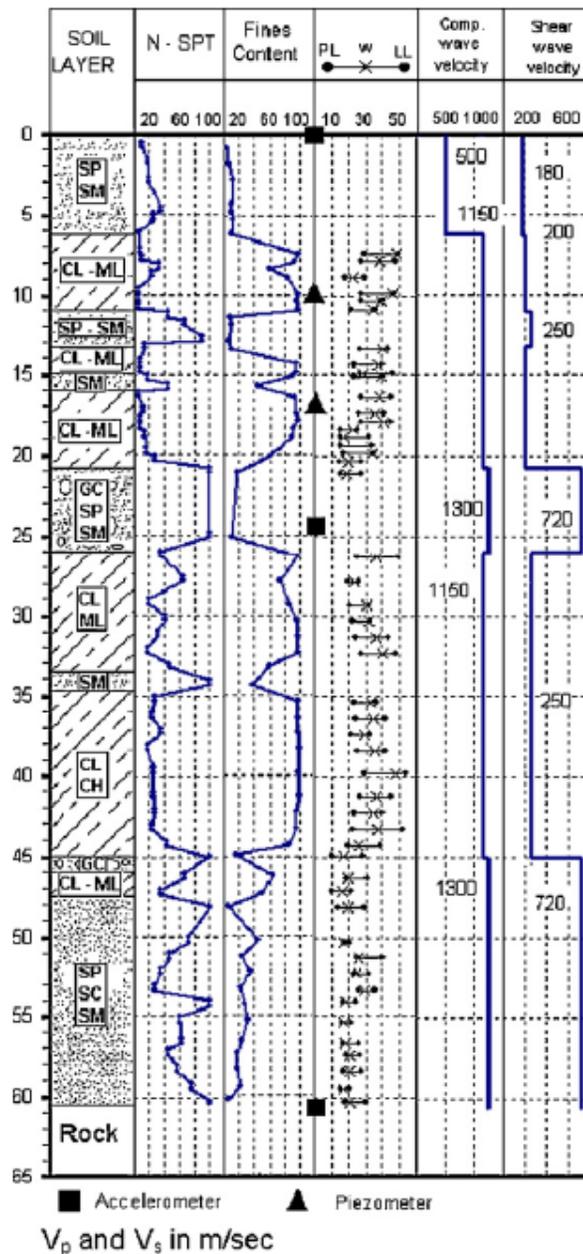


Figura 3.3: Propiedades geotécnicas del sitio en Lolloe (Verdugo, 2009).

### 3.3 Eventos Sísmicos Considerados

En el estudio se consideraron diversos eventos sísmicos, según la localización de las estaciones sismológicas. Los sismos utilizados fueron registrados por la red KiK-NET, con magnitud de momento  $M_w \geq 5.0$ , con un  $PGA \geq 0.1\%$  g, ocurridos entre los años 2000 y mediados del año 2018 (Figura 3.4).

La información completa de los sismos utilizados en cada estación – duración del registro, ubicación, profundidad y fecha – se encuentra en el ANEXO A.

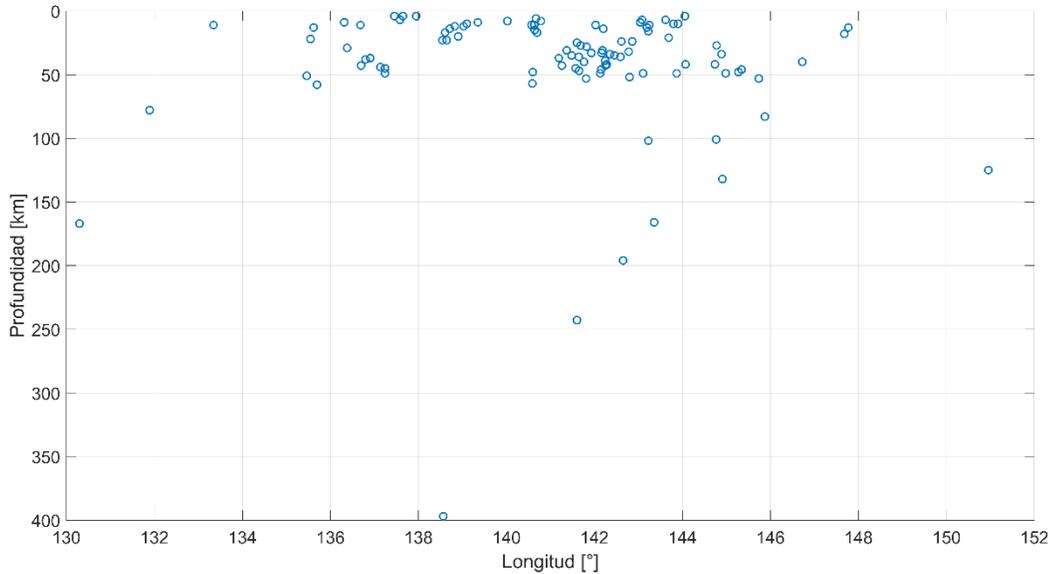


Figura 3.4: Distribución en profundidad de los eventos sísmicos utilizados en el estudio.

### 3.4 Cálculo de las Razones Espectrales $H_s/V_s$ y $H_s/H_b$

Con los registros sísmicos de las estaciones, se calculan las razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_b$  utilizando la siguiente metodología:

- 1) Se aplica el factor de escala para obtener los registros en unidades de (gal). Estos factores dependen del sensor y se informan en el reporte del registro de cada evento sísmico en la página web de la red KiK-net (<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>). Una vez que los registros se tienen en unidades de aceleración, se obtienen los acelerogramas de las componentes N-S, E-W y U-D, aplicándole la conversión de unidades de tal manera que queden en unidades de (g). Es importante aclarar que en este estudio se utilizaron los registros completos, lo cual es equivalente a considerar la ventana temporal correspondientes a la parte fuerte de los registros sísmicos.
- 2) Se filtran los registros utilizando un filtro Butterworth de orden 4 del tipo pasa alto con una frecuencia esquina de 0.01 (Hz).
- 3) Se calculan los espectros para cada componente aplicando el método  $\beta$  de Newmark (1959). Para ello, se asume un modelo de un grado de libertad con un amortiguamiento  $\beta$  del 5% del amortiguamiento crítico con un comportamiento elástico-lineal en la respuesta tensión deformación.
- 4) Se combinan los espectros de respuesta de las componentes horizontales EW y NS en uno solo, mediante la fórmula propuesta por Régnier et al. (2013):

$$H = \frac{\sqrt{NS^2 + EW^2}}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

Donde H sería el espectro de respuesta horizontal. Esta relación se aplica tanto para los registros en superficie como en profundidad.

- 5) Se realiza el cociente espectral entre la componente horizontal y vertical en superficie, obteniendo las razones espectrales  $H_s/V_s$ . Posteriormente se realiza el cociente espectral entre las componentes horizontales en superficie y en la base, obteniendo las razones espectrales  $H_s/H_B$ .

$$HVSR = \frac{H_s}{V_s} = \frac{H_{superficie}}{V_{superficie}} \quad (17)$$

$$HHSR = \frac{H_s}{H_B} = \frac{H_{superficie}}{H_{base}} \quad (18)$$

Los cinco pasos ya mencionados se aplican a los diferentes registros sísmicos analizados en cada estación.

- 6) Una vez que se obtuvieron las curvas espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$  mediante los registros sísmicos en cada estación, se procedió a calcular las curvas promedio y desviación estándar en todas las estaciones estudiadas. Las curvas promedio se calcularon como la media aritmética simple de la amplitud, mientras que las curvas de desviación estándar corresponden a la raíz cuadrada de la varianza de esta.

### 3.5 Determinación de la Función de Transferencia Teórica

Se determinó la función de transferencia teórica utilizando el modelo unidimensional de propagación de ondas SH explicada en la sección 2.1 considerando dos casos distintos. El primero de ellos corresponde a la función de transferencia que se obtiene al considerar el material que se encuentra entre los dos sensores, es decir, desde la superficie hasta donde se encuentra el sensor en profundidad, mientras que el segundo caso es considerando solo el depósito de suelo, es decir, desde la superficie hasta donde se encuentra la roca más superficial. Para ello, se consideró como roca a aquel estrato en que la velocidad de onda de corte era superior a los 800 m/s (Cadet et al., 2012; Ruz & Finn, 2016). Cabe destacar que, para suelos someros, el cálculo de funciones de transferencia tomando solo el depósito de suelo considera a lo más 30 metros de profundidad.

Dentro de los parámetros necesarios para el cálculo de estas funciones se encuentra el amortiguamiento, el cual se consideró de un 10% para todos los estratos, y la densidad, para la cual se asumieron los valores propuestos por Cadet et al. (2012) en su estudio de la red KiK-net:

$$\rho = \begin{cases} 1.7 \frac{g}{cm^3} & \text{para } V_s(z) \leq 180 \text{ m/s} \\ 2.0 \frac{g}{cm^3} & \text{para } 180 < V_s(z) \leq 360 \text{ m/s} \\ 2.2 \frac{g}{cm^3} & \text{para } 360 < V_s(z) \leq 1500 \text{ m/s} \\ 2.5 \frac{g}{cm^3} & \text{para } V_s(z) > 1500 \text{ m/s} \end{cases} \quad (19)$$

### 3.6 Variación de la Frecuencia Fundamental en Profundidad

Una vez que se obtuvieron las funciones de amplificación, se realiza un análisis de la variación de la frecuencia fundamental -considerando el modelo unidimensional de propagación de ondas SH -del depósito estudiado en profundidad. Para ello, se calculó la función de transferencia considerando distintas profundidades de referencia, comenzando con una profundidad de dos metros y luego con una variación de dos metros hasta los diez metros, y posteriormente variando cada diez metros hasta llegar a la profundidad en donde se ubica el sensor (Figura 3.5).

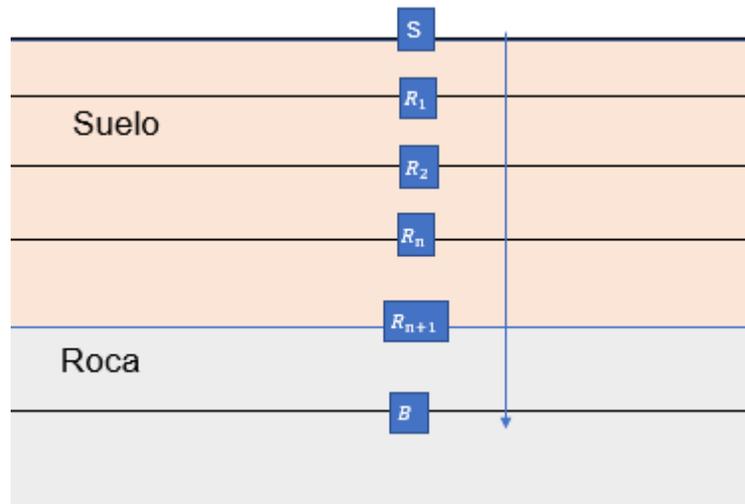


Figura 3.5: Representación de la variación del sitio de referencia para la obtención de la función de transferencia teórica en profundidad. S representa el sensor en superficie, mientras que B el sensor en profundidad. R representa el lugar de referencia, el cual fue ubicado cada 2 metros en los primeros 10 metros de profundidad, para luego ir ubicándolo cada 10 metros, hasta llegar a la ubicación del sensor en profundidad B.

### 3.7 Desarrollo de la Longitud de Onda en los Perfiles

De forma paralela, se calculó la longitud de onda que se desarrolla en cada estrato del depósito, para cada una de las estaciones estudiadas. Para ello, se utilizó la fórmula (15), considerando como V la velocidad de onda de corte  $V_s$ , y f como la frecuencia predominante obtenida mediante la razón espectral  $H_s/H_B$ .

Estos valores fueron normalizados por su estrato correspondiente, por lo cual se obtuvieron valores de  $\lambda/H$  para cada estrato en cada depósito estudiado. Además, se hizo este mismo procedimiento para una frecuencia igual al 80% de la frecuencia

predominante (Frecuencia mínima), y para otra igual al 120% de la frecuencia predominante (frecuencia máxima). Estas frecuencias se adjuntan en la Tabla 3.2.

La frecuencia predominante, frecuencia mínima y máxima se utilizan en todos los estratos del perfil, ya que se considera que el depósito completo comienza a vibrar a esa frecuencia.

Tabla 3.2: Frecuencia predominante, mínima (80% de la frecuencia predominante) y máxima (120% de la frecuencia predominante) utilizadas para el cálculo de la longitud de onda.

Estación	Frecuencia mín. (Hz)	Frecuencia predominante (Hz)	Frecuencia máx. (Hz)
ABSH09	5.3	6.6	7.9
ABSH14	8.0	10.0	12.0
FKSH05	3.7	4.6	5.5
FKSH07	10.0	12.5	15.0
FKSH09	11.3	14.1	16.9
FKSH17	3.3	4.1	4.9
FKSH19	2.8	3.5	4.2
GIFH21	9.4	11.8	14.2
IBRH15	7.4	9.3	11.2
IWTH01	3.8	4.7	5.6
IWTH04	2.7	3.4	4.1
IWTH14	8.5	10.6	12.7
IWTH22	6.2	7.7	9.2
IWTH23	12.9	16.1	19.3
MIEH03	8.2	10.2	12.2
NARH03	4.6	5.8	7.0
NGNH18	4.2	5.2	6.2
NGNH35	8.9	11.1	13.3
SOYH09	2.2	2.7	3.2
Llolleo	1.7	2.1	2.5

### 3.8 Dispersión de la Frecuencia y su Relación con la Amplitud

Se realizó un análisis de la dispersión de la frecuencia, y cómo este se puede relacionar con las amplitudes obtenidas. Para ello, se aplicó la siguiente metodología:

- 1) Se graficó la razón espectral  $H_s/V_s$  o  $H_B/V_B$  de cada evento sísmico en función de la frecuencia. Luego, se calculó una curva promedio, la cual tendrá una amplitud espectral promedio  $\bar{A}$  y una frecuencia predominante promedio  $\bar{f}_0$ . (Figura 3.6.a)).
- 2) Se obtiene la desviación estándar  $\sigma$  de las frecuencias predominantes obtenidas por cada evento sísmico, considerando como promedio la frecuencia predominante de la curva promedio  $\bar{f}_0$ . (Figura 3.6.b)).

3) Se realiza un gráfico de la desviación estándar  $\sigma$  versus la amplitud promedio  $\bar{A}$  asociada al cociente espectral  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . (Figura 3.6.c)).

Se espera que, si la amplitud promedio es mayor, la desviación estándar sea más baja ya que los datos se encuentran más juntos entre sí. Por otro lado, si la desviación estándar es mayor, se espera una amplitud promedio menor ya que la dispersión de los datos es mayor. El punto tres de la metodología recién explicada sirve para corroborar si se cumple lo esperado o no.

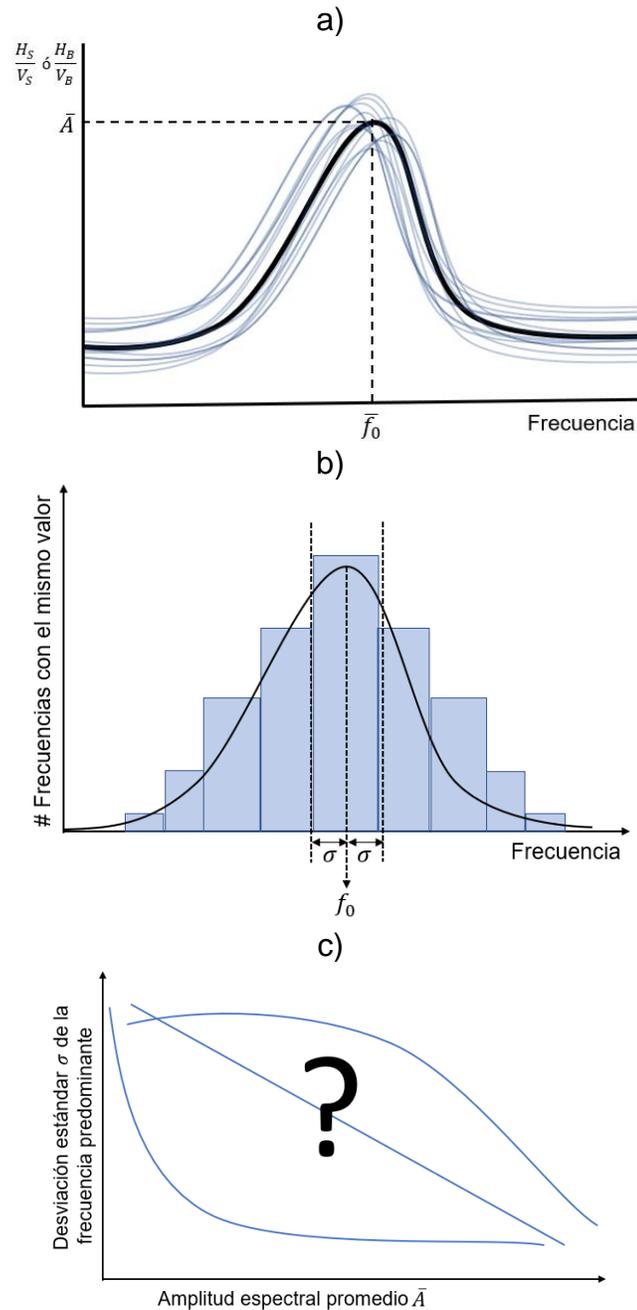


Figura 3.6: Metodología aplicada para el análisis de la dispersión de la frecuencia. a) Gráfico de la razón espectral  $v/s$  la frecuencia, obteniéndose una amplitud promedio  $\bar{A}$  y una frecuencia predominante promedio  $\bar{f}_0$ . b) Obtención de la desviación estándar  $\bar{\sigma}$  de la frecuencia predominante. c) Gráfico de la desviación estándar  $v/s$  amplitud espectral promedio.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.1 Resultados de Razones Espectrales $H_S/H_B$ , $H_S/V_S$ y FT Teórica

A continuación, se adjuntan los resultados obtenidos al aplicar la metodología explicada en la sección 3.4 y 3.5. La Figura 4.1 a la Figura 4.19 a) muestra las razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$  (líneas negra y gris continuas, respectivamente) junto a sus desviaciones estándar (línea negra y gris segmentadas, respectivamente), además de las funciones de transferencia teóricas considerando el depósito que hay entre el sensor en la superficie y en la base (línea azul) y solo el depósito de suelo (línea naranja). La Figura 4.1 a la Figura 4.19 b) corresponde al gráfico de la frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus frecuencia predominante  $H_S/H_B$ . Los círculos azules representan los diferentes eventos sísmicos considerados; el círculo rojo representa la frecuencia predominante promedio.

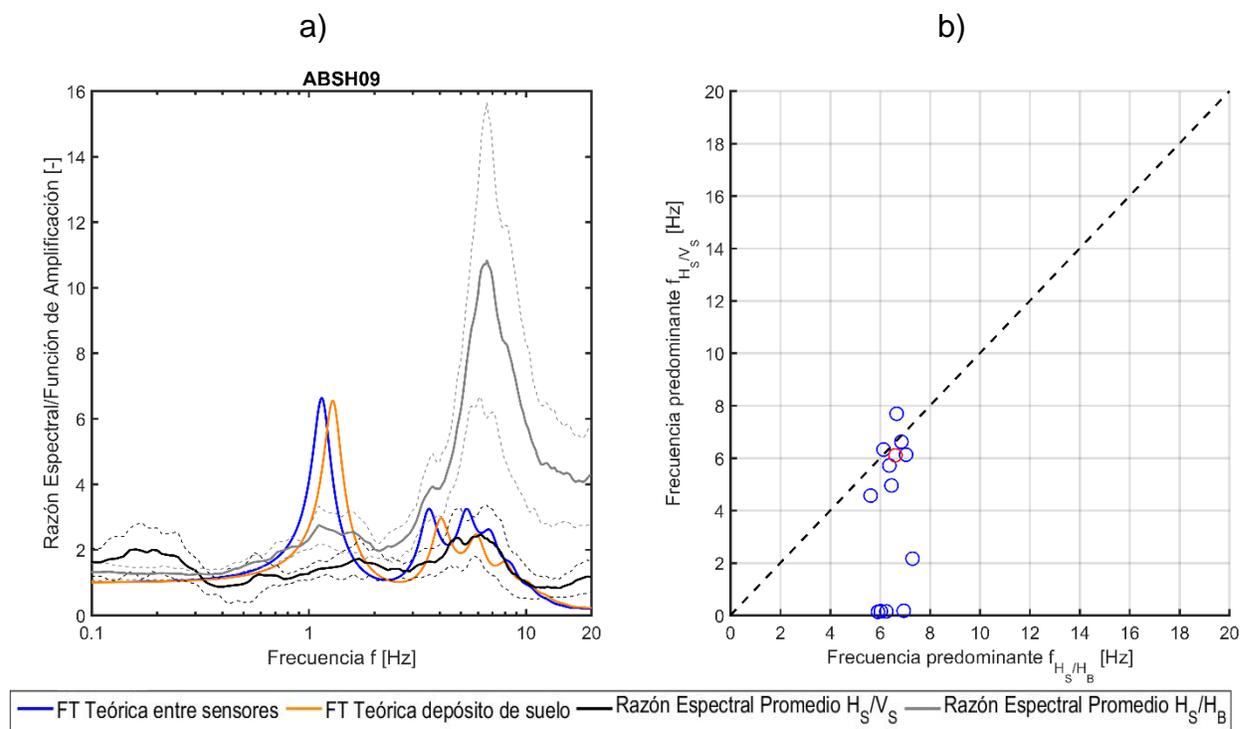


Figura 4.1: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus la frecuencia predominante  $H_S/H_B$  en estación ABSH09.

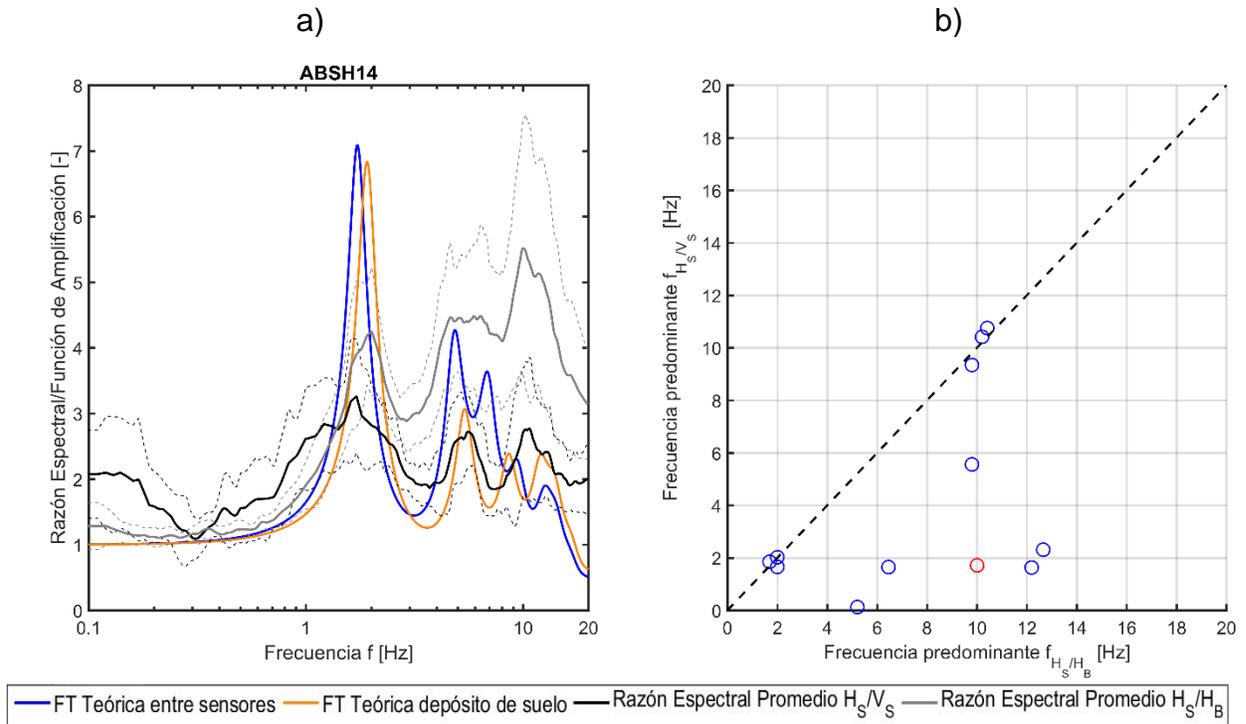


Figura 4.2: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación ABSH14.

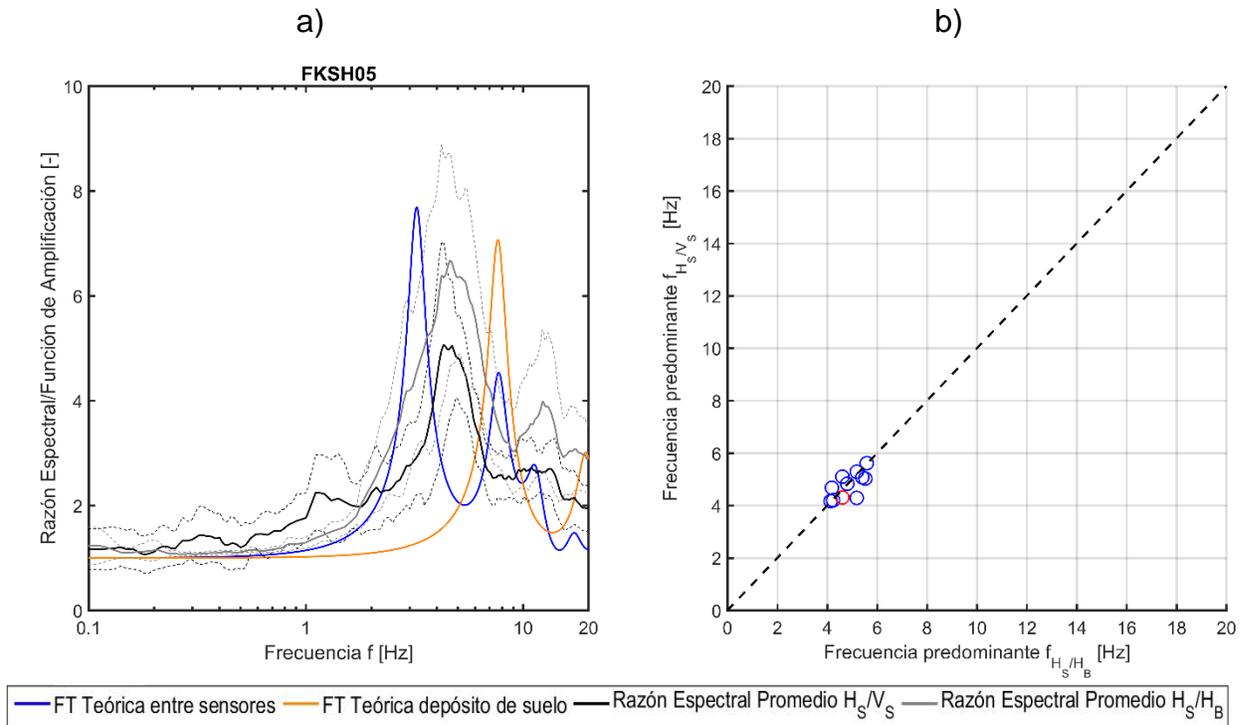


Figura 4.3: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación FKSH05.

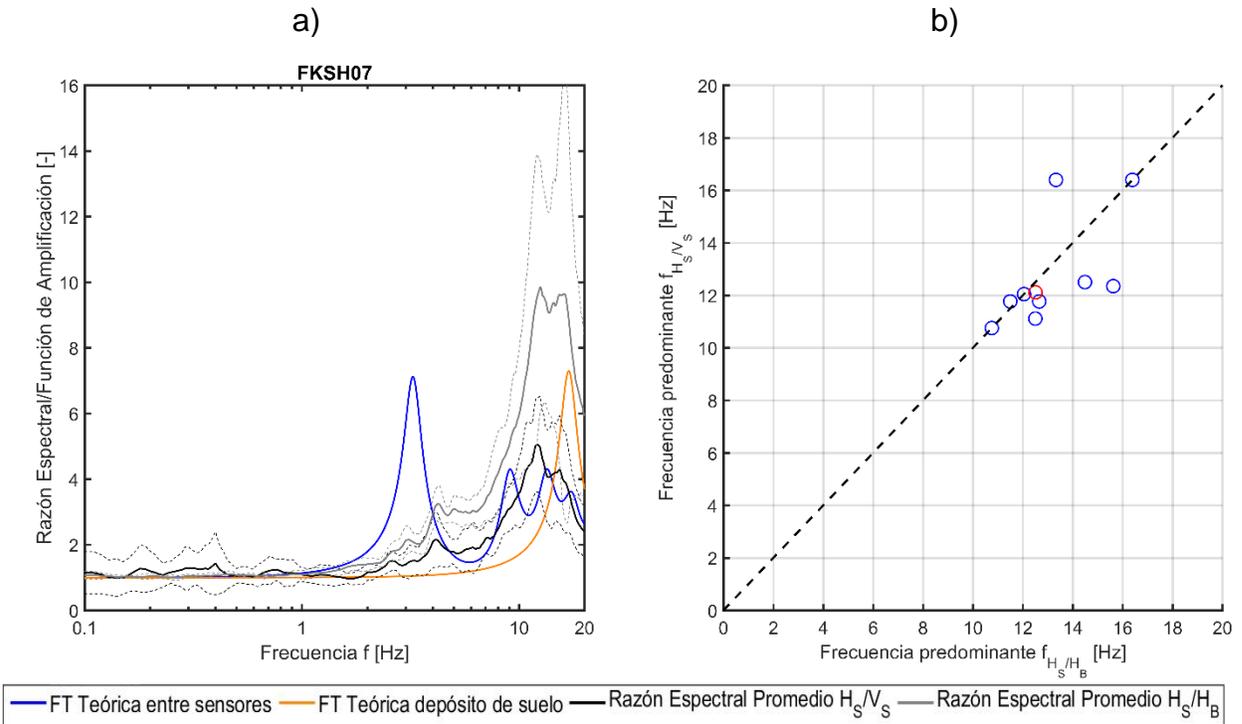


Figura 4.4: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación FKSH07.

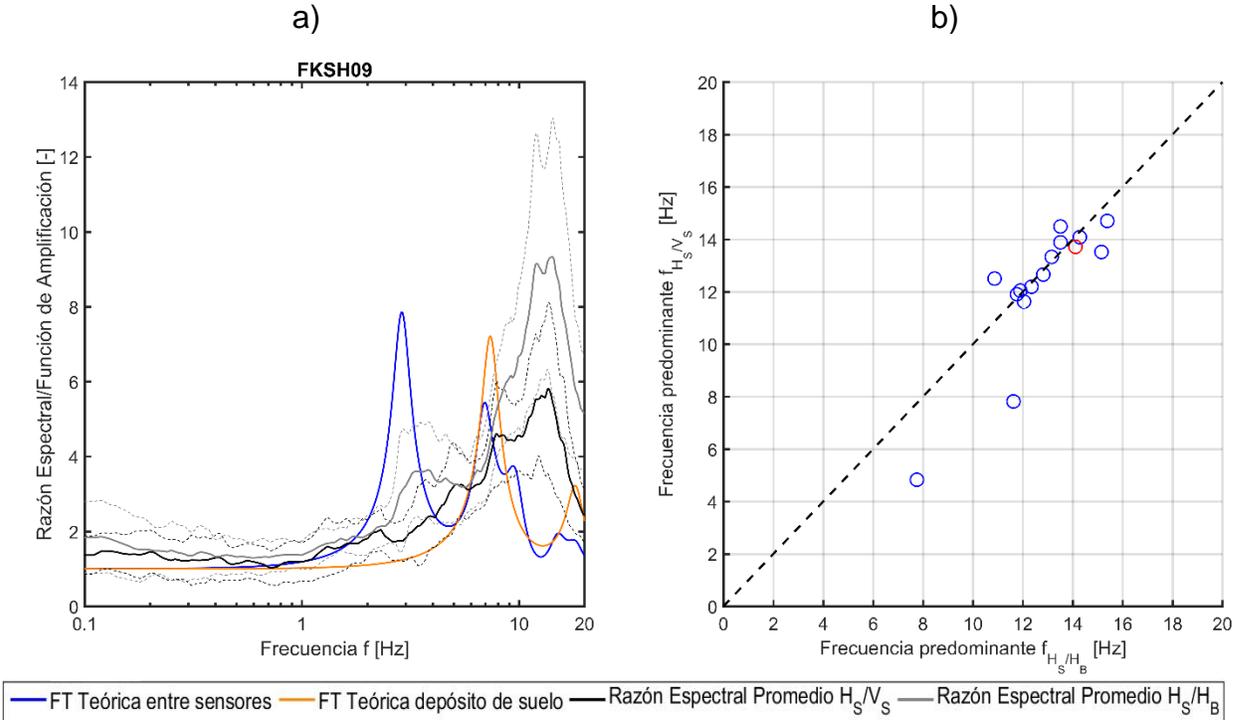


Figura 4.5: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación FKSH09.

a)

b)

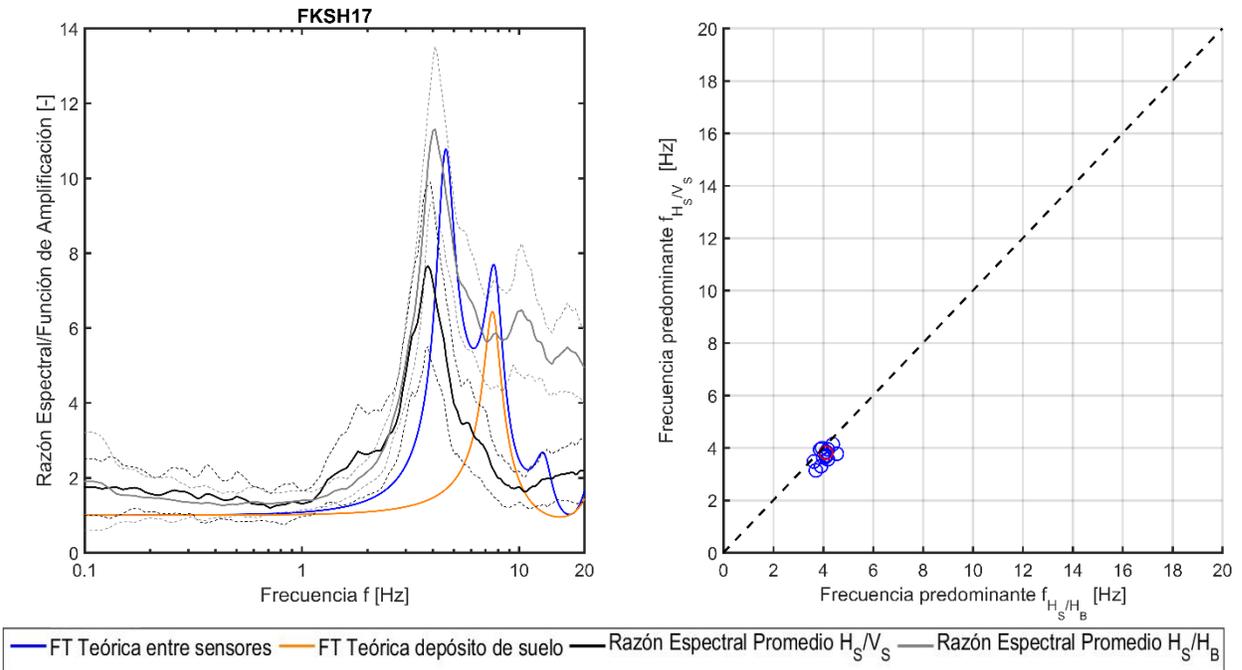


Figura 4.6: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus la frecuencia predominante  $H_S/H_B$  en estación FKSH17.

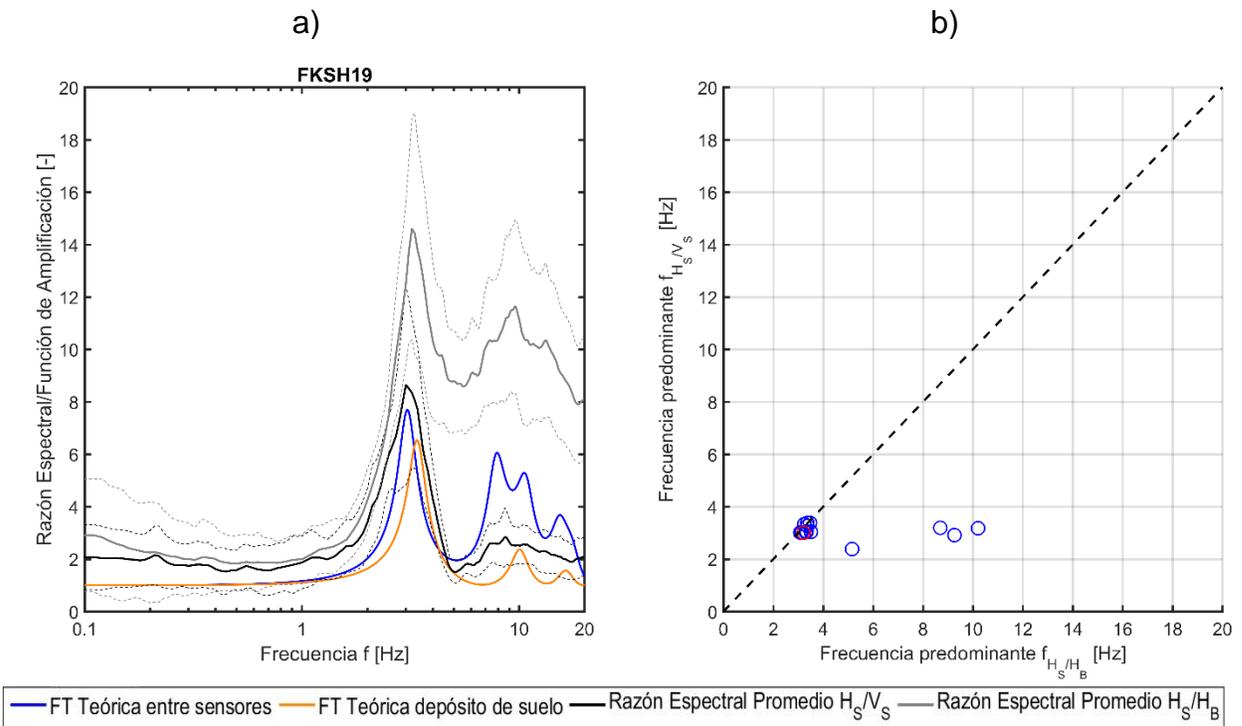


Figura 4.7: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_S/V_S$  y  $H_S/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_S/V_S$  versus la frecuencia predominante  $H_S/H_B$  en estación FKSH19.

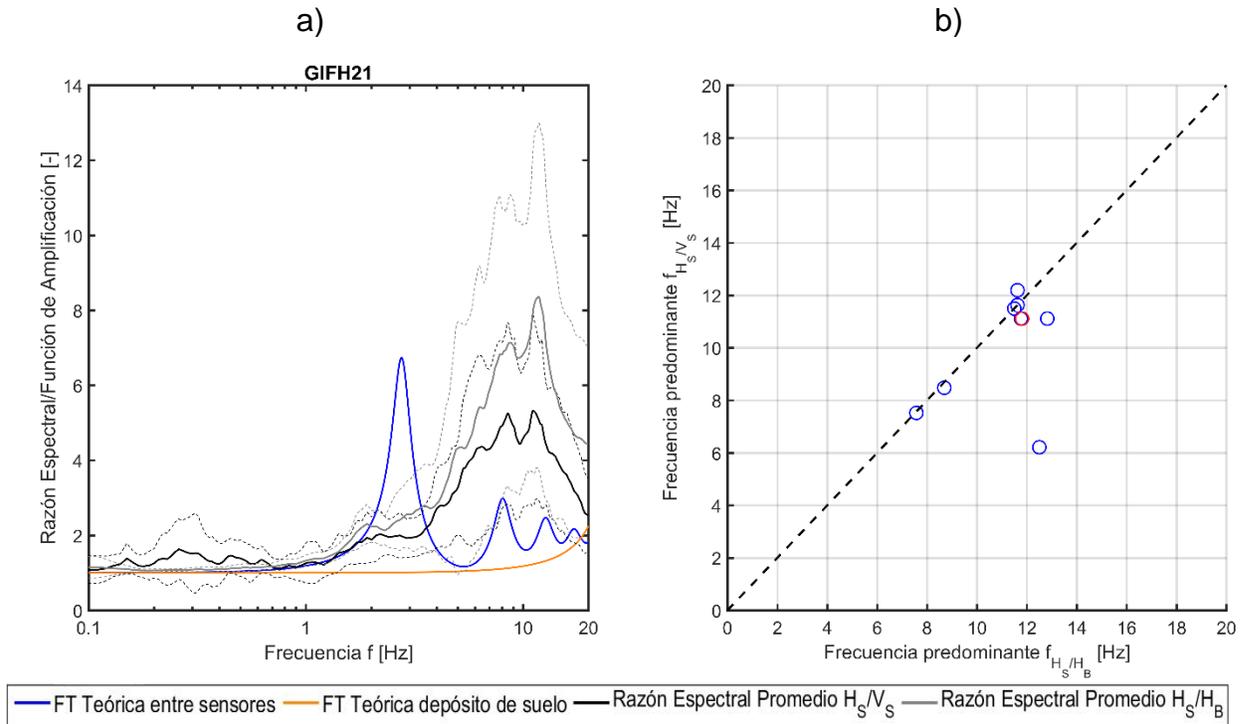


Figura 4.8: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación GIFH21.

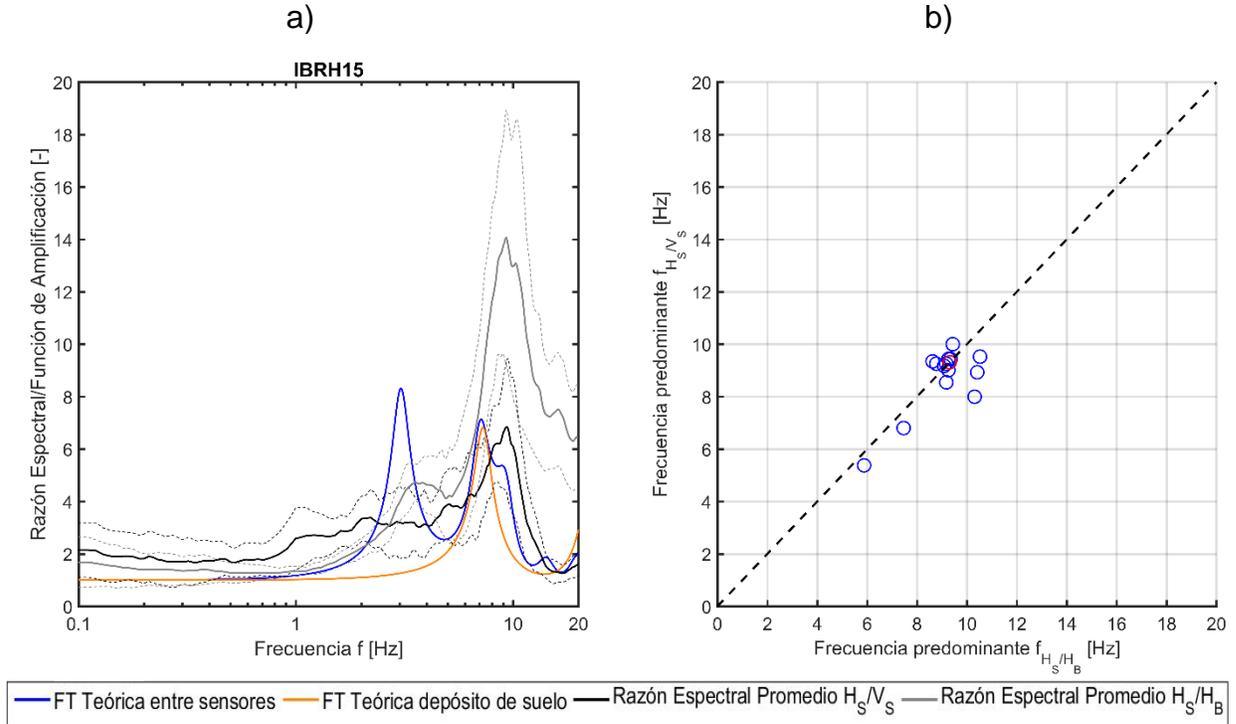


Figura 4.9: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación IBRH15.

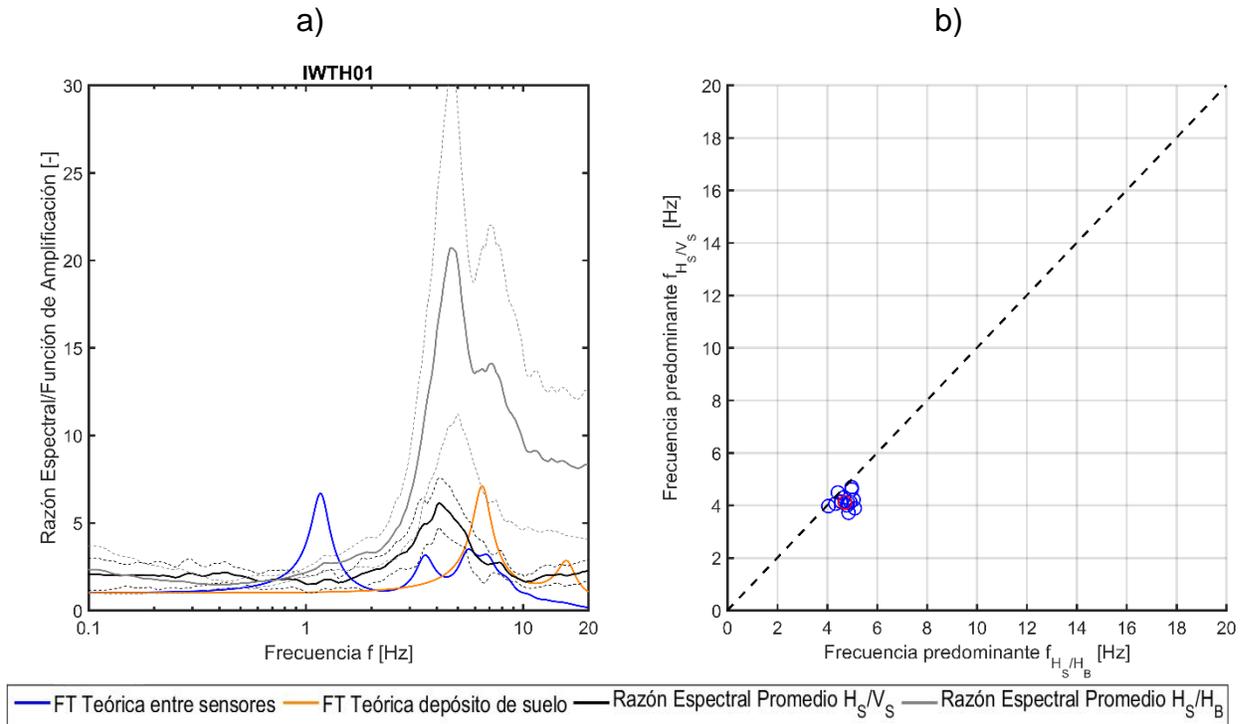


Figura 4.10: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación IWTH01.

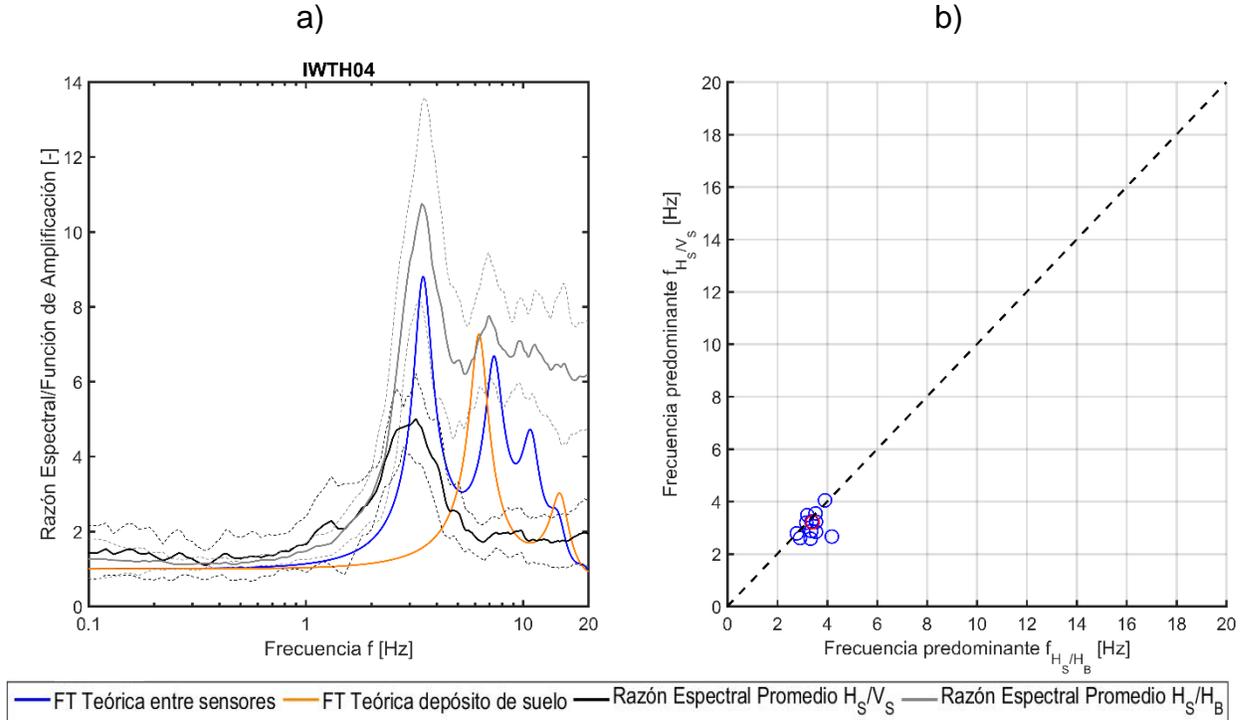


Figura 4.11: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación IWTH04.

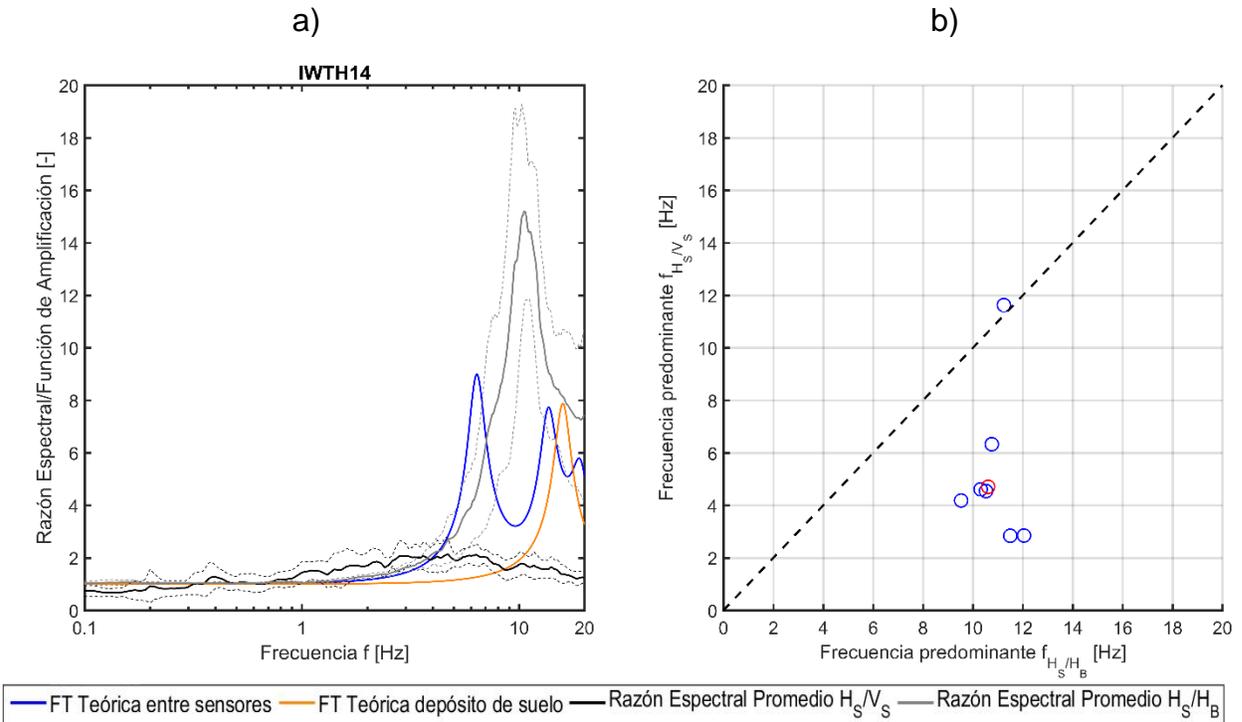


Figura 4.12: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación IWTH14.

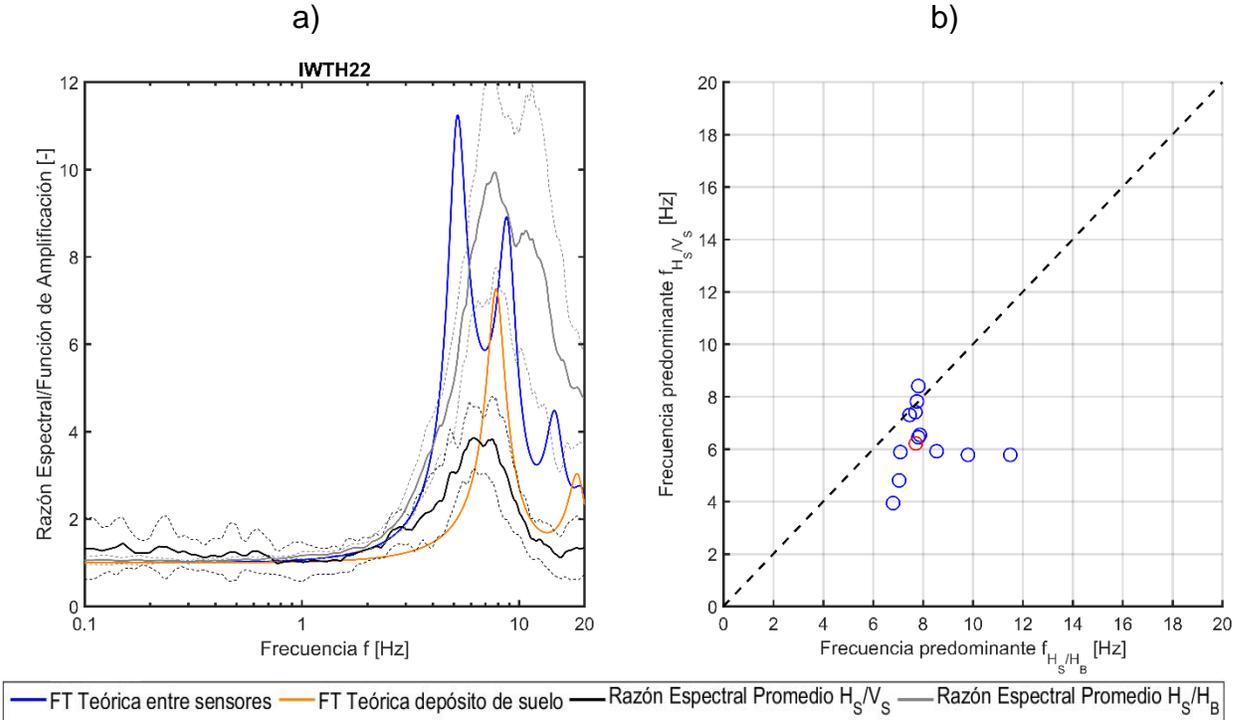


Figura 4.13: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación IWTH22.

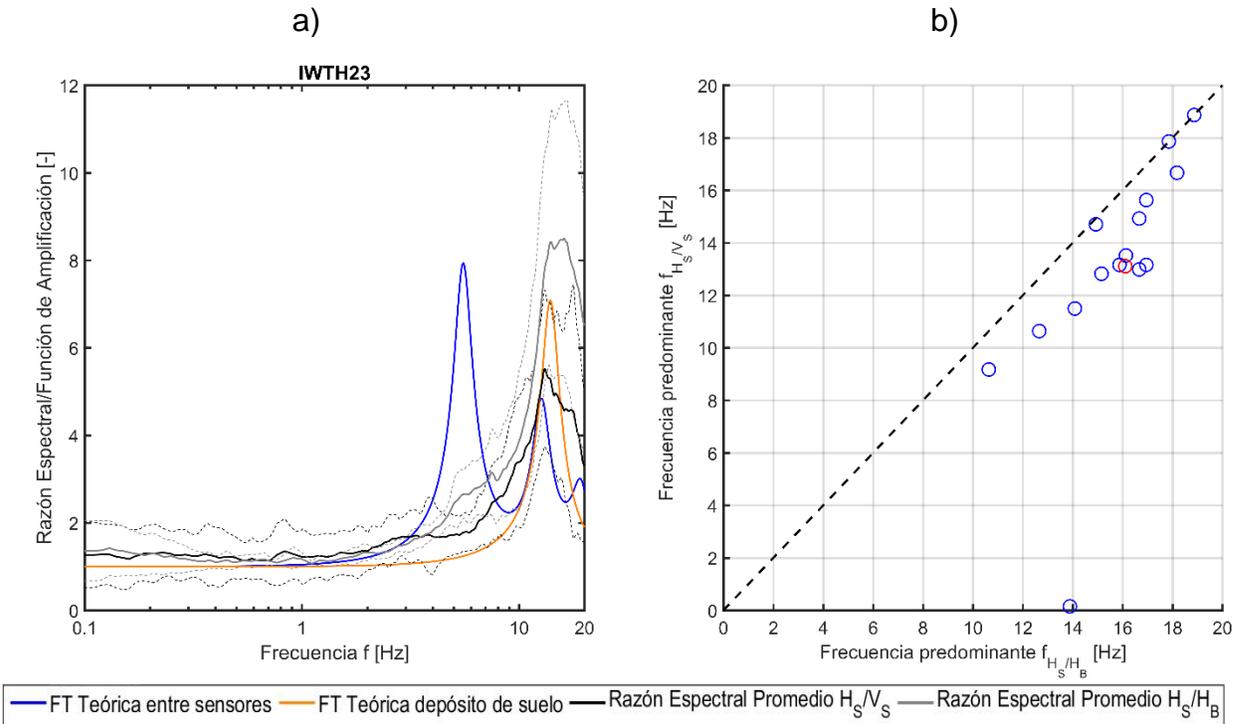


Figura 4.14: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación IWTH23.

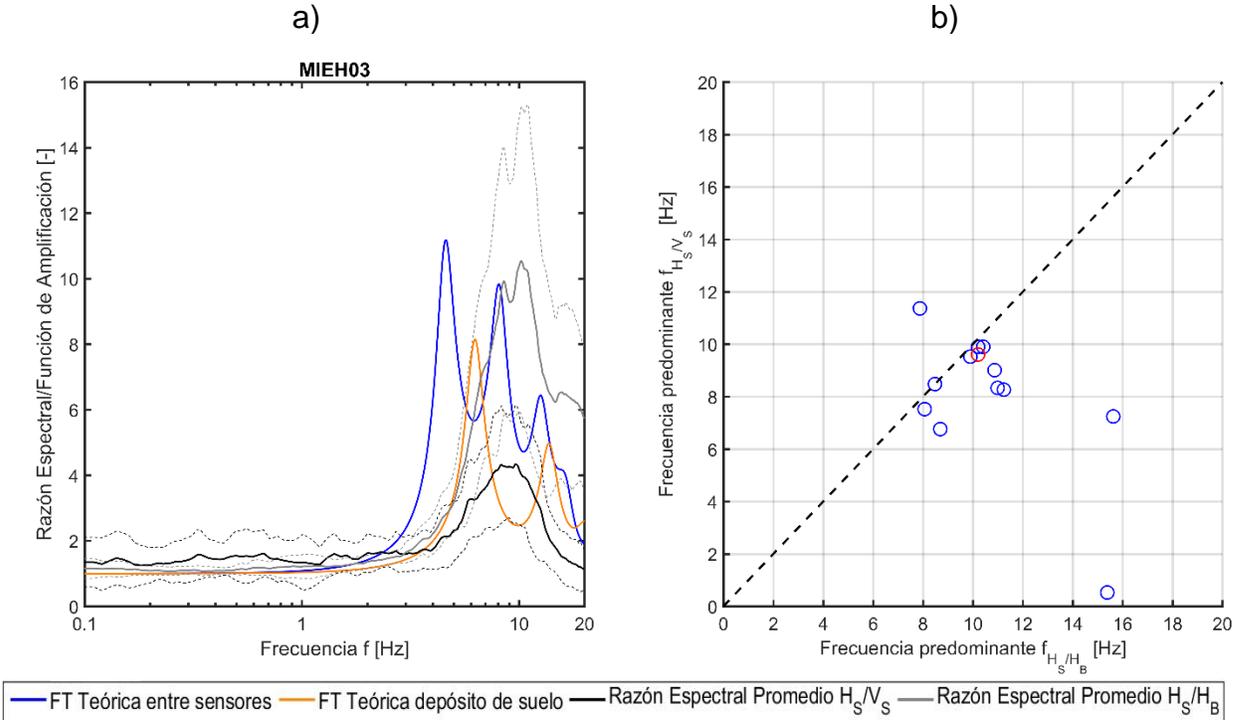


Figura 4.15: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación MIEH03.

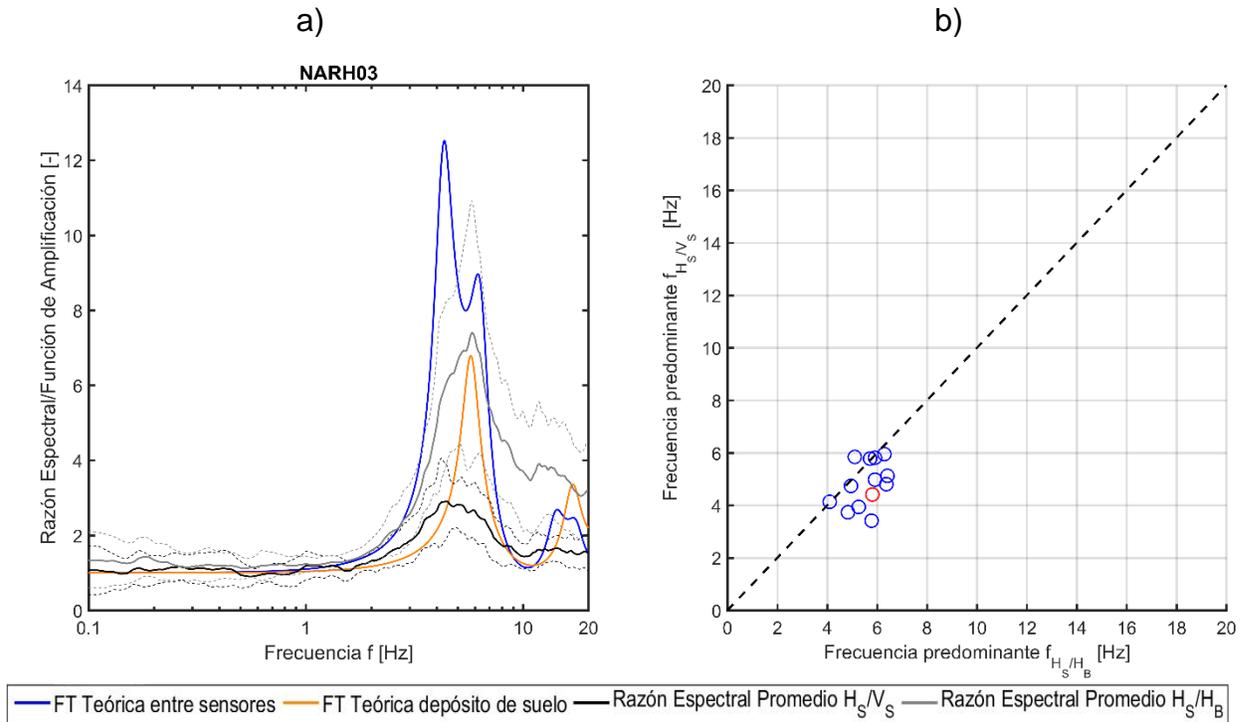


Figura 4.16: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación NARH03.

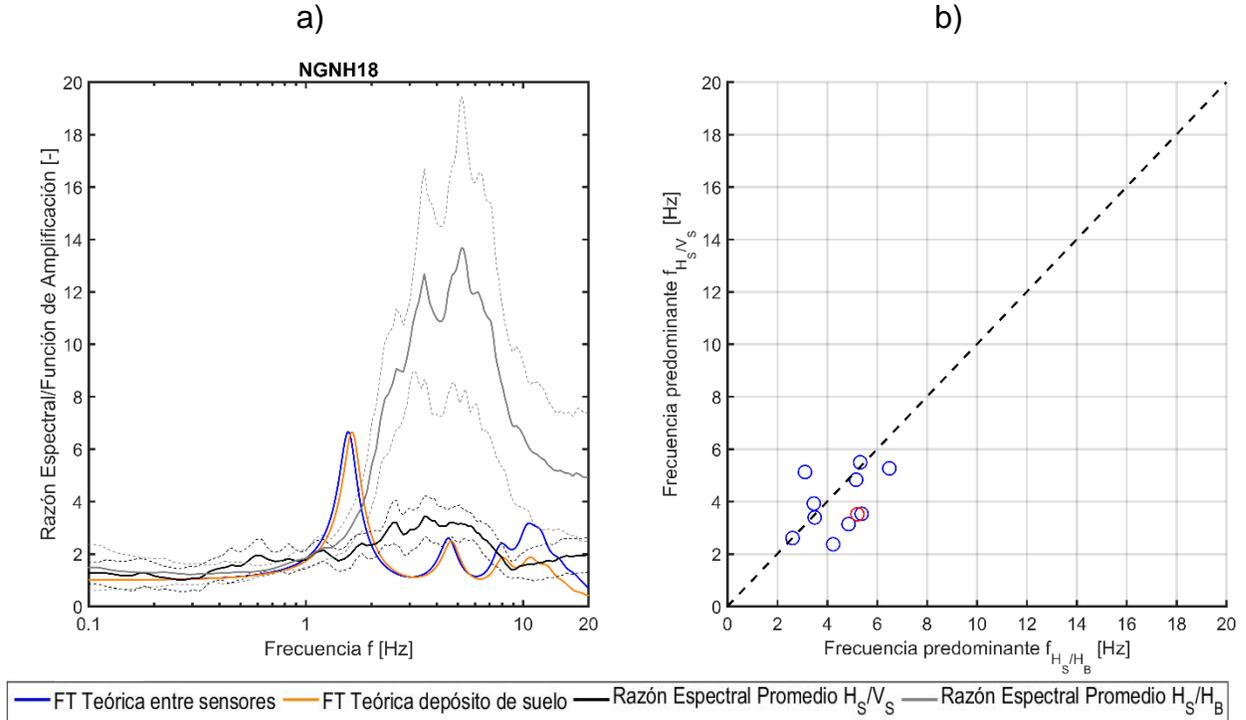


Figura 4.17: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación NGNH18.

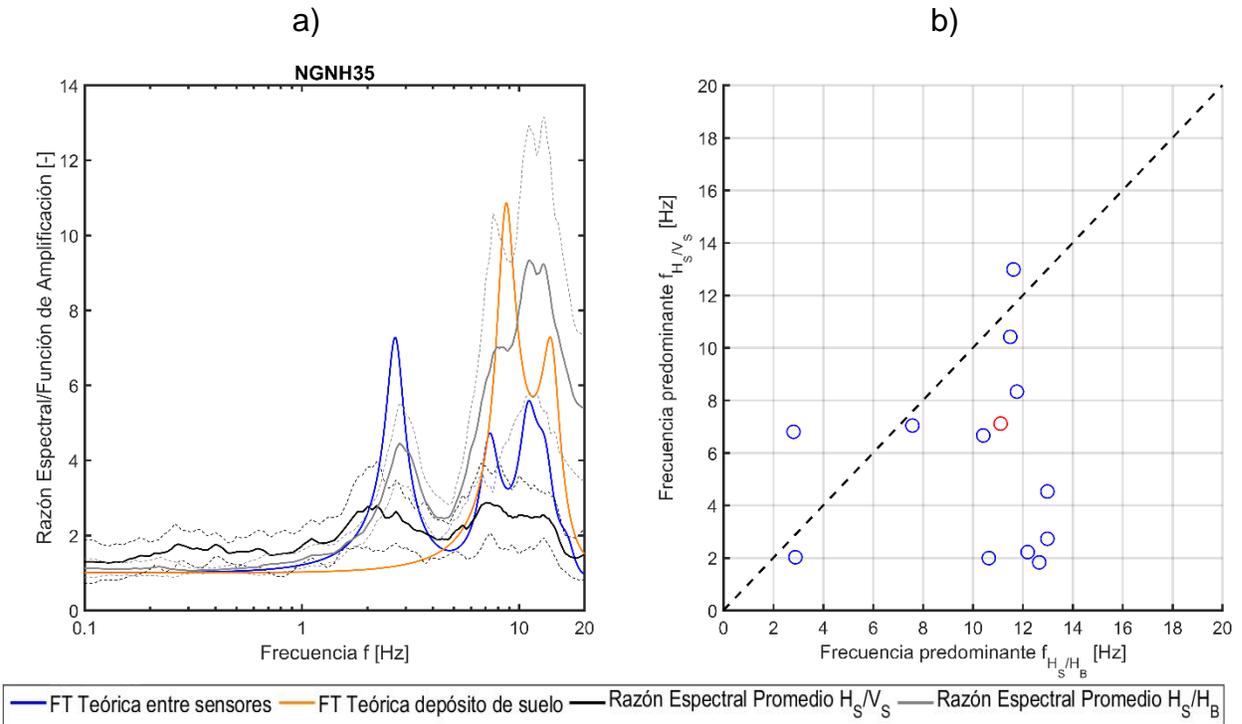


Figura 4.18: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación NGNH35.

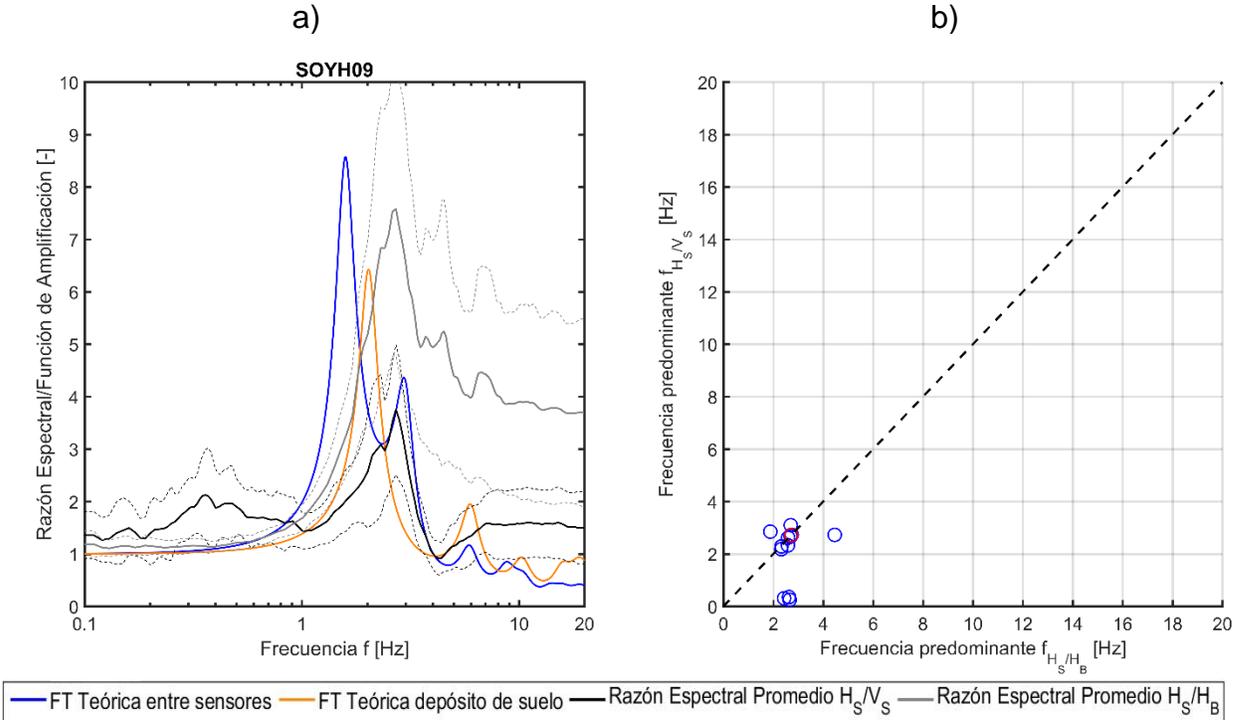


Figura 4.19: a) Funciones de amplificación teóricas y razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$ . b) Frecuencia predominante  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  en estación SOYH09.

## 4.2 Resultados de la Razón Espectrales $V_s/V_B$

Se realizó el cálculo y gráfico de la razón espectral mencionada en la sección 2.5, utilizando la fórmula (10). Este cociente fue efectuado para verificar si existe una amplificación o desamplificación de la componente vertical. Esto será analizado en el capítulo 5. La Figura 4.20 a la Figura 4.24 muestran las razones espectrales VVSR de todas las estaciones.

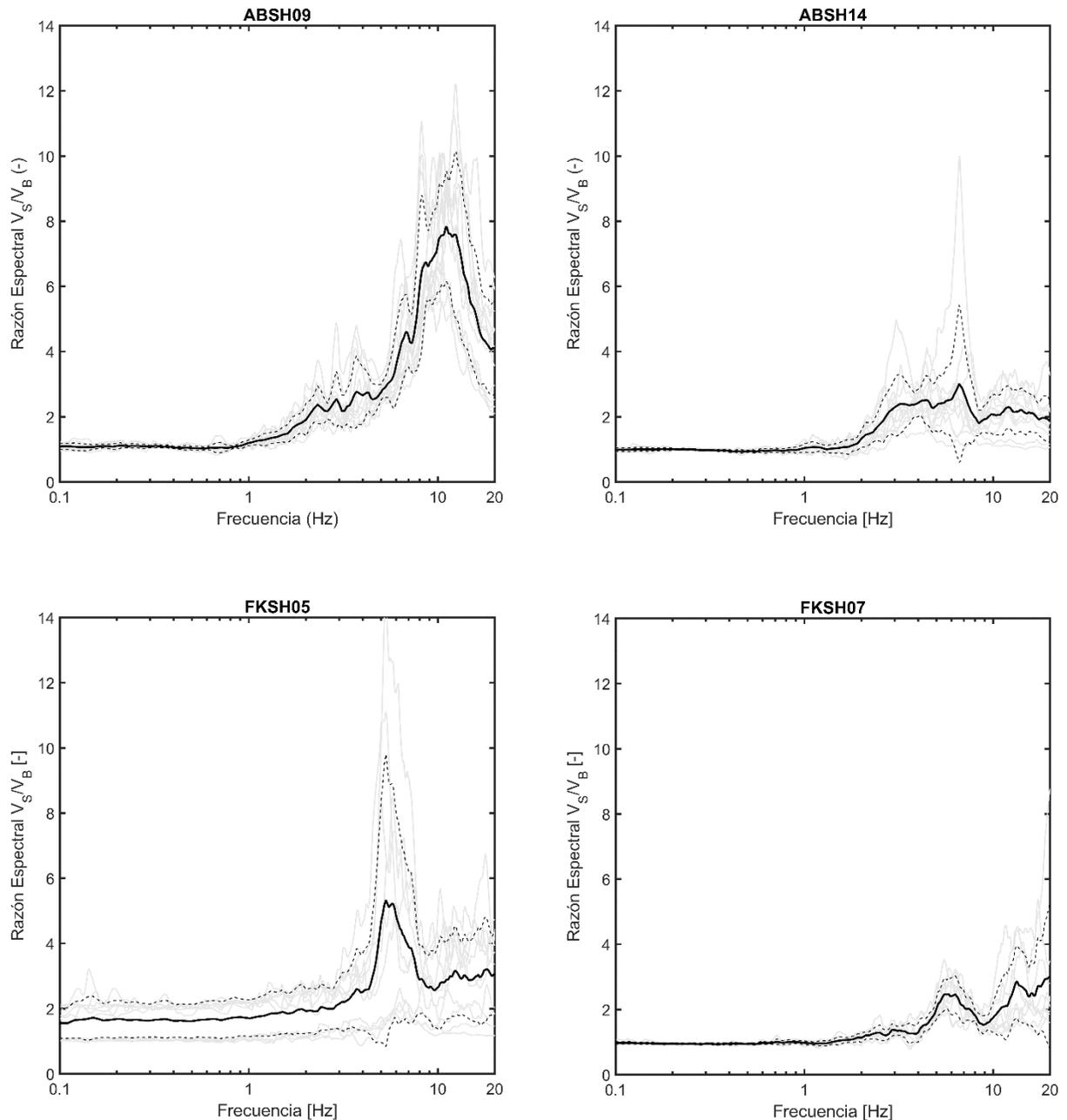


Figura 4.20: Razones espectrales  $V_s/V_B$  en función de la frecuencia  $f$  en las estaciones ABSH09, ABSH14, FKSH05 y FKSH07.

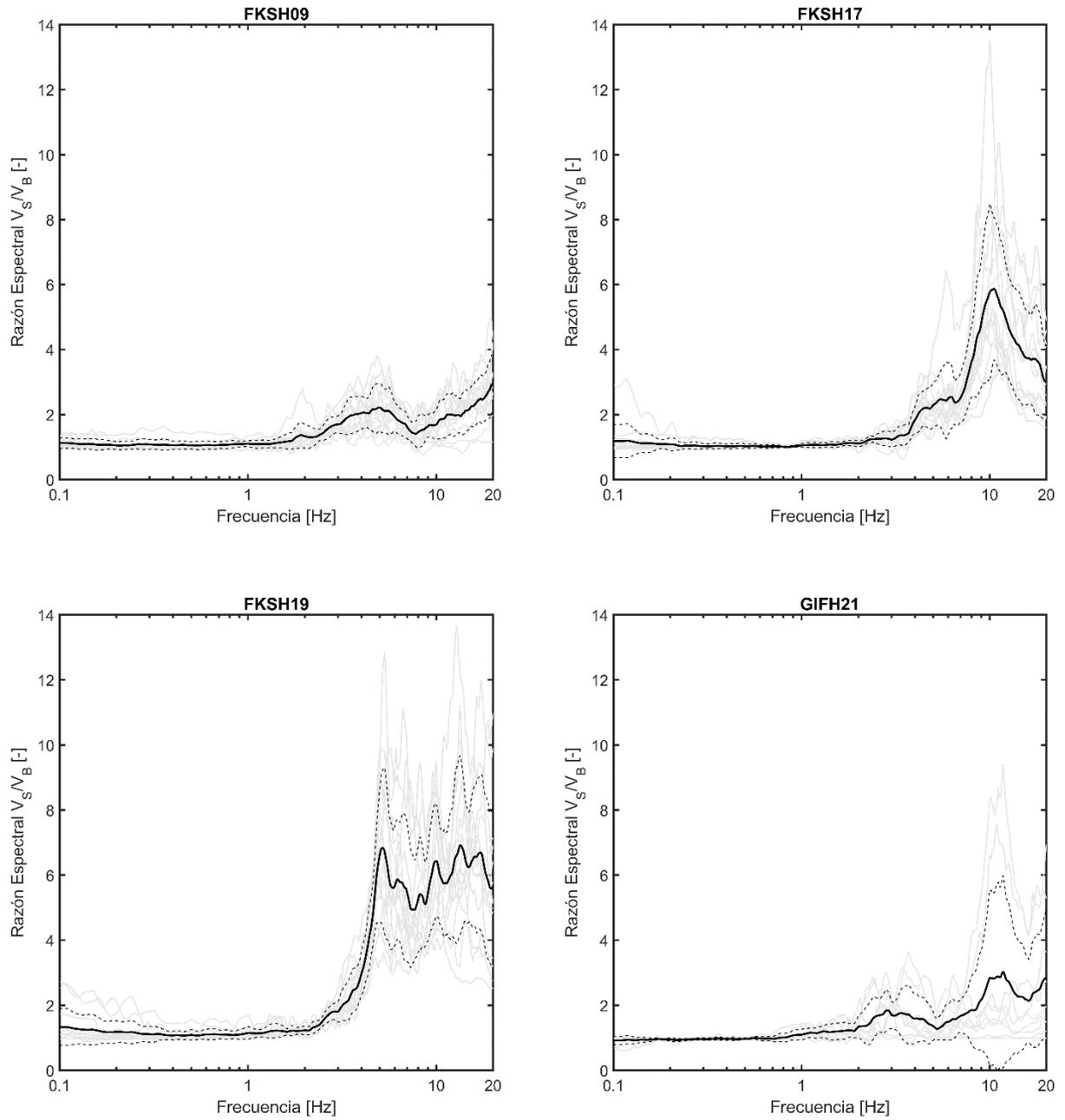


Figura 4.21: Razones espectrales  $V_S/V_B$  en función de la frecuencia  $f$  en las estaciones FKSH09, FKSH17, FKSH19 y GIFH21.

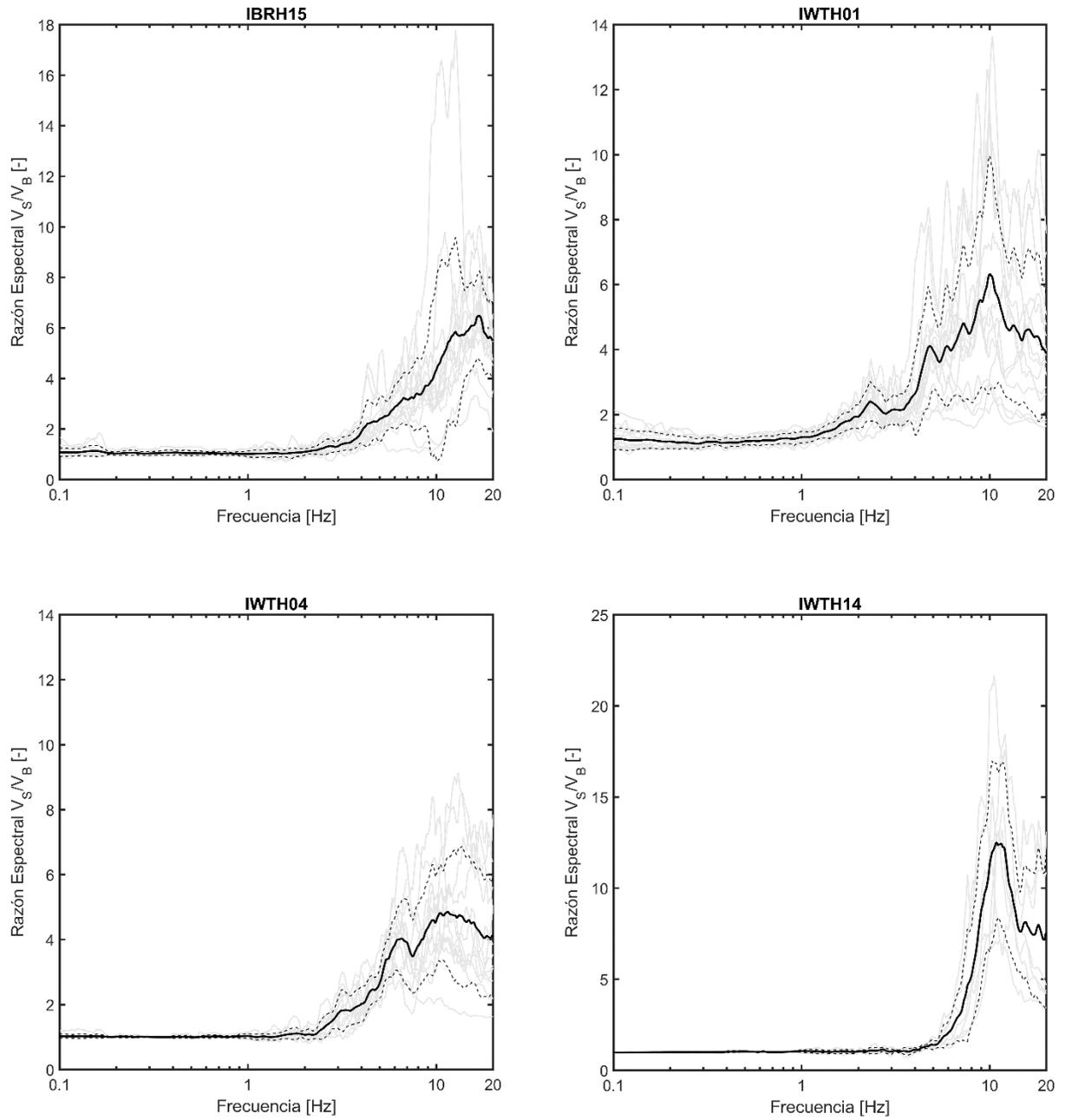


Figura 4.22: Razones espectrales  $V_S/V_B$  en función de la frecuencia  $f$  en las estaciones IBRH15, IWTH01, IWTH04 y IWTH14.

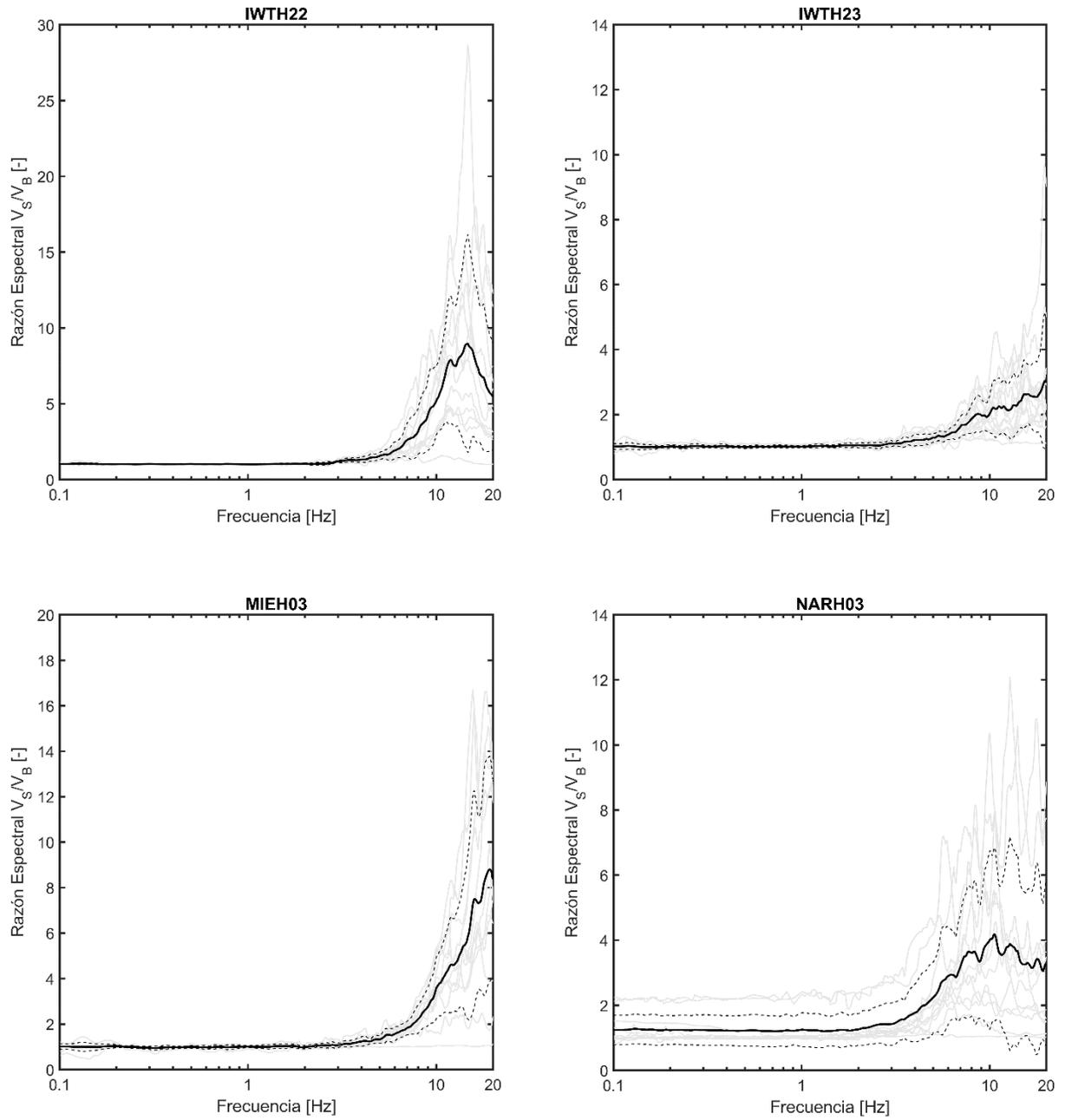


Figura 4.23: Razones espectrales  $V_S/V_B$  en función de la frecuencia  $f$  en las estaciones IWTH22, IWTH23, MIEH03 y NARH03.

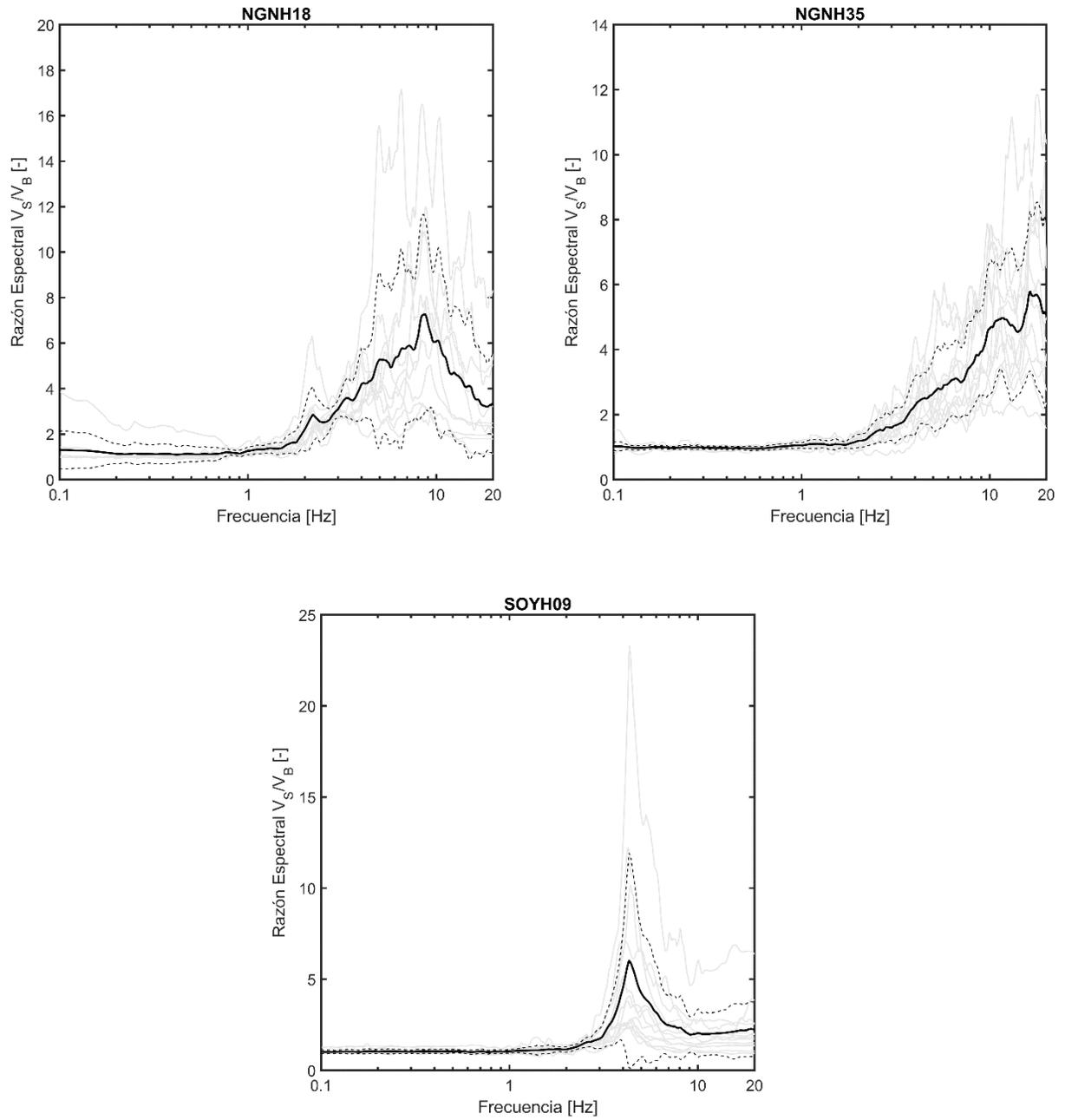


Figura 4.24: Razones espectrales  $V_S/V_B$  en función de la frecuencia  $f$  en las estaciones NGNH18, NGNH35 y SOYH09.

### 4.3 Resultados de razones espectrales $H_B/V_B$

Se realizó el cálculo y gráfico de las razones espectrales mostradas en la fórmula (7). El análisis de estos resultados será visto en el capítulo 5. A continuación, se adjuntan las Figura 4.25 a Figura 4.29, que muestran las razones espectrales  $H_B/V_B$  de todas las estaciones.

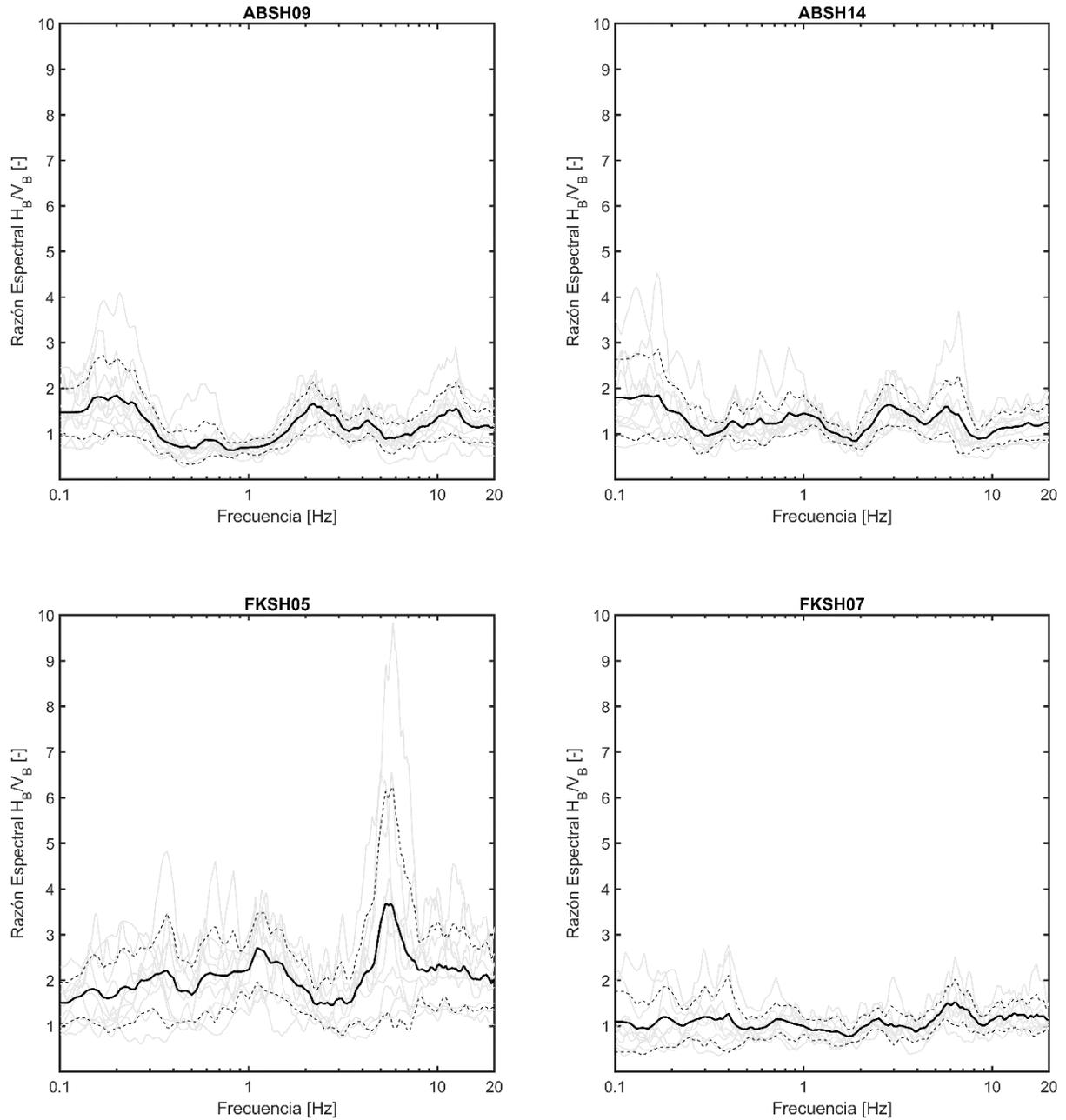


Figura 4.25: Razones espectrales  $H_B/V_B$  en función de la frecuencia  $f$  en las estaciones ABSH09, ABSH14, FKSH05 y FKSH07.

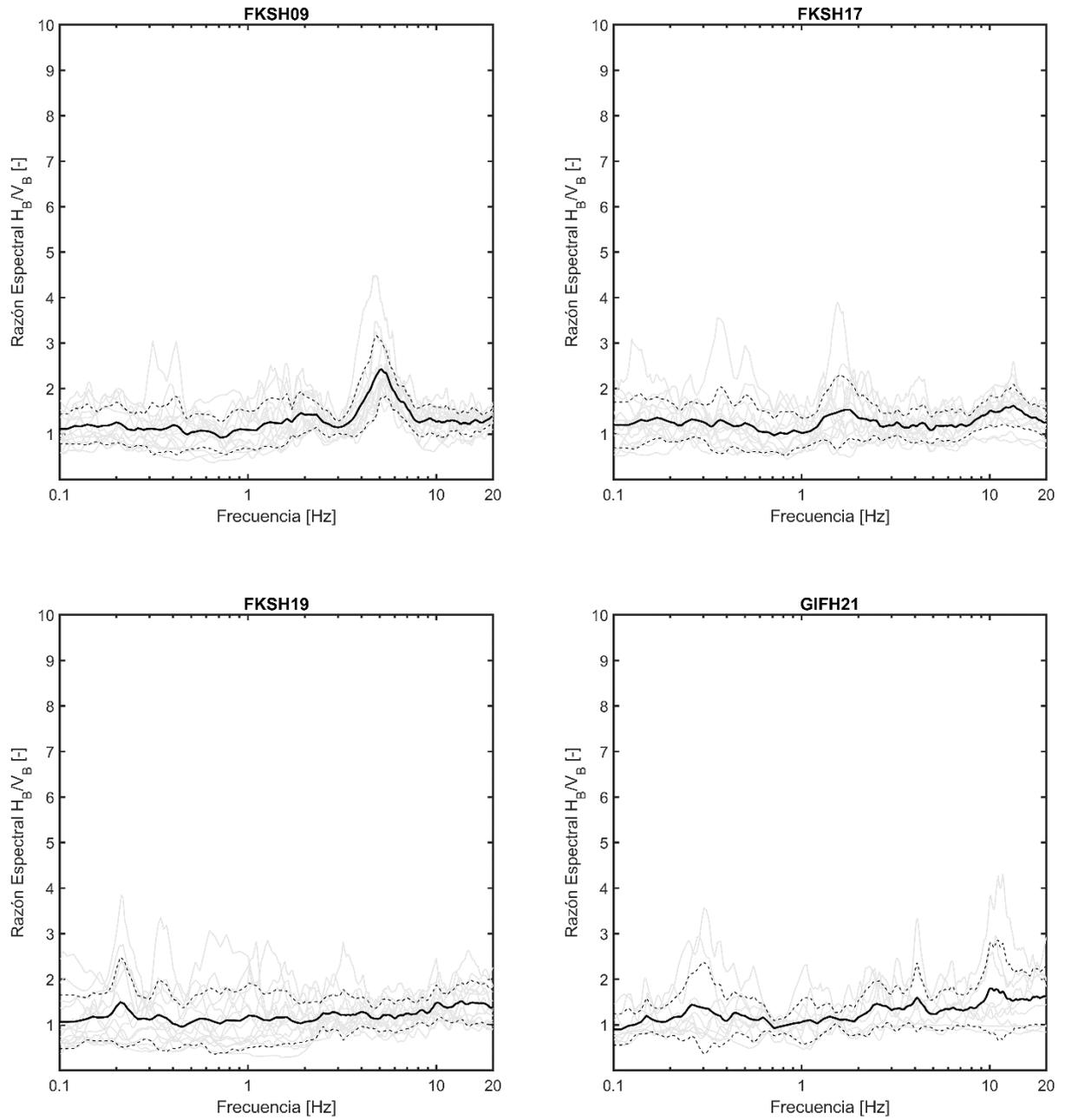


Figura 4.26: Razones espectrales  $H_B/V_B$  en función de la frecuencia  $f$  en las estaciones FKSH09, FKSH17, FKSH19 y GIFH21.

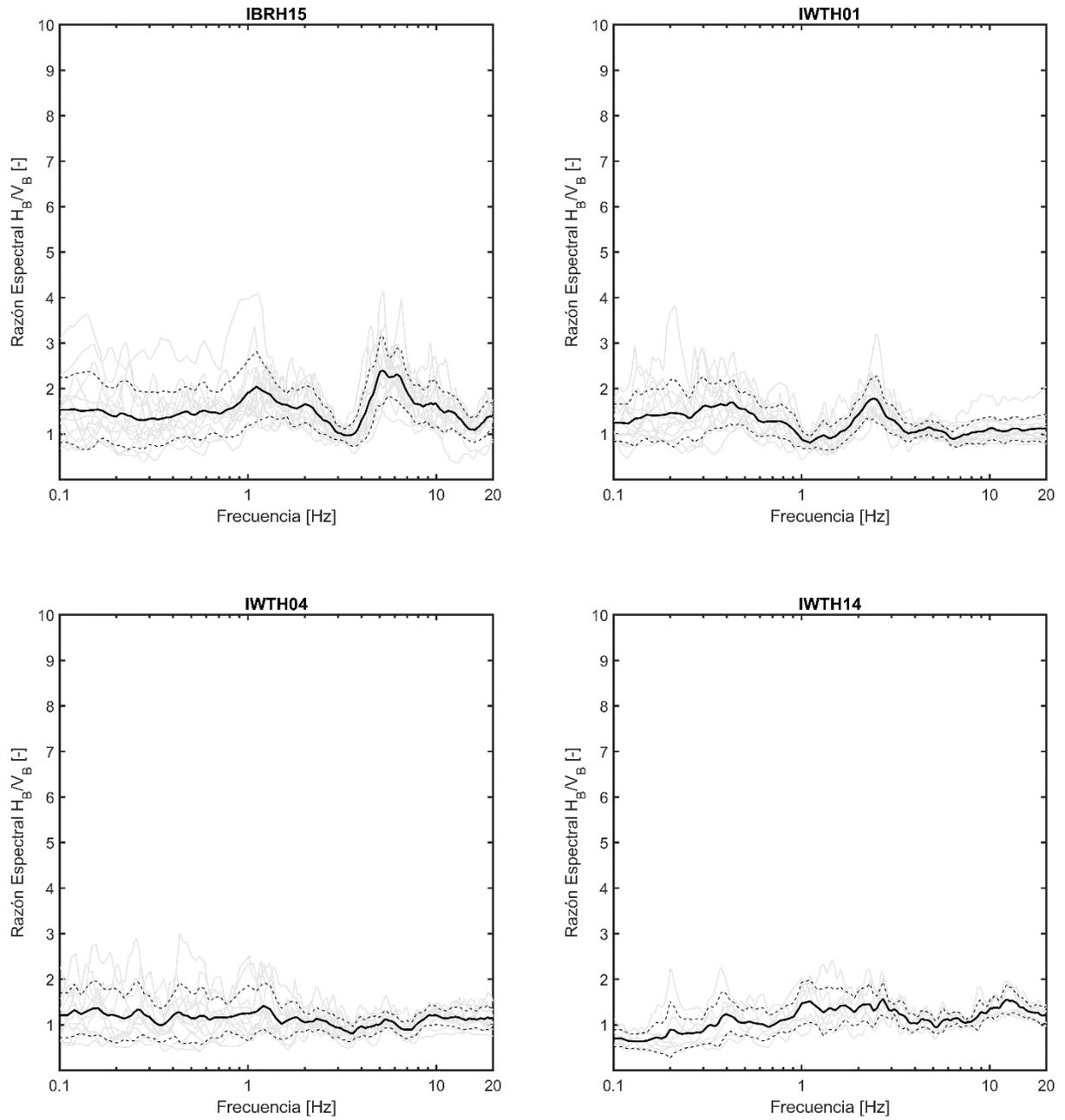


Figura 4.27: Razones espectrales  $H_B/V_B$  en función de la frecuencia  $f$  en las estaciones IBRH15, IWTH01, IWTH04 y IWTH14.

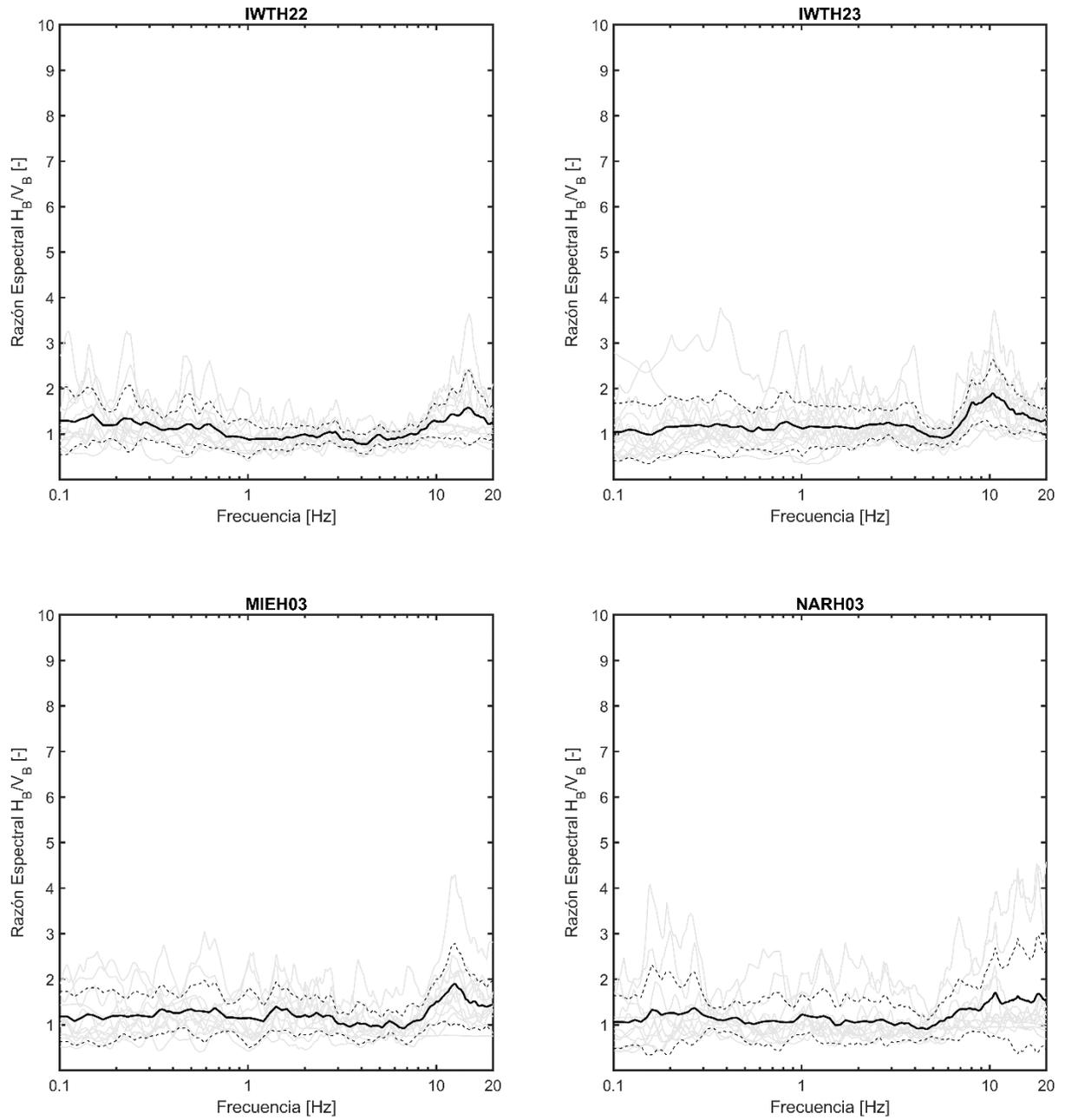


Figura 4.28: Razones espectrales  $H_B/V_B$  en función de la frecuencia  $f$  en las estaciones IWTH22, IWTH23, MIEH03 y NARH03.

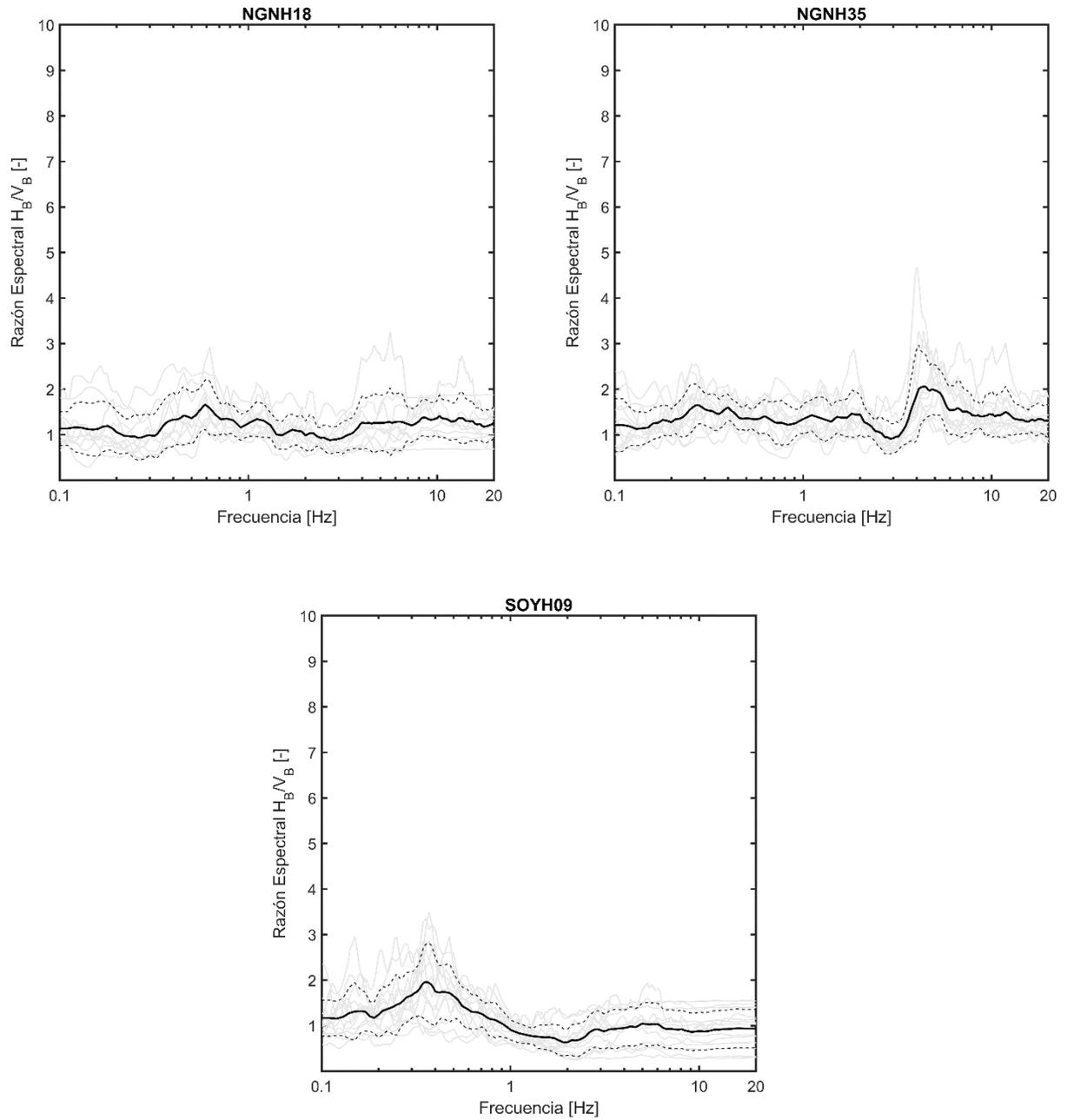


Figura 4.29: Razones espectrales  $H_B/V_B$  en función de la frecuencia  $f$  en las estaciones NGNH18, NGNH35 y SOYH09.

#### 4.4 Resultados de razones espectrales HVSR/HHSR

Se realizó el cálculo y gráfico de las razones espectrales mostradas en la fórmula (9). El análisis de estos resultados será visto en el capítulo 5. A continuación, se adjuntan las Figura 4.30 a la Figura 4.34, que muestran el cociente entre las razones espectrales HVSR/HHSR de todas las estaciones.

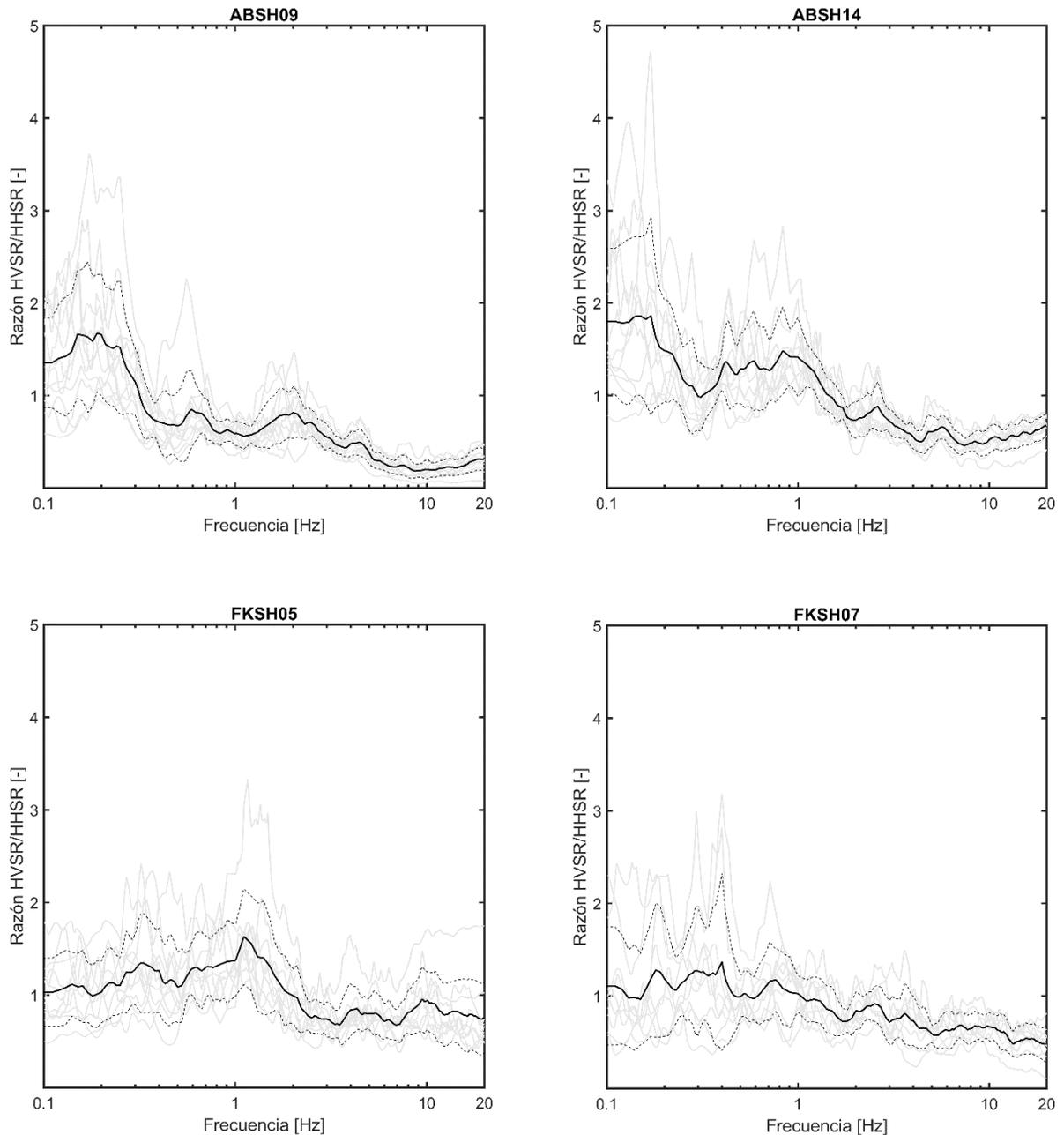


Figura 4.30: Cociente de las Razones espectrales HVSR/HHSR en función de la frecuencia  $f$  de las estaciones ABSH09, ABSH14, FKSH05 y FKSH07.

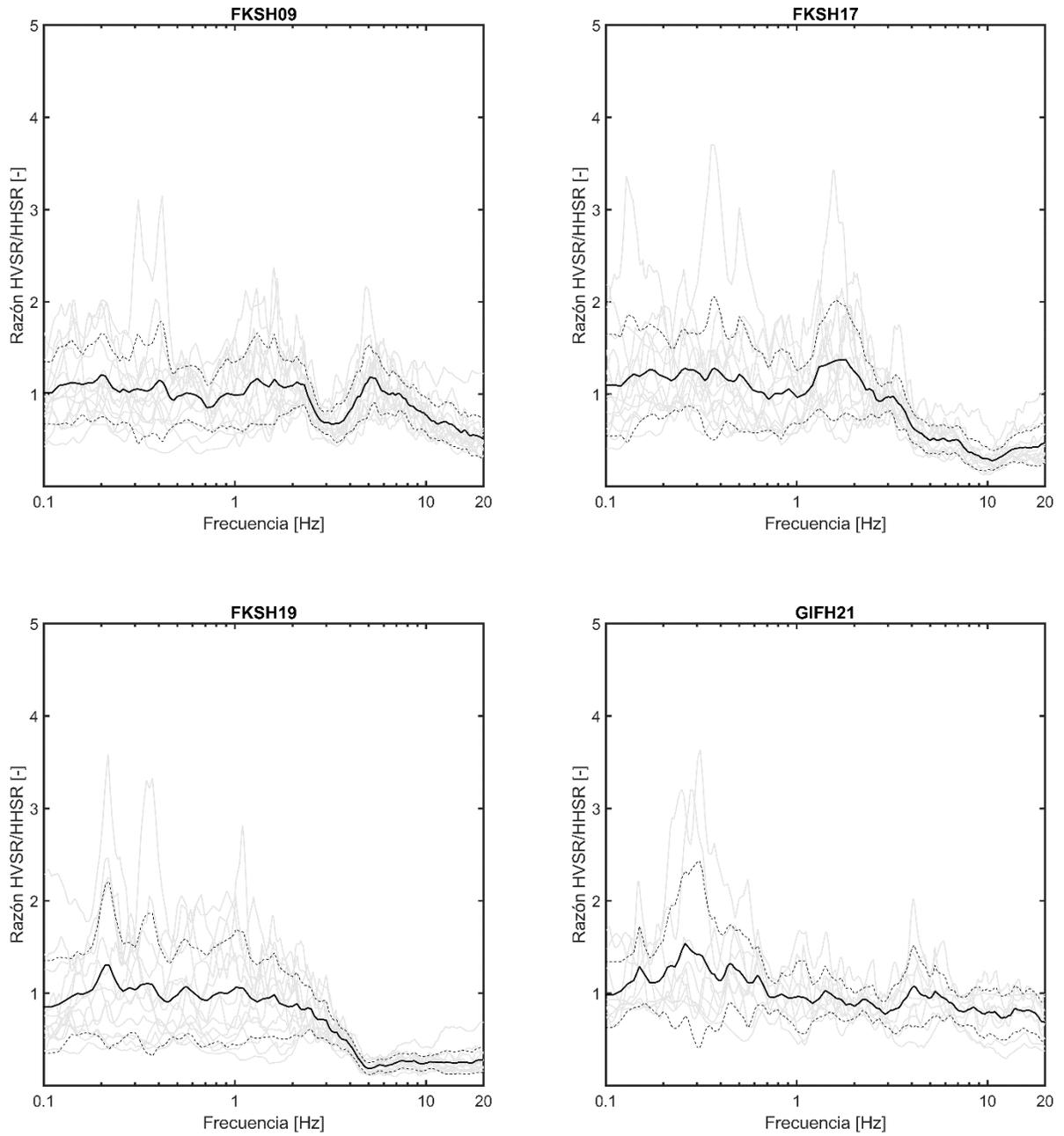


Figura 4.31: Cociente de las Razones espectrales HVSR/HHSR en función de la frecuencia  $f$  de las estaciones FKSH09, FKSH17, FKSH19 y GIFH21.

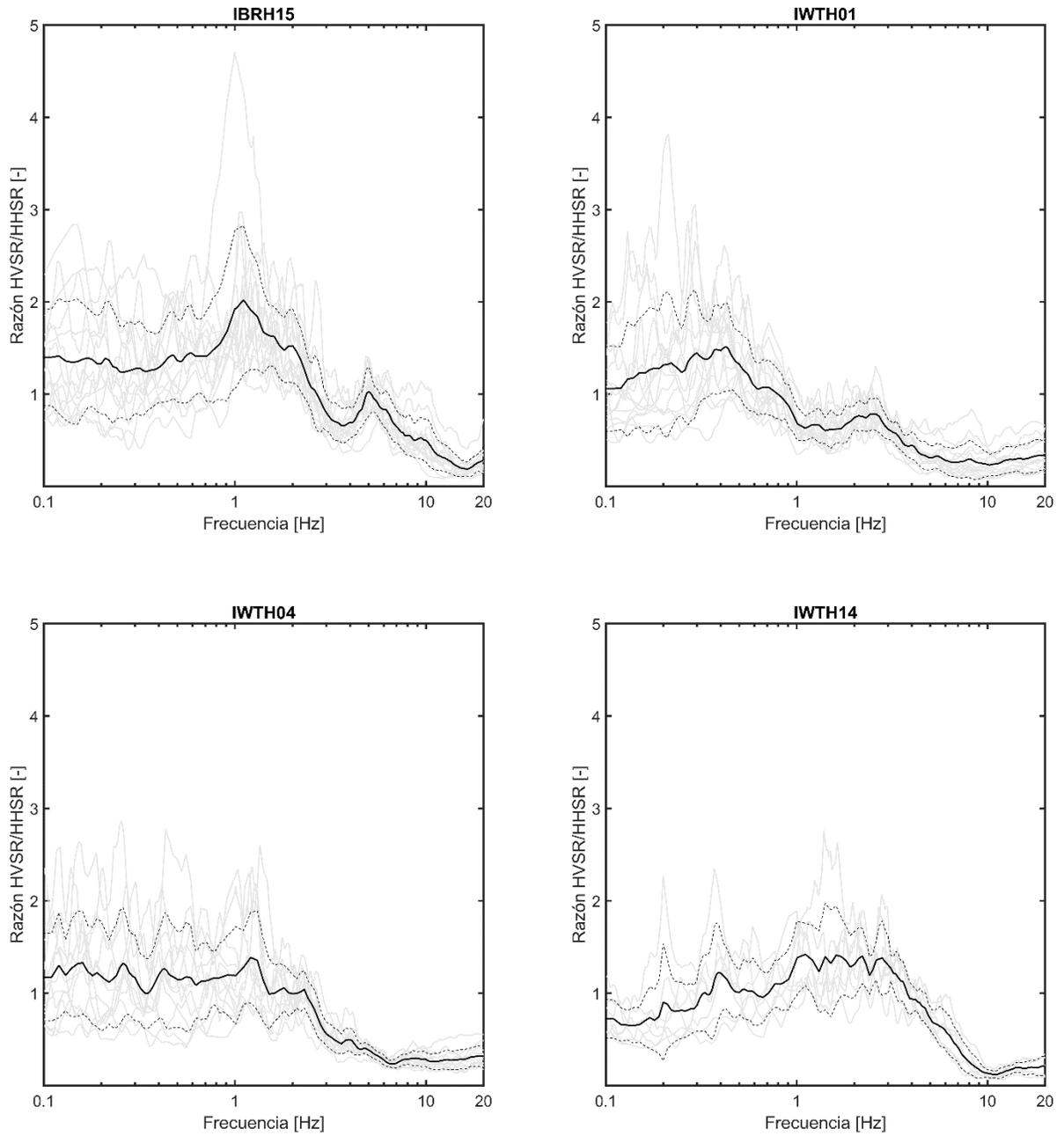


Figura 4.32: Cociente de las Razones espectrales HVSR/HHSR en función de la frecuencia  $f$  de las estaciones IBRH15, IWTH01, IWTH04 y IWTH14.

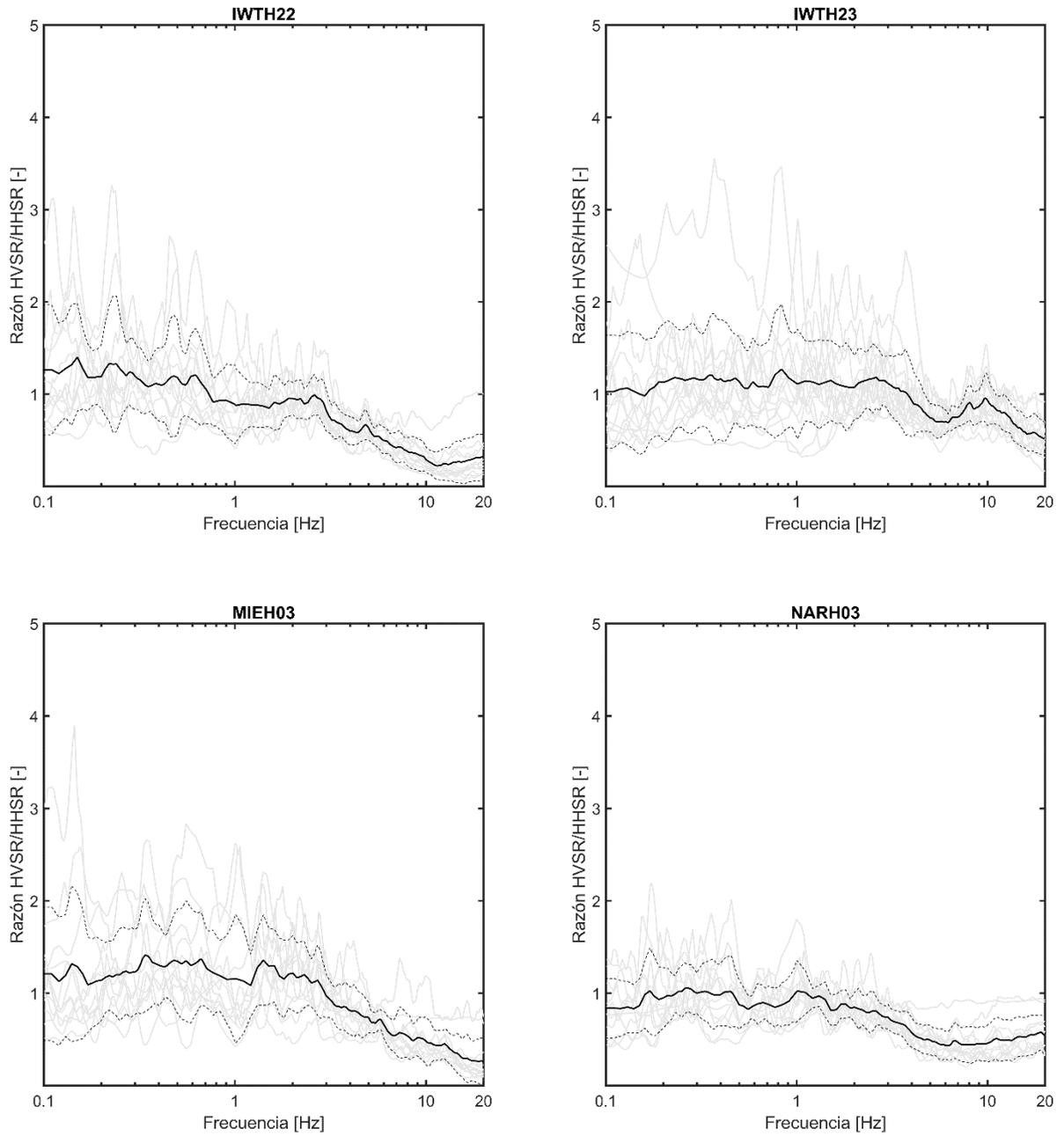


Figura 4.33: Cociente de las Razones espectrales HVSR/HHSR en función de la frecuencia  $f$  de las estaciones IWTH22, IWTH23, MIEH03 y NARH03.

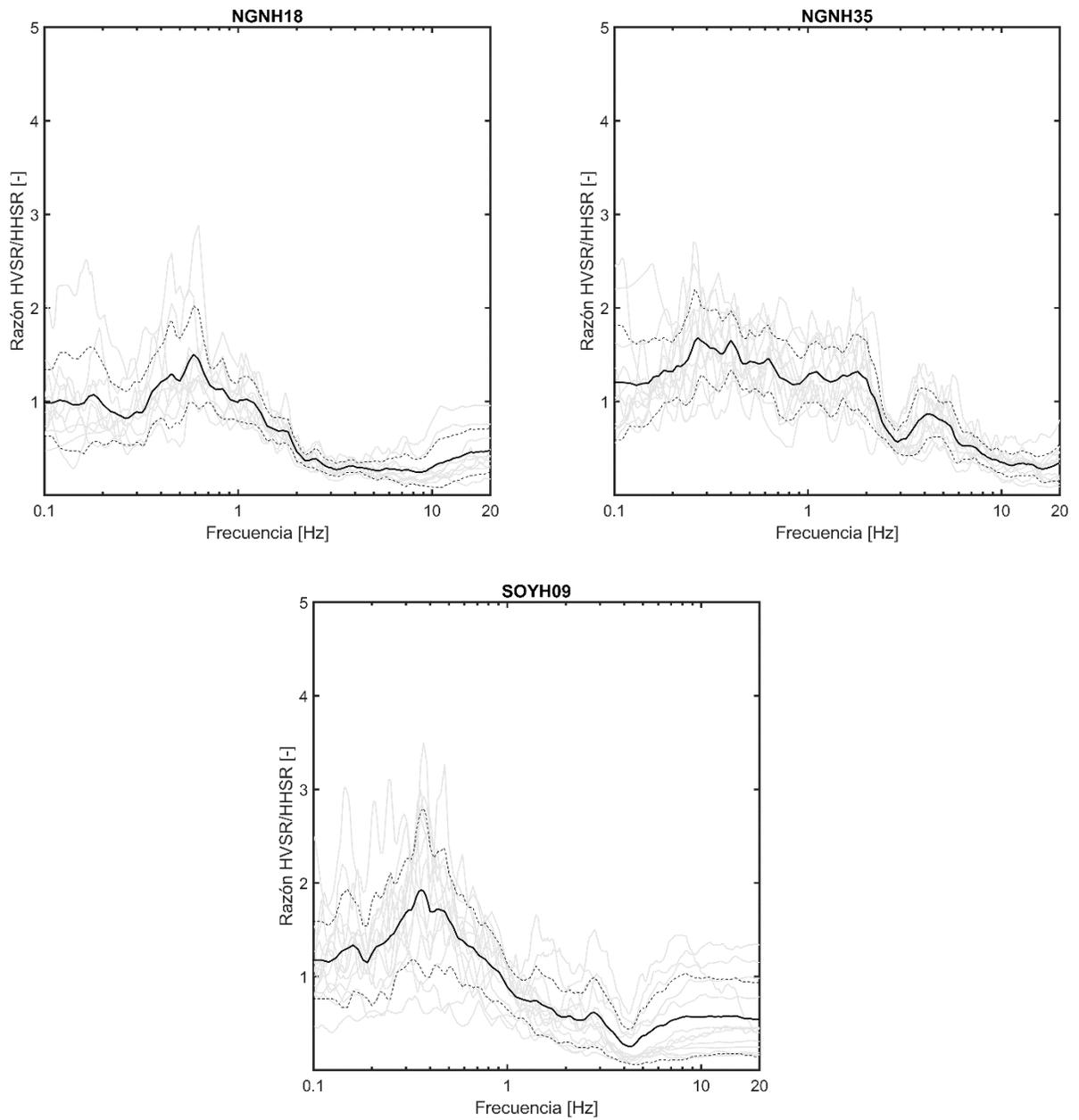


Figura 4.34: Cociente de las Razones espectrales HVSR/HHSR en función de la frecuencia  $f$  de las estaciones NGNH18, NGNH35 y SOYH09.

#### 4.5 Resultados Variación de la frecuencia fundamental en profundidad y Desarrollo de la Longitud de Onda

La Figura 4.35 a la Figura 4.54 presentan tres gráficos distintos. A continuación, se detalla cada uno de ellos:

- 1) La figura de la izquierda muestra el perfil de velocidades de onda de corte entre los dos acelerómetros. Se destacó con color rojo los estratos que corresponden a un LVL o HVL en aquellos perfiles donde se observó su existencia.
- 2) La figura central muestra la variación de la frecuencia fundamental en profundidad (curva roja). Esta curva se obtuvo al seguir la metodología explicada en la sección 3.6. Aquellos círculos azules representan la frecuencia fundamental obtenida al considerar la referencia en una interfaz de estratos. El punto negro representa la intersección entre la curva roja y la frecuencia predominante obtenida mediante la razón espectral  $H_s/H_B$ , mientras que el punto verde corresponde a la intersección entre la curva roja y la frecuencia predominante obtenida mediante la razón espectral  $H_s/V_s$ . En caso de no presentarse el punto verde, es debido a que la frecuencia predominante obtenida mediante esta razón espectral no logra intersectar a la frecuencia en las profundidades analizadas.
- 3) La figura de la derecha es el gráfico de dos parámetros distintos. El primero de ellos corresponde a la razón de velocidades entre el estrato  $i$  y el estrato  $i+1$  (eje de las abscisas superior) representados mediante asteriscos. El otro parámetro corresponde a la longitud de onda  $\lambda$  desarrollada en un estrato normalizada por el espesor del estrato  $H$ . El valor obtenido al utilizar la frecuencia predominante corresponde al valor central, mientras que los otros dos son los puntos obtenidos al utilizar la frecuencia predominante mínima y máxima (ver metodología en sección 3.7).

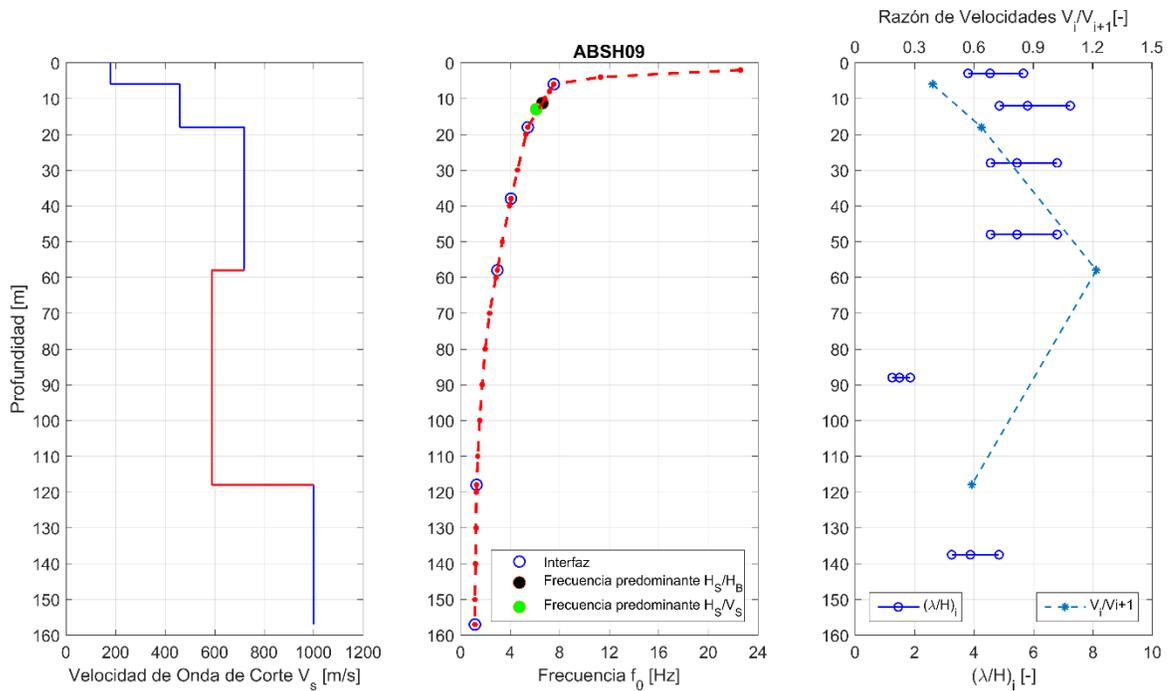


Figura 4.35: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación ABSH09.

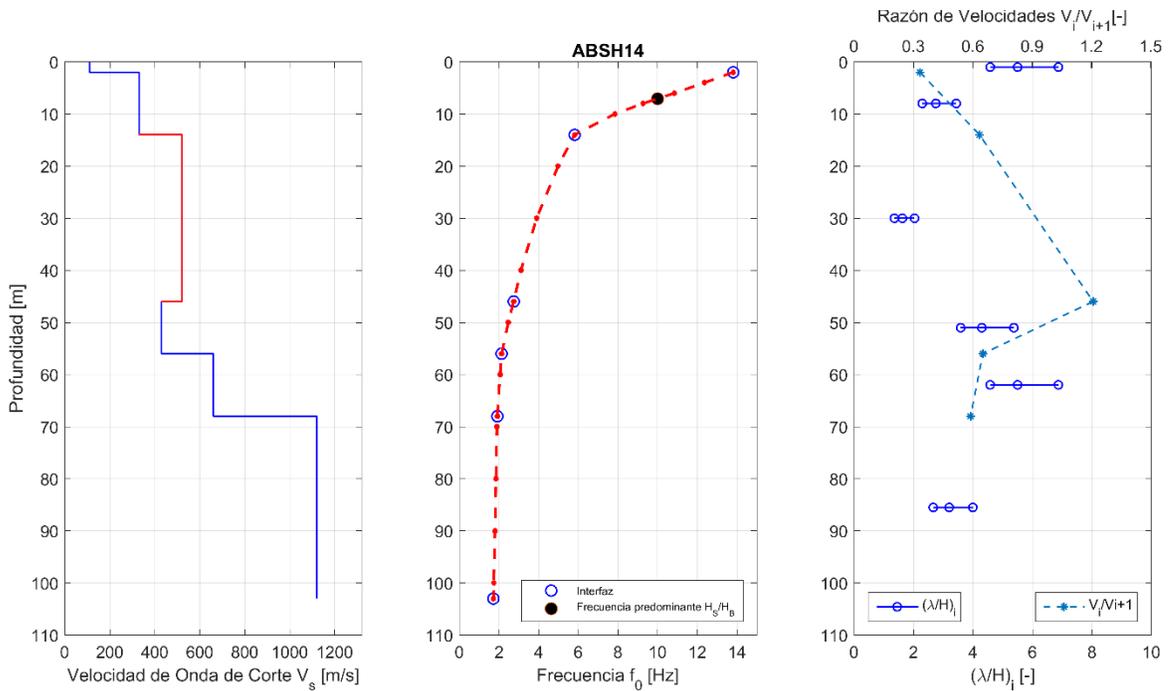


Figura 4.36: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación ABSH14.

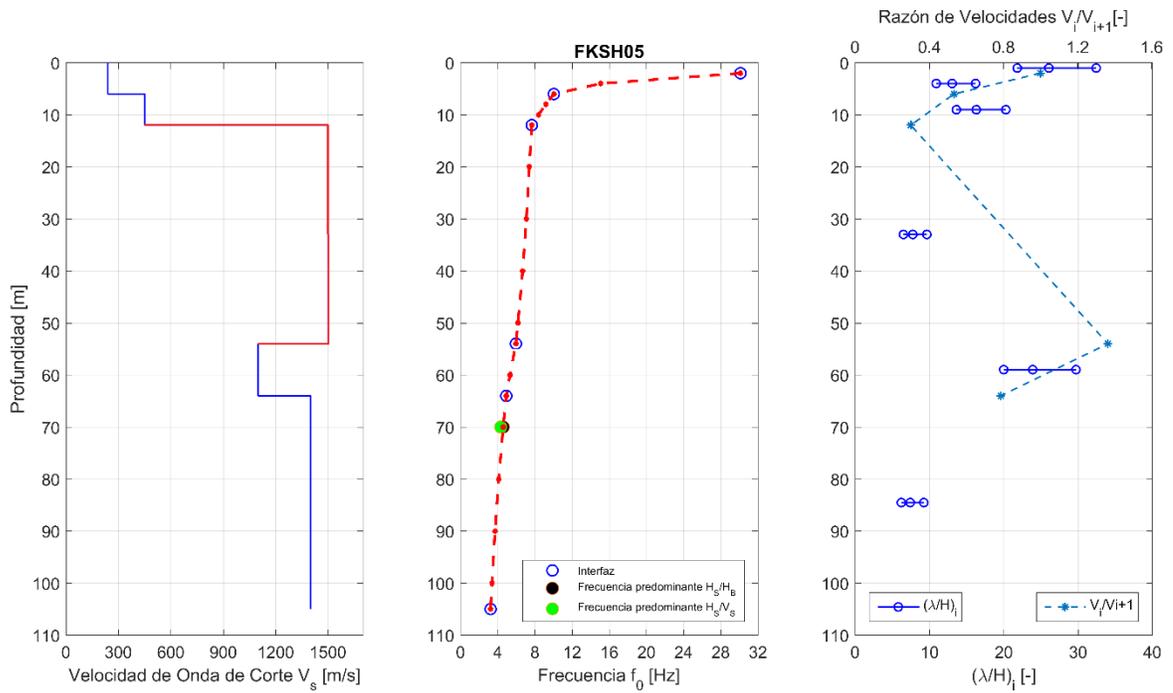


Figura 4.37: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación FHSK05.

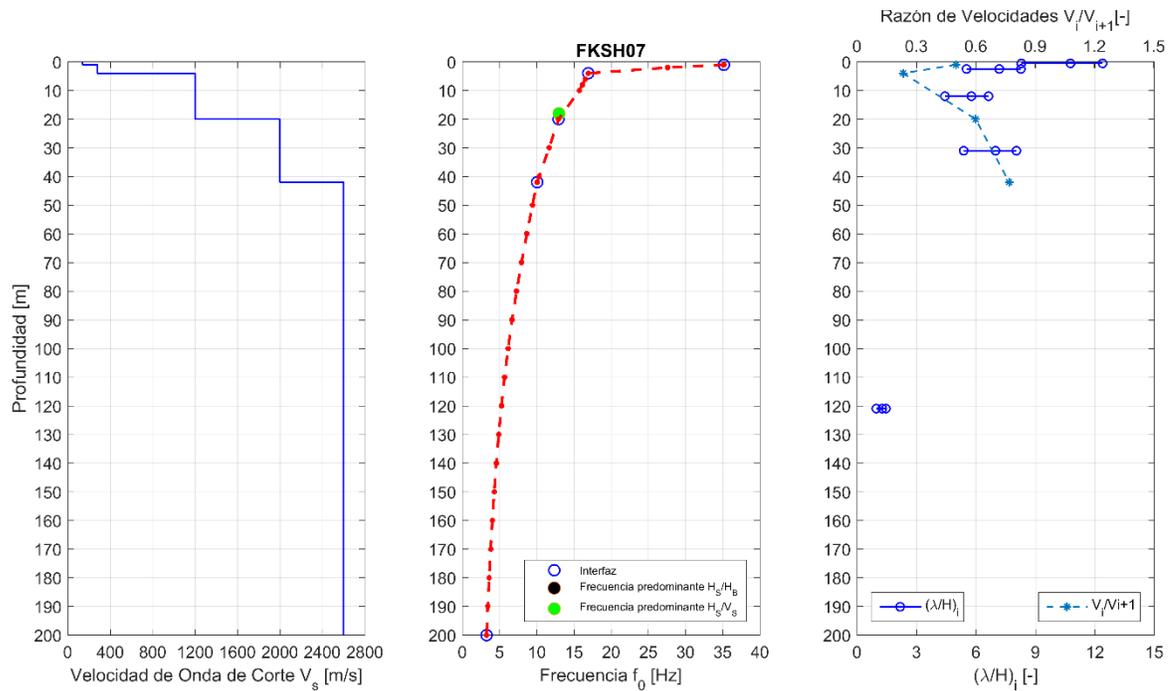


Figura 4.38: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación FKSH07.

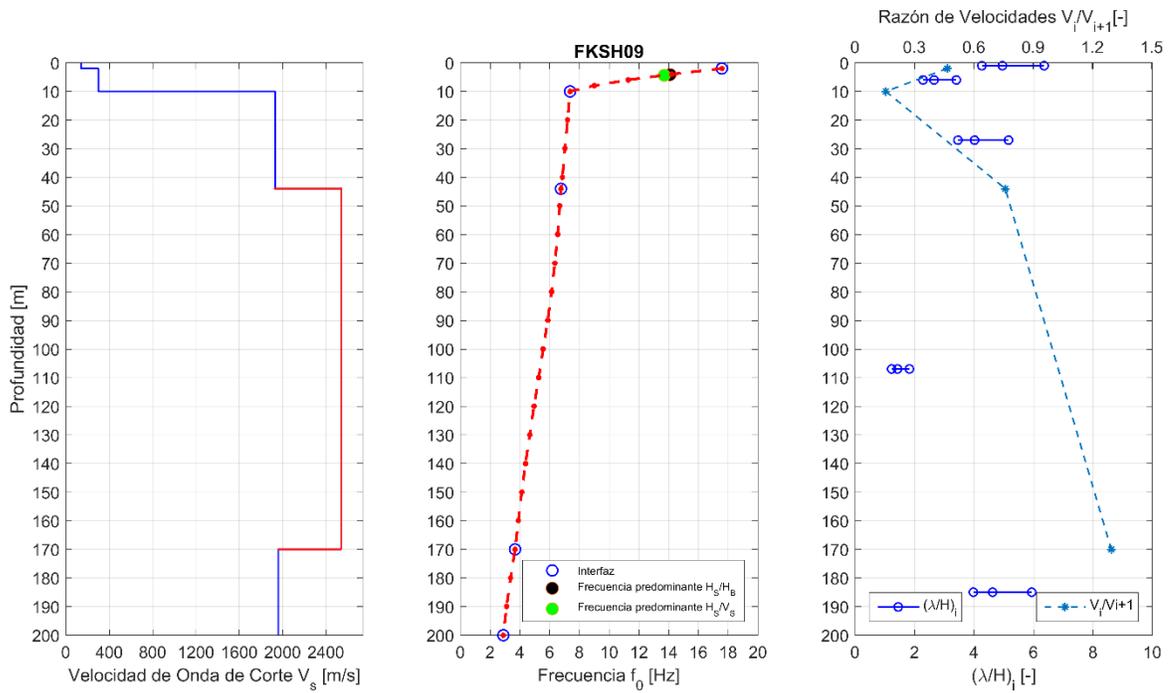


Figura 4.39: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación FKSH09.

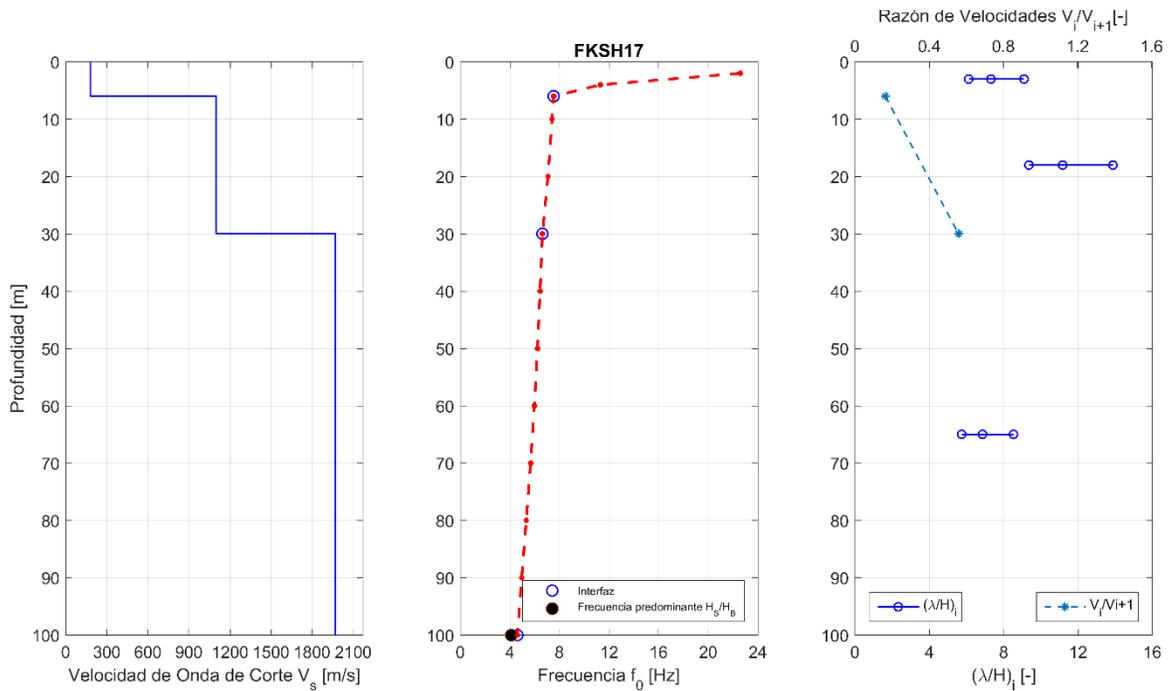


Figura 4.40: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación FKSH17.

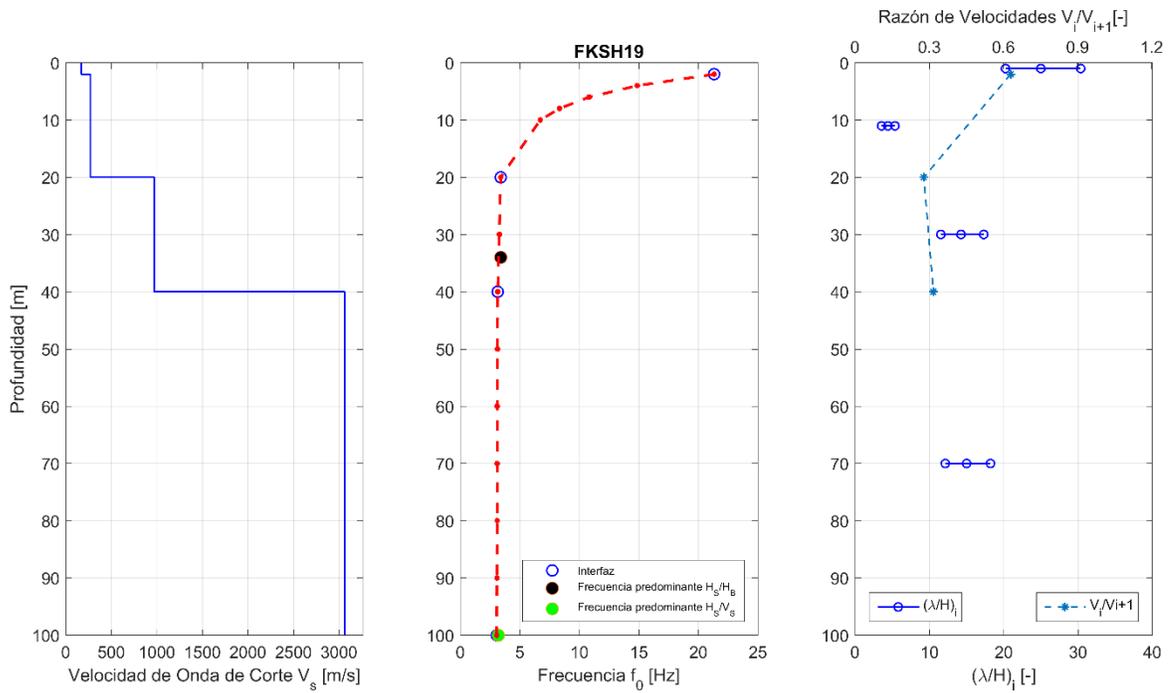


Figura 4.41: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación FKSH19.

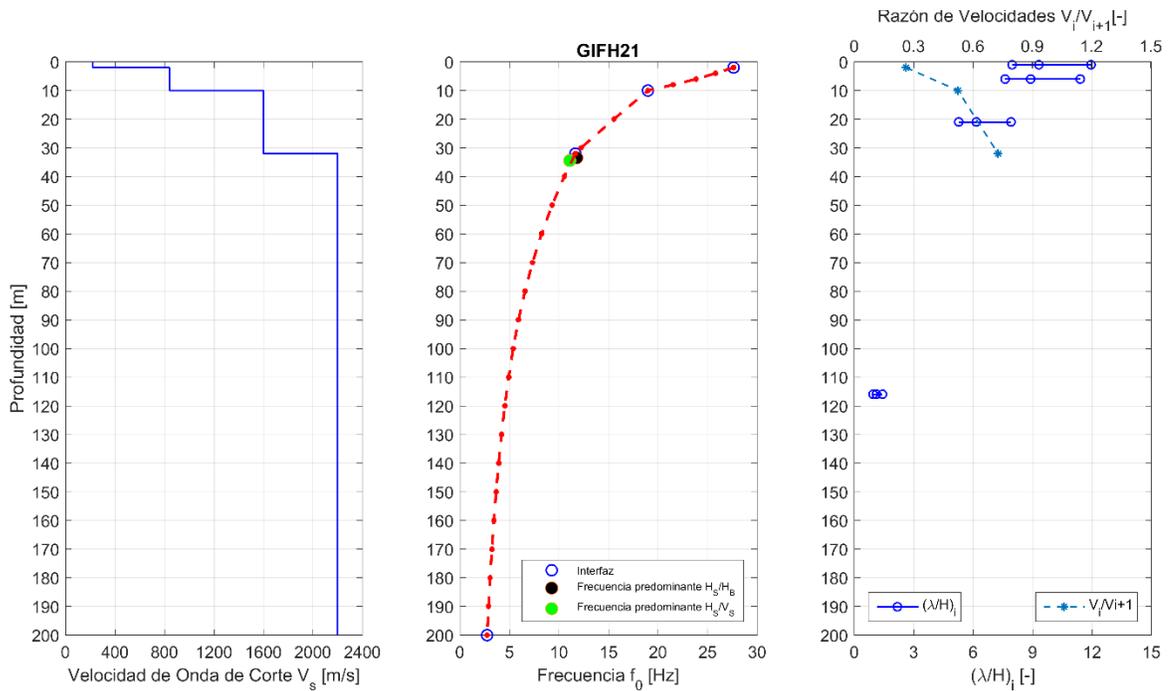


Figura 4.42: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación GIFH21.

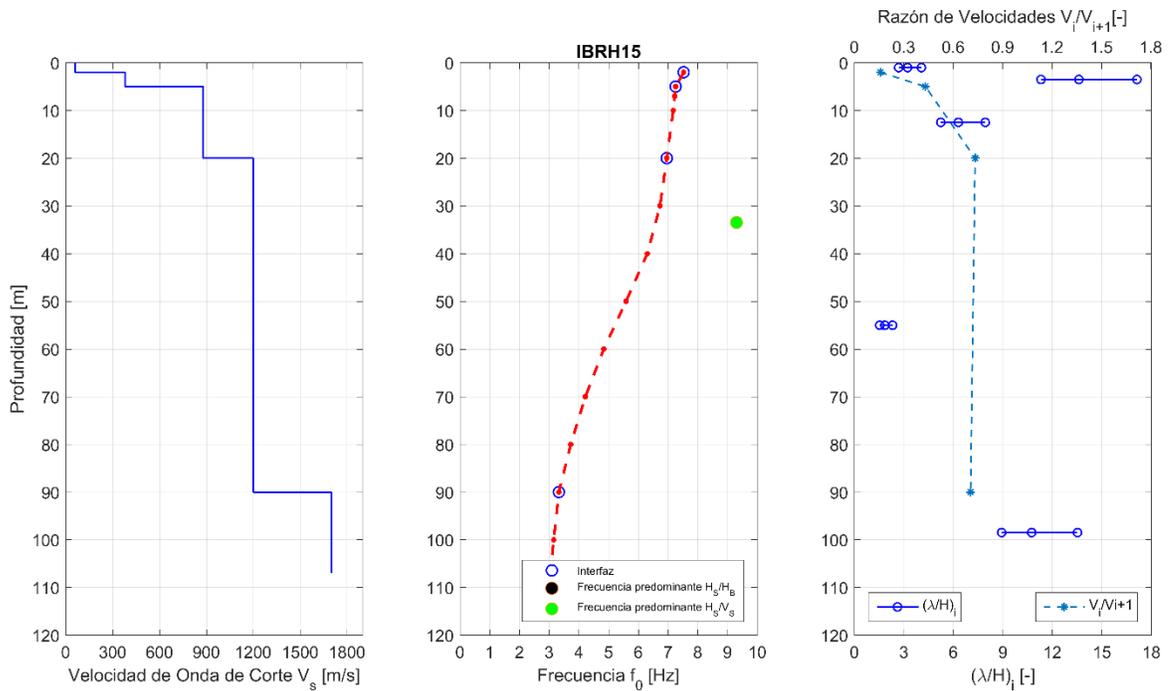


Figura 4.43: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación IBRH15.

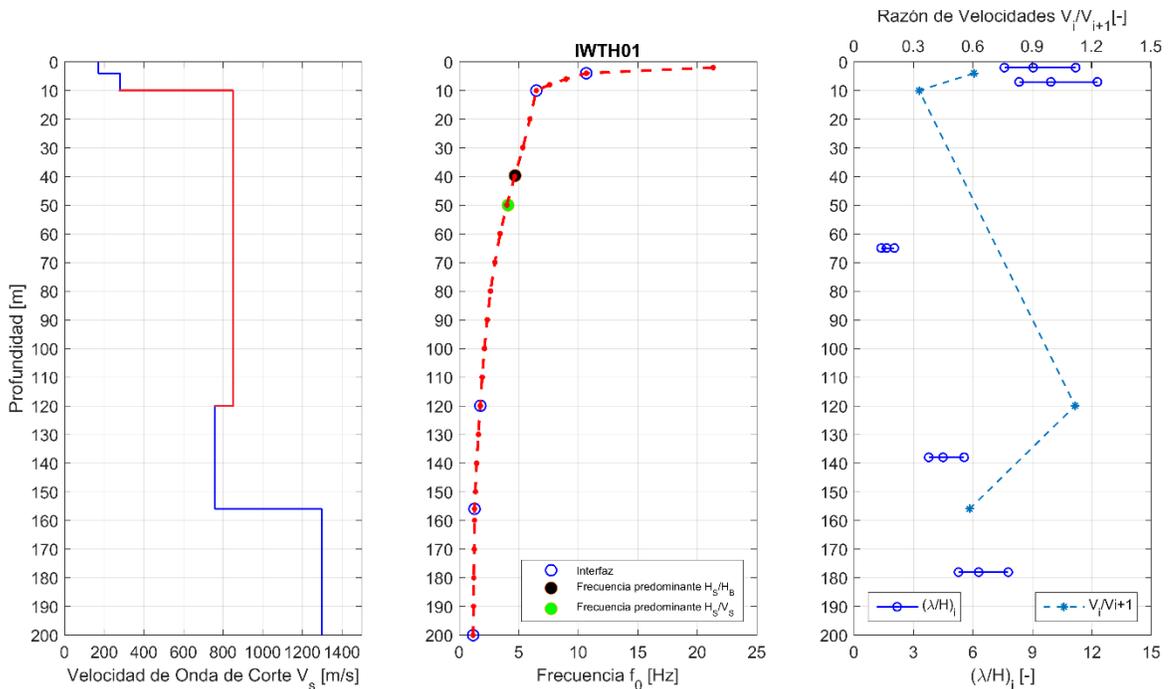


Figura 4.44: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación IWTH01.

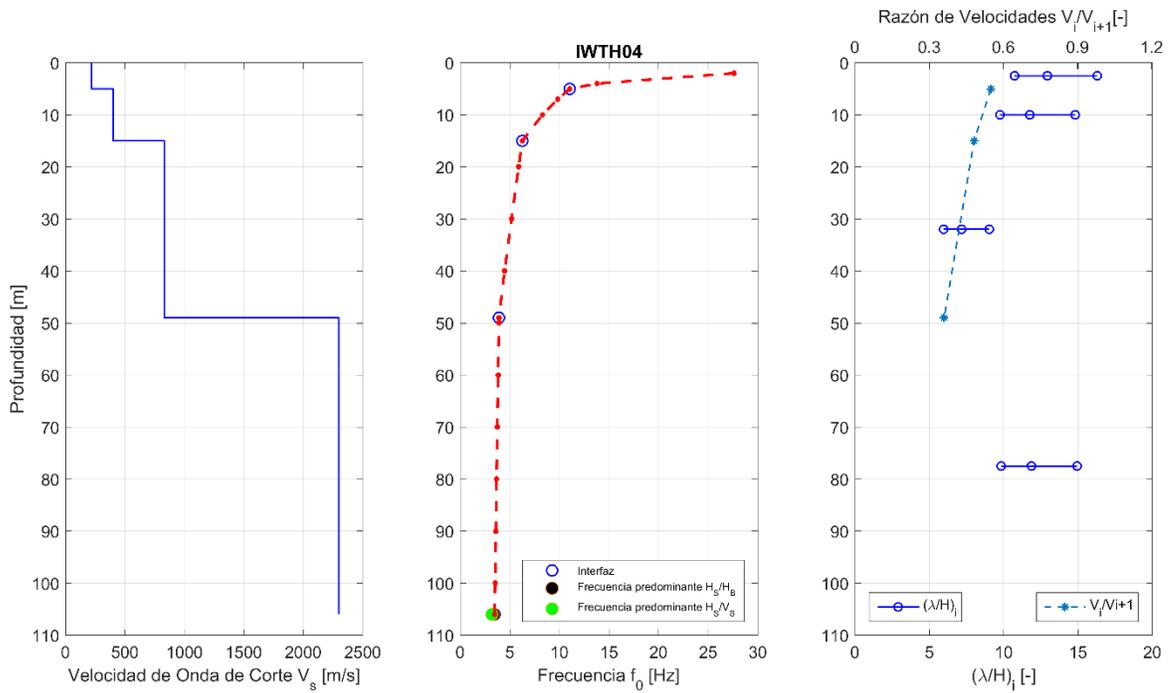


Figura 4.45: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación IWTH04.

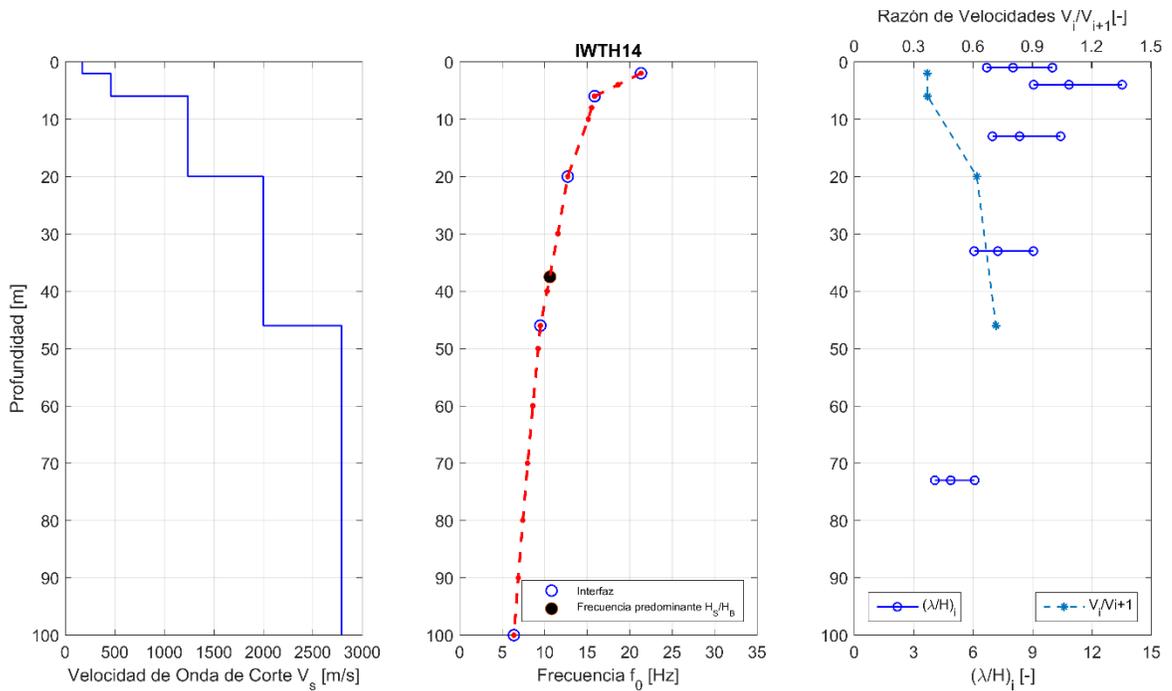


Figura 4.46: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación IWTH14.

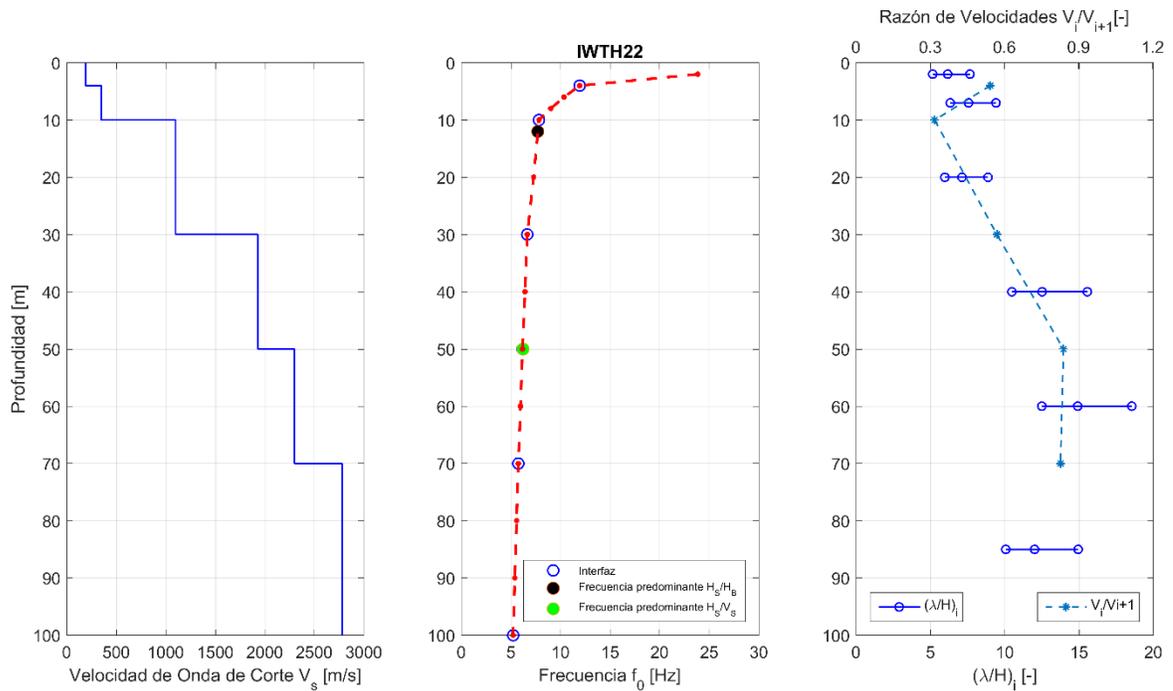


Figura 4.47: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación IWTH22.

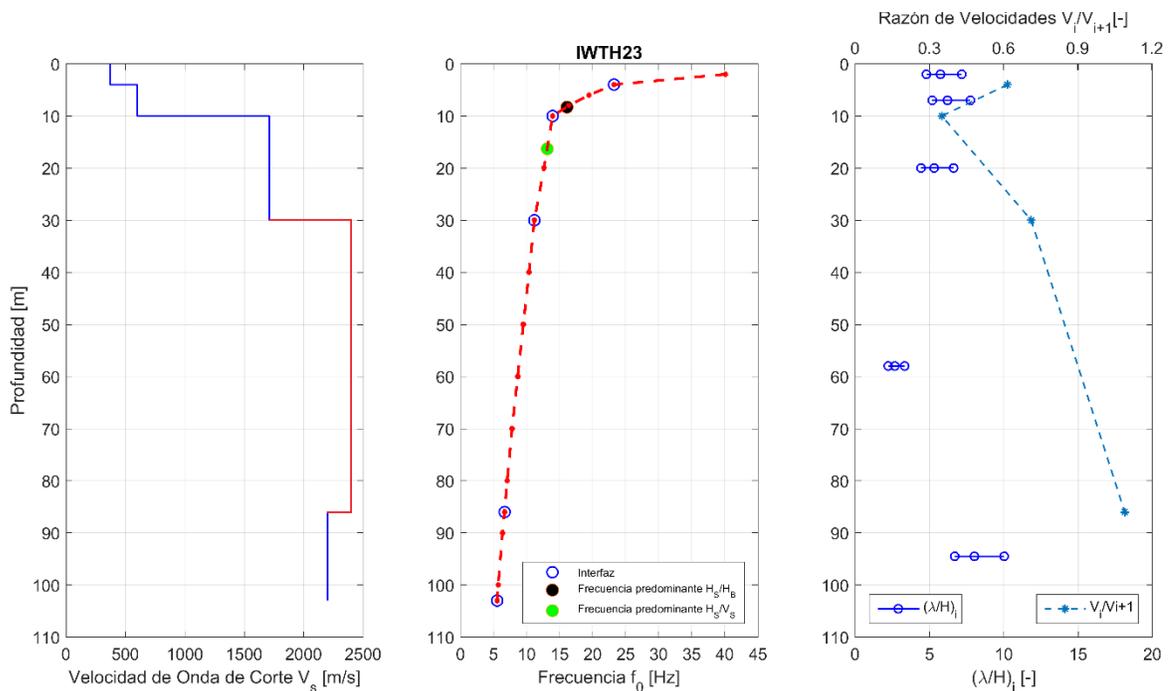


Figura 4.48: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación IWTH23.

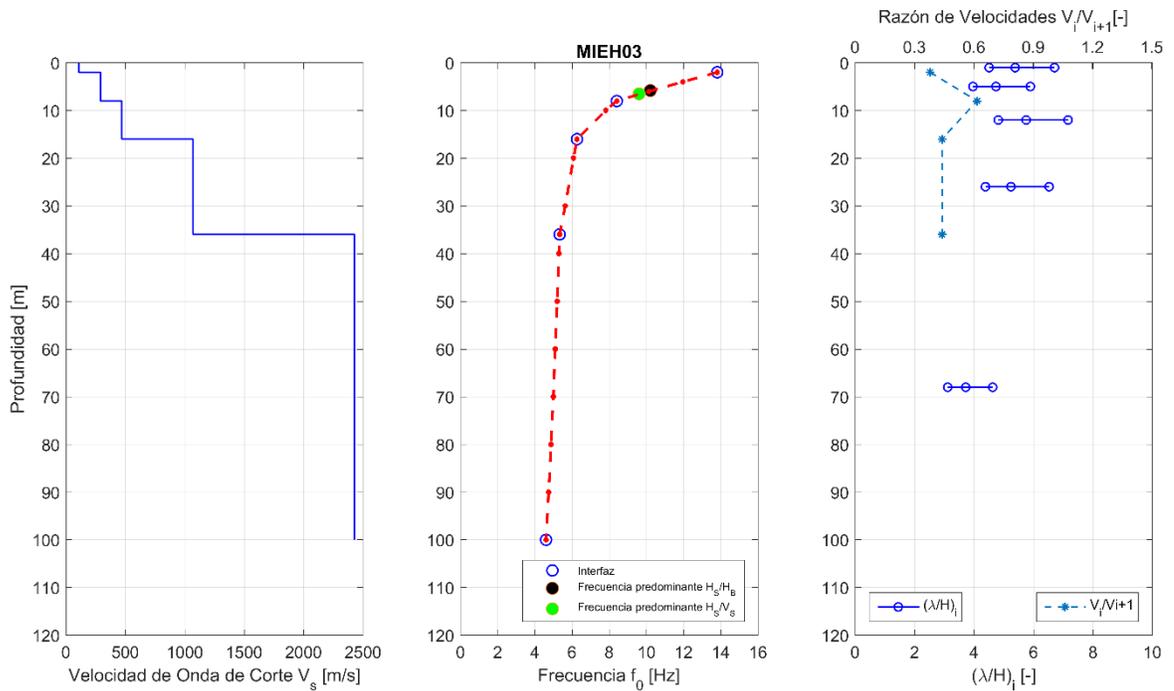


Figura 4.49: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación MIEH03.

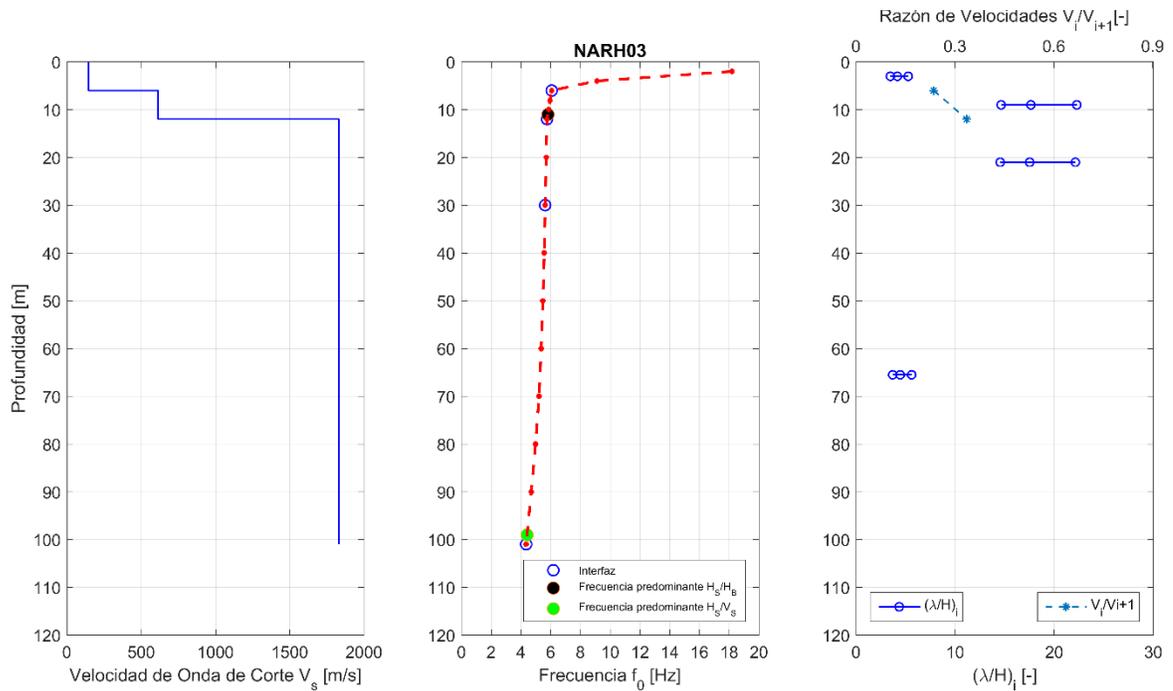


Figura 4.50: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación NARH03.

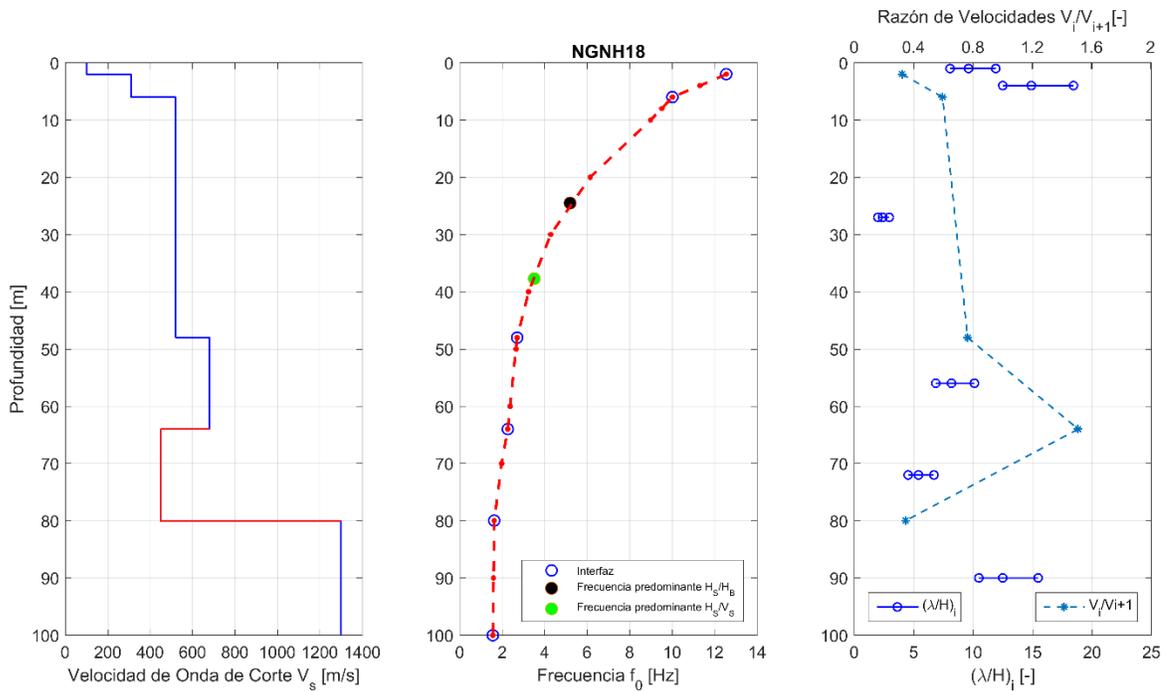


Figura 4.51: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación NGNH18.

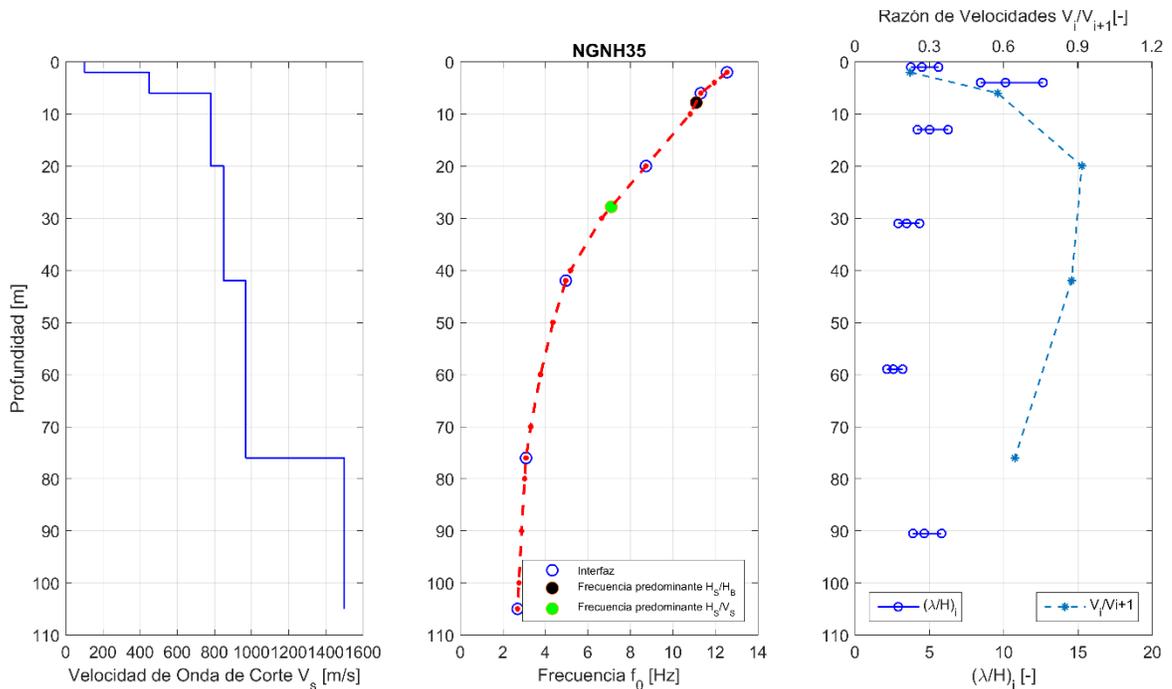


Figura 4.52: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación NGNH35.

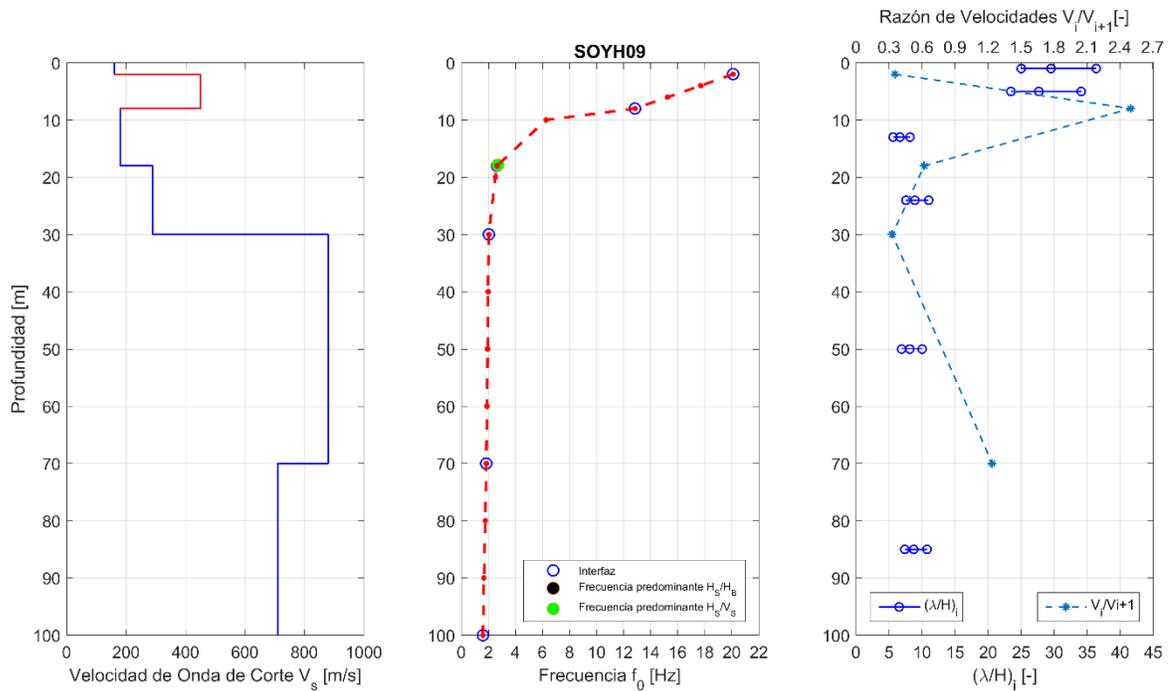


Figura 4.53: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación SOYH09.

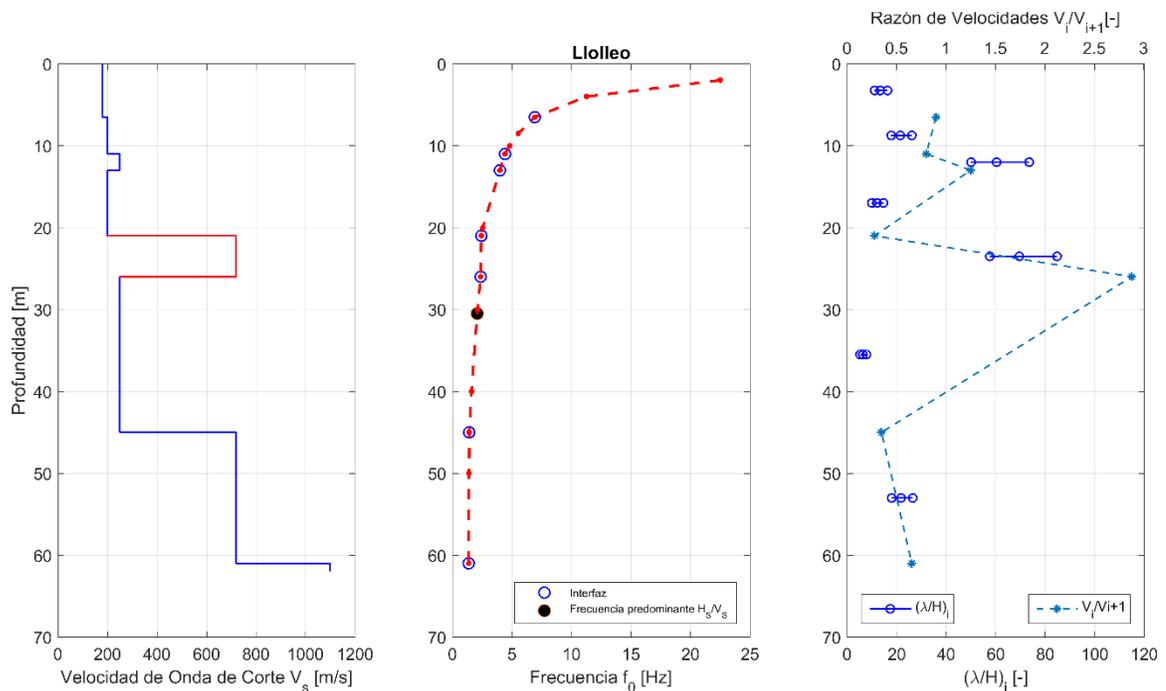


Figura 4.54: Velocidad de onda de corte  $V_s$  [m/s]; Frecuencia fundamental  $f_0$  junto a las frecuencias predominantes [Hz] y Longitud de onda normalizada por el espesor del estrato  $(\lambda/H)_i$  junto a la razón de velocidades en profundidad en la estación Lillole.

## CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se realizará un análisis de los resultados reportados en el capítulo 4. La Tabla 5.1 y Tabla 5.2 muestran resumen de las características del depósito de suelo asociado a cada estación analizada. Estas tablas presentan las siguientes características:

- Tipo de perfil: Puede ser un perfil con un suelo somero de espesor inferior a 30 metros de profundidad, o un perfil con una inclusión de alta o baja velocidad. En la tabla mencionada previamente, la letra “I” representa a aquellos perfiles con inclusión, mientras que la letra “S” es para referirse a los perfiles con suelos someros. Cuando se escriben ambas letras separadas con un guion, significa que el perfil corresponde a un suelo somero y además presenta una inclusión de velocidad. Dicho esto, se observa que hay 5 estaciones con una inclusión de velocidad, 11 con un depósito de suelo somero y 4 de ellas presentan un comportamiento dual entre estas dos particularidades.
- Frecuencia  $f_{HS/HB}$ ,  $f_{HS/Vs}$ : Corresponden a la frecuencia predominante promedio obtenida mediante la razón espectral  $H_s/H_B$  y  $H_s/V_s$ , respectivamente.
- $f_0$  1-D entre sensores y  $f_0$  1-D depósito de suelo: Corresponde a la frecuencia fundamental obtenida considerando el depósito entre los dos sensores y considerando solo el depósito de suelo, respectivamente.
- $V_{s30}$  (m/s): Corresponde al parámetro utilizado para clasificar sísmicamente los suelos, según la norma NCh433.
- Clasificación NCh433: Muestra la clasificación del suelo según la norma NCh433.Of1996 Mod.09.
- Clasif. Idini et al. (2016): Muestra la clasificación del suelo según la propuesta de Idini et al. (2016).
- Secuencia de estratos: Muestra la posible secuencia basada en las rigideces entre los estratos. Este criterio se obtiene al analizar los gráficos de desarrollo de la longitud de onda en profundidad (ver sección 4.5). Si la longitud de onda es mayor que el largo del estrato, entonces el movimiento que presentará dicho estrato será como el de un sólido rígido., siendo más rígido entre mayor sea la longitud de onda. Se observó cuál era el estrato que predominaba utilizando el gráfico de la frecuencia en profundidad utilizando la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  excepto para la estación de Lolloe, donde se utilizó  $H_s/V_s$  (Figura 5.1 a)), y una vez identificado se observó si el estrato sobre y bajo el estrato dominante es más rígido o flexible que este. (Figura 5.1 b)).  
La nomenclatura utilizada es de la forma “A-B-C”, donde “A” es el estrato superior del que predomina, “B” el estrato predominante y “C” el estrato inferior, siendo la letra “F” referencia a un estrato más flexible con respecto a su adyacente, mientras que “R” a un estrato más rígido. En algunos casos se agregó la componente “/C”, que significa que está dominando el depósito completo entre los dos sensores. Otro caso particular

son aquellas estaciones donde aparecen dos posibles secuencias- Esto es debido a que, como no hay una coincidencia entre la frecuencia predominante  $H_s/H_B$  y  $H_s/V_s$ , existía la posibilidad de tener dos estratos dominantes, por lo que la primera secuencia corresponde al obtenido mediante el uso de  $H_s/H_B$  y el segundo al  $H_s/V_s$ .

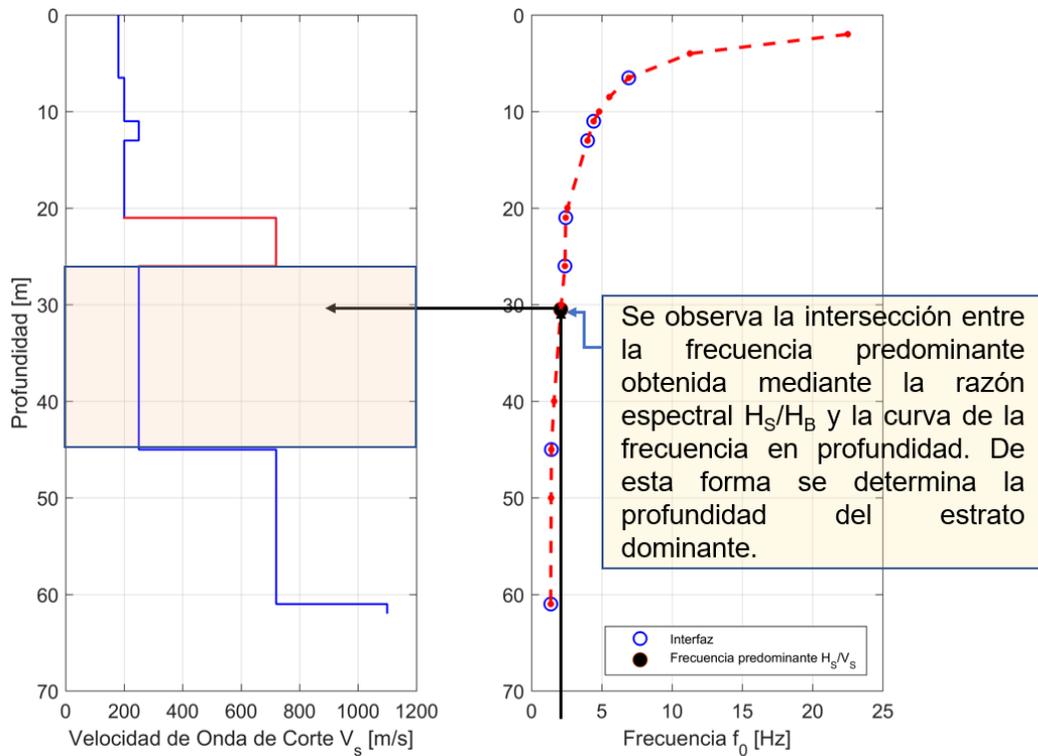


Figura 5.1: a) Metodología aplicada para determinar el estrato predominante.

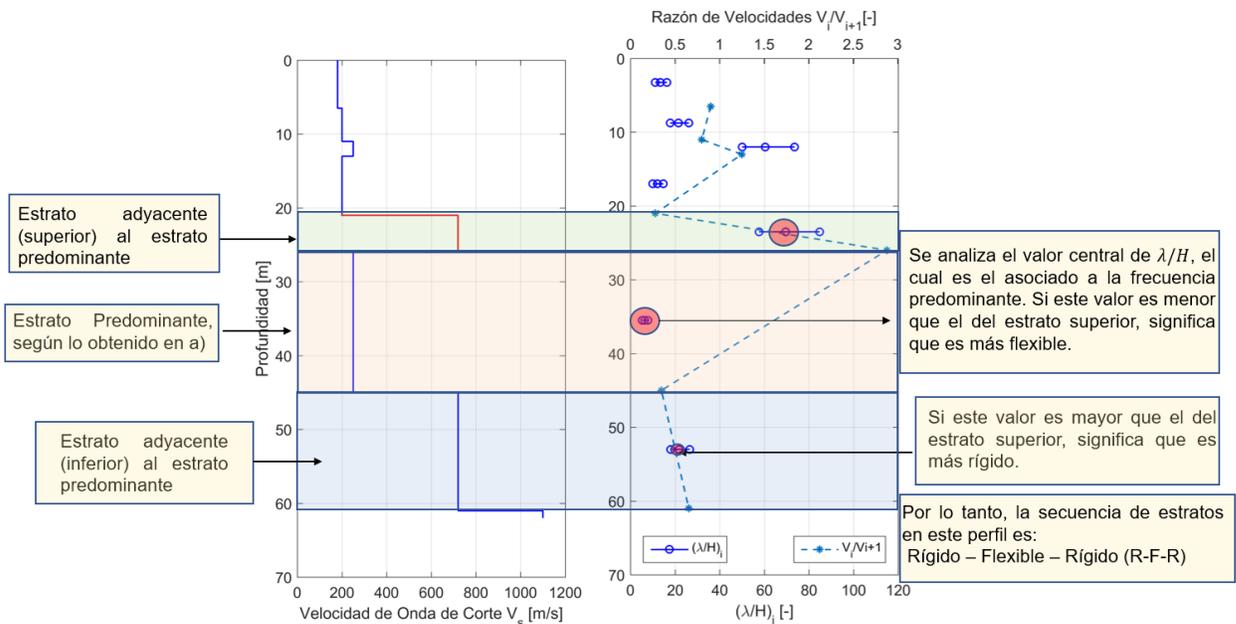


Figura 5.1: b) Metodología para determinar la secuencia de rigideces de los estratos.

Tabla 5.1: Resumen de características de los perfiles asociados a las estaciones ABSH09 hasta IWTH04.

Estación	ABSH09	ABSH14	FKSH05	FKSH07	FKSH09	FKSH17	FKSH19	GIFH21	IBRH15	IWTH01	IWTH04
<b>Tipo de Perfil</b>	I	I	I-S	S	I-S	S	S	S	S	I-S	S
<b>Frecuencia <math>f_{HS(HB)}</math> [Hz]</b>	6.61	10.01	4.61	12.51	14.11	4.11	3.5	11.81	9.31	4.71	3.41
<b>Frecuencia <math>f_{HS(VS)}</math> [Hz]</b>	6.11	1.71	4.31	12.11	13.71	3.81	3.2	11.11	9.31	4.11	3.21
<b><math>f_0</math> 1-D entre sensores [Hz]</b>	1.11	1.71	3.26	3.25	2.88	4.6	3.01	2.76	3.06	1.16	3.47
<b><math>f_0</math> 1D depósito de suelo [Hz]</b>	1.29	1.93	7.69	17.14	7.29	7.53	3.39	>20	7.23	6.41	6.31
<b><math>V_{s30}</math> [m/s]</b>	394	352	596	829	585	544	338	964	450	438	456
<b>Clasificación NCh433</b>	C	C	B	B	B	B	C	A	C	C	C
<b>Clasif. Idini et al. (2016)</b>	S <sub>I</sub>	S <sub>IV</sub>	S <sub>III</sub>	S <sub>II</sub>	S <sub>II</sub>	S <sub>II</sub>	S <sub>III</sub>	S <sub>II</sub>	S <sub>II</sub>	S <sub>III</sub>	S <sub>III</sub>
<b>Secuencia de estratos</b>	F-R-F	R-F-F	R-F-R	R-F-R	R-F-R	R-F-R/C	F-R-R/C	R-F-R	N.A.	R-F-R	F-R-R/C

Tabla 5.2: Resumen de características de los perfiles asociados a las estaciones IWTH14 hasta SOYH09, incluyendo Lolloo.

Estación	IWTH14	IWTH22	IWTH23	MIEH03	NARH03	NGNH18	NGNH35	SOYH09	Lolloo
<b>Tipo de Perfil</b>	S	S	I-S	S	S	I	S	I	I
<b>Frecuencia <math>f_{HS(HB)}</math> [Hz]</b>	10.61	7.71	16.11	10.21	5.81	5.21	11.11	2.71	-
<b>Frecuencia <math>f_{HS(VS)}</math> [Hz]</b>	4.71	6.21	13.11	9.61	4.41	3.51	7.11	2.71	2.07
<b><math>f_0</math> 1-D entre sensores [Hz]</b>	6.35	5.17	5.51	4.54	4.34	1.56	2.68	1.59	1.35
<b><math>f_0</math> 1D depósito de suelo [Hz]</b>	15.9	7.83	13.96	6.11	5.76	1.63	8.8	2.02	-
<b><math>V_{s30}</math> (m/s)</b>	816	532	923	435	492	379	512	244	232
<b>Clasificación NCh433</b>	B	B	A	C	C	C	B	D	D
<b>Clasif. Idini et al. (2016)</b>	S <sub>III</sub>	S <sub>II</sub>	S <sub>I</sub>	S <sub>II</sub>	S <sub>III</sub>	S <sub>III</sub>	S <sub>II</sub>	S <sub>III</sub>	S <sub>IV</sub>
<b>Secuencia de estratos</b>	R-F-F	R-F-R/F-R-F	F-R-F	R-F-R	F-R-R/R-F-R C	R-F-R	R-R-F	R-F-R	R-F-R

## Análisis de las frecuencias fundamentales obtenidas

La Figura 5.2 muestra la frecuencia fundamental obtenida mediante la teoría unidimensional de propagación de ondas de corte SH considerando el depósito entre los dos sensores versus la frecuencia fundamental obtenida con la misma teoría, pero considerando solo el depósito de suelo (ANEXO B). Se observa que las frecuencias entre estos dos análisis no son similares, y la frecuencia predominante obtenida considerando solo el depósito de suelo presenta valores de la frecuencia fundamental mayores que si se considera el depósito completo entre ambos sensores.

Se observa que para aquellos perfiles que no poseen un depósito somero, pero sí presentan una inclusión de alta o baja velocidad, las frecuencias fundamentales obtenidas mediante estos dos métodos son bastante similares.

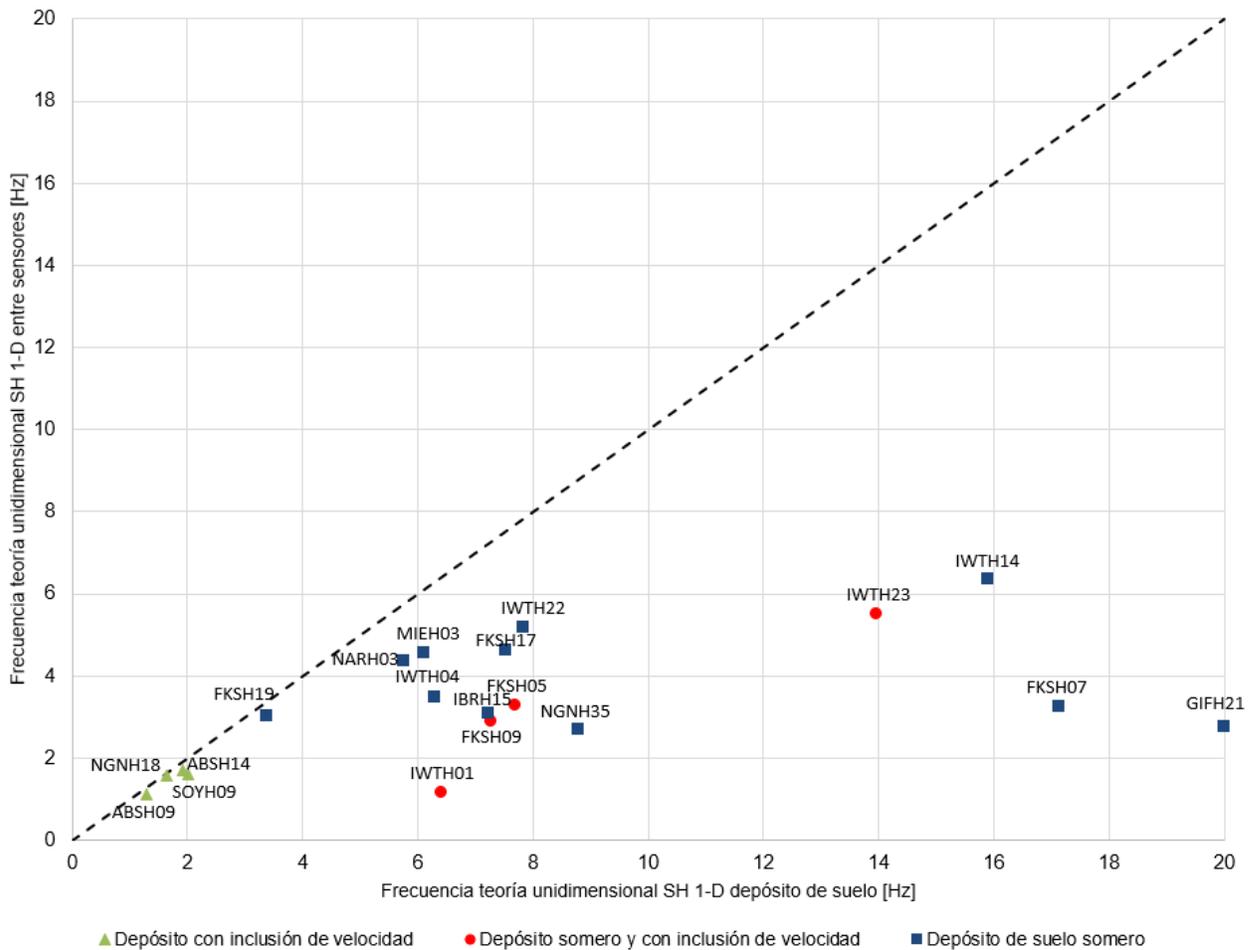


Figura 5.2: Gráfico de la frecuencia fundamental considerando el depósito completo entre los dos sensores vs la frecuencia fundamental considerando solo el depósito de suelo.

Análisis de la frecuencia fundamental obtenida por la teoría unidimensional de propagación de ondas de corte SH con respecto a frecuencia predominante obtenida mediante razones espectrales  $H_s/H_B$  y  $H_s/H_v$

Con respecto los resultados obtenidos en la sección 4.1, se puede observar que los peaks obtenidos mediante la teoría unidimensional de propagación de ondas de corte SH presentan una frecuencia fundamental distinta a la que se obtuvo de forma empírica utilizando las razones espectrales  $H_s/H_B$  y  $H_s/H_v$  en la gran mayoría de las estaciones estudiadas. Para evaluar la variación de los peaks teóricos con respecto a los empíricos, se utilizó el coeficiente  $r$  de Pearson (ver fórmula (20)), el cual fue utilizado por Thompson et al. (2012), quienes mencionan que una buena correlación entre la función de transferencia teórica y empírica se obtiene si el valor de  $r$  es igual o superior a 0.6.

$$r_{ij} = \frac{\sum(ETF_i(f) - \overline{ETF_i}) \cdot (TTF_j(f) - \overline{TTF_j})}{\sqrt{\sum(ETF_i(f) - \overline{ETF_i})^2} \cdot \sqrt{\sum(TTF_j(f) - \overline{TTF_j})^2}} \quad (20)$$

Donde  $ETF_i(f)$  es la razón espectral asociada al sismo  $i$ ;  $\overline{ETF_i}$  es la razón espectral promedio;  $TTF_j(f)$  es la función de transferencia teórica asociada al  $j$  análisis basado en el amortiguamiento (que en este estudio fue  $j=1$  ya que solo se trabajó para un nivel de amortiguamiento) y  $\overline{TTF_j}$  es la función de transferencia teórica promedio.

El coeficiente de Pearson puede tomar valores entre -1 y 1. Entre más cercano sea a 1, significa que las variables presentan una dependencia lineal directa (cuando sube una variable, también sube la otra), mientras que si es más cercana a -1, la dependencia lineal es inversa (cuando sube una, la otra baja). Hay que tener en consideración que, si  $r=0$ , entonces no existe correlación lineal, pero sí puede existir una correlación no lineal.

Se graficó el coeficiente de correlación de Pearson  $r$  de cada estación en la Figura 5.3, donde se puede observar que, para la mayoría de las estaciones, la función de transferencia teórica no coincide muy bien con la empírica, exceptuando las estaciones FKSH07, FKSH17, FKSH19, IBRH15, IWTH22, MIEH03, NARH03 y NGNH35, las cuales corresponden a depósitos de suelos someros y poseen una buena correlación con las razones espectrales  $H_s/H_B$  y  $H_s/V_s$ . Sin embargo, al observar la Figura 5.4 (gráfico de la frecuencia predominante obtenida mediante la teoría unidimensional de propagación de ondas de corte SH considerando el depósito entre los dos sensores versus las frecuencias predominantes obtenidas mediante razones espectrales  $H_s/H_B$  y  $H_s/V_s$ ) se observa que en las estaciones IBRH15, MIEH03 y NGNH35 el primer peak – asociado a la frecuencia fundamental o predominante, según corresponda – no están cerca entre sí, pero los otros peaks tienen ciertas similitudes en forma (Ver sección 4.1), por lo que entrega un valor mayor de  $r$ .

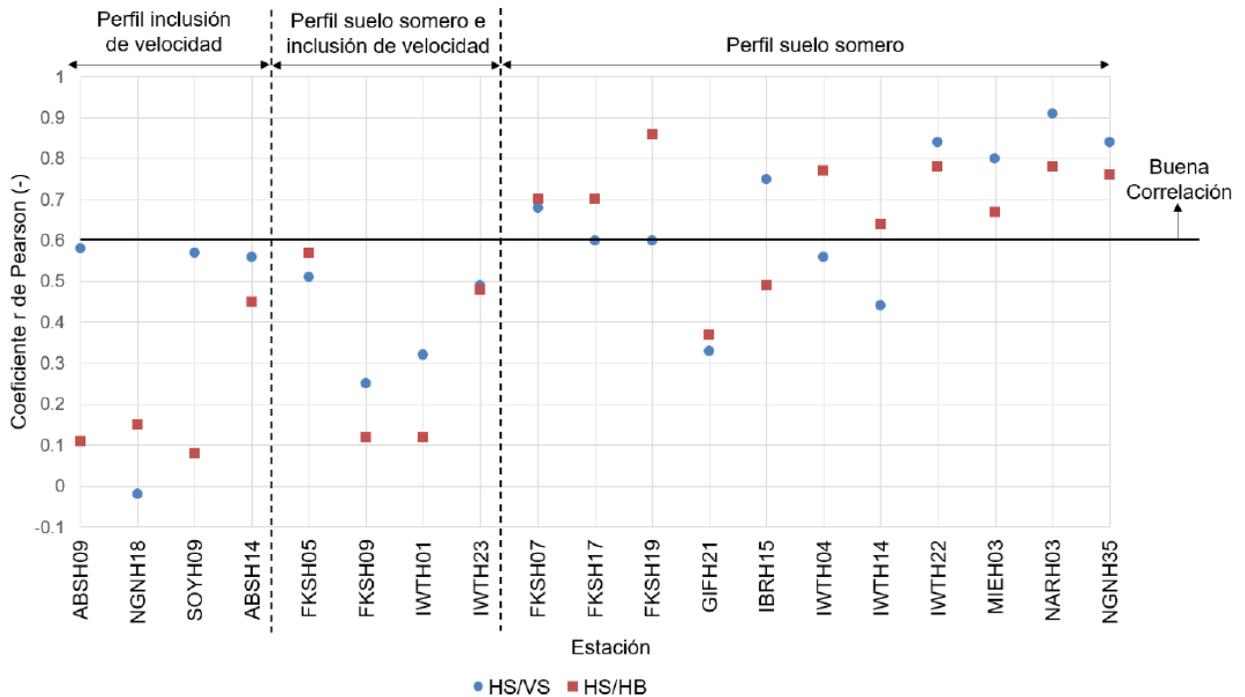


Figura 5.3: Gráfico de coeficiente de correlación de Pearson para las funciones de transferencia teóricas y empíricas, considerando función empírica obtenida con cociente espectral  $H_S/H_B$  y  $H_S/V_S$ . La línea negra representa el umbral de buena correlación propuesto por Thompson et al. (2012).

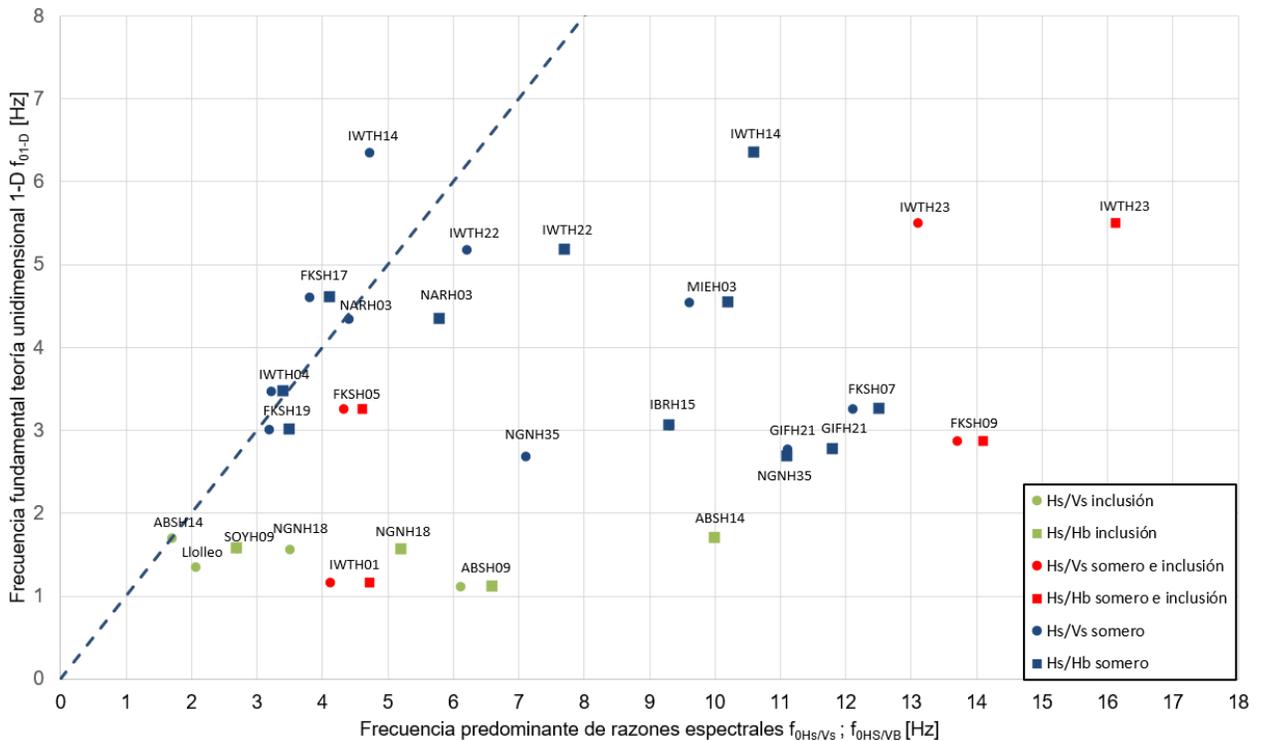


Figura 5.4: Gráfico de la frecuencia fundamental obtenida mediante la teoría unidimensional de propagación de ondas de corte SH considerando el depósito entre los dos sensores versus las frecuencias predominantes obtenidas mediante las razones espectrales  $H_S/H_B$  y  $H_S/V_S$ .

Razones por las cuales la teoría unidimensional de propagación de ondas de corte SH no permite capturar de manera precisa la frecuencia predominante de vibración del depósito de suelo se puede deber a efectos de no linealidad, efectos topográficos, anisotropía, a la existencia de interferencias de ondas ascendentes y descendentes y a la existencia de ondas P y SV. Es importante tener en consideración que tanto la onda P como la SV presentan su propia función de transferencia, generando una amplificación para una frecuencia dada. Por ejemplo, si se considera el sitio de Lolloe y el de la estación SOYH09, las funciones de transferencia teóricas de las ondas P, SH y SV para distintos ángulos de incidencia de la onda corresponden a las mostradas en la Figura 5.5, donde se observa que la amplificación que presenta cada una de ellas, y que no dependen del ángulo de incidencia de las ondas.

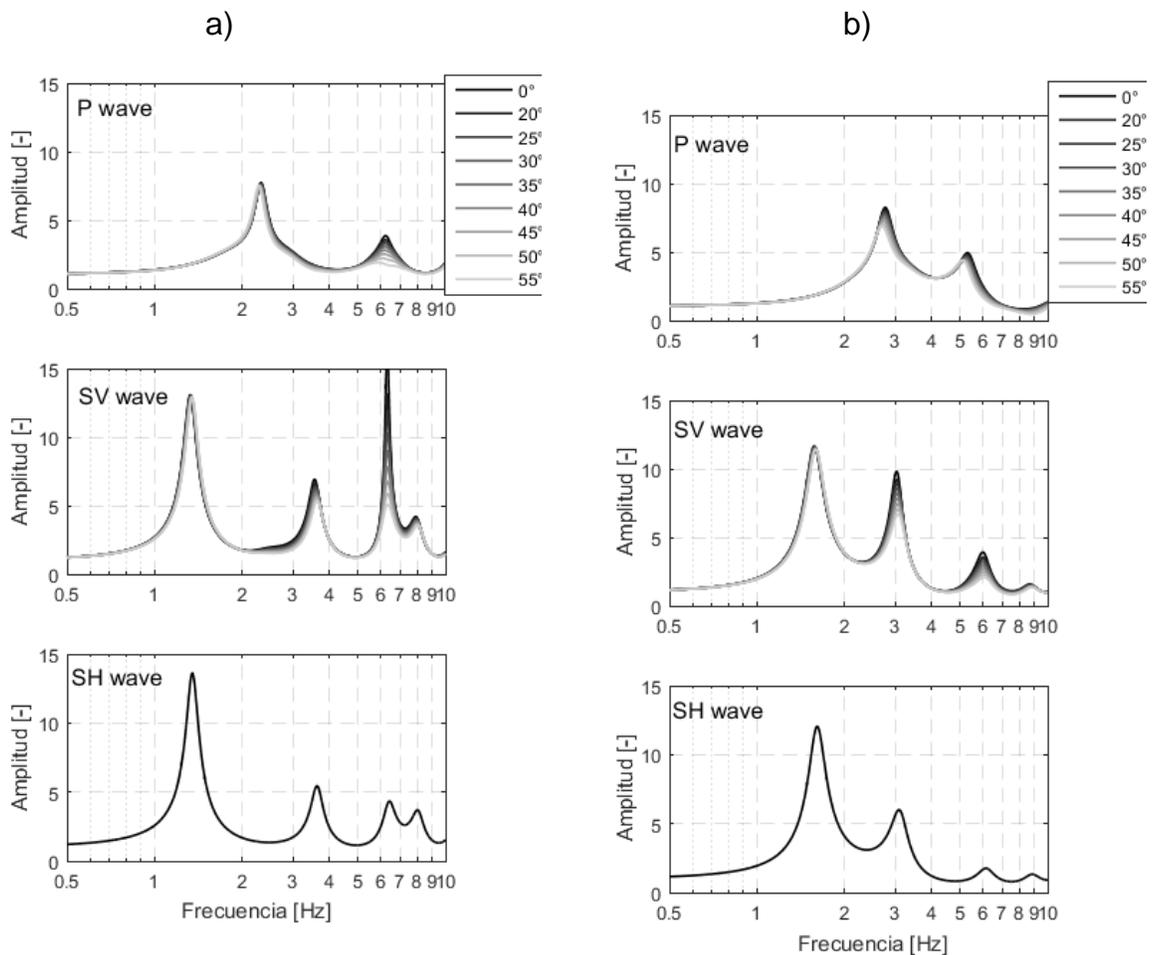


Figura 5.5: FT teóricas para ondas P, SV y SH para a) Lolloe b) SOYH09.

#### Análisis de frecuencias obtenidas por razones espectrales $H_s/H_B$ y $H_s/V_s$

Con respecto a la relación entre la frecuencia predominante obtenida mediante las razones espectrales  $H_s/H_B$  y  $H_s/V_s$ , se puede observar que en 15 de las 19 estaciones estudiadas presentan una frecuencia predominante bastante similar entre ambos métodos, de las cuales 6 de ellas presentan una inclusión de velocidad (Figura 5.6). En aquellos perfiles donde no coinciden estas dos frecuencias predominantes, es posible que coincidan en caso de que el sensor se ubique exactamente en la interfaz suelo-

roca. Una forma de poder corroborar que efectivamente la razón espectral  $H_s/H_B$  no ubicada en la interfaz entrega una frecuencia predominante confiable es realizando razones espectrales con respecto a un sitio de referencia, considerando un afloramiento rocoso cerca de la zona que se está analizando. Sin embargo, para las estaciones utilizadas en este estudio, no hay sitios que se puedan considerar de referencia.

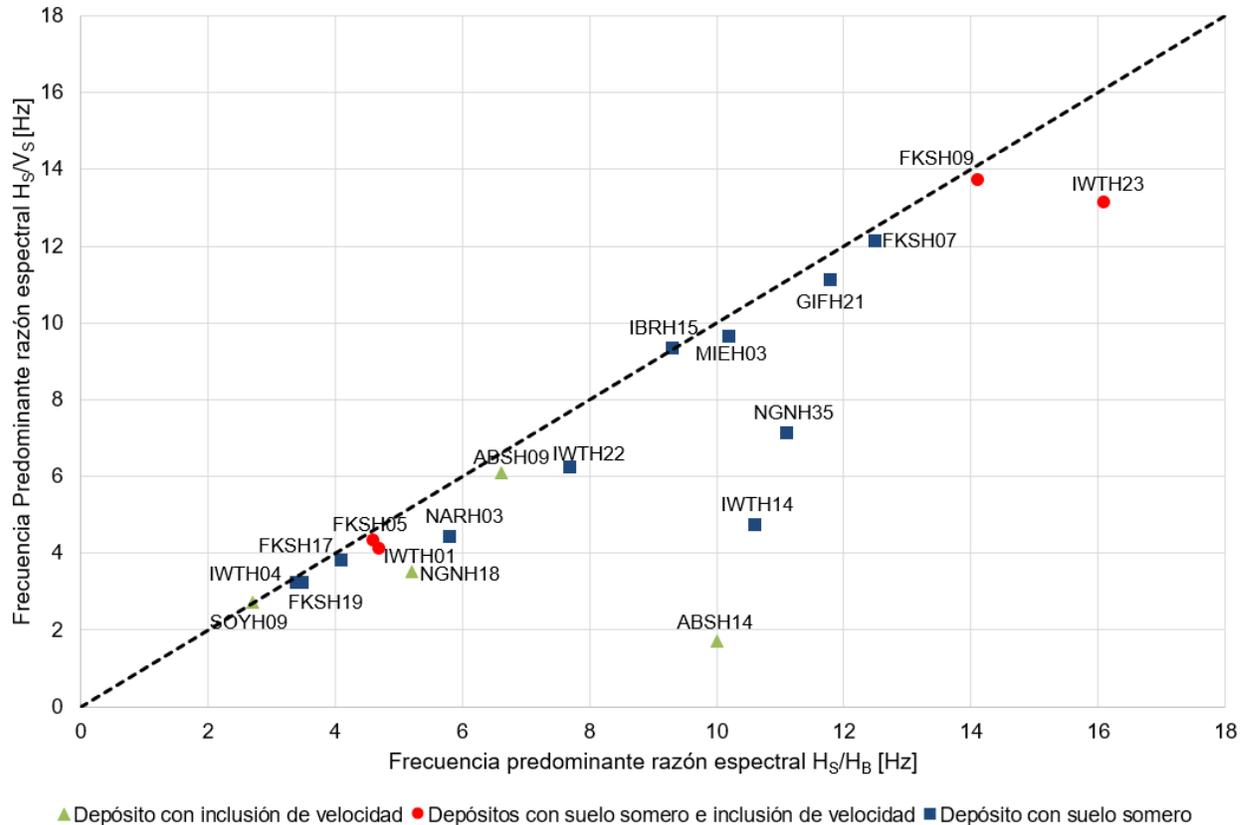


Figura 5.6: Gráfico de frecuencia predominante obtenida mediante la razón espectral  $H_s/V_s$  versus la frecuencia predominante obtenida mediante  $H_s/H_B$ , para todas las estaciones estudiadas.

No es descartable que en los perfiles donde existen diferencias entre las frecuencias predominantes  $H_s/H_B$  y  $H_s/V_s$  se deba a que los perfiles de velocidad no son del todo correctos, ya sea por una mala ejecución del ensayo downhole o por errores en el procesamiento de datos. Bajo esta misma línea, se recomienda analizar la confiabilidad de los datos obtenidos mediante este ensayo, ya que el método downhole es un muy sensible a la precisión con que se determinan los tiempos de llegada de las ondas sísmicas, como también al impulso que se aplica al momento de generar la onda, ya que puede influir en la calidad de la señal o ruido (Correia, 2015)

### Análisis de las razones espectrales $V_s/V_B$

Al analizar las razones espectrales verticales se debe saber que, si la razón  $V_s/V_B$  es mayor a 1, significa que existe una amplificación de la componente vertical.

Se puede observar en la sección 4.2 que las curvas de razones espectrales se mantienen planas hasta los 4.5 Hz aproximadamente. Posteriormente, se observa una amplificación de esta componente.

#### Análisis de las razones espectrales $H_B/V_B$

Por otro lado, en la sección 4.3 las curvas se ven técnicamente planas en todo el rango de frecuencias, puesto que no se observan peaks que superen una amplitud espectral de 2. Por lo tanto, se puede concluir que el supuesto teórico que utiliza Nakamura en su método es válido para estos tipos de depósitos de suelos singulares.

#### Análisis del cociente de las razones espectrales HVSR/HHSR

Al analizar la sección 4.4 se observa que las curvas para todas las estaciones se mantienen planas para un valor cercano a 1 en un rango de frecuencias menores a 4 Hz. En aquellas estaciones donde las frecuencias predominantes  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$  coinciden, se observa que existe una similitud de la amplificación promedio asociada a estos métodos en el rango de frecuencias mencionado previamente, para luego comenzar a presentar diferencias de manera paulatina, a menos que presenten solo una inclusión de velocidad, ya que en estos casos las diferencias son más pronunciadas en un rango de frecuencias superior a los 4 Hz. Si las frecuencias predominantes  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$  no coinciden, la diferencia abrupta que se observa en los perfiles con inclusión de velocidad también se observa en estos casos.

#### Análisis de secuencia de rigideces en base a la longitud de onda

Al analizar las rigideces de los perfiles estudiados, se puede observar que cumplen con un patrón particular, el cual consiste en la presencia de un estrato rígido, seguido por uno predominante flexible y posteriormente otro rígido. Sin embargo, para realizar esta afirmación se está considerando un fuerte supuesto, el cual asume que la rigidez del material que se encuentra bajo el sensor de la base, que es mayoritariamente roca, es más rígido que el material que se encuentra justo encima del instrumento. Sin embargo, este supuesto solo afecta a los casos en que se tiene que el estrato que predomina en basados en la frecuencia predominante obtenida es el que se encuentra justo encima del sensor en la base. Ahora bien, del total de las estaciones estudiadas, 11 de ellas cumplen con este patrón, y además cumplen con que la frecuencia predominante obtenida mediante  $H_s/H_B$  y  $H_s/V_s$  son similares. Por último, es importante mencionar que 6 de los depósitos poseen que cumplen con el patrón poseen una inclusión de alta velocidad, mientras que 8 poseen un depósito de suelo somero, por lo que existen 3 estaciones que cumplen con ambas características.

#### Comparación de clasificación sísmica de suelos someros según la norma NCh433 e Idini et al. (2016)

Al analizar aquellos depósitos de suelos con espesor inferior a 30 metros de profundidad, se puede observar que dos sitios pueden clasificar igual según la norma NCh433, pero distinto según otras propuestas, como lo es la de Idini et al. (2016). Por ejemplo, las estaciones GIFH21 y IWTH23 según la norma NCh433 clasificarían como un suelo tipo A, mientras que según Idini et al. (2016) se clasificarían como suelos tipo  $S_{II}$  y  $S_I$ , respectivamente. Otro caso es la estación IWTH14 con la IWTH04 y la IWTH22. Al comparar la clasificación de la estación IWTH14 con la de la estación IWTH04 según

la norma NCh433 clasificarían como suelos tipo B y C, respectivamente, mientras que según Idini et al. (2016) ambos serían suelos tipo S<sub>III</sub>. Por otro lado, al comparar la clasificación de la estación IWTH14 con la de la estación IWTH22, según la norma NCh433 ambas clasifican como suelo tipo B, pero según Idini et al. (2016) estos suelos serían tipo S<sub>III</sub> y S<sub>II</sub>, respectivamente. Por lo tanto, se observa una discordancia entre los autores al momento de clasificar sísmicamente los depósitos de suelo someros.

### Análisis de dispersión de la frecuencia

Del análisis estadístico realizado para verificar la dispersión de la frecuencia predominante, se observa que la amplitud espectral promedio en torno a la frecuencia predominante obtenida mediante las razones espectrales H<sub>s</sub>/H<sub>B</sub> y H<sub>s</sub>/V<sub>s</sub> es inversamente proporcional a la desviación estándar. Esto significa que, entre mayor es la amplitud espectral promedio, la dispersión de las frecuencias predominantes obtenidas por analizar cada sismo es menor (Figura 5.7).

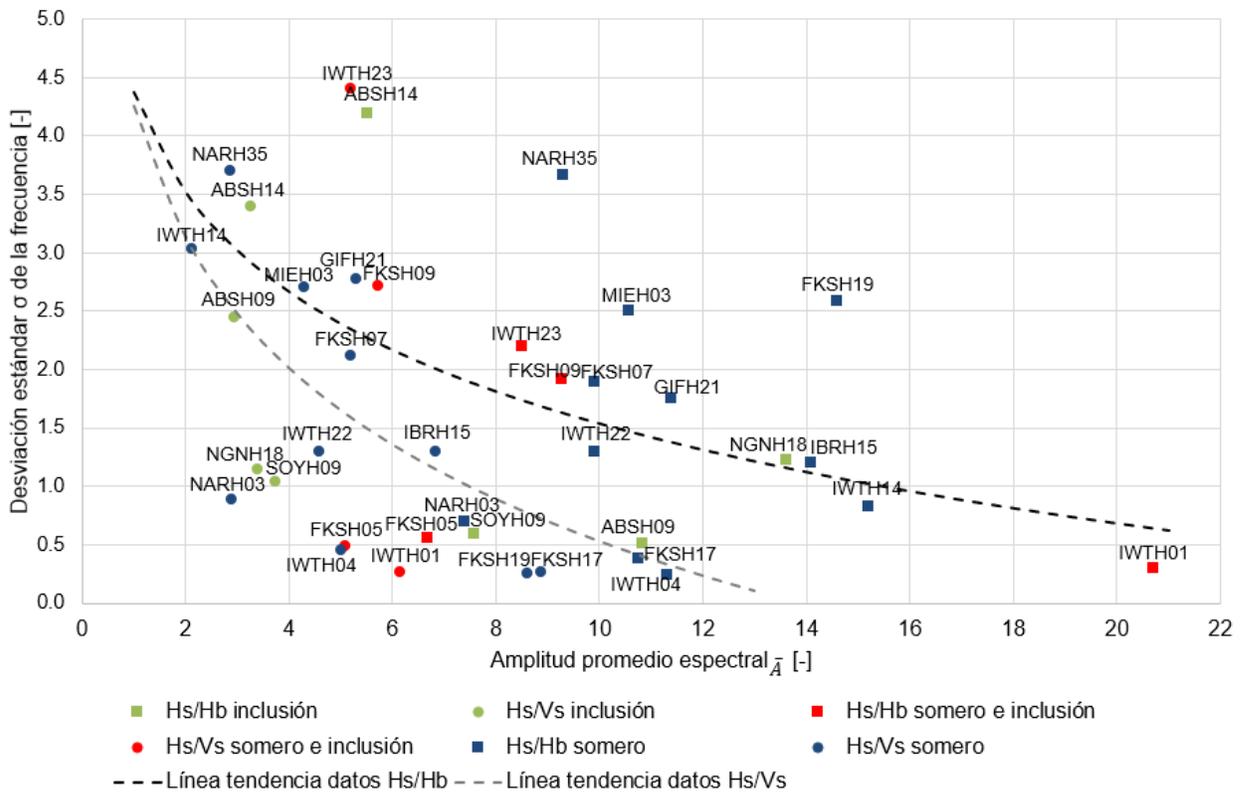


Figura 5.7: Gráfico de Desviación Estándar  $\sigma$  de la frecuencia predominante v/s Amplitud Espectral Promedio  $\bar{a}$ . Cada punto representa una estación.

Aquellas estaciones que presentan un valor alto para la desviación estándar, como IWTH23 o ABSH14, es debido a que se observa más de un peak, por lo que algunos sismos amplifican más para una frecuencia más baja (o alta) que la frecuencia predominante asociada a la amplitud espectral promedio.

Respecto a la fuente de los sismos utilizados, se observa que la mayoría se encuentran ubicados entre la longitud 136° y 144°, a una profundidad menor a los 50 km. Existen algunos sismos que se encuentran bajo esta profundidad, en las cuales puede existir un

efecto asociado a la fuente que puede estar influyendo en los resultados. Sin embargo, como la cantidad de sismos que se encuentran más lejos no son muchos, se podría realizar el análisis sin considerar estos sismos y ver cómo varían los resultados finales, aunque no se esperarían mayores diferencias.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del desarrollo realizado en este trabajo, se pueden establecer las siguientes conclusiones y recomendaciones.

### 6.1 Conclusiones

- Los estudios de suelos con inclusión de alta o baja velocidad en la literatura se han enfocado principalmente en mejorar las técnicas de estimación de los modelos de velocidades de estos perfiles, pero no han profundizado en el estudio de su respuesta sísmica.
- En depósitos de suelo de espesor inferior a 30 metros, se observa que depósitos de suelo que tienen la misma clasificación según la norma NCh433, presentan clasificaciones distintas si se compara con la clasificación propuesta por otros autores, como Idini et al. (2016). Esta discordancia sugiere el uso de más de un parámetro para la clasificación sísmica de este tipo de sitios; es decir, tanto el uso del  $V_{s30}$  como la frecuencia predominante de vibración.
- La frecuencia predominante obtenida mediante la razón espectral  $H_s/H_B$  coincide con la obtenida utilizando la razón espectral  $H_s/V_s$  en 13 de las 19 estaciones analizadas. Las diferencias pueden ser debido a que el sensor en la base no se encuentra exactamente en una interfaz entre el suelo y la roca. Otra posibilidad puede ser que los perfiles de velocidad no son del todo correctos, ya sea por una mala ejecución del ensayo downhole o por errores en el procesamiento de datos
- En los depósitos donde existe una inclusión de alta o baja velocidad, o un depósito de suelo con espesor menor a 30 metros, se observa que la teoría unidimensional de propagación de ondas de corte SH no predice las frecuencias predominantes que se obtienen con las razones espectrales  $H_s/H_B$  o  $H_s/V_s$ . Según diversos autores, esto se puede deber a que la teoría no considera los efectos de amplificación que pueden generar las ondas P o SV, efectos topográficos, la inclinación de los estratos, la anisotropía del medio o los efectos de no linealidad.
- La función de transferencia teórica no coincide con las razones espectrales  $H_s/H_B$  y  $H_s/V_s$ , de acuerdo con el coeficiente de correlación  $r$  de Pearson en perfiles con una inclusión de velocidad. Por otro lado, el valor del coeficiente de correlación de Pearson es alto en depósitos de suelos someros. No obstante, es posible que el coeficiente sea elevado a pesar de que el peak fundamental de la función de transferencia teórica y el peak predominante de las razones espectrales no coincidan, dado que las curvas son similares para el resto de las frecuencias.
- Existe cierto patrón en perfiles de suelos singulares, especialmente donde las frecuencias predominantes de las razones espectrales  $H_s/V_s$  y  $H_s/H_B$  coinciden. El patrón consiste en la presencia de un estrato rígido, seguido de uno más flexible y luego uno más rígido en profundidad. Además, El estrato flexible se encuentra a la profundidad en que la frecuencia predominante obtenida mediante la razón espectral  $H_s/H_B$  coincide con la frecuencia fundamental obtenida mediante la teoría

unidimensional de propagación de ondas de corte SH. Se recomienda profundizar el estudio asociado al patrón de rigideces visto en aquellos lugares donde se observa una inclusión de velocidad, ya que no hay suficientes antecedentes como para afirmar con certeza que el patrón obtenido en este estudio es aplicable para todo tipo de depósito con un suelo singular.

- En base a los resultados obtenidos al realizar el cociente espectral  $V_s/V_B$ , se concluye que en este tipo de depósitos la componente vertical no suele presentar amplificación en frecuencias inferiores a aproximadamente los 5 Hz.
- Del análisis de los cocientes espectrales  $H_B/V_B$ , se concluye que el supuesto teórico de Nakamura se cumple dentro del rango de frecuencias estudiado en los depósitos analizados, es decir, entre los 0.1 Hz y 20 Hz.
- En el análisis del cociente entre las razones espectrales HVSR/HHSR, se observa que existe una similitud en las amplitudes espectrales asociadas a estos dos métodos en frecuencias menores a 4 Hz.
- Del análisis estadístico realizado para verificar la dispersión de la frecuencia predominante, se observa que la amplitud promedio espectral es inversamente proporcional a la desviación estándar. Esto significa que las frecuencias predominantes de cada sismo son similares en sitios con grandes amplitudes peak.

## 6.2 Recomendaciones

- Se recomienda profundizar el estudio de estos depósitos de suelos singulares, ya que se observa comportamientos sísmicos distintos a los suelos que son normalmente dispersivos.
- El procesamiento de los registros sísmicos fue realizado considerando el uso de registro completo, que es equivalente a considerar el uso de una ventana donde predominan las ondas SH. Se recomienda realizar un análisis considerando una ventana de la onda S más pequeña o la coda, ya que es lo que han realizado otros (Bonilla et al., 1997; Satoh et al., 2001; Tsujiura, 1998) y han mostrado resultados donde coinciden las curvas  $H_s/H_B$ ,  $H_s/V_s$  e incluso la teórica.
- Para realizar este tipo de estudios, sería ideal contar con registros en sitios de referencia - afloramiento rocoso – cerca de las estaciones estudiadas. Lamentablemente, no se encuentran presentes en Japón, por lo que no se pudo aplicar una metodología asociada a estos sitios.
- En la práctica se recomienda hacer uso de la razón espectral  $H_s/V_s$  tanto para depósitos de suelo normalmente dispersivos como para los depósitos de suelos singulares, ya que es la herramienta más confiable y eficaz que existe actualmente para la predicción de efecto de sitio.

- Debido a que la teoría de propagación de ondas es limitada, se hace necesario desarrollar un modelo numérico de propagación ondas P, SV y SH que permita mejorar la comprensión del comportamiento sísmico de estos perfiles de suelos singulares.
- Se recomienda realizar más estudios en este tipo de depósitos de suelos singulares. Para ello se debe buscar, procesar y analizar registros sísmicos que cumplan con los criterios mencionados en los capítulos anteriores en otras partes del mundo y ver cómo se comportan en dichos lugares. Se buscó información de Italia en las páginas web:

<http://nisbas.crs.inogs.it/nisbas/CadmoDriver? action do=1& page=ACC redirect home page& rock=INVALID& state=initial& tabber=0& token=NULLNULLNULLNULL>

<https://esm.mi.ingv.it/DYNA-stage/CadmoDriver? action do=1& page=ACC redirect home page& rock=INVALID & state=initial& tabber=0& token=NULLNULLNULLNULL>

El problema en estas estaciones es que no existía información referente a algún tipo de sensor en profundidad. En el caso de Turquía se buscó información en las páginas web:

[http://kyhdata.deprem.gov.tr/2K/kyhdata\\_v4.php](http://kyhdata.deprem.gov.tr/2K/kyhdata_v4.php)

<http://euroseisdb.civil.auth.gr/stations>

En este último enlace también se encuentra información de Grecia. El problema es que no existen registros de gran magnitud al momento de realizar este trabajo, o no se vio evidencia de suelos de espesor inferior a los 30 metros o con una inclusión de alta o baja velocidad.

- Finalmente, para trabajos futuros se recomienda utilizar registros sísmicos que posean fuentes similares y distancias hipocentrales tal que la trayectoria sea posiblemente la misma en estos distintos casos, con el objetivo de mitigar la influencia asociada a efectos de trayectoria o de fuente. Estos estudios pueden permitir descartar efectos topográficos que se pueden presentar en algunas zonas y adquirir más antecedentes, y verificar si las conclusiones obtenidas en este trabajo son válidas para esas otras localidades.

## CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

- Afshari, K., & Stewart, J.P. (2015). *Effectiveness of 1D ground response analyses at predicting site response at California vertical array sites*. UCLA. Recuperado de: <https://escholarship.org/uc/item/4qd93847>
- Aoi, S., Kunugi, T., & Fujiwara, H. (2004). *Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net*. Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Volume 4, N°3, pp. 65–74.
- Astroza, M., Ruiz, S., & Astroza, R. (2012). *Damage assessment and seismic intensity analysis of the 2010 (Mw 8.8) Maule Earthquake*. Earthquake Spectra, Volume 28, Issue S1, pp. S145-S164.
- Bard, P.-Y. (1995). *Effects of surface geology on ground motion: recent results and remaining issues*. 10<sup>th</sup> European Conference Earthquake Engineering, Vienna, Balkema, Rotterdam, 1, pp. 305-323.
- Bonilla, F., Steidl, J., Lindley, G., Tumarkin, A., & Archuleta, R. (1997). *Site amplification in the San Fernando Valley, California: Variability of site-effect estimation using S-wave, coda, and H/V methods*. Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 87, Number 3, pp. 710-730.
- Boore, D. (2003). *A compendium of P – and S – wave velocity from surface to borehole logging: summary and reanalysis of previously published data and analysis of unpublished data*. U.S. Geological Survey.
- Boore, D., Thompson, E., & Cadet, H. (2011). *Regional correlations of Vs30 and velocities averaged over depths less than and greater than 30 meters*. Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 101, pp. 3046-3059.
- Borcherdt, R.D. (1970). *Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay*. Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 60, pp. 29-61.
- Cadet, H., Pierre, Y-B., & Rodriguez-Marek, A. (2012). *Site effect assessment using KiK-net data: Part 1. A simple correction procedure for surface/downhole spectral ratios*. Bulletin of Earthquake Engineering, Volume 10, Issue 2, pp. 421-448.
- Castellaro, S., & Mulargia, F. (2014). *Simplified seismic soil classification: the Vfz matrix*. Bulletin of Earthquake Engineering, Volume 12, Issue 2, pp. 735-754.
- Castellaro, S., Mulargia, F., & Rossi, P. (2008). *Vs30: proxy for seismic amplification?* Seismological Research Letters, Volume 79, pp. 540-543.
- Castro, R. R., Mucciarelli, M., Pacor, F., & Petrangaro, C. (1997). *S-wave site-response estimates using horizontal-to-vertical spectral ratios*. Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 87, Number 1, pp. 256-260.
- Correia, N. (2015). *Obtención del perfil de velocidad de onda de corte mediante método MASW y comparación con ensayo tipo downhole en estaciones sismológicas de zona*

*central*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Dimitriu, P.P., Papaioannou, Ch.A., & Theodulitis, N.P. (1998). *EURO-SEISTEST Strong-motion array near Thessaloniki, Northern Greece: A study of site effects*. Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 88, Number 3, pp. 862-873.

Farrugia, D., E. Paolucci, S. D'amico, and P. Galea (2016). *Inversion of surface-wave data for subsurface shear-wave velocity profiles characterized by a thick buried low-velocity layer*. Geophys. J. Int. 206, N°. 2, pp. 1221–1231.

Field, E., & Jacob, K. (1995). *A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent*. Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 85, Number 4, pp. 1127-1143.

Fujiwara, H., Aoi, S., Kunugi, T., & Adachi, S. (2004). *Strong-motion observation networks of NIED: K-NET and KiK-net*. Cosmos Report.

Ghofrani, H., Atkinson, G., & Goda, K. (2013). *Implications of the 2011 M9.0 Tohoku Japan earthquake for the treatment of site effects in large earthquakes*. Bulletin of Earthquake Engineering, Volume 11, Issue 1, pp. 171-203.

González, F. (2015). *Estimación de velocidades de onda de corte: Registro de ondas superficiales Love v/s refracciones de ondas internas SH*. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias, Mención Geofísica. Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.

Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., & Park, D. (2016). *DEEPSOIL 6.1, User manual*. Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.

Humire, F., Sáez, E., Leyton, F., & Yañez, G. (2015). *Combining active and passive multi-channel analysis of surface waves to improve reliability of  $V_{s30}$ , estimation using standard equipment*. Bulletin of Earthquake Engineering, Volume 13, Issue 5, pp. 1303-1321.

Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S., & Pastén, C. (2016). *Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone*. Bulletin of Earthquake Engineering, Volume 15, Issue 5, pp. 1853-1880.

Instituto Nacional de Normalización (INN Chile). (2009). NCh433 Of. 96, Mod. 2009. Diseño Sísmico de Edificios. Chile.

Kanai, K., & Tanaka, T. (1961). *On Microtremors VIII*. Bulletin of Earthquakes Research Institute, 39, pp. 97-114.

Kinoshita, S. (1998). *Kyoshin Net (K-NET)*. Bulletin Seismological Society of America, Volume 64, Number 6, pp. 1685-1696.

- Konno, K., & Ohmachi, T. (1998). *Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor*. Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 88, Number 1, pp. 228-241.
- Kramer, S. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. In *Wave Propagation* (pp. 143-183). New Jersey: Prentice Hall.
- Lachet, C., & Bard, P-Y. (1994). *Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique*. Journal of Physics of the Earth, Volume 42, Issue 5, pp. 377-397.
- Lachet, C., Hatzfeld, D., Bard, P-Y., Theodulidis, N., Papaioannou, C., & Savvaidis, A. (1996). *Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece): comparison of different approaches*. Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 86, Number 6, pp. 1692-1703.
- Lermo, J., & Chávez-García, F.J. (1993). *Site effect evaluation using spectral ratios with only one station*. Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 83, N°5, pp. 1574-1594.
- Luke, B., & C. Calderón-Macías. (2007). *Inversion of seismic Surface wave data to resolve complex profiles*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Volume 133, Issue 2, pp. 155-165.
- Luzi, L., Puglia, R., Pacor, F., Gallipoli, M.R., Bindi, D., & Mucciarelli, M. (2011). *Proposal for a soil classification based on parameters alternative or complementary to  $V_{s30}$* . Bulletin of Earthquake Engineering, Volume 9, Issue 6, pp. 1877-1898.
- Mucciarelli, M., & Gallipoli, M. (2006). *Comparison between  $V_{s30}$  and other estimates of site amplification in Italy*. First European conference on earthquake engineering and seismology, Geneva, Switzerland, 3-8 september 2006, paper No. 274.
- Nakamura, Y. (1989). *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*. Quarterly Report of RTRI, 30:1, 25-33.
- Newmark, Nathan M. (1959). *A method of computation for structural dynamics*. Journal of the Engineering Mechanics Division, Volume EM 3, pp 67-94.
- Pousse, G. (2005). *Analyse des données accélérométriques de K-net et KiK-net: Implications sur la prédiction du mouvement sismique – accélérogrammes et spectres de réponse – et la prise en compte des effets de site non-linéaires*. Ph.D. Thesis, University Joseph Fourier, Grenoble I, October 2005, 238 pages (En Français).
- Régnier, J., Cadet, H., Bonilla, L.F., Bertrand, E., & Semblat, J-F. (2013). *Assessing nonlinear behavior of soils in seismic site response statistical analysis on KiK-net strong-motion data*. Bulletin of the Sismological Society of America, Volume 103, Number 3, pp. 1750-1770.
- Rodriguez, V., & Midorikawa, S. (2003). *Comparison of spectral ratio techniques for estimation of site effects using microtremor data and earthquake motions recorded at the surface and in boreholes*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Volume 32, Issue 11, pp. 1691-1714.

- Rong, M., Fu, L.-Y., Wang, Z., Li, X., Carpenter, N., Woolery, E., & Lyu, Y. (2017). *On the amplitude discrepancy of HVSR and site amplification from strong-motion observations*. Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 107, Number 6, pp. 2873-2884.
- Ruiz, S., Klein, E., Del Campo, F., Rivera, E., Poli, P., Metois, M., Vigny, C., Baez, J.C., Vargas, G., Leyton, F., Madariaga, R., & Fleitout, L. (2016). *The seismic sequence of the 16 september 2015 Mw 8.3 Illapel, Chile, Earthquake*. Seismological Research Letters, Volume 84, Number 4, pp. 789-799.
- Ruz, F., & Finn, L. (2016). *Amplification effects of thin soft surface layers*. Earthquake Spectra, Volume 32, Issue 4, pp. 2109-2126.
- Sáez, M. (2016). *Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la Cuenca de Santiago*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Sísmica, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
- Sáez, M., Pastén, C., Ruiz, S., & Salomón, J. (2018). *The impact of a buried high-velocity layer in the seismic site amplification of the city of Lolleo, Chile*. Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 108, Number 4, pp. 2199-2208.
- Sambridge, M. (2001). *Finding acceptable models in nonlinear inverse problems using a neighbourhood algorithm*. Inverse Problems, Volume 17, Number 3, pp. 387.
- Satoh, T., Kawase, H., & Matsushima, S. (2001). *Differences between site characteristics obtained from microtremors, S-waves, P-waves, and codas*. Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 91, Number 2, pp. 313-334.
- Shen, C., Xu, Y., Pan, Y., Wang, A., & Gao, L. (2016). *Sensitivities of phase-velocity dispersion curves of surface waves due to high-velocity-layer and low-velocity-layer models*. Journal of Applied Geophysics, Volume 135, pp. 367-374.
- Steidl, J., Tumarkin, A., & Archuleta, R. (1996). *What is a reference site?*. Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 86, Number 6, pp. 1733-1748.
- Tarantola, A. (1987). *Inverse problem theory. Methods for data fitting and model parameter estimation*. Elsevier Science.
- Thompson, E.M., Baise, L.G., Tanaka, Y., & Kayen, R.E. (2012). *A taxonomy of site response complexity*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 41, pp. 32-43.
- Tsuboi, S., Saito, M., Ishihara, Y. (2001). *Verification of horizontal-to-vertical spectral-ratio technique for estimation of site response using borehole seismographs*. Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 91, Number 3, pp. 499-510.
- Tsujiura, M. (1978). *Spectral analysis of the coda waves from local earthquakes*. Bulletin of the Earthquake Research Institute, Volume 53, pp. 1-48.

Verdugo, R. (2009). *Amplification phenomena observed in downhole array records generated on a subductive environment*. Physics on the Earth and Planetary Interiors, Volume 175, Issues 1-2, pp. 63-77.

Verdugo, R. (2018). *Seismic Site Classification*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.04.045>

Verdugo, R., Ochoa, F., González, J., & Valladares, G. (2018). *Site effect and site classification in areas with large earthquakes*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, ISSN 0267-7261.

Wakamatsu, K., & Yasui, Y. (1996). *Possibility of estimation for amplification characteristics of soil deposits based on ratio of horizontal to vertical spectra of microtremors*. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, paper N° 1565.

Xia, J., R. D. Miller, C. B. Park, J. A. Hunter, J. B. Harris, and J. Ivanov (2002). *Comparing shear-wave velocity profiles inverted from multichannel surface wave with borehole measurements*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 22, Issue 3, pp. 181–190.

## ANEXO A.

A continuación, se adjuntan los eventos sísmicos utilizados en el estudio para cada estación analizada. "Profund." corresponde a la profundidad a la que ocurre el sismo.

Tabla A: Sismos utilizados en el presente estudio

Estación	Mw	PGA (g)	Duración (s)	Latitud (°)	Longitud (°)	Profund. (km)	Fecha	Hora
ABSH09	5.0	0.002	120	43.130	144.770	101	09-03-2013	21:16:00
	5.1	0.002	120	42.623	144.985	49	10-03-2013	5:11:00
	5.2	0.002	120	42.388	144.738	42	12-09-2008	7:34:00
	5.6	0.001	120	43.672	147.770	13	11-03-2007	16:09:00
	5.8	0.006	135	43.352	146.725	40	09-10-2007	2:10:00
	5.9	0.004	129	43.528	147.683	18	29-04-2003	22:53:00
	6.9	0.002	238	39.947	142.590	36	23-06-2011	6:51:00
	7.1	0.004	300	41.710	143.691	21	26-09-2003	6:08:00
	7.3	0.008	258	38.018	143.867	49	07-12-2012	17:18:00
	7.5	0.006	281	37.837	144.893	34	11-03-2011	15:26:00
	8.2	0.002	300	46.937	155.937	30	13-01-2007	13:24:00
9.0	0.004	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00	
ABSH14	5.0	0.014	133	43.492	144.060	-	04-06-2015	4:34:00
	5.4	0.007	120	43.175	145.737	53	14-04-2018	4:00:00
	5.9	0.011	182	43.023	145.876	83	27-04-2001	2:49:00
	6.1	0.009	187	42.327	143.110	49	25-08-2012	23:16:00
	6.5	0.016	300	42.702	143.227	102	02-02-2013	23:17:00
	6.7	0.004	272	41.970	142.800	52	14-01-2016	12:25:00
	6.9	0.015	297	42.848	145.343	46	06-12-2004	23:15:00
	7.1	0.034	300	42.946	145.274	48	29-11-2004	3:32:00
	7.3	0.008	273	38.018	143.867	49	07-12-2012	17:18:00
	8.0	0.061	300	41.781	144.074	42	26-09-2003	4:50:00
9.0	0.009	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00	
FKSH05	5.7	0.081	175	37.285	140.025	8	29-09-2010	17:00:00
	5.9	0.040	120	36.965	140.633	11	11-04-2011	20:42:00
	6.1	0.001	120	40.267	142.455	35	27-09-2017	5:22:00
	6.4	0.060	163	37.052	140.643	15	12-04-2011	14:07:00
	7.0	0.111	300	36.945	140.672	6	11-04-2011	17:16:00
	7.4	0.036	290	37.353	141.603	25	22-11-2016	5:59:00
	7.5	0.007	300	37.837	144.893	34	11-03-2011	15:26:00
	8.1	0.004	261	27.860	140.682	682	30-05-2015	20:24:00
9.0	0.165	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00	

Estación	Mw	PGA (g)	Duración (s)	Latitud (°)	Longitud (°)	Profund. (km)	Fecha	Hora
FKSH07	5.9	0.005	120	37.050	140.695	17	20-09-2013	2:25:00
	6.0	0.040	300	37.253	138.829	12	23-10-2004	18:12:00
	6.4	0.007	120	37.052	140.643	15	12-04-2011	14:07:00
	7.0	0.027	120	36.945	140.672	6	11-04-2011	17:16:00
	7.2	0.002	176	38.150	142.278	42	16-08-2005	11:46:00
	7.3	0.005	120	38.018	143.867	49	07-12-2012	17:18:00
	7.4	0.004	120	37.353	141.603	25	22-11-2016	5:59:00
	7.7	0.014	300	36.108	141.265	43	11-03-2011	15:15:00
	9.0	0.032	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00
FKSH09	5.0	0.012	120	37.507	141.577	45	03-05-2015	13:03:00
	5.1	0.004	120	38.460	142.187	31	17-08-2011	12:05:00
	5.2	0.009	120	36.957	141.373	31	13-04-2012	21:12:00
	5.3	0.002	120	36.370	141.813	53	29-03-2014	10:53:00
	5.4	0.002	120	36.230	141.932	33	20-07-2013	15:06:00
	5.8	0.003	120	39.815	142.253	43	01-08-2011	22:44:00
	6.2	0.013	120	39.077	142.357	34	21-03-2011	17:21:00
	6.3	0.054	120	36.720	140.573	11	28-12-2016	21:38:00
	6.8	0.011	163	38.862	142.150	46	13-05-2015	6:13:00
	7.0	0.012	182	31.427	138.565	397	01-01-2012	14:28:00
	7.4	0.077	300	37.353	141.603	25	22-11-2016	5:59:00
	7.7	0.029	300	36.108	141.265	43	11-03-2011	15:15:00
	8.1	0.003	255	27.860	140.682	682	30-05-2015	20:24:00
9.0	0.391	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00	
FKSH17	5.0	0.012	120	37.507	141.577	45	03-05-2015	13:03:00
	5.1	0.007	120	38.460	142.187	31	17-08-2011	12:05:00
	5.2	0.006	120	36.957	141.373	31	13-04-2012	21:12:00
	5.3	0.002	120	36.370	141.813	53	29-03-2014	10:53:00
	5.4	0.003	120	36.230	141.932	33	20-07-2013	15:06:00
	5.8	0.001	120	39.815	142.253	43	01-08-2011	22:44:00
	6.1	0.001	120	38.605	143.248	11	09-03-2011	13:37:00
	6.2	0.018	120	39.077	142.357	34	24-03-2011	17:21:00
	6.8	0.013	162	38.862	142.150	46	13-05-2013	6:13:00
	7.0	0.015	181	31.427	138.565	397	01-01-2012	14:28:00
	7.4	0.079	300	37.353	141.603	25	22-11-2016	5:59:00
	7.7	0.047	300	36.108	141.265	43	11-03-2011	15:15:00
	8.1	0.005	271	27.860	140.682	682	30-05-2015	20:24:00
	9.0	0.237	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00

Estación	Mw	PGA (g)	Duración (s)	Latitud (°)	Longitud (°)	Profund. (km)	Fecha	Hora
FKSH19	5.0	0.018	120	37.507	141.577	45	03-05-2015	13:03:00
	5.1	0.009	120	38.460	142.187	31	17-08-2011	12:05:00
	5.2	0.012	120	36.957	141.373	31	13-04-2012	21:12:00
	5.3	0.006	120	36.370	141.813	53	29-03-2014	10:53:00
	5.8	0.002	120	39.815	142.253	43	01-08-2011	10:44:00
	6.1	0.002	120	38.605	143.248	11	09-03-2011	13:37:00
	6.8	0.029	158	38.862	142.150	46	13-05-2015	6:13:00
	7.0	0.042	172	31.427	138.565	397	01-01-2012	14:28:00
	7.4	0.102	180	37.353	141.603	25	22-11-2016	5:59:00
8.1	0.009	246	27.860	140.682	682	30-05-2015	20:24:00	
GIFH21	5.0	0.006	120	36.157	137.457	4	27-02-2011	2:19:00
	5.5	0.024	120	36.155	137.453	4	27-02-2011	5:38:00
	5.6	0.016	120	35.867	137.585	7	25-06-2017	7:02:00
	6.1	0.007	120	34.843	135.622	13	18-06-2018	7:58:00
	6.2	0.003	120	34.708	138.547	23	01-08-2011	23:58:00
	6.4	0.004	120	35.308	138.713	14	15-03-2011	22:31:00
	6.9	0.011	151	37.220	136.685	11	25-03-2007	9:42:00
	7.7	0.001	210	36.108	141.265	43	11-03-2011	15:15:00
	9.0	0.003	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00
IBRH15	5.0	0.008	120	37.507	141.577	45	03-05-2015	14:03:00
	5.1	0.004	120	38.460	142.187	31	17-08-2011	12:05:00
	5.2	0.004	120	36.957	141.373	31	13-04-2012	21:12:00
	5.3	0.004	120	36.370	141.813	53	29-03-2014	10:53:00
	5.4	0.005	120	36.230	141.932	33	20-07-2013	15:06:00
	5.8	0.006	120	35.715	140.600	48	29-04-2012	19:28:00
	6.1	0.049	120	38.605	143.248	11	09-03-2011	13:37:00
	6.2	0.008	120	39.077	142.357	34	24-03-2011	17:21:00
	6.8	0.006	161	38.862	142.150	46	13-05-2015	6:13:00
	7.0	0.021	186	31.427	138.565	397	01-01-2012	14:28:00
	7.4	0.048	260	37.353	141.603	25	22-11-2016	5:59:00
	7.7	0.213	300	36.108	141.265	43	11-03-2011	15:15:00
	8.1	0.008	268	27.860	140.682	682	30-05-2015	20:24:00
9.0	0.720	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00	

Estación	Mw	PGA (g)	Duración (s)	Latitud (°)	Longitud (°)	Profund. (km)	Fecha	Hora
IWTH01	5.0	0.001	120	37.507	141.577	45	03-05-2015	13:03:00
	5.1	0.011	120	38.460	142.187	31	17-08-2011	12:05:00
	5.2	0.001	120	36.957	141.373	31	13-04-2012	21:12:00
	5.3	0.006	120	38.382	142.168	33	22-08-2016	15:11:00
	5.4	0.003	120	37.625	141.650	47	03-04-2011	16:38:00
	5.8	0.059	127	39.815	142.253	43	01-08-2011	22:44:00
	6.1	0.003	148	38.605	143.248	11	09-03-2011	13:37:00
	6.2	0.048	125	39.077	142.357	34	24-03-2011	17:21:00
	6.8	0.050	220	38.862	142.150	46	13-05-2015	6:13:00
	7.0	0.005	216	31.427	138.565	397	01-01-2012	14:28:00
	7.4	0.006	274	37.353	141.603	25	22-11-2016	5:59:00
	7.7	0.013	300	36.108	141.265	43	11-03-2011	15:15:00
	8.1	0.001	190	27.860	140.682	682	30-05-2015	20:24:00
9.0	0.259	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00	
IWTH04	6.0	0.010	120	37.617	141.820	28	18-06-2011	20:31:00
	6.1	0.003	120	38.605	143.248	11	09-03-2011	13:37:00
	6.4	0.014	202	40.400	139.100	10	12-03-2011	4:47:00
	6.6	0.009	139	40.258	143.085	7	17-09-2011	4:26:00
	6.8	0.009	149	38.172	143.043	9	10-03-2011	6:24:00
	6.9	0.035	191	39.872	143.192	13	17-02-2015	8:06:00
	7.0	0.012	120	31.427	138.565	397	01-01-2012	14:28:00
	7.4	0.016	243	37.353	141.603	243	22-11-2016	5:59:00
	7.5	0.034	197	37.837	144.893	34	11-03-2011	15:26:00
	7.7	0.018	300	36.108	141.265	43	11-03-2011	15:15:00
	8.1	0.003	146	27.860	140.682	682	30-05-2015	20:24:00
9.0	0.307	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00	
IWTH14	6.0	0.002	138	37.083	140.787	8	23-03-2011	7:12:00
	6.1	0.001	120	38.605	143.248	11	09-03-2011	13:37:00
	6.2	0.002	120	39.800	143.800	10	22-03-2011	18:44:00
	6.5	0.004	187	39.537	143.620	7	20-05-2012	16:20:00
	6.7	0.064	274	39.168	142.618	24	11-03-2011	20:37:00
	7.5	0.037	209	37.837	144.893	34	11-03-2011	15:26:00
	9.0	0.216	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00

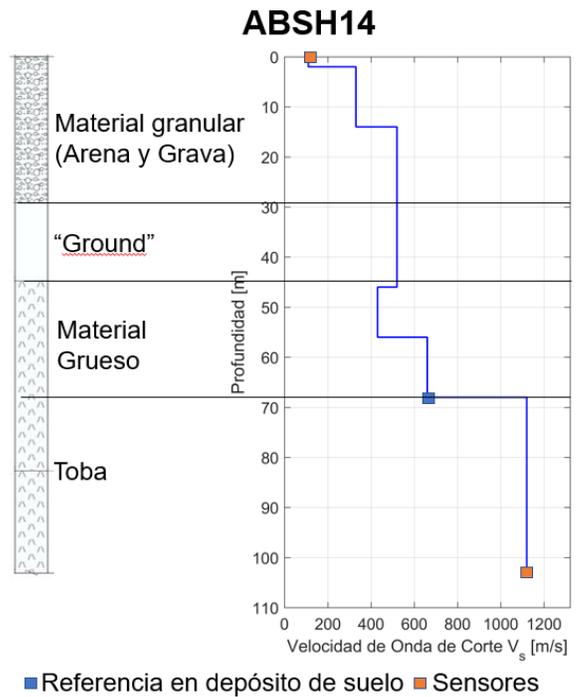
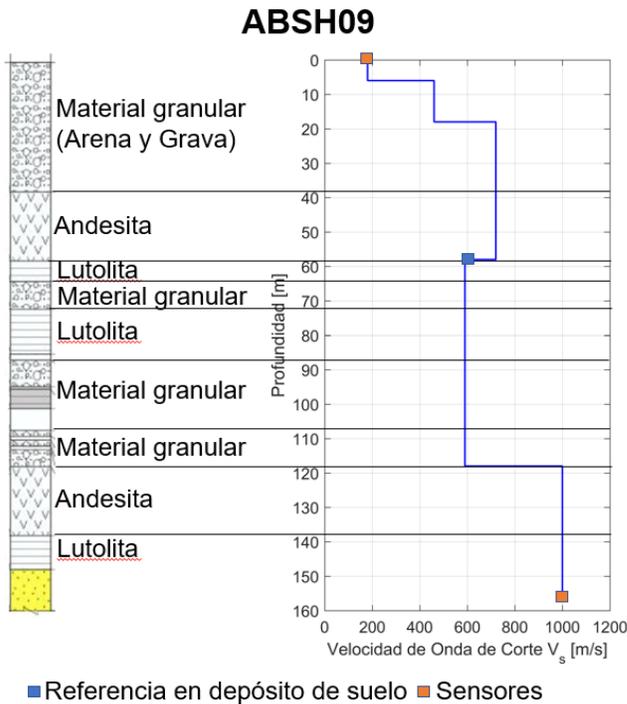
Estación	Mw	PGA (g)	Duración (s)	Latitud (°)	Longitud (°)	Profund. (km)	Fecha	Hora
IWTH22	5.0	0.002	120	37.277	141.482	35	22-11-2016	6:10:00
	5.1	0.001	120	39.947	143.227	16	13-06-2011	15:50:00
	6.0	0.008	120	37.617	141.820	28	18-06-2011	20:31:00
	6.1	0.002	120	38.605	143.248	11	09-03-2011	13:37:00
	6.3	0.005	120	37.100	143.900	10	22-03-2011	16:19:00
	6.4	0.005	201	40.400	139.100	10	12-03-2011	4:47:00
	7.0	0.003	134	31.427	138.565	397	01-01-2012	14:28:00
	7.4	0.010	247	37.353	141.603	25	22-11-2016	5:59:00
	7.5	0.038	300	37.837	144.893	34	11-03-2011	15:26:00
	7.7	0.019	300	36.108	141.265	43	11-03-2011	15:15:00
	8.1	0.001	128	27.860	140.682	682	30-05-2015	20:24:00
9.0	0.248	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00	
IWTH23	5.0	0.026	120	38.700	142.247	39	06-10-2015	18:32:00
	5.3	0.006	120	37.313	141.192	37	21-10-2015	15:04:00
	5.6	0.002	120	37.225	141.647	36	25-12-2014	8:06:00
	5.8	0.003	120	37.537	141.762	40	26-02-2018	1:28:00
	5.9	0.044	120	39.675	142.135	49	05-07-2014	7:42:00
	6.1	0.002	120	38.605	143.248	11	09-03-2011	13:37:00
	6.4	0.005	120	37.052	140.643	15	12-04-2011	14:07:00
	6.5	0.004	170	39.537	143.620	7	20-05-2012	16:20:00
	6.9	0.016	187	39.872	143.192	13	17-02-2015	8:06:00
	7.0	0.006	180	31.427	138.565	397	01-01-2012	14:28:00
	7.4	0.009	187	27.353	141.603	25	22-11-2016	5:59:00
	7.5	0.045	194	37.837	144.893	34	11-03-2011	15:26:00
	7.7	0.056	300	36.108	141.265	43	11-03-2011	15:15:00
8.1	0.001	128	27.860	140.682	682	30-05-2015	20:24:00	
9.0	0.352	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00	
MIEH03	5.0	0.003	120	33.111	136.697	43	05-09-2004	19:25:00
	5.1	0.011	120	34.205	135.693	58	21-07-2010	6:19:00
	5.2	0.005	120	35.662	136.313	9	18-02-2009	6:47:00
	5.3	0.002	120	33.875	137.240	45	19-01-2003	4:50:00
	5.4	0.014	120	33.842	135.463	51	19-11-2016	11:48:00
	5.9	0.004	120	33.288	136.905	37	06-09-2004	5:30:00
	6.1	0.001	120	36.840	135.547	22	07-06-2000	6:16:00
	6.2	0.002	120	34.047	139.352	9	17-04-2013	17:57:00
	6.9	0.075	128	33.031	136.797	38	05-09-2004	19:07:00
	7.0	0.004	179	31.427	138.565	397	01-01-2012	14:28:00
	7.4	0.076	120	37.353	141.603	25	22-11-2016	5:59:00
	9.0	0.001	120	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00

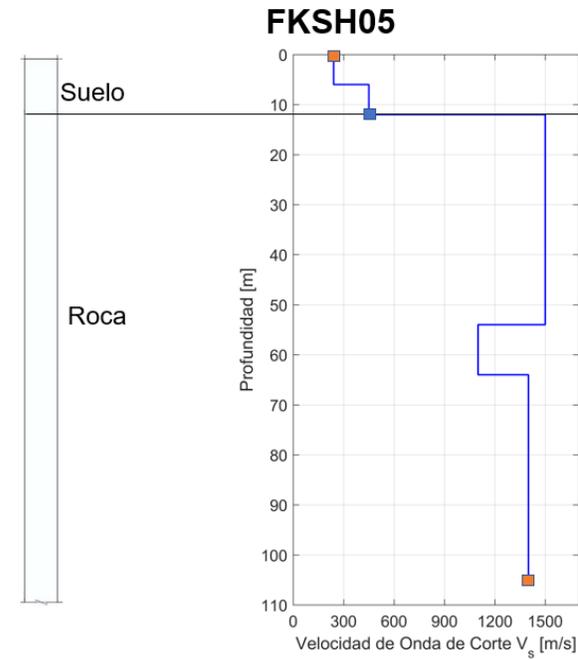
Estación	Mw	PGA (g)	Duración (s)	Latitud (°)	Longitud (°)	Profund. (km)	Fecha	Hora
NARH03	5.1	0.002	120	35.355	137.243	49	14-12-2011	13:01:00
	5.2	0.002	120	35.662	136.313	9	18-02-2009	6:47:00
	5.3	0.002	120	33.875	137.240	45	19-01-2003	4:50:00
	5.4	0.038	120	33.842	135.463	51	19-11-2016	11:48:00
	6.0	0.001	120	31.125	130.300	167	03-09-2009	22:26:00
	6.1	0.001	120	36.840	135.547	22	07-06-2000	6:16:00
	6.2	0.005	125	33.692	131.890	78	14-03-2014	2:07:00
	6.5	0.006	120	33.323	136.382	29	01-04-2016	11:39:00
	6.9	0.032	175	33.031	136.797	38	05-09-2004	19:07:00
	7.3	0.002	160	35.278	133.345	11	06-10-2000	13:30:00
	7.4	0.048	239	33.146	137.139	44	05-09-2004	23:57:00
9.0	0.001	270	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00	
NGNH18	5.5	0.074	120	36.155	137.453	4	27-02-2011	5:38:00
	5.6	0.409	139	35.867	137.585	7	25-06-2017	7:02:00
	6.0	0.002	120	35.165	140.592	57	07-07-2018	20:23:00
	6.4	0.026	120	35.308	138.713	14	15-03-2011	22:31:00
	6.8	0.002	123	36.733	142.028	11	11-03-2011	14:51:00
	7.0	0.003	169	36.945	140.672	6	11-04-2011	17:16:00
	7.5	0.003	147	37.837	144.893	34	11-03-2011	15:26:00
	7.7	0.005	211	36.108	141.265	43	11-03-2011	15:15:00
	8.1	0.002	245	27.860	140.682	682	30-05-2015	20:24:00
9.0	0.018	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00	
NGNH35	5.0	0.006	120	36.157	137.457	4	27-02-2011	2:19:00
	5.1	0.005	120	36.188	137.953	4	30-06-2011	8:21:00
	5.2	0.03	120	36.548	137.647	-	05-10-2011	19:06:00
	5.3	0.003	120	37.316	138.905	20	23-10-2004	23:34:00
	5.4	0.044	120	36.532	137.650	4	05-10-2011	19:00:00
	5.8	0.015	120	37.503	138.643	23	16-07-2007	15:37:00
	6.1	0.008	140	37.291	139.032	12	27-10-2004	10:40:00
	6.2	0.004	120	34.708	138.547	23	01-08-2011	23:58:00
	6.8	0.018	163	37.557	138.608	17	16-07-2007	10:13:00
	6.9	0.006	158	37.220	136.685	11	25-03-2007	9:42:00
	7.4	0.004	204	33.146	137.139	44	05-09-2004	23:57:00
9.0	0.03	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00	

<b>Estación</b>	<b>Mw</b>	<b>PGA (g)</b>	<b>Duración (s)</b>	<b>Latitud (°)</b>	<b>Longitud (°)</b>	<b>Profund. (km)</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>
	5.2	0.001	120	43.700	143.358	166	11-05-2005	8:50:00
	5.3	0.003	120	46.307	142.202	14	23-04-2017	15:37:00
	5.8	0.001	120	43.543	144.908	132	01-07-2007	13:12:00
	5.9	0.001	120	46.973	141.688	27	02-08-2007	14:22:00
	6.1	0.001	120	42.188	144.776	27	26-09-2003	15:27:00
	6.3	0.001	120	44.857	142.652	196	21-10-2011	17:03:00
SOYH09	6.9	0.002	222	42.848	145.343	46	06-12-2004	23:15:00
	7.0	0.001	184	45.300	150.957	125	19-04-2013	12:06:00
	7.4	0.001	227	39.838	142.780	32	11-03-2011	15:09:00
	7.5	0.001	188	37.837	144.893	34	11-03-2011	15:26:00
	8.1	0.001	120	27.860	140.682	682	30-05-2015	20:24:00
	8.4	0.001	267	54.873	153.280	609	24-05-2013	14:47:00
	9.0	0.002	300	38.103	142.860	24	11-03-2011	14:46:00

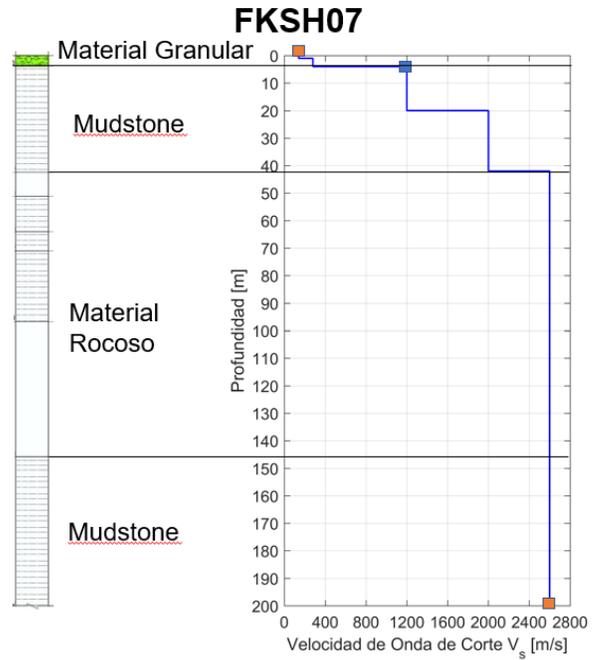
## ANEXO B

Se adjuntan los perfiles estratigráficos de las estaciones japonesas utilizadas. Estos perfiles se encuentran originalmente en japonés, por lo que se realizó una traducción de cada estrato. Además, se adjunta la ubicación de los sensores en superficie y en la base (cuadrados naranjos) y la ubicación de la referencia para el cálculo de las funciones de transferencia del depósito de suelo en la sección 4.1 (cuadrado azul).

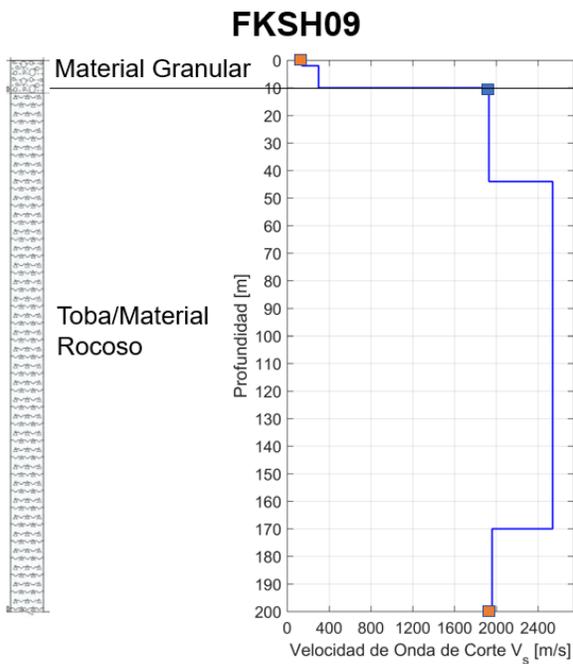




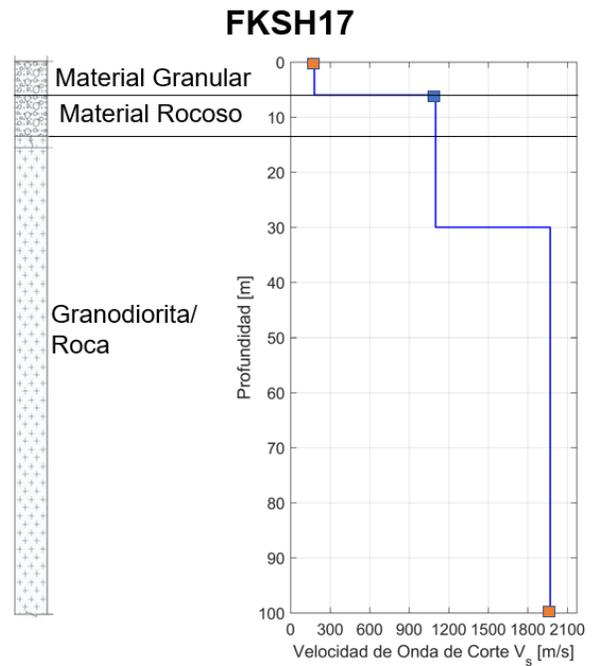
■ Referencia en depósito de suelo ■ Sensores



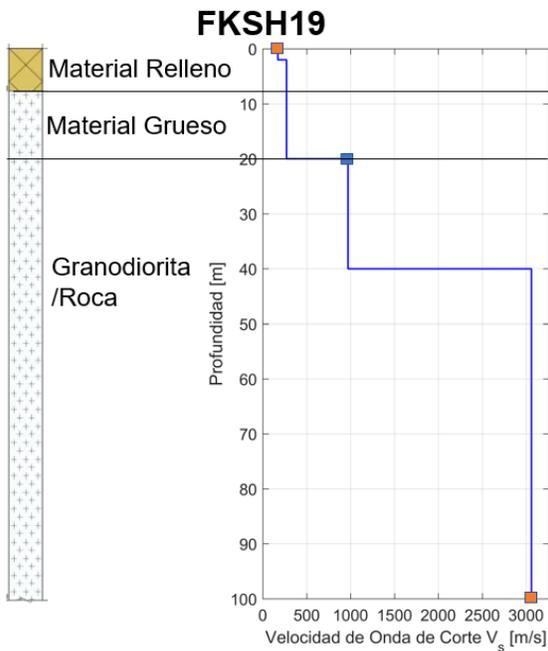
■ Referencia en depósito de suelo ■ Sensores



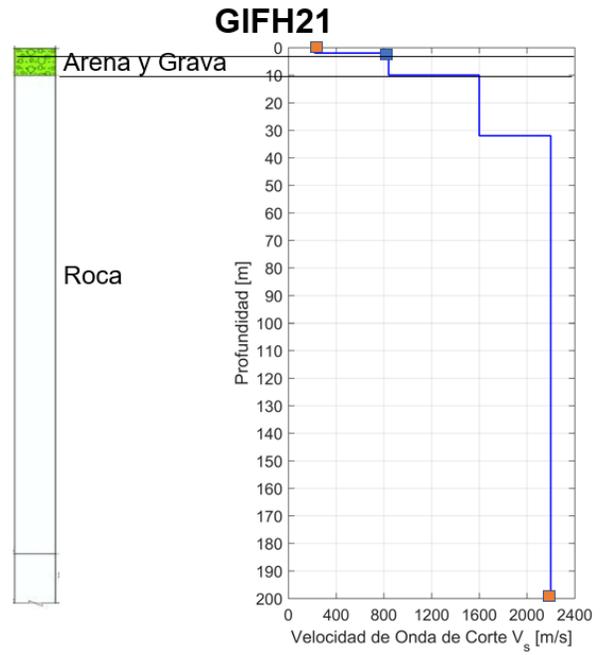
■ Referencia en depósito de suelo ■ Sensores



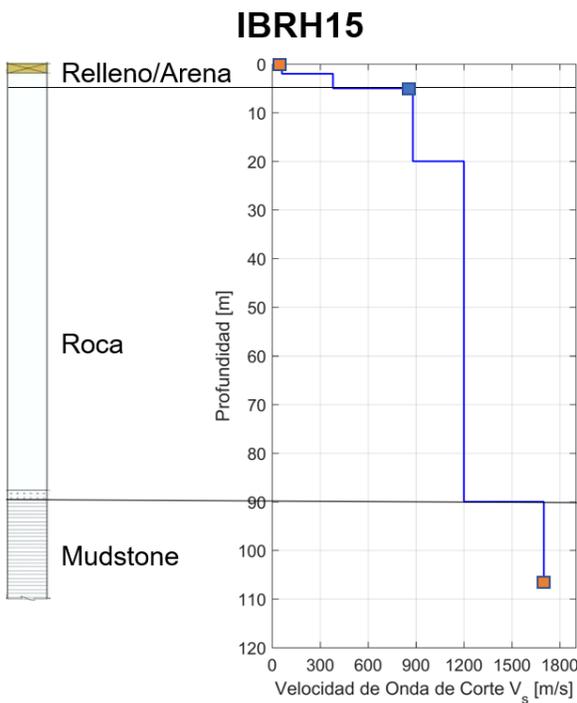
■ Referencia en depósito de suelo ■ Sensores



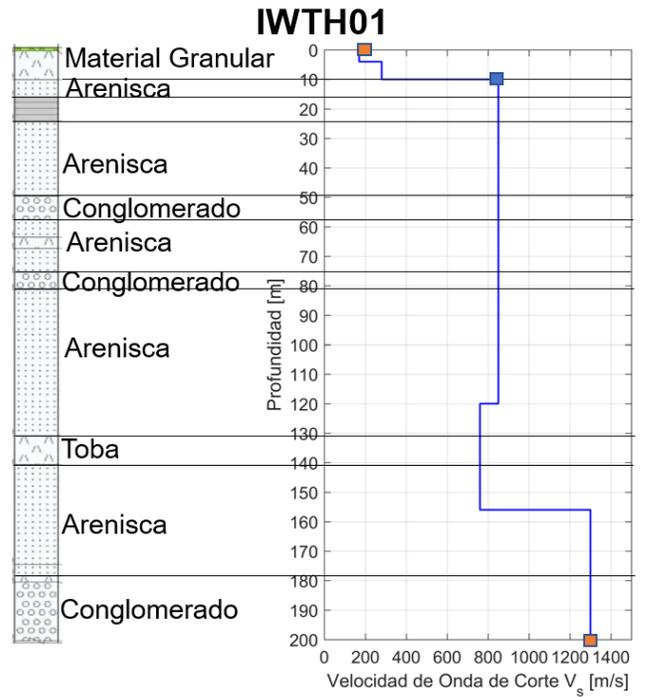
■ Referencia en depósito de suelo ■ Sensores



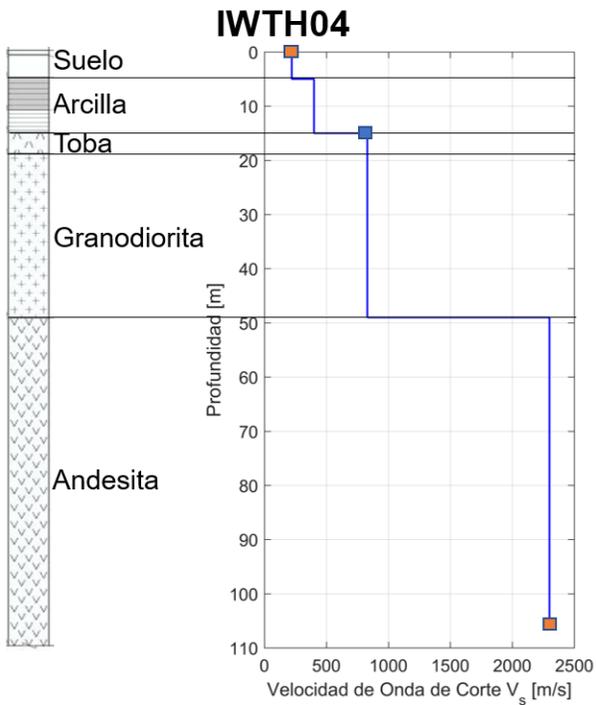
■ Referencia en depósito de suelo ■ Sensores



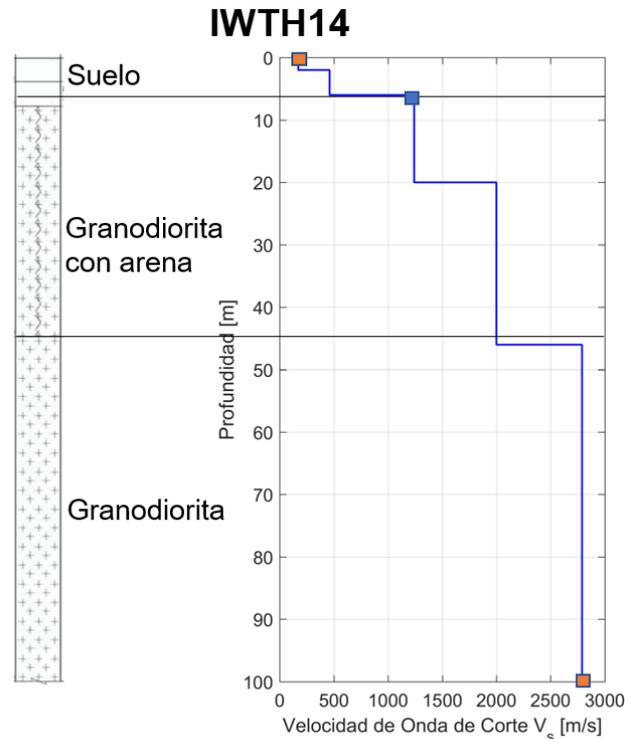
■ Referencia en depósito de suelo ■ Sensores



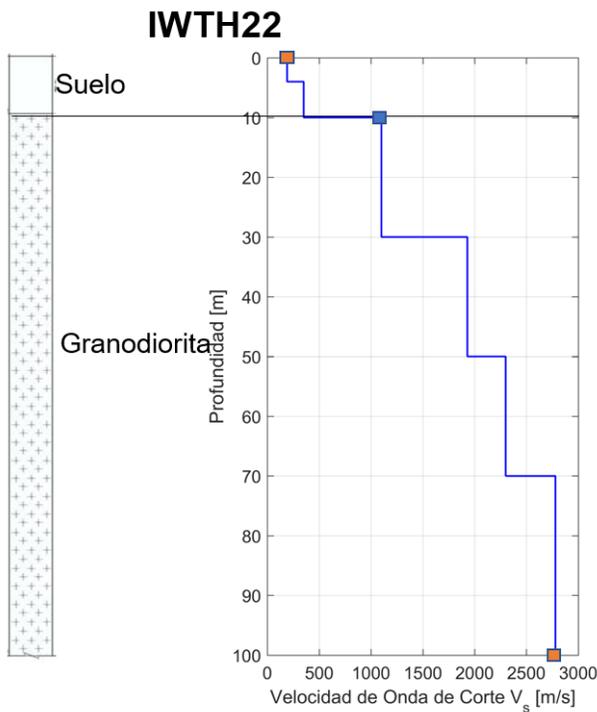
■ Referencia en depósito de suelo ■ Sensores



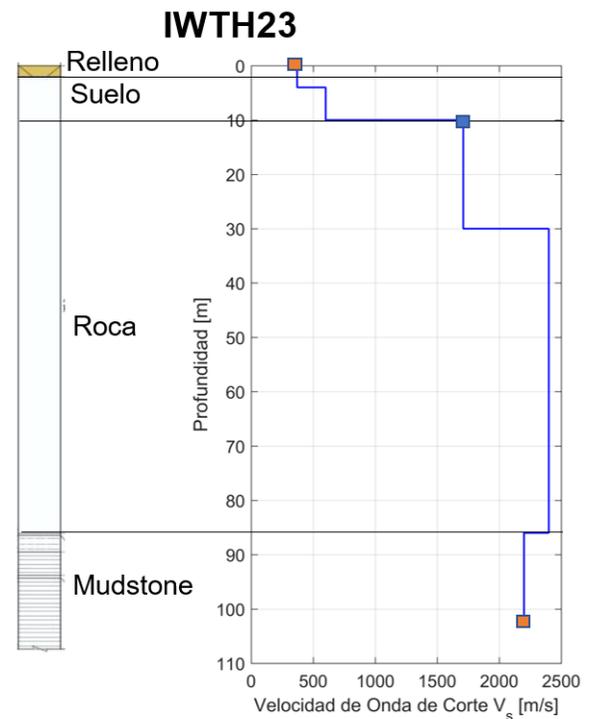
■ Referencia en depósito de suelo ■ Sensores



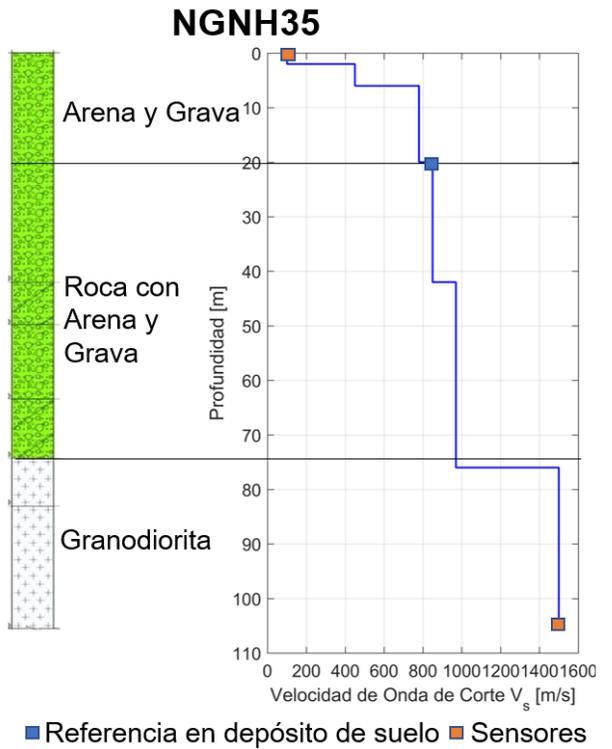
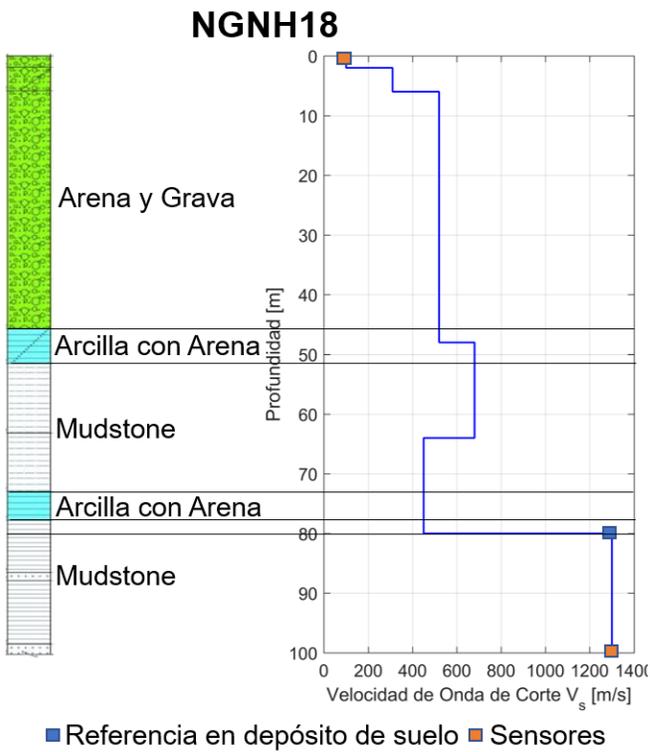
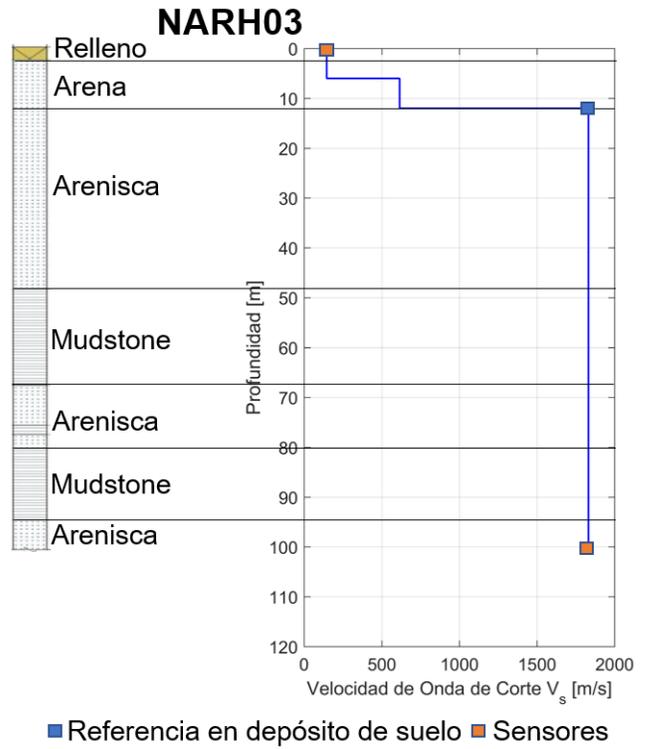
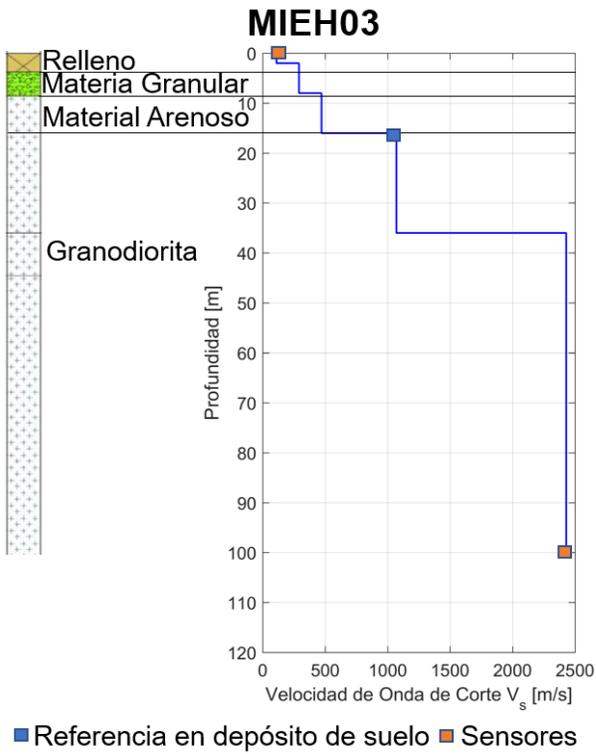
■ Referencia en depósito de suelo ■ Sensores



■ Referencia en depósito de suelo ■ Sensores



■ Referencia en depósito de suelo ■ Sensores



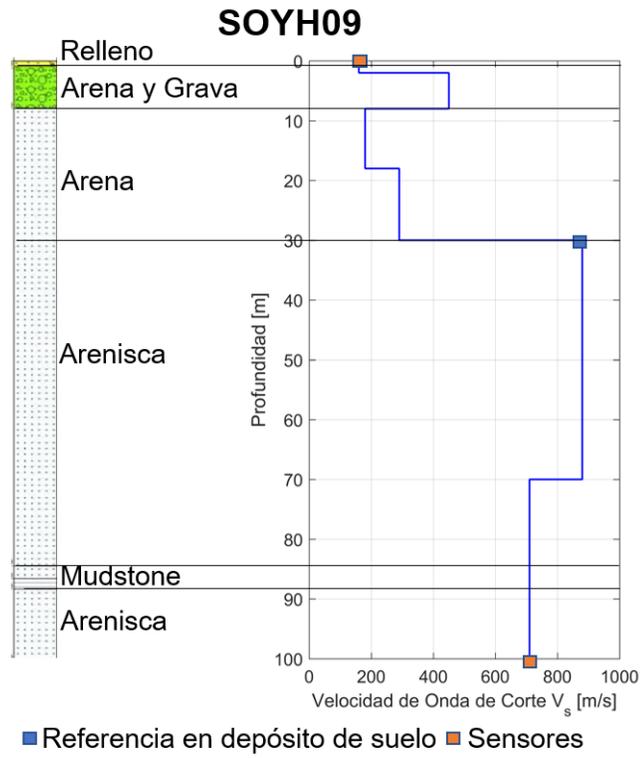


Figura A: Perfil estratigráfico y modelo de velocidades de las estaciones japonesas utilizadas en el presente estudio