



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

CORRELACIÓN ENTRE EL PERFIL DE VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS DE CORTE Y EL ESPECTRO DE RESPUESTA EN SUELOS

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
CAMILO IGNACIO PINILLA RAMOS**

PROFESOR GUÍA
LENART GONZÁLEZ LAGOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
RAMÓN VERDUGO ALVARADO
RUBÉN BOROSCHEK KRAUSKOPF

SANTIAGO DE CHILE
ENERO DE 2012

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: CAMILO PINILLA R.
FECHA: 12/01/2012
PROF. GUIA: Sr. LENART GONZALEZ

RESUMEN

“CORRELACIÓN ENTRE EL PERFIL DE VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS DE CORTE Y EL ESPECTRO DE RESPUESTA EN SUELOS”

Este trabajo de título presenta un análisis de la respuesta sísmica que tuvieron nueve sitios con estaciones de monitoreo sísmico durante el terremoto del Maule del 2010, correlacionando la respuesta con el perfil de velocidad de ondas de corte, el parámetro V_{S30} y la clasificación sísmica correspondiente a cada sitio.

Para obtener el perfil de velocidades de ondas de corte se implementó el método SASW de manera de alcanzar al menos 30 m de profundidad. Se realizaron dos mediciones de prueba con este método, y se comparó el perfil de velocidad de ondas de corte con el obtenido con un ensayo Downhole realizado previamente en cada lugar, presentando diferencias dentro de un margen razonable

Si bien este método permitió obtener perfiles de velocidad consistentes con la geología y estratigrafía en muchos de los sitios, el método SASW requiere de personas capacitadas para obtener la curva de dispersión. Esto se hace aún más crítico cuando la velocidad de ondas de corte disminuye en profundidad. Aún más, el proceso de inversión para obtener el perfil de velocidades no tiene una única solución. Es por esto que es necesario contar con gente capacitada que aplique este método, que ojalá se cuente con información de la estratigrafía del sector, y que los resultados sean utilizados con cautela.

Las principales conclusiones de este trabajo son que i) en suelos con una distribución de rigidez no monótonamente creciente en profundidad se observó más de un período con altos valores de pseudo-aceleración, lo que se debería traducir en un espectro de diseño con un plateau más extendido para lograr una cobertura adecuada del espectro de respuesta; ii) no se observó en los sitios estudiados una única correlación entre el V_{S30} y la pseudo-aceleración en superficie, lo que significa que este parámetro por sí solo no es suficiente para la clasificación sísmica de los suelos; y iii) en la cuenca de Santiago si se observó una disminución de la pseudo-aceleración con el aumento de V_{S30} sugiriendo una buena correlación en estos sitios.

AGRADECIMIENTOS

Sin duda a las dos primeras personas que debo que agradecer es a mis padres, Ana María y Ricardo (o Sigfrido), que sin ellos ni siquiera hubiese llegado a la mitad de este camino, que no comencé el 2005 cuando entré a la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile, si no mucho antes, cuando el año 1993 entré a 1° básico. Esto gracias a la formación que ellos me dieron, siendo fuerte no sólo en la parte académica, si no en muchísimas otras áreas de mi vida, y que me permite ahora ser una persona llena y contenta por la vida, por esto, GRACIAS TOTALES!.

Quiero darle también las gracias a Luis Pinilla, mi tío Lucho, que siempre ha sido un gran apoyo en mi carrera y ha tenido buenas respuestas al momento de pedirle consejos sobre mi rumbo profesional.

Le debo un especial agradecimiento a mi profesor guía Lenart González, por un lado, por haberme introducido en un tema tan contingente como éste, sobre todo después del terremoto y haberme dado la posibilidad de haber desarrollado un método tan interesante como SASW, y por otro lado por la forma en que llevamos la memoria, cumpliendo a cabalidad su rol de profesor guía.

También quiero reconocer al profesor Ramón Verdugo por su gran aporte en mi formación como Ingeniero Civil Geotécnico, y que se ha incorporado como profesor co-guía de mi comisión de titulación.

Quiero agradecer a mi polola Edna Aranda por todo el apoyo que me ha brindado en la parte final de mi memoria, además de haber sido un soporte en algunos momentos más complicados,

como también por haber estado ahí para compartir las alegrías cuando las cosas han salido bien.

Agradezco especialmente a IDIEM por haberme facilitado los equipos para desarrollar las mediciones de este trabajo, sobre todo considerando que sin su apoyo jamás hubiese podido ejecutar los ensayos y llevar a cabo esta interesante memoria.

Muchas gracias a todas las personas que me acompañaron a medir a terreno, entre los que están mis amigos Miguel Agüero, Alejandro Cárdenas y Carlita Sáez y las personas del IDIEM Mauricio Ortúzar, Felipe, don Miguel, don Guillermo y Mario.

También quiero agradecer a Omar González y Mario Carrillo del Laboratorio de Suelos de la Escuela, por toda la buena disposición, buena voluntad y buena compañía que siempre estuvieron dispuestos a entregar.

Por último quiero destacar y agradecer a la vida por el momento en que me estoy titulando y el contexto dentro de la Ingeniería que esto implica. En Febrero de 2010, cuando Chile fue azotado por uno de los terremotos más fuertes de los que se tiene registro, se puso a prueba todos los conocimientos y tecnologías hasta la fecha empleadas en Ingeniería, de las que se obtuvo, dependiendo de las diversas situaciones, resultados buenos y otros francamente malos, consecuencia de buenas y malas prácticas, lo que generó un amplio debate en mi entorno profesional y académico, que estoy seguro ha dejado una huella de enriquecimiento y sobre todo una gigantesca conciencia de la responsabilidad que cae sobre los hombros de la ingeniería.

Esta situación fue relevante, tomando en consideración que este evento telúrico, ocurrido en mis últimos años de estudio, me permitió la posibilidad de conocer en terreno sus efectos, poco tiempo después de su suceso, reconociendo los verdaderos daños, para poder discutirlos, conversarlos y sobre todo aprender de ellos, como también asumir los problemas que éstos

acarrearon a las personas, a la gente, al pueblo, a nuestra sociedad, que al fin y al cabo, es para quienes en verdad trabajamos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Contexto del trabajo realizado.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Esquema del trabajo.....	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Método SASW.....	5
2.2 Marco teórico.....	8
3. METODOLOGÍA DE SASW	12
3.1 Equipos empleados.....	12
3.2 Metodología.....	13
3.2.1 Medición en terreno.....	13
3.2.2 Procesamiento de datos.....	14
3.2.3 Eliminación de los registros con más ruido.....	15
3.2.4 Obtención de la curva de dispersión.....	17
3.2.5 Inversión de la curva de dispersión.....	22
4. IMPLEMENTACIÓN DE SASW	24
4.1 Fuente utilizada.....	24
4.2 Implementación de SASW.....	26
4.2.1 Implementación en el sitio de Llolleo.....	28
4.2.2 Implementación en el sitio de Maipú.....	30
4.3 Conclusiones de la implementación de SASW.....	32
5. MEDICIÓN CON SASW EN EL SUBSUELO DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO SÍSMICO	33
5.1 Estación de monitoreo sísmico de Llolleo.....	35
5.2 Estación de monitoreo sísmico de Peñalolén.....	38
5.3 Estación de monitoreo sísmico de Puente Alto.....	41
5.4 Estación de monitoreo sísmico de Mirador.....	44
5.5 Estación de monitoreo sísmico de Antumapu.....	47
5.6 Estación de monitoreo sísmico de Casablanca.....	50

5.7 Estación de monitoreo sísmico de Curicó.....	53
5.8 Estación de monitoreo sísmico de Hualañé	56
5.9 Estación de monitoreo sísmico de Constitución	59
5.10 Resumen de las mediciones.....	62
6. ANÁLISIS DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA DEL SISMO DEL 27F	64
6.1 Espectros de respuesta del sismo del 27F.....	64
6.1.1 Estación de monitoreo sísmico de Lollole	65
6.1.2 Estación de monitoreo sísmico de Peñalolén	67
6.1.3 Estación de monitoreo sísmico de Puente Alto	69
6.1.4 Estación de monitoreo sísmico de Mirador	71
6.1.5 Estación de monitoreo sísmico de Antumapu.....	72
6.1.6 Estación de monitoreo sísmico de Casablanca.....	74
6.1.7 Estación de monitoreo sísmico de Curicó	76
6.1.8 Estación de monitoreo sísmico de Hualañé	78
6.1.9 Estación de monitoreo sísmico de Constitución.....	80
6.1.10 Resumen de los espectros de respuesta del terremoto del 27F	82
6.2 Análisis de los espectros de respuesta del sismo del 27F.....	83
6.2.1 Análisis de los espectros de respuesta del 27F por tipo de clasificación.....	83
6.2.2 Correlación entre el V_{S30} y el valor máximo de pseudo-aceleración	87
6.2.3 Comparación de la respuesta sísmica analizando el V_{S30} y perfil de velocidades de ondas de corte	89
6.2.4 Correlación entre el período predominante y el V_{S30}	93
6.2.5 Clasificación sísmica de suelos compuestos por grava	94
7. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	98
7.1 Discusión sobre el método SASW	98
7.2 Discusión sobre la respuesta sísmica de los suelos.....	100
7.3 Discusión final	102
7.4 Conclusiones finales.....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	104

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resultados y margen de error de la implementación del método SASW	32
Tabla 2: Ubicación de las estaciones de monitoreo sísmico	33
Tabla 3: Resumen del resultado de las mediciones con SASW	62
Tabla 4: Resumen del análisis de los espectros de respuesta	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema del método SSRM (F. Ochoa, 2007).....	5
Figura 2.2: Esquema de la disposición en terreno de los geófonos y de la fuente	6
Figura 2.3: Esquema del movimiento de las ondas Rayleigh (V. Peredo, 2011).....	8
Figura 2.4: Propagación de un tren de ondas entre dos geófonos (Sung-Ho Jo, 1996).	9
Figura 2.5: Curva de desfase empaquetada (K. Stokoe, 2009).....	11
Figura 2.6: Curva de dispersión experimental del subsuelo de un sitio	11
Figura 3.1: Comparación entre gráficos de ángulo de desfase empaquetado para distintos registros con un mismo espaciamiento de 24 m de un mismo sitio.	16
Figura 3.2: Diferencia entre el ángulo de fase empaquetado para tres mediciones diferentes para un mismo lugar y mismo espaciamiento	18
Figura 3.3: Inserción de las primeras curvas de dispersión correspondientes a los espaciamientos menores entre geófonos.....	19
Figura 3.4: Inserción de las mediciones con un espaciamiento de 32 m a la curva de dispersión.....	20
Figura 3.5: Curva de dispersión resultante después de eliminar las curvas de dispersión de 32 m que no se traslaparon con el resto	20
Figura 3.6: Inserción de las mediciones con un espaciamiento de 40 m a la curva de dispersión.....	21
Figura 3.7: Curva de dispersión resultante después de eliminar las curvas de dispersión de 40 m que no se traslaparon con el resto	21
Figura 3.8: Curva de dispersión experimental del subsuelo del sitio medido.....	22
Figura 4.1: Martillo hidráulico empleado para ensayos de SASW. (K. Stokoe, 2005)	25
Figura 4.2: Sistema del trípode con la masa de 63.5 kg ejecutando golpes en la Estación de Peñalolén.	26
Figura 4.3: Ubicación del sitio de la medición de implementación en Maipú	27

Figura 4.4: Ubicación del sitio de la medición de implementación en Llolleo.....	27
Figura 4.5: Curva de dispersión experimental del subsuelo del sitio de Llolleo.....	28
Figura 4.6: Comparación de los perfiles de velocidad de ondas de corte obtenidos por downhole y SASW en el sitio de la medición de implementación de Llolleo.	29
Figura 4.7: Curva de dispersión experimental del subsuelo del sitio de Maipú	30
Figura 4.8: Comparación perfiles de velocidad de ondas de corte obtenidos por downhole y SASW en el sitio de Maipú.....	31
Figura 5.1: Mapa de la zona centro-sur de Chile con la ubicación de las estaciones de monitoreo sísmico seleccionadas en este trabajo.	34
Figura 5.2: Ubicación de la Estación de Llolleo.....	35
Figura 5.3: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Llolleo.	36
Figura 5.4: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Llolleo.....	36
Figura 5.5: Ubicación de la Estación de Peñalolén	38
Figura 5.6: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Peñalolén.....	39
Figura 5.7: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Peñalolén.....	39
Figura 5.8: Ubicación de la Estación de Puente Alto.	41
Figura 5.9: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Puente Alto.	42
Figura 5.10: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Puente Alto.....	42
Figura 5.11: Ubicación de la Estación de Mirador.	44
Figura 5.12: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Mirador.....	45
Figura 5.13: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Mirador.....	45
Figura 5.14: Ubicación de la Estación de Antumapu.....	47
Figura 5.15: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Antumapu.	48
Figura 5.16: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Antumapu.....	48
Figura 5.17: Ubicación de la Estación de Casablanca.....	50
Figura 5.18: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Casablanca. ...	51
Figura 5.19: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Casablanca.....	51
Figura 5.20: Ubicación de la Estación de Curicó.	54
Figura 5.21: Curva de dispersión del experimental subsuelo de la Estación de Curicó.....	54
Figura 5.22: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Curicó....	55
Figura 5.23: Ubicación de la Estación de Hualañé.....	56
Figura 5.24: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Hualañé.....	57

Figura 5.25: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Hualañé.	57
Figura 5.26: Ubicación de la Estación de Constitución.	60
Figura 5.27: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Constitución.	60
Figura 5.28: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Constitución.	61
Figura 6.1: Espectros de respuesta de la Estación de Lolleo.	66
Figura 6.2: Espectros de respuesta de la Estación de Peñalolén.	68
Figura 6.3: Espectros de respuesta estación de la Estación de Puente alto.	70
Figura 6.4: Espectros de respuesta estación la Estación de Mirador.	71
Figura 6.5: Espectros de respuesta de la Estación de Antumapu.	73
Figura 6.6: Espectros de respuesta de la Estación de Casablanca.	75
Figura 6.7: Espectros de respuesta de la Estación de Curicó.	77
Figura 6.8: Espectros de respuesta de la Estación de Hualañé.	79
Figura 6.9: Espectro de respuesta de la Estación de Constitución.	81
Figura 6.10: Espectros de respuesta de los suelos tipo II de acuerdo a la norma Nch433	83
Figura 6.11: Espectros de respuesta de los suelos tipo II de acuerdo al decreto 117	84
Figura 6.12: Espectros de respuesta de los suelos tipo III de acuerdo a la norma Nch433	85
Figura 6.13: Espectros de respuesta de los suelos tipo III de acuerdo al decreto 117	86
Figura 6.14: Máxima Pseudo-aceleración en función del V_{S30}	87
Figura 6.15: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de las estaciones emplazadas sobre grava de Santiago.	88
Figura 6.16: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de las estaciones de Peñalolén, Mirador y Curicó.	89
Figura 6.17: Espectros de respuesta de las estaciones de Peñalolén, Mirador y Curicó.	90
Figura 6.18: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de las estaciones de Puente Alto, Antumapu y Hualañé	91
Figura 6.19: Espectros de respuesta de las estaciones de Puente Alto, Antumapu y Hualañé.	92
Figura 6.20: Máximo valor de pseudo-aceleración en función del V_{S30}	93
Figura 6.21: Gráfico que presenta el período peak en función del V_{S30}	93
Figura 6.22: Perfiles de velocidad de las estaciones emplazadas sobre gravas fluviales	95
Figura 6.23: Espectros de respuesta de las estaciones de Peñalolén, Antumapu y Curicó	96
Figura 6.24: Comparación del espectro de respuesta de las estaciones de Peñalolén, Puente Alto y Hualañé con los espectros de diseño de los suelos tipo II	97

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto del trabajo realizado

El pasado evento telúrico del 27 de Febrero de 2010, que sacudió la zona centro-sur del país, abrió un amplio debate sobre la forma en que se está haciendo y considerando los estudios de mecánica de suelo a la fecha. Dentro de los cuestionamientos realizados están los que apuntan a si la clasificación de suelos de la norma Nch433, los cuales permiten evaluar su funcionamiento y sus deficiencias. Por otra parte se está discutiendo la posibilidad de hacer subdivisiones a los tipos de suelo y agregar más tipos de clasificación.

A raíz del terremoto del 27F uno de los parámetros más preponderantes para la clasificación de los suelos comenzó a ser la velocidad de propagación de ondas de corte, en desmedro del ensayo de penetración estándar (N_{SPT}), requiriéndose un estudio de los 30 primeros metros, y así obtener el V_{S30} (velocidad de propagación de ondas de corte promedio en los 30 metros de profundidad) para la clasificación del suelo.

Hay varios métodos geofísicos que permiten la obtención del perfil de velocidades de ondas de corte, con distintos costos, ventajas y desventajas entre los que destacan; la reflexión y refracción sísmica, de bajo costo, pero también de bajo detalle en la estratigrafía del perfil de velocidad de ondas de corte y de algunas restricciones para su utilización. Además están los métodos de downhole y crosshole, que por medio de sondajes permiten obtener el perfil de velocidades de ondas de corte con buena resolución, pero a un elevado costo, pues requiere la ejecución de un sondaje.

En las últimas décadas se ha estado desarrollando métodos geofísicos en base a ondas superficiales con los cuales se puede obtener el perfil de velocidades de ondas de corte del suelo con relativamente una buena resolución y a un bajo costo. Entre estos métodos destacan SASW, MASW y ReMi.

El método SASW (Spectral Analysis of Surface Waves), es una forma de prospección geofísica que consiste en medir, por medio de geófonos, excitaciones en el suelo generadas por una fuente emisora de ondas mecánicas (ondas superficiales). De esta forma se logra obtener la curva de dispersión del suelo del sitio medido, de la cual se puede generar el perfil de velocidades de ondas de corte por medio de un método de inversión. SASW se está utilizando en varios países en el mundo y recientemente se está analizando su incorporación dentro de las técnicas de medición de suelos que ofrece el mercado chileno.

Un trabajo de tesis previo a éste implementó el método SASW logrando obtener perfiles de velocidad de ondas de corte hasta 15 m de profundidad, utilizando los equipos y Software del laboratorio MECESUP de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile¹. Los perfiles de velocidad de ondas de corte fueron calibrados en dos sitios donde existía un ensayo de Downhole en el lugar, obteniéndose resultados aceptables en la velocidad de ondas de corte promedio de los primeros 15 m.

Dentro de este contexto, un objetivo de este trabajo consistió en seleccionar una fuente emisora que genere ondas mecánicas superficiales con suficiente energía, de tal manera que permita ejecutar mediciones hasta al menos 30 m de profundidad, que hoy en día es lo que está exigiendo la norma para la clasificación sísmica de los suelos.

Con el método SASW implementado hasta al menos 30 m de profundidad, se realizaron mediciones para estimar el perfil de velocidad de ondas de corte del subsuelo de nueve estaciones de monitoreo sísmico que registraron el terremoto del 27F para comparar, analizar y correlacionar algunos parámetros de la respuesta sísmica registrada en el sismo del 27F, con el

¹ V. Peredo, 2011.

perfil de velocidad de ondas de corte, los espectros de diseño y la clasificación sísmica entregada por la norma Nch433.Of1996.mod.2009 y el decreto 117 promulgado en Febrero de 2011.

Del análisis efectuado se obtuvo varias conclusiones acerca de la clasificación sísmica de los suelos en base a la velocidad de ondas de corte, el (V_{S30}), además de algunas correlaciones entre la respuesta sísmica que se registró en el suelo con su perfil de velocidad de ondas de corte.

1.2 Objetivos

Este trabajo tiene tres objetivos fundamentales:

- Implementar el método SASW hasta profundidades de 30 m, utilizando una fuente emisora que permita generar ondas superficiales con suficiente energía como para estimar perfiles de velocidad de ondas de corte hasta al menos 30 m de profundidad, usando los equipos del laboratorio MECESUP de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile.
- Estimar perfiles de velocidad de propagación de ondas de corte en los suelos subyacentes a nueve estaciones de monitoreo sísmico que registraron el terremoto del 27 de Febrero de 2010 y obtener el V_{S30} del sitio.
- Comparar, analizar y correlacionar los parámetros de la respuesta sísmica registrada en el sismo del 27F con los perfiles de velocidad de ondas de corte y el espectro de diseño que define la norma Nch433 y el decreto 117 de acuerdo a la clasificación del V_{S30} .

1.3 Esquema del trabajo

El presente trabajo tiene la siguiente distribución de capítulos:

- **Capítulo 2, Revisión Bibliográfica** En este capítulo se hace una breve discusión del método SASW, presentando su marco teórico y haciendo una revisión bibliográfica.
- **Capítulo 3, Metodología de SASW** En este capítulo se explica en forma detallada la metodología desarrollada en este trabajo para poder llevar a cabo las mediciones con el método SASW, la obtención de las curvas de dispersión y la estimación de los perfiles de velocidad de ondas de corte.
- **Capítulo 4, Implementación de SASW** En este capítulo se presenta como se desarrolló el primer objetivo de este trabajo, alcanzar los 30 m de profundidad, realizándose dos mediciones de prueba; una en la comuna de Maipú y otra en la ciudad de Llole.
- **Capítulo 5, Medición con SASW en el subsuelo de las estaciones de monitoreo sísmico** En esta sección se presenta el resultado de las mediciones con el método SASW del subsuelo de las estaciones de monitoreo sísmico seleccionadas en este trabajo.
- **Capítulo 6, Análisis de los espectros de respuesta del sismo del 27F** Este capítulo presenta el análisis, estudio y correlación entre los espectros de respuesta de las estaciones de monitoreo sísmico que registraron el terremoto del 27F, el perfil de velocidad de ondas de corte obtenido con el método SASW y la clasificación sísmica definida para la velocidad de ondas de corte medida.
- **Capítulo 7, Discusiones y conclusiones** En este capítulo se concluye y discute sobre la experiencia de haber estimado perfiles de velocidad de ondas de corte con el método SASW y de la respuesta sísmica de los suelos chilenos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Método SASW

Los métodos de prospección geotécnica en base a geofísica cada vez han ido obteniendo mejores resultados. En la década de 1950 comenzó el desarrollo de las primeras técnicas de exploración mediante ondas superficiales (Ondas Rayleigh) con el método SSRM (Steady-State Rayleigh Method), usando una fuente generadora de ondas superficiales estacionaria. Esta técnica sin embargo tiene el defecto que es muy lenta y requiere de mucho trabajo en terreno, lo que causó que finalmente no se masificara. El método SSRM consiste en hacer entrar en fase una configuración de geófonos dada mediante la variación de la frecuencia de vibrar de una fuente emisora de excitaciones mecánicas estacionaria (ver figura 2.1) y de esta forma obtener la curva de dispersión del suelo².

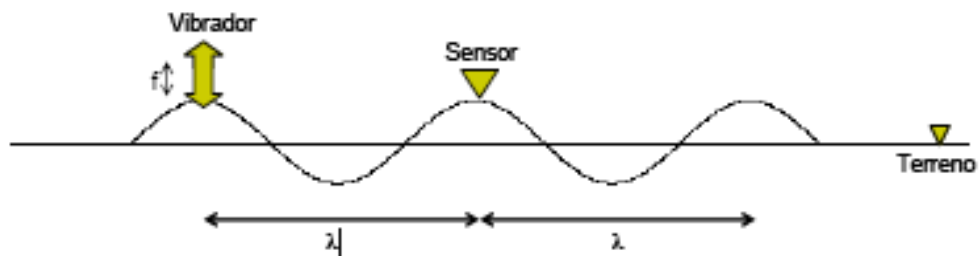


Figura 2.1: Esquema del método SSRM (F. Ochoa, 2007)

Sin embargo no hubo un gran avance en esta área hasta la década de 1980, período en el cual hubo un gran desarrollo de la computación lo que facilitó resolver ecuaciones y cálculos más sofisticados. Esto permitió realizarle análisis espectrales a trenes de ondas superficiales, lo que trajo como consecuencia una evolución del método SSRM, disminuyendo el tiempo

² F. Ochoa, 2007

utilizado en la toma de datos en terreno y su procesamiento, obteniéndose la curva de dispersión del suelo con mucha más facilidad y precisión³.

Dentro de este contexto aparece el método SASW (Spectral Analysis of Surface Waves), el que consiste en registrar con dos geófonos en el suelo excitaciones mecánicas en la superficie generadas por una fuente activa para posteriormente aplicarle a los registros un análisis espectral. Una posición clásica de los equipos en terreno para el método SASW consiste en ubicar en una línea recta los dos geófonos y la fuente emisora activa, usando la misma distancia entre los tres elementos. La figura 2.2 muestra un esquema de la disposición en terreno de los geófonos y de la fuente.

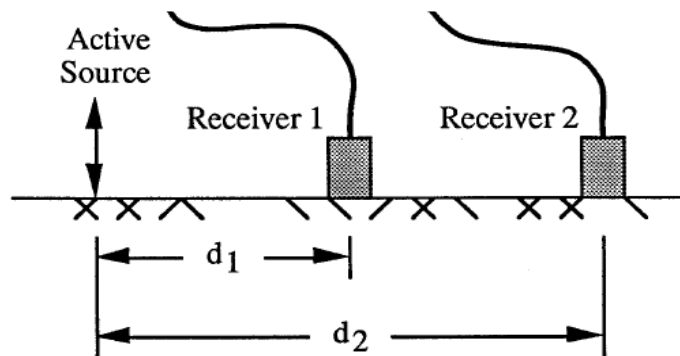


Figura 2.2: Esquema de la disposición en terreno de los geófonos y de la fuente (Sung-Ho Jo, 1996).

Para estimar el perfil de velocidades de ondas de corte, primero se ejecutan varios golpes por cada configuración de geófonos, lo que se va repitiendo para cada espaciamiento definido para la medición. Cada conjunto de registros obtenidos de un determinado espaciamiento aporta a un determinado rango de longitudes de onda en la obtención de la curva de dispersión experimental del subsuelo del sitio medido, por lo que es necesario tener un conjunto de registros para varios distanciamientos entre geófonos y así obtener la curva de dispersión global experimental de un sitio.

³ F. Ochoa, 2007

El método SASW tiene la ventaja que estima perfiles de velocidad de ondas de corte en suelos con una resolución superior a otras técnicas basadas en sismica como la refracción o reflexión sísmica, incluso permite estimar perfiles de velocidad de ondas de corte en suelos donde hay estratos rígidos sobre otros más blandos. Además SASW tiene la ventaja que tiene un costo mucho más bajo que los ensayos de Downhole y Crosshole.

SASW es un método que analiza la propagación de ondas superficiales en cualquier medio que transmita ondas de corte, lo que permite no sólo obtener perfiles de velocidades de un sitio, si no también determinar calidad y rigidez de materiales de construcción como hormigones, determinar el nivel de compactación en rellenos de suelo o de otros materiales como residuos domiciliarios e incluso con la técnica MASW (Multi-Station Analysis Surface Waves) se puede identificar si existen cuerpos o estructuras enterradas ⁴.

El método SASW se basa en medir ondas superficiales tipo Rayleigh, las cuales tienen la característica de tener movimiento horizontal y vertical, como muestra la figura 2.3. El movimiento vertical es el registrado por los geófonos, ya que es la única onda superficial con movimiento en esta dirección, así que se puede medir usando geófonos verticales.

Las ondas tienen como característica que sus propiedades de propagación dependen del medio por donde se propagan y si éste es estratificado, como es el caso de los suelos, se produce el fenómeno de dispersión que es la esencia del desarrollo del método SASW. La dispersión se produce cuando un tren de ondas Rayleigh recorre medios estratificados, produciendo para distintas longitudes de onda distintas velocidades de fase, generando que las propiedades del suelo sean representadas solamente por la longitud de onda y la frecuencia, reduciendo el problema a sólo dos variables.

⁴ T. Satoh, 1991

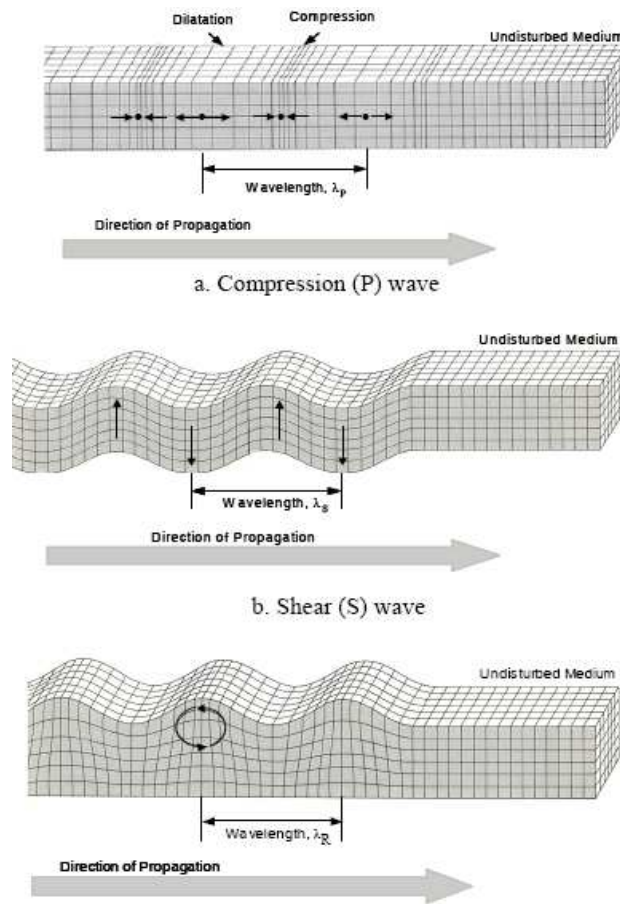


Figura 2.3: Esquema del movimiento de las ondas Rayleigh (V. Peredo, 2011).

2.2 Marco teórico

El método SASW se basa en un análisis espectral al registro obtenido en cada geófono por medio de la aplicación de la Transformada de Fourier transformándolo al dominio de las frecuencias. El objetivo de esto es encontrar el desfase temporal de la llegada del tren de ondas a cada geófono en el espacio de las frecuencias.

La figura 2.4 muestra un esquema de la interpretación física de la función de fase, la cual representa el tiempo de diferencia de la llegada del tren de ondas entre cada geófono, el que es calculado en el dominio de las frecuencias por lo que se representa como un ángulo en el plano complejo.

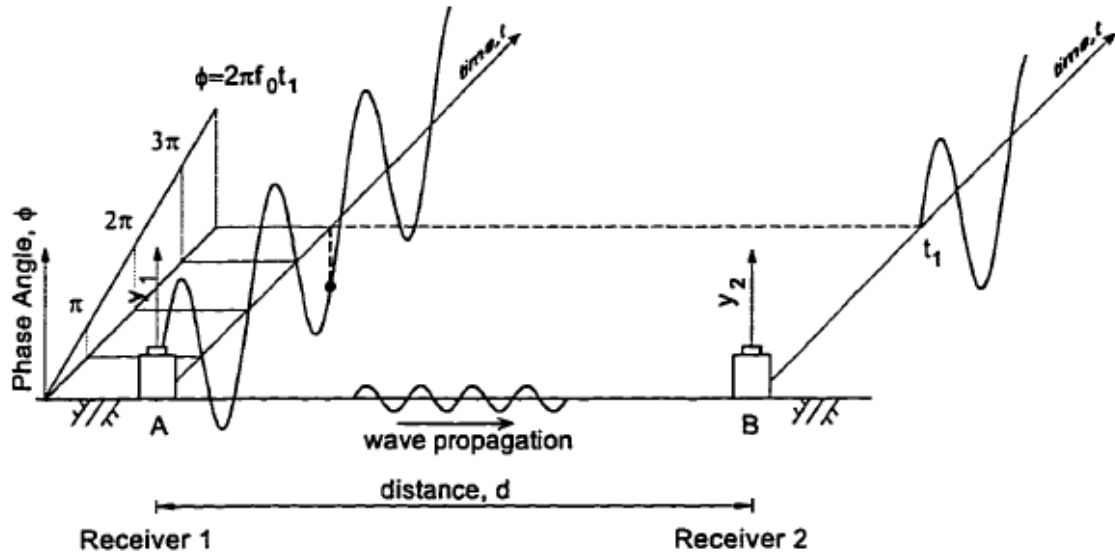


Figura 2.4: Propagación de un tren de ondas entre dos geófonos (Sung-Ho Jo, 1996).

Por otro lado, de acuerdo con las leyes de la teoría de ondas la velocidad de fase de un tren de ondas con una longitud de onda (λ) y frecuencia (f) es la presentada en la ecuación (2.1).

$$V_{ph} = \lambda \cdot f \quad (2.1)$$

Además la ecuación (2.2) representa la velocidad de fase cuando una onda ha recorrido un distanciamiento dado (d) entre geófonos en un tiempo (t).

$$V_{ph} = \frac{d}{t} \quad (2.2)$$

Se puede expresar el tiempo en función de la longitud de onda del tren de ondas superficiales, lo que es representado por la función de desfase (ϕ) y su frecuencia (f). Con lo anterior la velocidad de fase del tren de ondas puede ser definida como se presenta en la ecuación (2.3).

$$V_{ph} = \frac{2\pi \cdot f}{\phi(f)} \cdot d \quad (2.3)$$

La función $\phi(f)$ se conoce como la función de desfase o fase y se calcula como la diferencia entre los ángulos complejos de cada registro de los geófonos en el dominio de las frecuencias. Las ecuaciones (2.4) y (2.5) representan la Transformada de Fourier para el registro del geófono 1 y 2 respectivamente.

$$z_1 = A_1(\cos \phi_1 + i \operatorname{sen} \phi_1) \quad (2.4)$$

$$z_2 = A_2(\cos \phi_2 + i \operatorname{sen} \phi_2) \quad (2.5)$$

Entonces el problema se reduce a obtener la diferencia de los ángulos complejos de las ecuaciones (2.4) y (2.5). Se puede obtener esta diferencia de la ecuación (2.6), resultando finalmente la ecuación (2.7).

$$z_2 z_1^* = A_1 A_2 (\cos(\phi_2 - \phi_1) + i \operatorname{sen}(\phi_2 - \phi_1)) \quad (2.6)$$

$$\phi(f) = \phi_2 - \phi_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{sen}(\phi_2 - \phi_1)}{\cos(\phi_2 - \phi_1)} \right) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{Im}(z_2 z_1^*)}{\operatorname{Re}(z_2 z_1^*)} \right) \quad (2.7)$$

Donde:

z_1^* : Representa el complejo conjugado de la Transformada de Fourier del registro del geófono 1.

Las curvas de desfase contienen la información para obtener la curva de dispersión generada por cada golpe. De la ecuación (2.3) se puede obtener la relación que existe entre el ángulo de desfase con la longitud de onda para una frecuencia dada. Esta relación es mostrada en la ecuación (2.8).

$$\lambda = \left(\frac{2\pi}{\phi(f)} \right) \cdot d \quad (2.8)$$

Cuando las curvas de desfase tienen valores entre -180° a 180° se le llama curva de desfase empaquetada, en cambio cuando esta curva tiene valores mayores que 0 y siempre creciente se le llama curva de desfase desempaquetada. La figura 2.5 muestra una curva de desfase empaquetada.

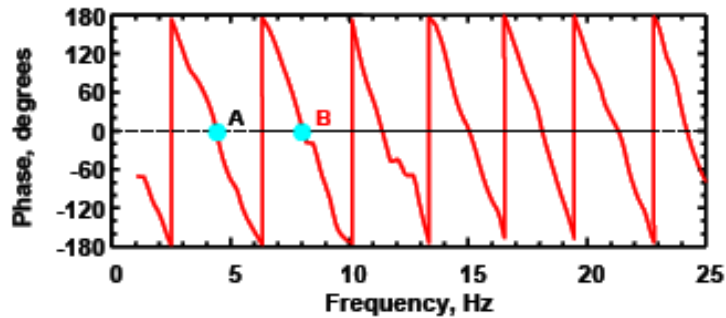


Figura 2.5: Curva de desfase empaquetada (K. Stokoe, 2009).

Cada curva de desfase representa un segmento de la curva de dispersión experimental del sitio medido en un rango de longitud de onda limitado por el espaciamiento dado entre geófonos. Al formar un conjunto de curvas de fase se obtiene la curva de dispersión experimental global, como la presentada en la figura 2.6. A través de un método de inversión aplicado a esta curva se obtiene finalmente el perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo.

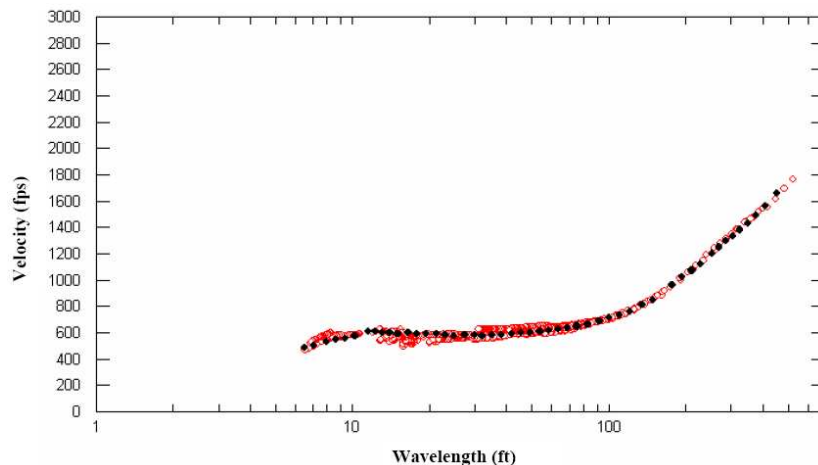


Figura 2.6: Curva de dispersión experimental del subsuelo de un sitio (K. Stokoe, 2004)

3. METODOLOGÍA DE SASW

En este capítulo se presenta una revisión de la metodología empleada para obtener los perfiles de velocidad de ondas de corte en el subsuelo de las estaciones de monitoreo sísmico seleccionadas utilizando el método SASW.

3.1 Equipos empleados

Los equipos empleados en la toma de datos corresponden a un sistema de adquisición de datos, tipo geode, Geometrics de 24 canales, de 16 bits cada uno, además de dos geófonos verticales de 4.5 Hz. Adicionalmente se contó con el sistema de cableado necesario para unir el geode con los geófonos y con un laptop en el que se registró la información obtenida en terreno para su posterior procesamiento.

Cabe señalar que los geófonos de 4.5 Hz, que han sido usados en algunos estudios de SASW y MASW (incluso de mayor frecuencia natural), presentaron un buen rendimiento, sin embargo pueden generar problemas de distorsión en mediciones sobre suelos de baja rigidez⁵.

Un ejemplo de esto se muestra a continuación: la medición en un suelo con baja velocidad de propagación de corte⁶, del orden de 200 m/s a 30 m de profundidad, el tren de ondas superficiales que se debe generar para efectuar esa medición debe tener aproximadamente una longitud de onda de 60 m, lo que implica trabajar en la siguiente frecuencia:

$$f = \frac{V_{ph}}{\lambda} = \frac{200}{60} = 3.33 \text{ Hz}$$

⁵ Jianghai Xia, Richard D. Miller, Choon B. Park, 2010.

⁶ La velocidad de fase y de onda de corte tienen aproximadamente el mismo valor, ésta última es superior en un 10% aproximadamente a la velocidad de fase. Felipe Ochoa, 2007.

Lo que implica que al medir trenes de ondas con un contenido alto de frecuencias bajas utilizando geófonos de 4.5 Hz, se puede perder calidad en el resultado de la medición.

3.2 Metodología

A continuación se detalla la metodología empleada para obtener los perfiles de velocidad de ondas de corte desde el momento en que se toman los datos en terreno hasta que se realiza la inversión de la curva de dispersión experimental obtenida.

3.2.1 Medición en terreno

Previo a la ejecución de la medición con el método SASW, es necesario realizar dos actividades en el sitio donde se realizó la medición para obtener buenos resultados en la obtención del perfil de velocidad de ondas de corte. Lo primero es observar la geología y topografía local del lugar de tal manera de estudiar la existencia de una posible pendiente en la estratificación del suelo o existencia de roca a baja profundidad, además de recopilar antecedentes e información que puede ser valiosa al momento de hacer la inversión de la curva de dispersión. Lo segundo consiste en buscar un espacio con suelo expuesto de al menos 70 m de extensión (idealmente más distancia) donde se puedan desplegar los equipos de medición.

Para el posicionamiento de los equipos en terreno se utilizó la configuración clásica de SASW presentada en la revisión bibliográfica, distribuyendo los dos geófonos y la fuente generadora de ondas mecánicas en una única línea recta con el mismo espaciamiento entre sí. Los espaciamientos seleccionados para usar en las mediciones corresponden a 2 m, 4 m, 8 m, 16 m, 24 m, 32 m y 40 m, realizándose 15 golpes por cada uno.

La presencia de mucho ruido⁷ en el sitio donde se ejecuta la medición puede generar problemas en los resultados obtenidos, distorsionando los registros, lo que produce una pérdida de nitidez de las señales e incluso en casos extremos llegando a quedar inutilizadas para los fines del estudio. Por este motivo es que se recomienda medir en sitios donde haya poco ruido o si hay ruido esperar los momentos que éste baja de tal manera de conseguir mediciones nítidas.

Los golpes fueron ejecutados con tres fuentes distintas, una masa manual de 2.5 kg para los espaciamientos de 2 m y 4 m, una masa manual de 12.5 kg para los espaciamientos de 8 m, 16 m y 24 m y una masa de 63.5 kg que se dejó caer desde un trípode a una altura cercana a los 3 m (el mismo sistema utilizado para el ensayo de penetración estándar SPT) para los espaciamientos de 32 m y 40 m. De esta última fuente se hará más referencia en el capítulo 4.

3.2.2 Procesamiento de datos

Una vez que se realizó la toma de datos en terreno se hizo el procesamiento y análisis de datos. El geode almacena los datos obtenidos en terreno en archivos con formato SEG2. Los archivos incluyen en las primeras filas de texto información del equipo y de su fabricante, consignándose a continuación los datos registrados por los geófonos. Por esta razón es necesario borrar estas primeras líneas de texto (para el geode utilizado en este trabajo fue necesario borrar las primeras 39 líneas). Esto se puede realizar con un editor de texto que logre abrir este tipo de archivos. Una vez que se haya borrado el encabezado, se tiene en el archivo solamente los datos de voltaje en el tiempo (los geófonos miden voltaje).

Los archivos con los registros obtenidos en terreno se convirtieron de formato SEG2 a ASCII con un programa que viene incluido en el paquete del software de inversión (en este trabajo se usó el software WINSASW).

⁷ Entiéndase por ruido como toda señal que registra el geófono y que no aporta a la medición, como por ejemplo las vibraciones producidas por vehículos o personas caminando.

A los registros almacenados en archivos con formato ASCII se les aplicó las ecuaciones presentadas en la revisión bibliográfica para obtener los espectros de potencia y las curvas de fase. Una vez realizado esto, se guardan los resultados de cada medición en un archivo con formato HYX. Este formato de archivo es el que se insertó en el software de inversión.

En el Anexo C se presenta el código de programación que permitió calcular las curvas de desfase para obtener, posteriormente la curva de dispersión de cada registro.

3.2.3 Eliminación de los registros con más ruido

No todos los registros obtenidos de la medición en terreno tienen una buena nitidez, viéndose afectados por la presencia de ruido o una mala ejecución de los golpes de la fuente generadora de ondas mecánicas, por lo que hay que eliminar algunos registros antes de insertar los datos al programa.

Se debe seleccionar los mejores registros para lograr obtener la curva de dispersión correcta. Entiéndase como buen registro aquel que presenta una curva de fase empaquetada con escalones nítidos y sin distorsión. Para ejemplificar lo anterior se presenta en la figura 3.1 tres curvas de fase empaquetada obtenidas para un distanciamiento de 24 m en un mismo sitio, donde se puede ver que la curva superior es la más nítida de todas y la inferior la más distorsionada. Con estos resultados corresponde seleccionar sólo la curva superior.

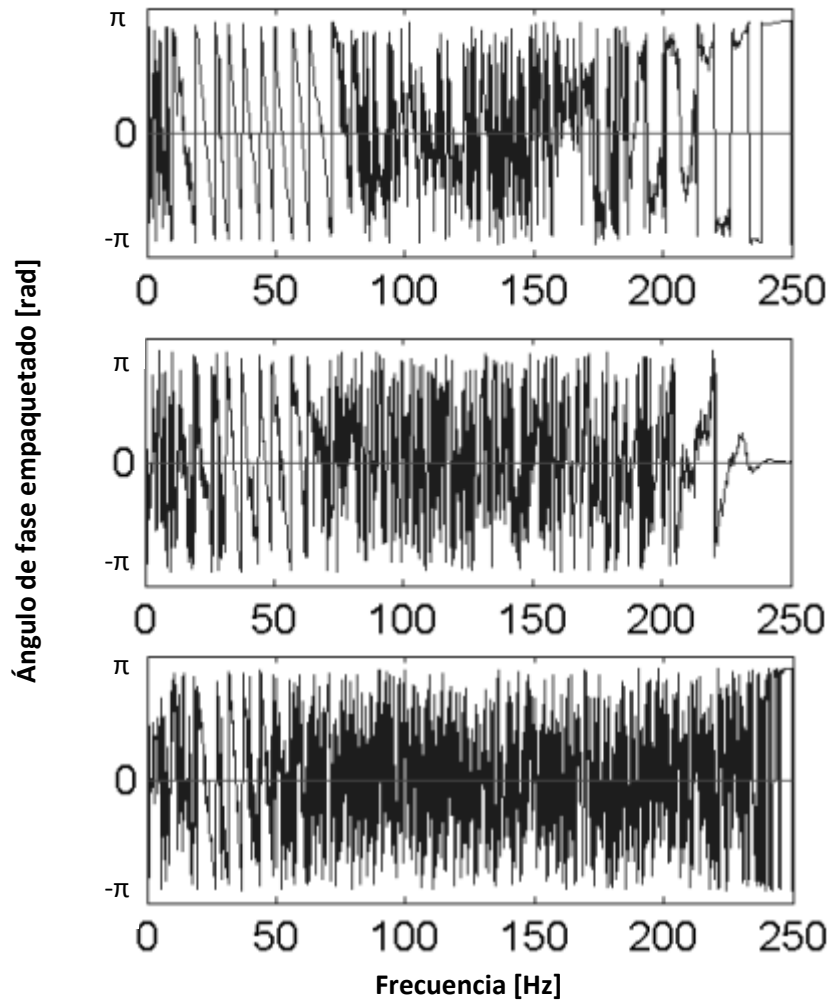


Figura 3.1: Comparación entre gráficos de ángulo de desfase empaquetado para distintos registros con un mismo espaciamiento de 24 m de un mismo sitio.

Finalmente utilizando el criterio recién descrito se eligen los cuatro a seis mejores registros para cada distanciamiento para ser insertados en el software de inversión (WINSASW).

3.2.4 Obtención de la curva de dispersión

Con los archivos insertos en el software de inversión se procede a la obtención de la curva de dispersión del subsuelo del sitio medido. Cada registro aportó información en un rango de longitud de onda definido por el espaciamiento entre los geófonos. El criterio utilizado para determinar el rango de longitud de onda de la curva de dispersión obtenida de la curva de fase de cada registro es:

$$\frac{d}{3} < \lambda < 2d$$

Donde

d: Corresponde al espaciamiento entre geófonos utilizado al momento de guardar el registro.

No todos los registros seleccionados en la etapa anterior aportan información correcta para la obtención de la curva de dispersión, debido a que la curva de fase asociada a cada registro presenta un desfase por las distorsiones en bajas frecuencias, no debiendo considerarse algunos.

La fuente emisora de ondas mecánicas empleada para los espaciamientos de 32 m y 40 m genera señales con una alta distorsión en las lecturas de los geófonos en bajas frecuencias, lo que implica que para registros de un mismo espaciamiento, la curva de desfase comienza en puntos diferentes. Este fenómeno visto en el plano del ángulo de fase desempaquetado en función de la frecuencia, se observa como una traslación vertical de la curva, es decir, se forma un conjunto de curvas paralelas, pero con diferente posición lo que cambia el tramo en la curva de dispersión que aporta ese registro. La figura 3.2 presenta tres curvas de ángulo desempaquetado en función de la frecuencia para un mismo lugar y un mismo espaciamiento con una buena calidad de nitidez, pero trasladadas entregando resultados diferentes.

La palabra clave que soluciona este problema se llama traslape, que consiste en obtener la curva de dispersión global en función de las mediciones que se superponen entre sí, descartando las que no cumplen este requisito. El traslape de las curvas de dispersión individuales entre varios espaciamientos medidos indica la buena ejecución del ensayo en el

sitio. A continuación se detalla paso a paso el procedimiento de la selección de datos, donde se utiliza como ejemplo la obtención de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Casablanca:

En primer lugar, se incluyeron los segmentos de la curva de dispersión de los espaciamientos menores a 32 m usando el promedio espectral de las mediciones⁸. La figura 3.3 presenta esta primera etapa:

Posteriormente se van agregando las curvas de dispersión de los registros de los espaciamientos de 32 m y 40 m.

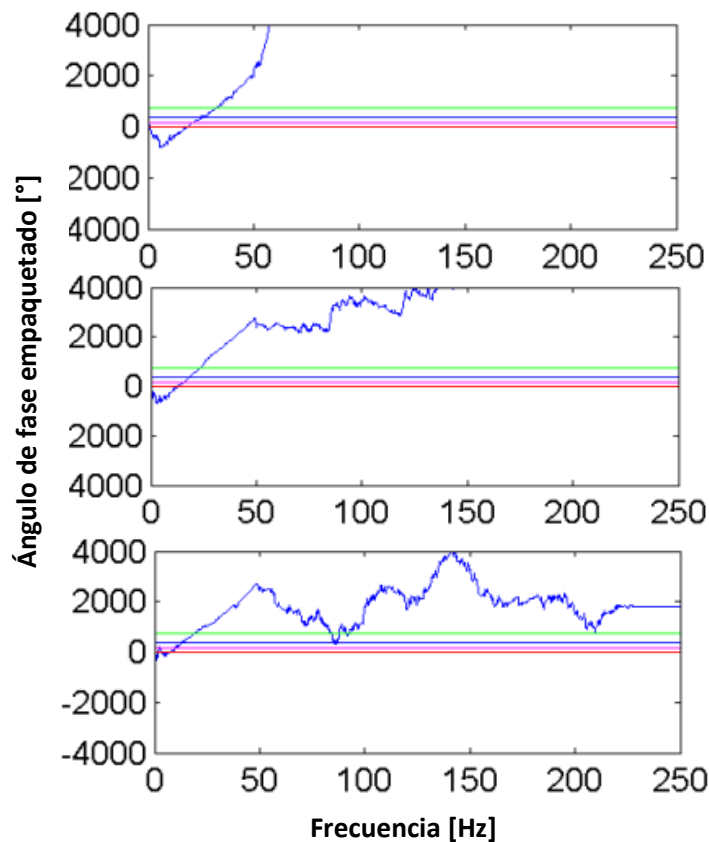


Figura 3.2: Diferencia entre el ángulo de fase empaquetado para tres mediciones diferentes para un mismo lugar y mismo espaciamiento

⁸ Entiéndase como Promedio Espectral el promedio de las mediciones de un determinado espaciamiento en el espacio de las frecuencias, después de haber aplicado la Transformada de Fourier.

El procedimiento para solucionar este problema consiste en insertar primero las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 32 m e ir comparándolas con las de espaciamientos menores que ya fueron seleccionadas. Las curvas de dispersión con un correcto inicio del ángulo de desfase desempaquetado se traslapan con las que ya son parte de la curva de dispersión global, eliminándose el resto. Se repite el mismo procedimiento para las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 40 m. La figura 3.4 presenta el primer paso de este proceso, donde se comenzó por insertar las curvas de dispersión para los registros con un espaciamiento de 32 m.

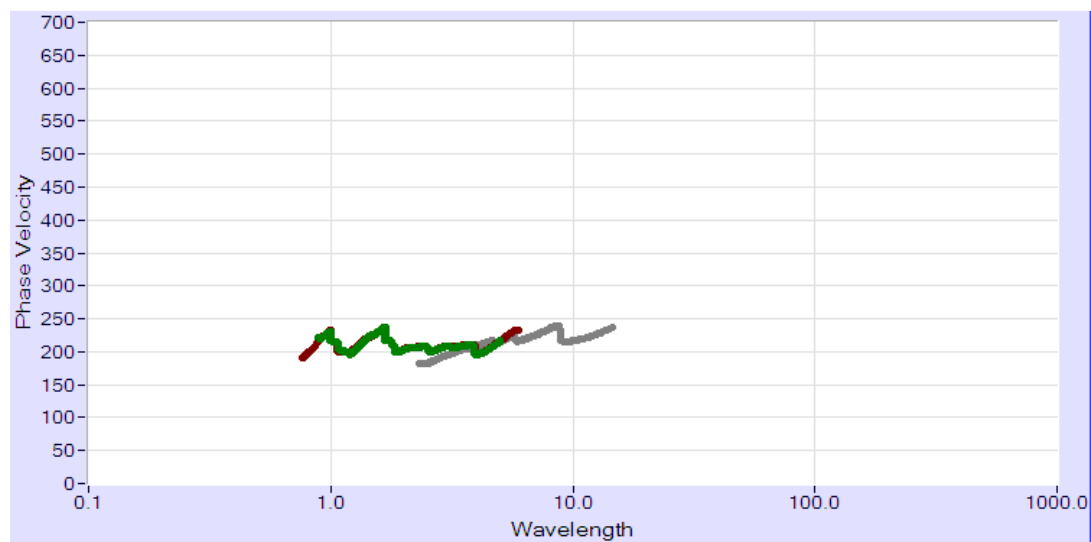


Figura 3.3: Inserción de las primeras curvas de dispersión correspondientes a los espaciamientos menores entre geófonos.

De la figura 3.4 se observa que dos curvas de dispersión no se traslapan con las que fueron insertadas. Estas curvas son eliminadas, las que son indicadas con un círculo rojo, resultando la figura 3.5.

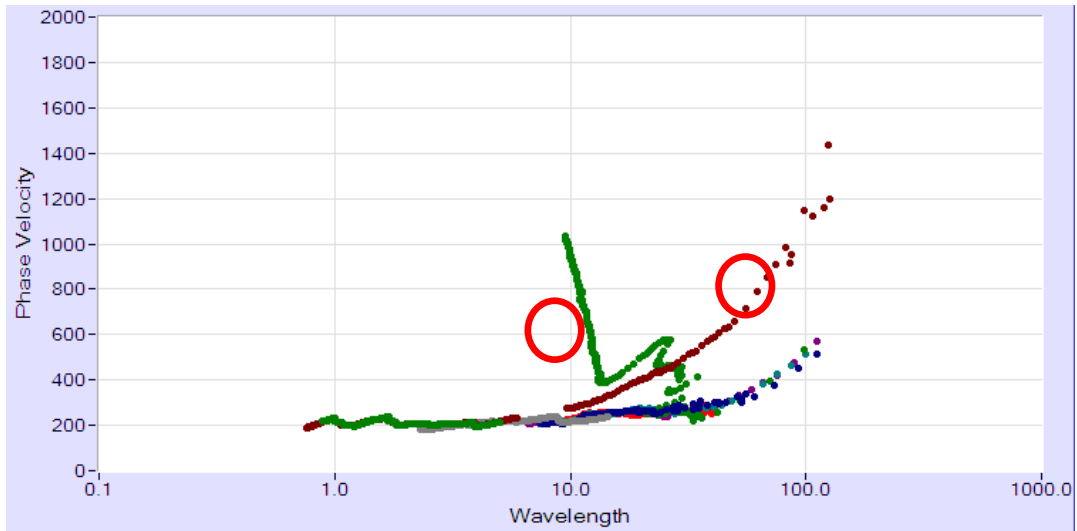


Figura 3.4: Inserción de las mediciones con un espaciamento de 32 m a la curva de dispersión

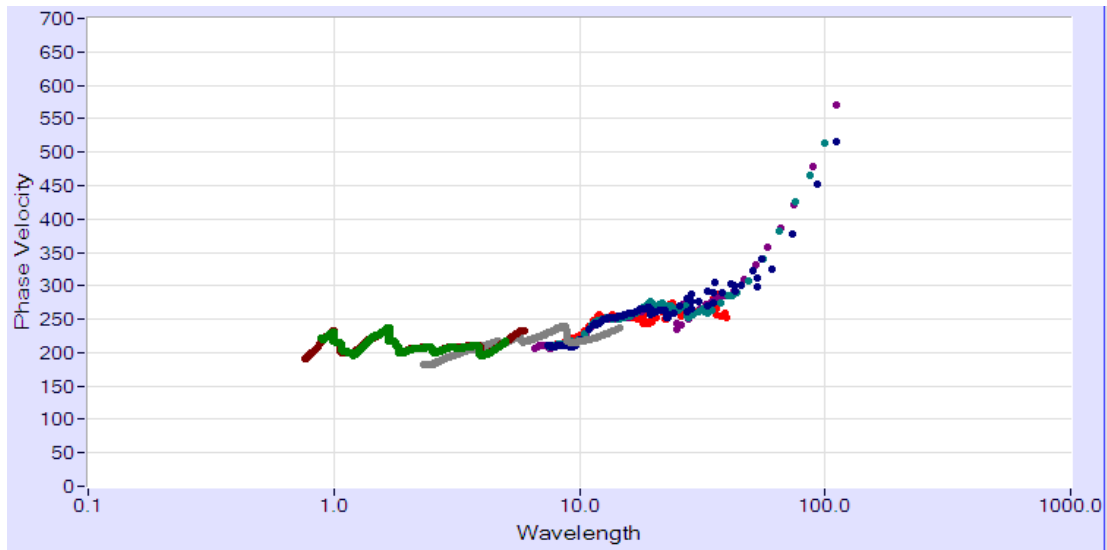


Figura 3.5: Curva de dispersión resultante después de eliminar las curvas de dispersión de 32 m que no se traslaparon con el resto

A continuación se repite el mismo procedimiento con las curvas de dispersión con un espaciamento de 40 m. Esto se presenta en la figura 3.6.

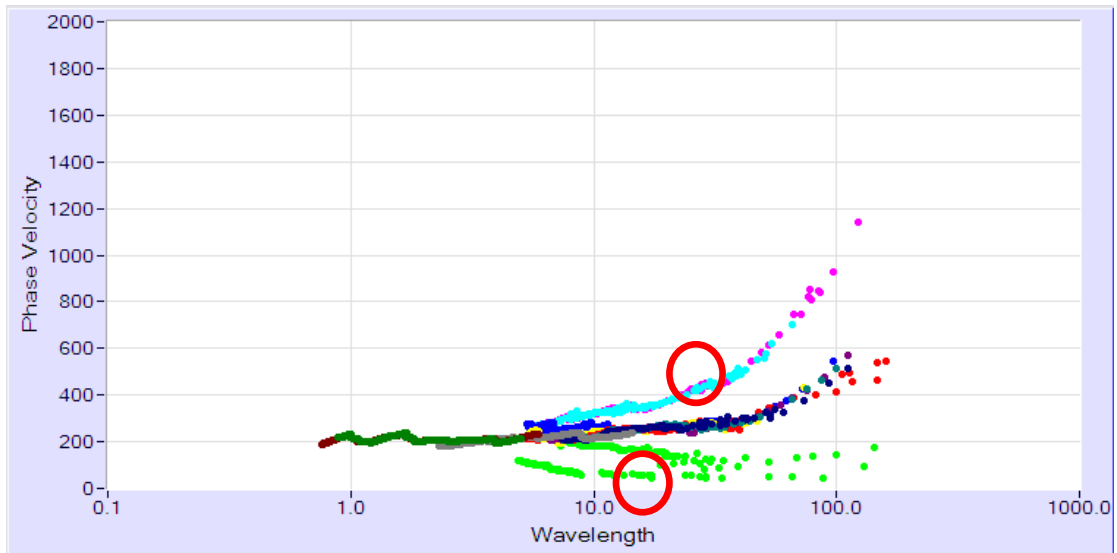


Figura 3.6: Inserción de las mediciones con un espaciamiento de 40 m a la curva de dispersión

En la figura 3.6 se observa que algunas curvas insertadas no se traslapan con el resto, por lo que se eliminan de la curva de dispersión final, resultando la figura 3.7.

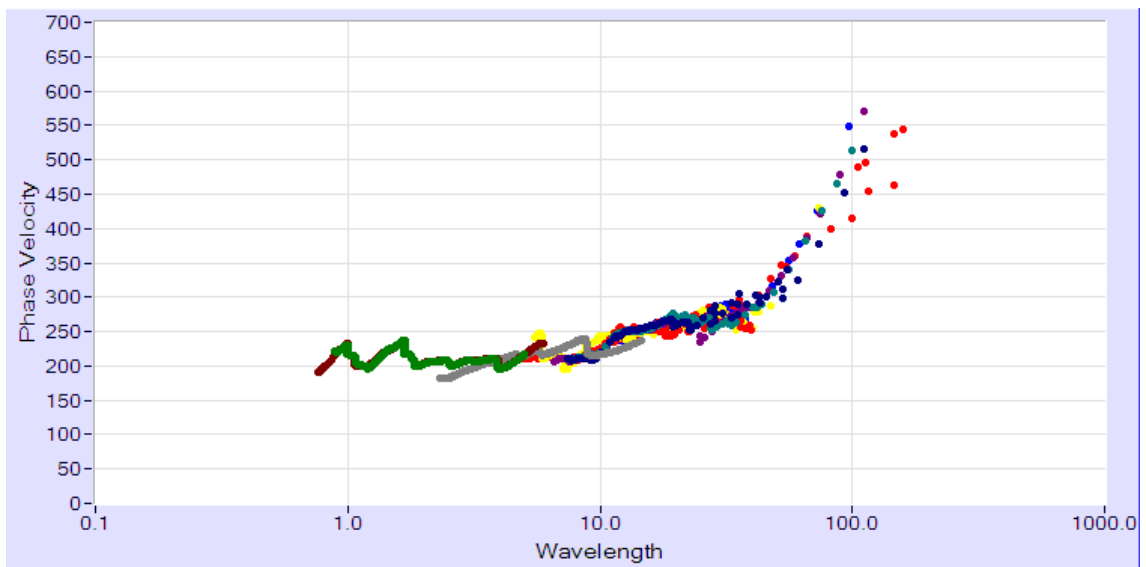


Figura 3.7: Curva de dispersión resultante después de eliminar las curvas de dispersión de 40 m que no se traslaparon con el resto

Finalmente, se obtiene la curva de dispersión experimental al promediar el conjunto de curvas de dispersión seleccionadas previamente. El método empleado para promediar las curvas de dispersión obtenidas en terreno corresponde al desarrollado por Sung-Ho Joh, que por medio de un proceso iterativo promedia las curvas de dispersión individuales y además va suavizando la pendiente de la curva resultante⁹, la curva de dispersión experimental global. A esta curva se le aplica el método de inversión para obtener los perfiles de velocidad. Ésta se presenta en la figura 3.8.

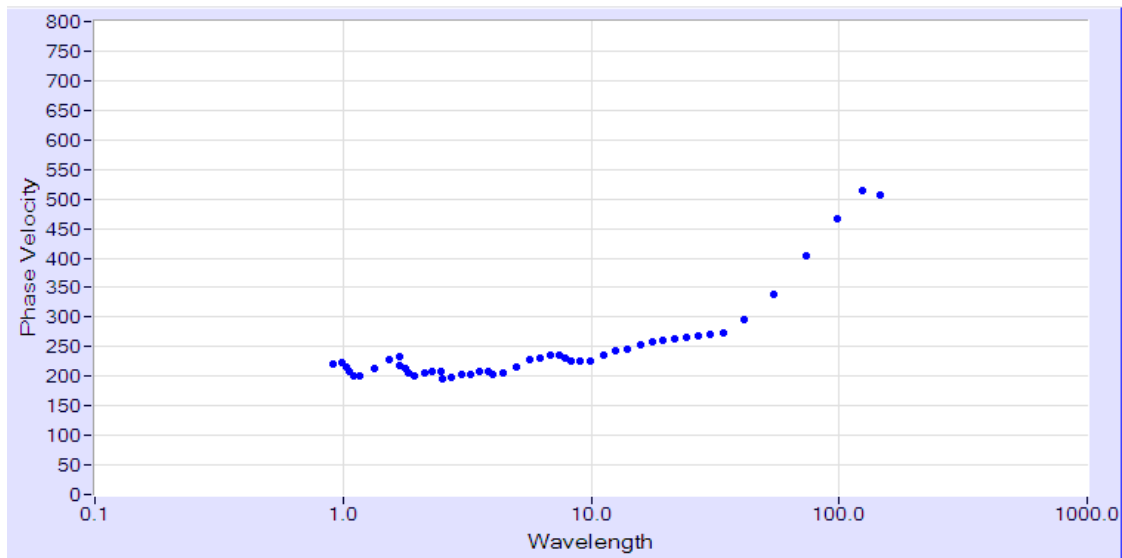


Figura 3.8: Curva de dispersión experimental del subsuelo del sitio medido

3.2.5 Inversión de la curva de dispersión

A partir de la curva de dispersión global experimental se obtiene el perfil de velocidad de ondas de corte a través de un método de inversión. Éste opera entregando un perfil de velocidad de ondas de corte para comparar la diferencia que hay entre la curva de dispersión de dicho perfil (curva teórica) con la curva experimental obtenida con la medición en terreno. El objetivo de esto es que la curva de dispersión teórica sea lo más parecida posible a la experimental, es decir, se minimiza la diferencia obteniéndose el perfil de velocidad de ondas de corte del subsuelo del sitio.

⁹ Op. cit.

El programa utilizado para invertir la curva de dispersión (WINSASW) presenta dos alternativas para obtener el perfil de velocidad de ondas de corte. En la primera el usuario inserta un perfil de velocidad de ondas de corte y/o una estratigrafía (Forward Modeling) para luego comparar la curva de dispersión teórica con la experimental. Haciendo este proceso en forma iterativa se obtiene el perfil de velocidad de ondas de corte final hasta conseguir una diferencia mínima entre la curva de dispersión teórica con la experimental.

La segunda alternativa que presenta el programa WINSASW es el método inverso¹⁰, que desde un perfil de velocidad de ondas de corte inicial, y por medio de un proceso iterativo, se va comparando las derivadas de las curvas de dispersión, ajustando en cada iteración el perfil anterior. El resultado es un perfil de velocidad de ondas de corte con una diferencia mínima entre las curvas de dispersión experimental y teórica.

Estas dos alternativas de procesamiento de las curvas de dispersión son complementarias, vale decir, no hay una mejor que la otra. Por ejemplo los perfiles de velocidad de ondas de corte crecientes en profundidad se pueden invertir rápidamente sólo con el método inverso; en cambio, los perfiles de velocidad de ondas de corte con estratigrafías más complejas se procesan tanto con la primera alternativa (Forward Modeling) como con el método de inversión para obtener el perfil de velocidades de ondas de corte final.

¹⁰ El método inverso utilizado es bastante complejo y tiene una matemática muy sofisticada, por lo que si se quiere ahondar más en él, se recomienda estudiar "Sung-Ho Joh (1996) "Advances in the data interpretation technique for Spectral-Analysis-of Surface-Waves (SASW) measurements", *Requirements for the degree of Doctor of Philosophy*, The University of Texas at Austin".

4. IMPLEMENTACIÓN DE SASW

4.1 Fuente utilizada

Un trabajo de tesis previo a éste implementó el método SASW logrando obtener perfiles de velocidad de ondas de corte hasta 15 m de profundidad. No se logró alcanzar mayores profundidades debido a que se careció en ese momento de una fuente generadora de ondas mecánicas superficiales que generase excitaciones con longitudes de onda más profundas¹¹.

Dentro de este contexto, uno de los objetivos de este trabajo consistió en alcanzar profundidades de medición de al menos 30 m, para poder obtener el V_{S30} ¹² del suelo. Esto requirió buscar una fuente emisora que lograra generar ondas superficiales con suficiente energía como para poder estimar el perfil de velocidad de ondas de corte hasta una profundidad mínima de 30 m. Para esto se evaluaron varias alternativas, entre ellas usar herramientas manuales, tipo masa de 12,5 kg, con algún sistema o técnica de golpe especial, usar el sistema de golpes empleado para el ensayo de penetración estándar N_{SPT} o crear un mecanismo con un martillo hidráulico que genere percusiones en el suelo, como el mostrado en la figura 4.1.

¹¹ Valentina Peredo, 2011.

¹² El V_{S30} del suelo es la velocidad de ondas de corte equivalente tal que una onda de corte se demora el mismo tiempo en recorrer los primeros 30 m con esta velocidad que con las velocidades de ondas de corte proporcionado por el perfil de velocidades. En el capítulo 5 se detalla su expresión matemática.



Figura 4.1: Martillo hidráulico empleado para ensayos de SASW. (K. Stokoe, 2005)

Se optó por ensayar primero las opciones más económicas y accesibles; éstas corresponden a la herramienta manual, tipo masa de 12.5 kg y el sistema de percusión del ensayo de penetraciones estándar N_{SPT} . Estas pruebas fueron realizadas el 18 de Noviembre de 2010 en la bodega de IDIEM en la Comuna de Cerrillos, en la ciudad de Santiago y dio como resultado que la señal generada por el combo de 12.5 kg llegaba muy atenuada al último geófono en los espaciamientos mayores, no así la masa de 63.5 kg dejada caer desde el trípode, con la que se podía distinguir bien el contenido de frecuencias del tren de ondas. El resultado de esta evaluación fue la elección de la masa lanzada desde el trípode utilizado para el ensayo de penetración estándar en la ejecución de los golpes que requieran de mayor energía (los espaciamientos de 32 m y 40 m). La figura 4.2 presenta el trípode realizando golpes en terreno en la medición del subsuelo de la Estación de Peñalolén.



Figura 4.2: Sistema del trípode con la masa de 63.5 kg ejecutando golpes en la Estación de Peñalolén.

4.2 Implementación de SASW

Se hicieron dos mediciones para implementar SASW en lugares donde se realizaron previamente ensayos de Downhole, y por lo tanto se contaba con el perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo. La figura 4.3 muestra la ubicación del sitio ubicado en la Comuna de Maipú y la figura 4.4 el de la ciudad de Llole.

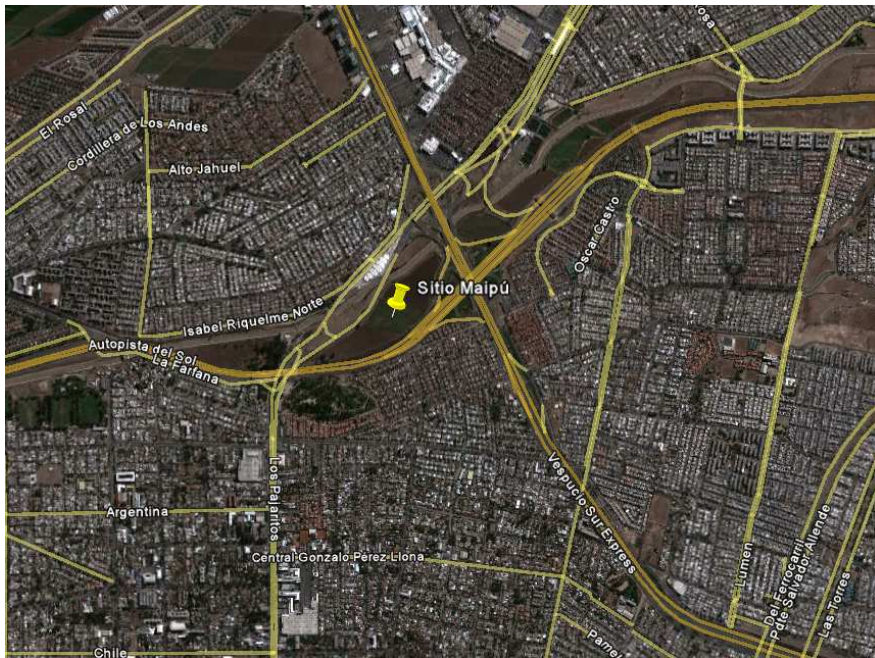


Figura 4.3: Ubicación del sitio de la medición de implementación en Maipú

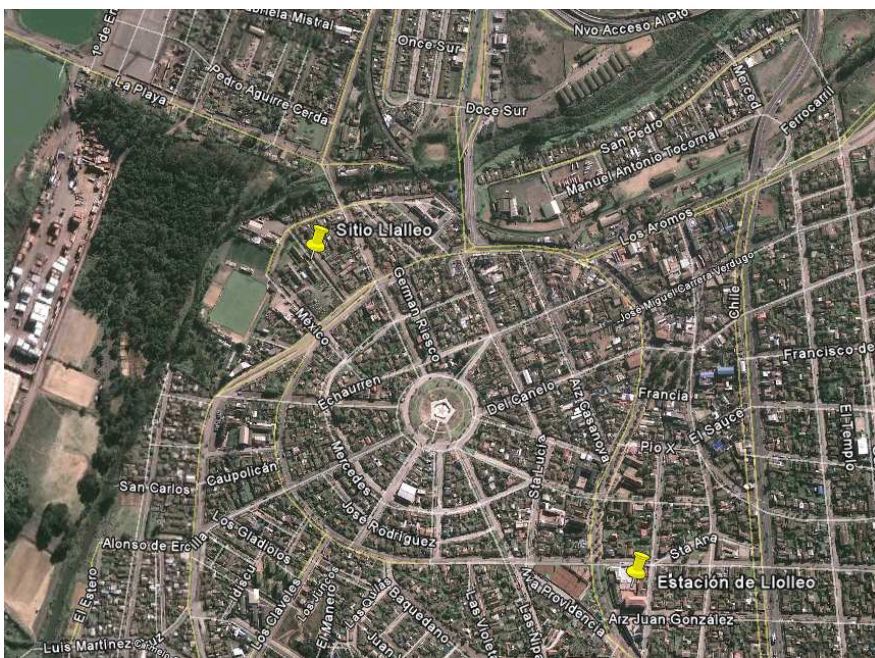


Figura 4.4: Ubicación del sitio de la medición de implementación en Lillo

4.2.1 Implementación en el sitio de Lolloe

El sitio medido en Lolloe está aledaño a una comisaría ubicada en el sector nor-poniente de la ciudad. Es un lugar plano, que a diferencia del subsuelo de la Estación de Lolloe, presenta suelos de mala calidad geotécnica, según el ensayo downhole¹³, correspondientes a depósitos arenosos de la desembocadura del río Maipo.

Se midió sobre un camino de tierra con prácticamente una presencia nula de ruido. La curva de dispersión experimental de la medición de implementación de Lolloe es mostrada en la figura 4.5.

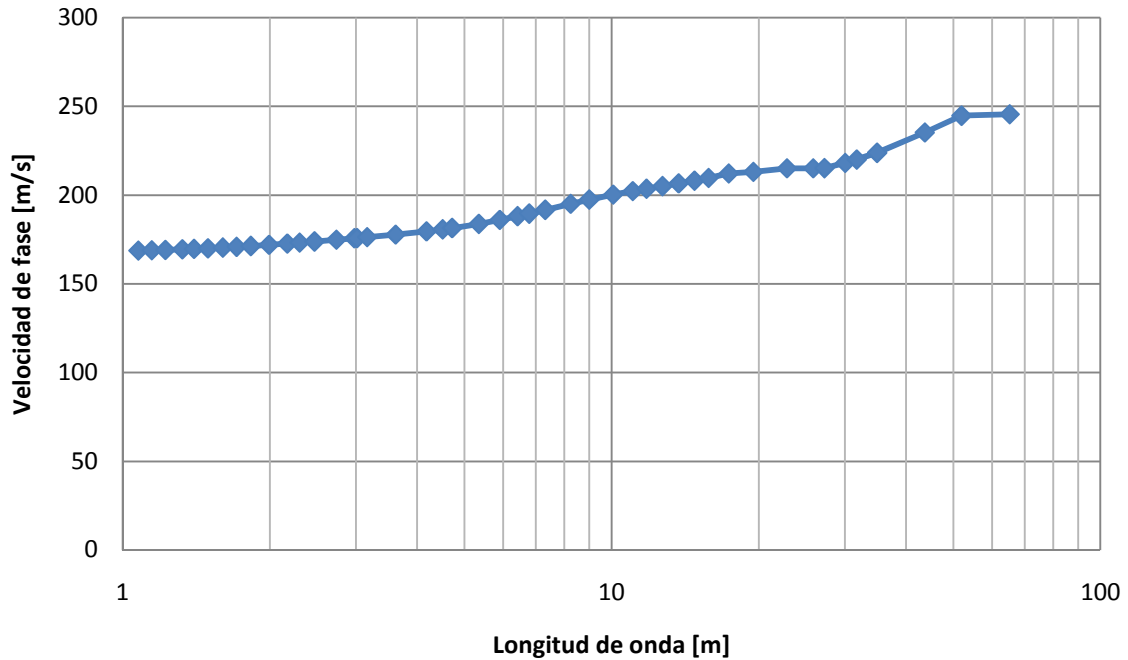


Figura 4.5: Curva de dispersión experimental del subsuelo del sitio de Lolloe

¹³ R. Verdugo, 2002, "Amplification phenomena observed in downhole array records generated on a subductive environment"

El perfil resultante de la inversión de la curva de dispersión global junto con el obtenido por el ensayo de downhole ejecutado en el lugar es mostrado en la figura 4.6.

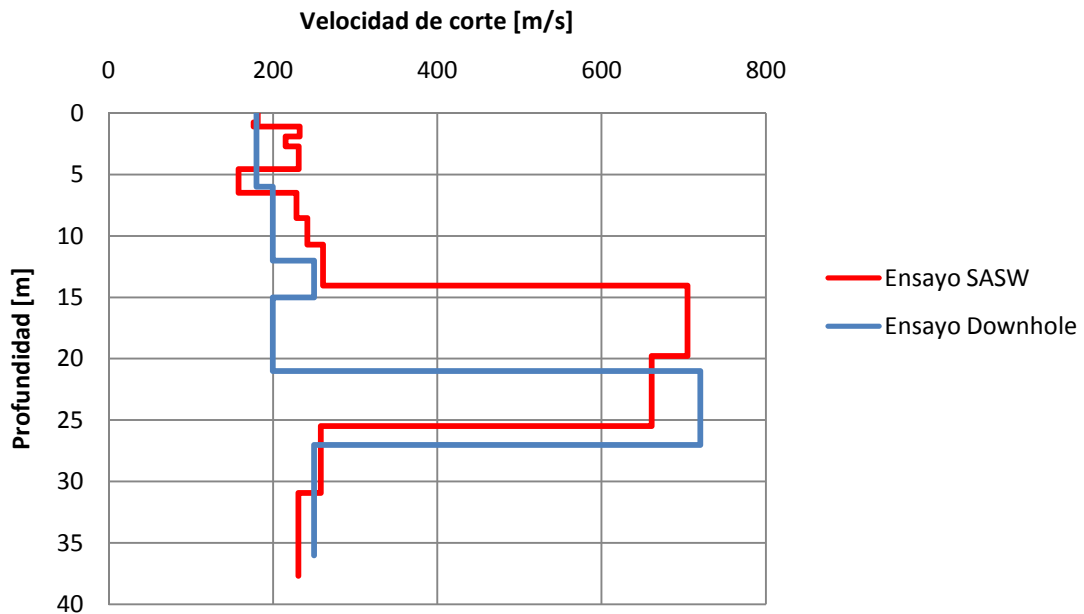


Figura 4.6: Comparación de los perfiles de velocidad de ondas de corte obtenidos por downhole y SASW en el sitio de la medición de implementación de Lollole.

Se puede ver de la figura 4.6 que ambos ensayos presentan un perfil de velocidades de ondas de corte muy similar y logran detectar un estrato rígido en torno a los 20 m, con un valor de velocidad de ondas de corte muy semejante, pero con una diferencia en el espesor del estrato de un poco más de 4 m.

4.2.2 Implementación en el sitio de Maipú

Este sitio se ubica en la ciudad de Santiago, en la comuna de Maipú, a 200 m al poniente de la intersección entre las avenidas Américo Vespucio y Pajaritos. La medición fue ejecutada en el bandejón central de la avenida Pajaritos, a unos 40 m de la canalización del Zanjón de la Guada, en un sitio plano, por lo que podría haber un suelo de relleno en los primeros metros de suelo.

El lugar presentó bastante ruido al ubicarse al centro del bandejón central de la calle Pajaritos, que tiene un elevado tráfico, sumado a algo de flujo de vehículos pesados, lo que demoró la medición al tener que esperar momentos de bajo ruido para poder ejecutar los golpes, mas lo anterior, no bajó la calidad de ésta.

La curva de dispersión experimental es mostrada en la figura 4.7.

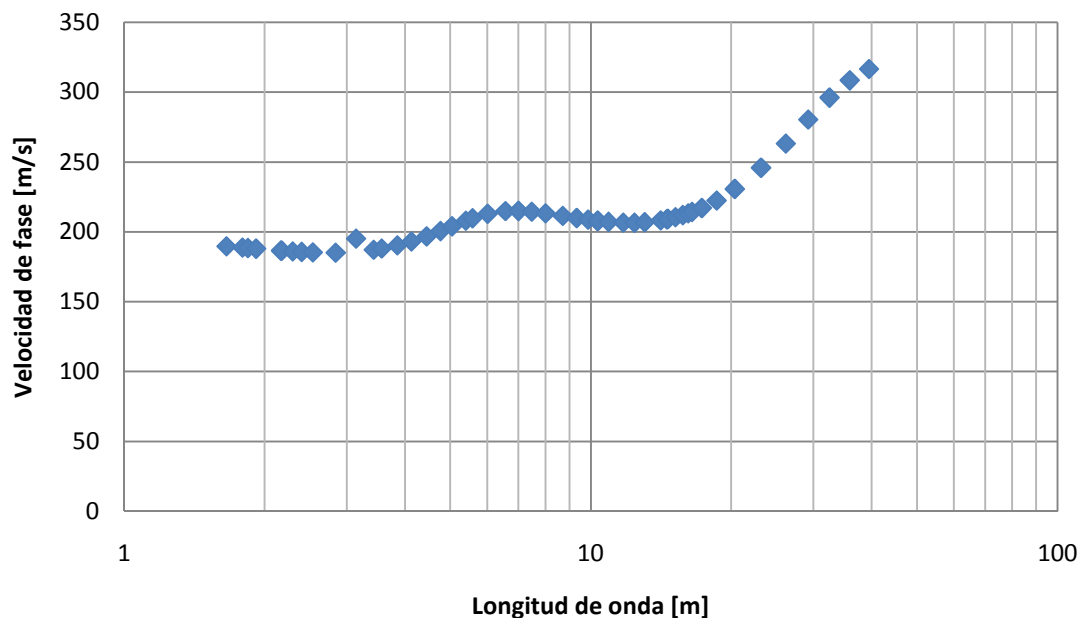


Figura 4.7: Curva de dispersión experimental del subsuelo del sitio de Maipú

El perfil resultante de la inversión de la curva de dispersión experimental global junto con el obtenido por el ensayo de downhole se presenta en la figura 4.8. Se puede ver de esta figura que ambos ensayos detectan un incremento en el perfil de velocidad de ondas de corte en un estrato de aproximadamente 8 m de espesor entre los 8 m y 16 m junto con una disminución en la velocidad de ondas de corte debajo de este estrato. Hubo una diferencia no menor en el valor de la velocidad de ondas de corte en el estrato rígido que se obtuvo por medio de los dos ensayos.

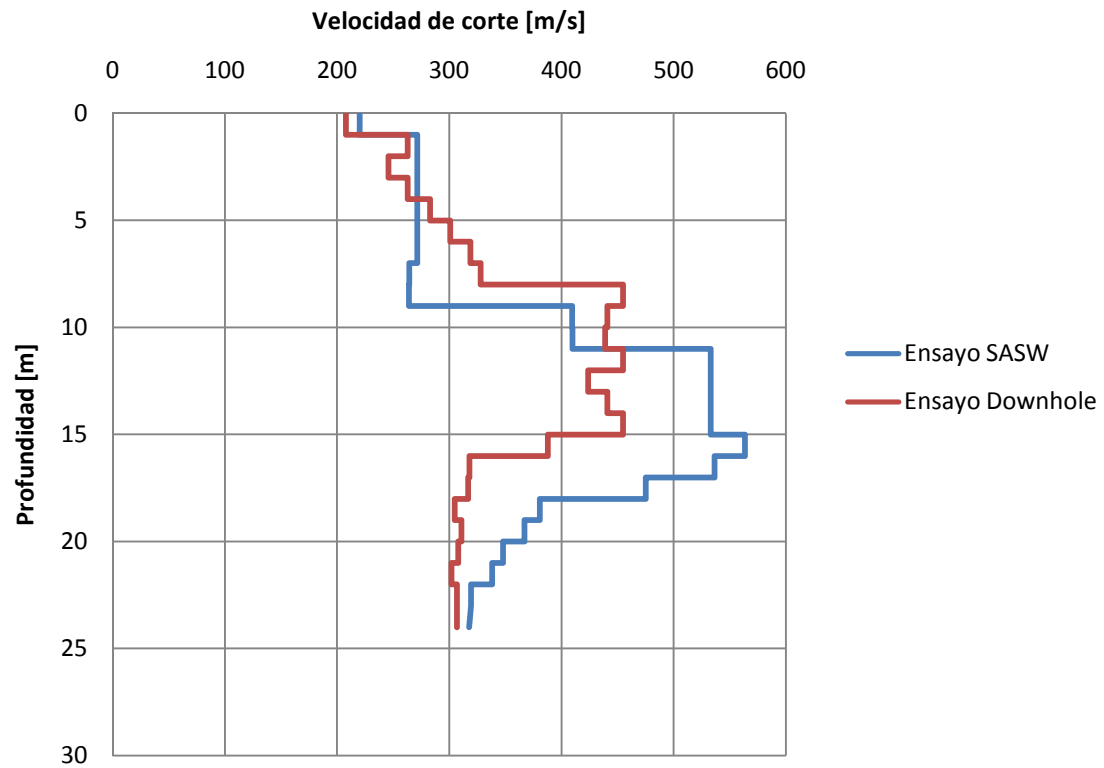


Figura 4.8: Comparación perfiles de velocidad de ondas de corte obtenidos por downhole y SASW en el sitio de Maipú

4.3 Conclusiones de la implementación de SASW

Se observó una buena correlación entre el perfil de velocidad de ondas de corte obtenido por el ensayo de SASW y el Downhole.

La tabla 1 presenta la velocidad de ondas de corte promedio hasta 30 m para la medición del sitio de Lolloe y hasta 23 m para la medición del sitio de Maipú, junto con el error asociado a cada una¹⁴.

Tabla 1: Resultados y margen de error de la implementación del método SASW

Sitio	V _s [m/s]		Error [%]
	SASW	Downhole	
Lolloe	290	243	16,2
Maipú	345	327	5,2

El mayor error asociado a los perfiles de velocidad de ondas de corte en el sitio de Lolloe se debe básicamente a que el estrato de alta rigidez detectado en torno a los 20 m tiene 4 m más de espesor según el ensayo SASW, sin embargo la forma del perfil de velocidad de ondas de corte del suelo es la misma.

Según los resultados de las dos mediciones de implementación de SASW, se puede concluir que se logró cumplir el objetivo de obtener el perfil de velocidades de ondas de corte hasta al menos 30 m con un buen nivel de precisión.

¹⁴ El método de cálculo de la velocidad de ondas promedio es el mismo expuesto en el capítulo 5.10.

5. MEDICIÓN CON SASW EN EL SUBSUELO DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO SÍSMICO

Este capítulo presenta los perfiles de velocidad de ondas de corte estimados con el método SASW en nueve sitios donde hay estaciones de monitoreo sísmico que registraron el terremoto del 27 de Febrero de 2010. Las estaciones seleccionadas para este trabajo se presentan en la tabla 2, con su lugar de ubicación y con sus coordenadas geográficas. La figura 5.1 muestra un mapa de la zona centro-sur de Chile con la ubicación de las estaciones de monitoreo sísmico seleccionadas.

Tabla 2: Ubicación de las estaciones de monitoreo sísmico

Estación	Ubicación	Región	Coordenadas geográficas	
			Latitud [°]	Longitud [°]
Llolleo	Colegio Santa Teresita	V	-33,62	-70,61
Peñalolén	Hospital Luis Tisné	R.M.	-33,50	-70,58
Puente Alto	Hospital Sótero del Río	R.M.	-33,58	-70,58
Mirador	Mall Florida Center	R.M.	-33,44	-70,65
Antumapu	Facultad Antumapu U. de Chile	R.M.	-33,57	-70,63
Casablanca	Teatro Municipal	V	-33,32	-71,41
Curicó	Hospital	VII	-34,98	-71,24
Hualañé	Hospital	VII	-34,75	-71,80
Constitución	Hospital	VII	-35,34	-72,41

El anexo I contiene el detalle de la obtención de cada curva de dispersión de los sitios medidos, complementado con el resultado del análisis espectral de los registros considerados, el que incluyen la curva del ángulo de desfase empaquetado y desempaquetado y los espectros de potencia de cada geófono.

El anexo II presenta algunas fotografías de las mediciones tomadas en las estaciones de monitoreo sísmico.



Figura 5.1: Mapa de la zona centro-sur de Chile con la ubicación de las estaciones de monitoreo sísmico seleccionadas en este trabajo.

5.1 Estación de monitoreo sísmico de Llolleo

Esta estación está ubicada en el colegio Santa Teresita de Llolleo, en la ciudad de Llolleo, V Región, a tres cuadras al sur-oriente de la plaza de armas de la ciudad. En la foto satelital de la figura 5.2 se puede ver un afloramiento rocoso perteneciente al cordón de la Cordillera de la Costa, lo que se vio reflejado en el terreno en una pendiente ascendente una cuadra hacia el sur del colegio, lo que podría indicar la existencia de roca a baja profundidad. La medición fue realizada en un área de suelo expuesto entre la vereda y la calzada de una de las calles periféricas del colegio, a menos de 20 m de la estación.

La figura 5.3 muestra la curva de dispersión experimental del sitio en tanto la figura 5.4 el perfil de velocidades de ondas de corte (la línea punteada indica el inicio inferido de la roca).

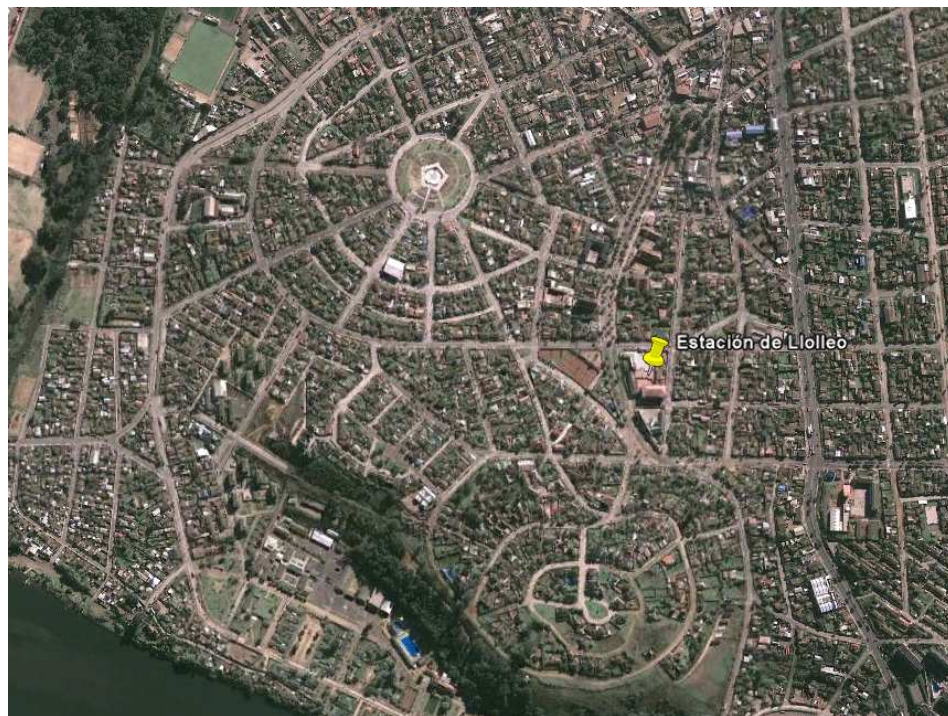


Figura 5.2: Ubicación de la Estación de Llolleo.

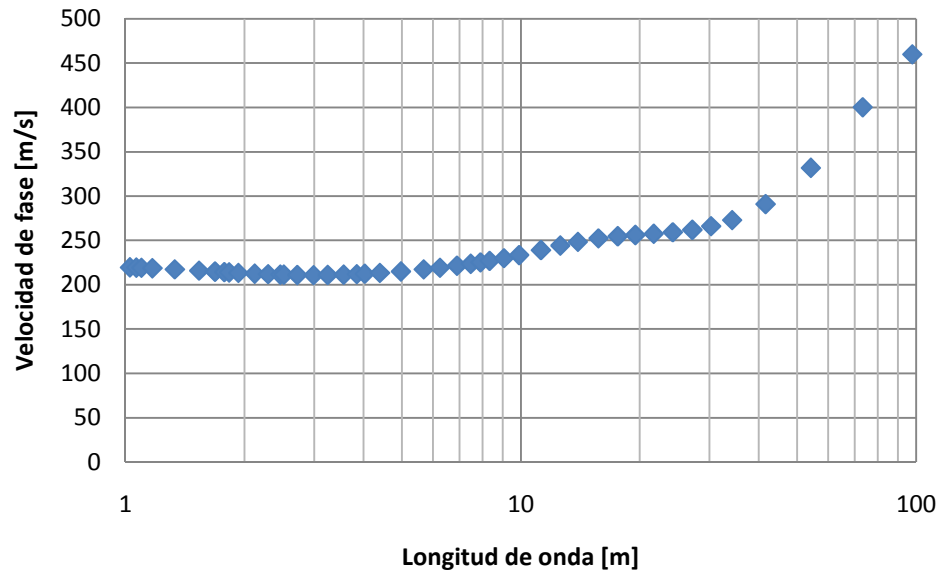


Figura 5.3: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Lolloe.

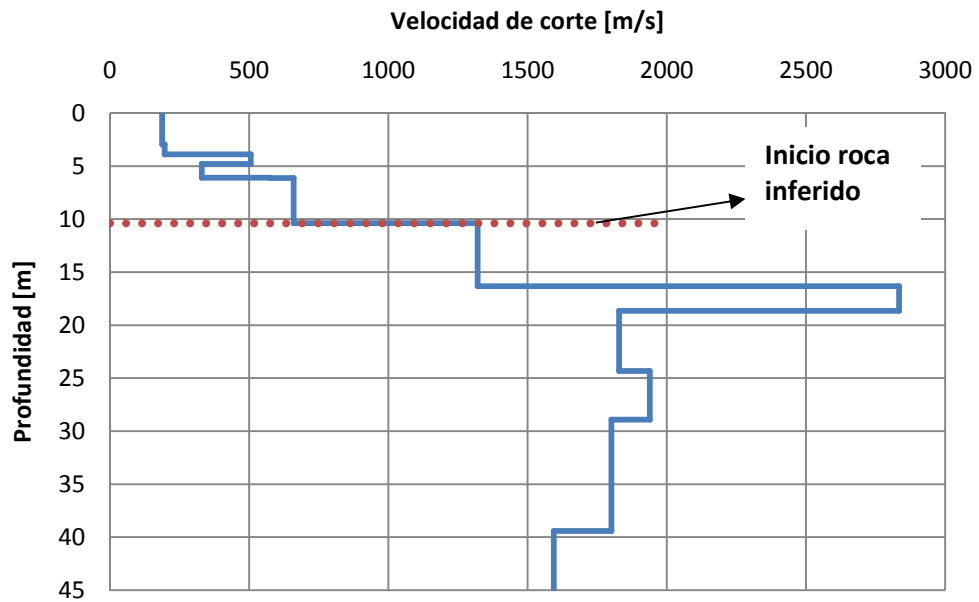


Figura 5.4: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Lolloe.

Como fue inferido anteriormente de la geología local, se encuentra roca a baja profundidad en este sitio, en torno a los 10 m. Además, este tipo de estructuras geológicas produce suelos residuales, por lo que es normal detectar un perfil de velocidad de ondas de corte creciente en profundidad, que aumenta su valor por sobre 600 m/s en unos pocos metros de profundidad, ya que corresponde a roca descompuesta y/o meteorizada. Desde los 16 m se puede observar roca más sana con una velocidad de corte promedio en torno a 1.700 m/s.

Lo anterior también se puede ver en la curva de dispersión, donde a partir de los 30 m de longitud de onda, hay un quiebre abrupto en la pendiente de la curva, lo que indica un cambio en la velocidad.¹⁵

¹⁵ En el gráfico de la curva de dispersión, la longitud de onda corresponde aproximadamente al doble de la profundidad donde se encuentra el centro de masa de la onda Rayleigh, por lo que se puede hacer la siguiente aproximación (donde H corresponde a la profundidad medida y λ la longitud de onda). F. Ochoa ,2007.

$$H = \frac{\lambda}{2}$$

5.2 Estación de monitoreo sísmico de Peñalolén

Esta estación está ubicada en el hospital Luis Tisné, de la Comuna de Peñalolén, en la ciudad de Santiago, cercano a la intersección de las avenidas Las Torres y Américo Vespucio. Este lugar está cerca de la precordillera, por lo que sus suelos están conformados por material granular grueso correspondiente a la grava de Santiago y por coluvios generalmente compuesto por suelos finos. La figura 5.5 muestra la ubicación de la estación.

La medición fue realizada en un sitio eriazo al costado del hospital, a menos de 25 m de su entrada. El lugar tiene un grado de inclinación no mayor a un 8%, sin embargo la medición de SASW fue ejecutada en el sentido perpendicular a la pendiente, por lo que ésta no debería generar problemas en la medición. La medición se realizó prácticamente sin ruido. Las figuras 5.6 y 5.7 muestran la curva de dispersión experimental y el perfil de velocidades de ondas de corte respectivamente.

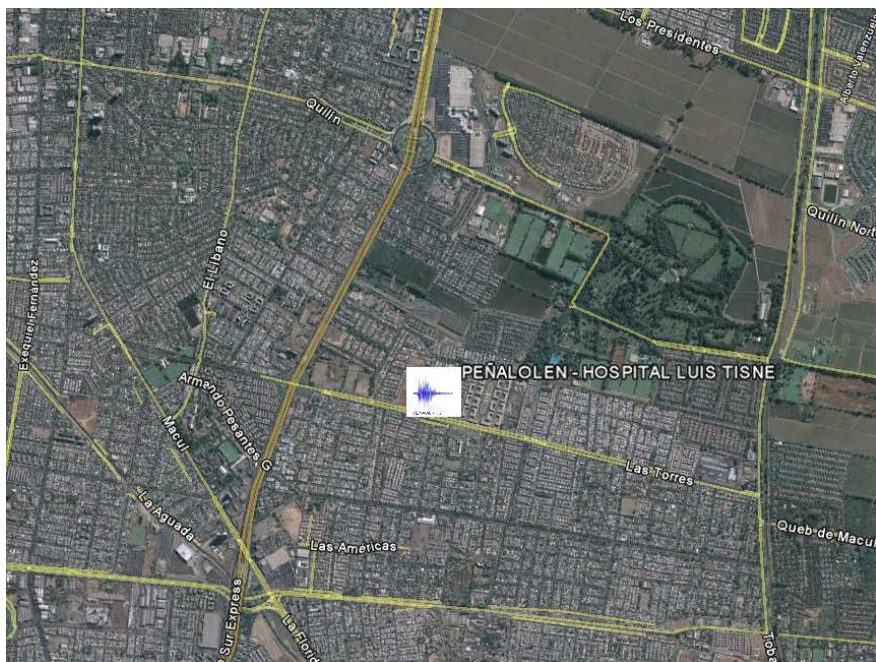


Figura 5.5: Ubicación de la Estación de Peñalolén

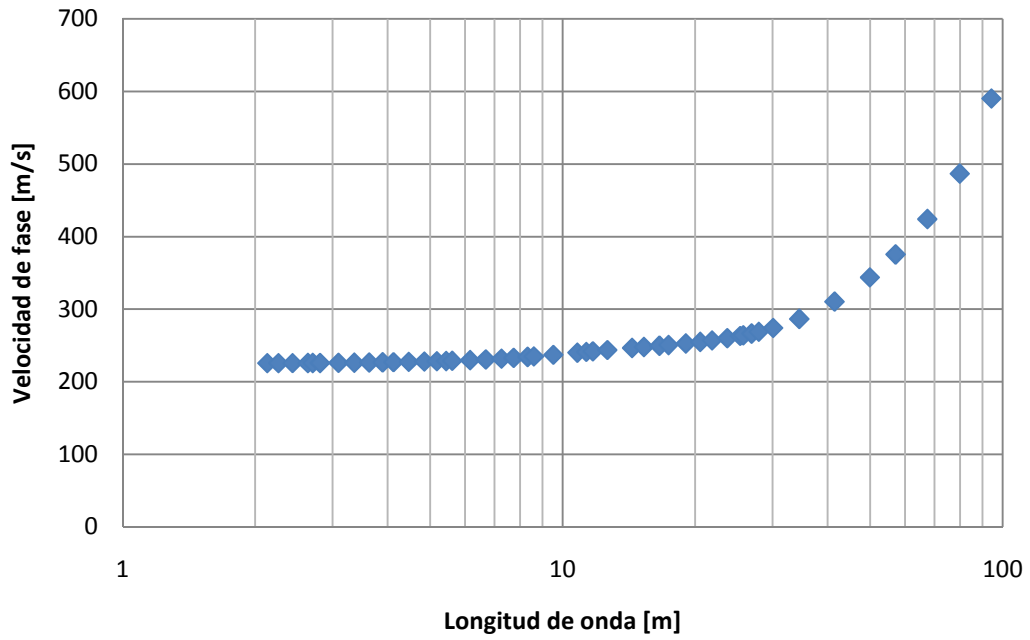


Figura 5.6: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Peñalolén.

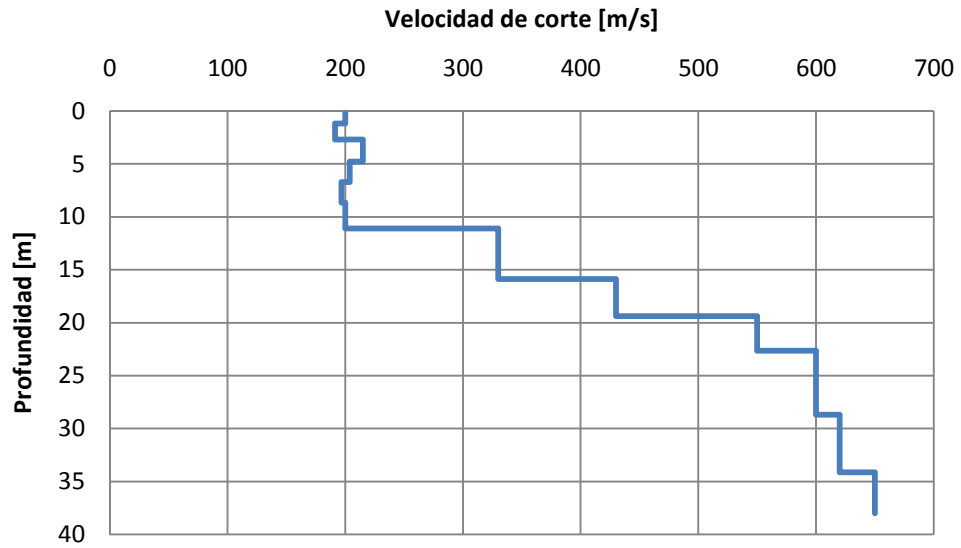


Figura 5.7: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Peñalolén.

Del perfil de velocidad de ondas de corte del subsuelo de esta estación se puede deducir la existencia de un estrato blando en los primeros 12 m, probablemente conformado por suelos finos por la descripción geológica del lugar. Bajo este estrato se encuentra un horizonte mucho más competente y es muy probable que sean depósitos de la grava de Santiago por la distribución de las velocidades de ondas de corte en el perfil¹⁶.

En la curva de dispersión se puede observar que a partir de los 30 m de longitud de onda hay un punto de inflexión en la curva donde la pendiente cambia drásticamente, lo que indica el inicio del estrato rígido, presuntamente de grava. Hasta los 30 m de longitud de onda la curva es levemente creciente, con valores de velocidad de fase en torno a 220 m/s, correlacionándose con el estrato blando detectado hasta los 12 m.

¹⁶ Karem de la Oz, 2007

5.3 Estación de monitoreo sísmico de Puente Alto

Esta estación está ubicada en el Hospital Sótero del Río, de la Comuna de Puente Alto, en la ciudad de Santiago, cercano a la intersección de las avenidas Vicuña Mackenna con Gabriela Mistral. Los suelos de ese lugar están formados por la Grava de Santiago. Estudios geotécnicos indican que entre los 10 m y 15 m de profundidad aproximadamente existe un estrato correspondiente a un suelo aluvional muy cementado, de mucha rigidez. La figura 5.8 muestra la ubicación de la estación.

La medición de esta estación fue llevada a cabo a cerca de 300 m de distancia hacia el oriente de la entrada del hospital, sin embargo este tipo de suelo tiene poca variabilidad en una distancia como ésta, por lo que esto no debería implicar problemas en los resultados. Además fue ejecutada en condiciones de ausencia de ruido y en un sitio plano. Las figuras 5.9 y 5.10 muestran la curva de dispersión experimental y el perfil de velocidades de ondas de corte respectivamente.

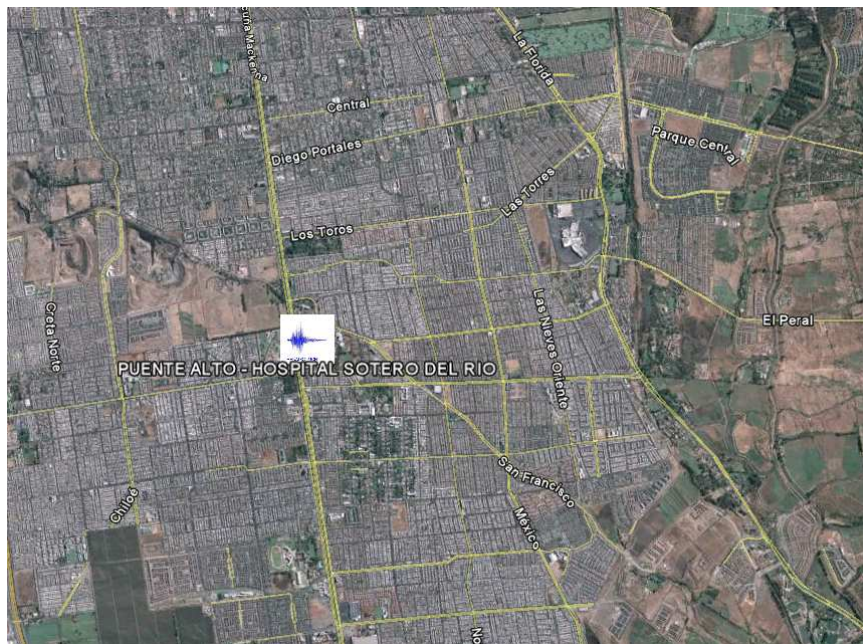


Figura 5.8: Ubicación de la Estación de Puente Alto.

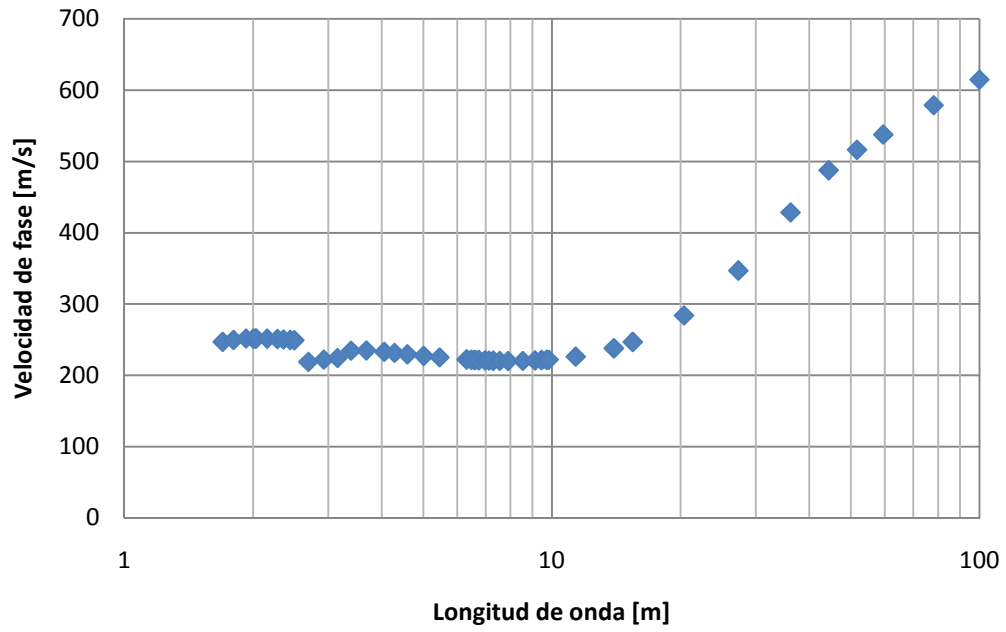


Figura 5.9: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Puente Alto.

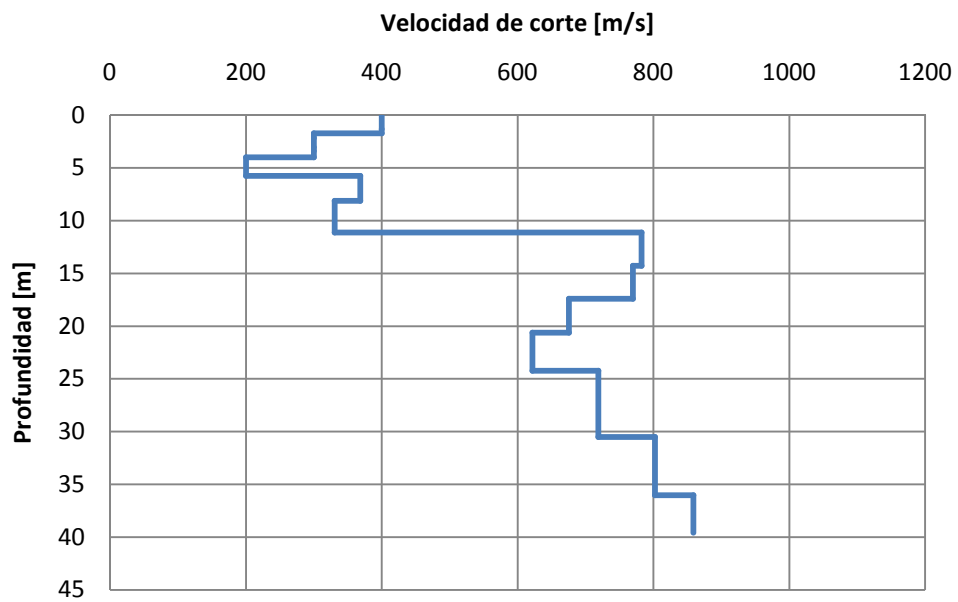


Figura 5.10: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Puente Alto.

Del perfil de velocidad de ondas de corte se puede inferir la existencia de un estrato de bajas propiedades geotécnicas hasta los 5 m, profundidad a la cual comienza a subir la velocidad de ondas de corte. Entre los 11 m a los 20 m de profundidad aparece un estrato claramente diferenciado del resto que debe corresponder al suelo aluvional muy cementado. Desde los 20 m de profundidad el perfil de velocidades sigue la distribución común de grava rigidizándose en profundidad.

De la curva de dispersión del suelo se puede ver claramente en torno a los 45 m de longitud de onda un quiebre en la pendiente de la curva, volviéndose menos inclinada, lo que corresponde al final del estrato cementado y al inicio de la grava.

5.4 Estación de monitoreo sísmico de Mirador

Esta estación está ubicada en la estación homónima de la línea 5 del metro de Santiago, en la Comuna de La Florida. Los suelos de este lugar están formados por grava de Santiago. La figura 5.11 muestra la ubicación de la estación.

La medición de esta estación fue ejecutada a 300 m de distancia de la estación del metro sobre un relleno compactado de suelo fino, bajo condiciones prácticamente nulas de ruido. Las figuras 5.12 y 5.13 muestran la curva de dispersión experimental y el perfil de velocidades de ondas de corte respectivamente.

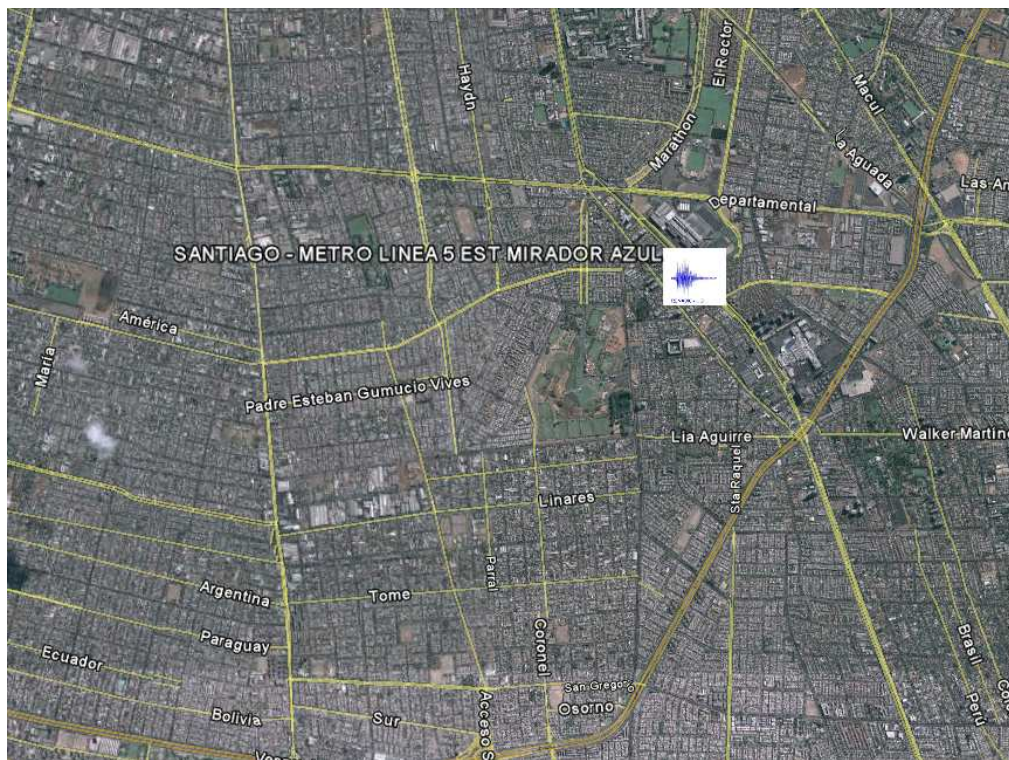


Figura 5.11: Ubicación de la Estación de Mirador.

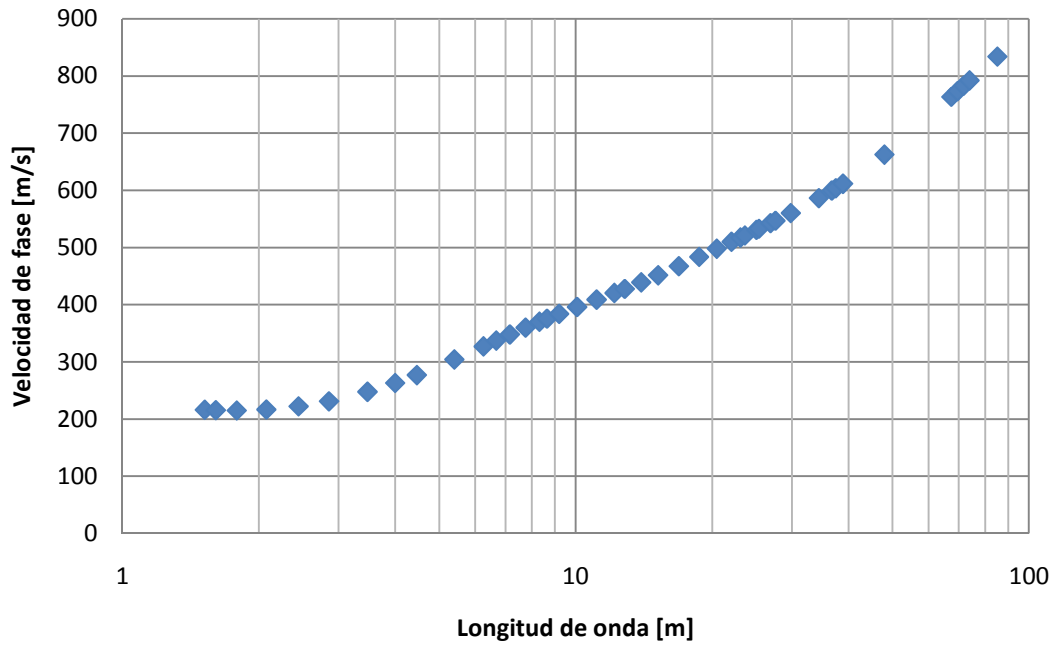


Figura 5.12: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Mirador.

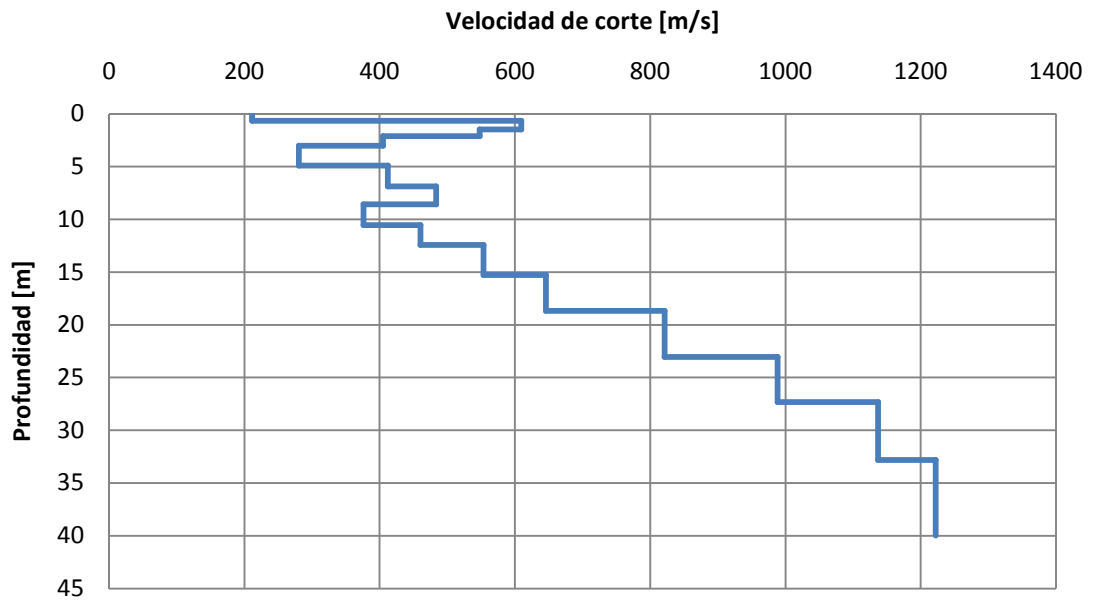


Figura 5.13: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Mirador.

En el primer metro de profundidad del perfil de velocidad de ondas de corte se puede ver un material de muy mala competencia mecánica, que corresponde al relleno de suelo fino detectado en terreno. Bajo este estrato subyace un horizonte con una velocidad promedio en torno a 400 m/s hasta los 10 m de profundidad, que podría corresponder a la segunda depositación de la grava de Santiago, de acuerdo a lo que plantea la literatura¹⁷. A partir de los 10 m hay un aumento sustancial en la rigidez del suelo, con la curva común de distribución de velocidad en profundidad para la grava de Santiago.

La curva de dispersión de este suelo es siempre creciente, con una gran pendiente. Se puede observar que a partir de los 20 m de valor de longitud de onda hay un quiebre de la pendiente de la curva, siendo más pronunciada, correspondiente al estrato más rígido detectado a los 10 m.

Curvas de estas características son bastante sencillas y rápidas de invertir al ser siempre crecientes, ya que las iteraciones realizadas en el método inverso son muy optimizadas.

¹⁷ Karem de la Oz, 2007

5.5 Estación de monitoreo sísmico de Antumapu

Esta estación está ubicada en la Facultad de Agronomía de la Universidad de Chile, en el paradero 33 de Santa Rosa, en la Comuna de la Pintana, en la ciudad de Santiago. Los suelos de esta zona están conformados por grava de Santiago. La figura 5.14 presenta la ubicación de la estación de monitoreo sísmico.

La medición de SASW fue realizada en un camino de tierra interior del campus del centro de estudios, a menos de 100 m de distancia de la estación de monitoreo sísmico, en un sitio plano, con un nivel prácticamente nulo de ruido. Las figuras 5.15 y 5.16 muestran la curva de dispersión experimental y el perfil de velocidades de ondas de corte respectivamente.

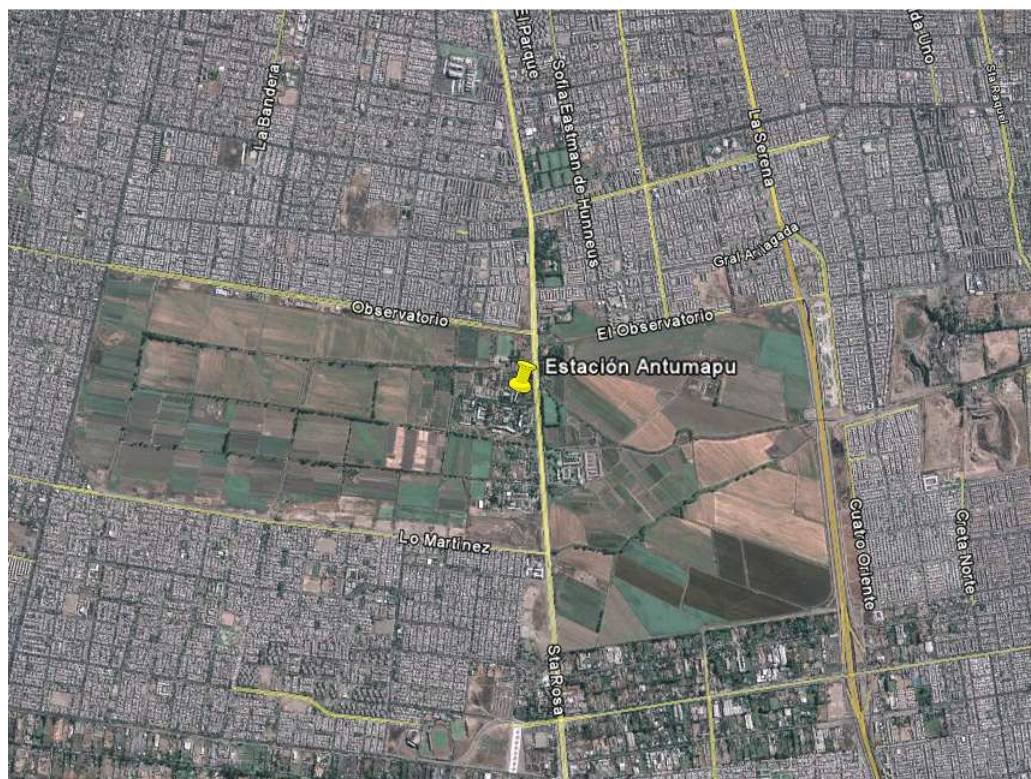


Figura 5.14: Ubicación de la Estación de Antumapu.

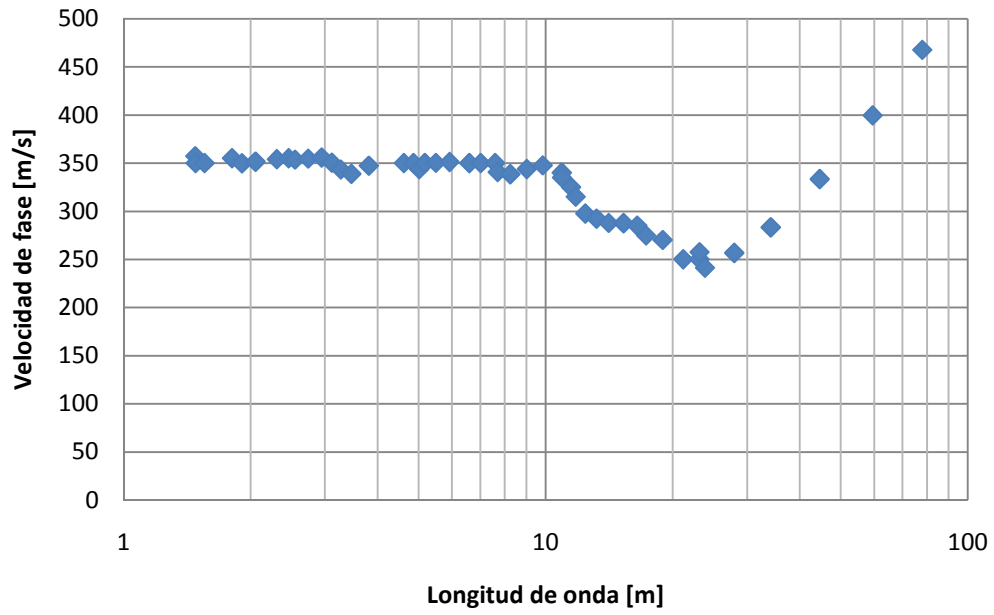


Figura 5.15: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Antumapu.

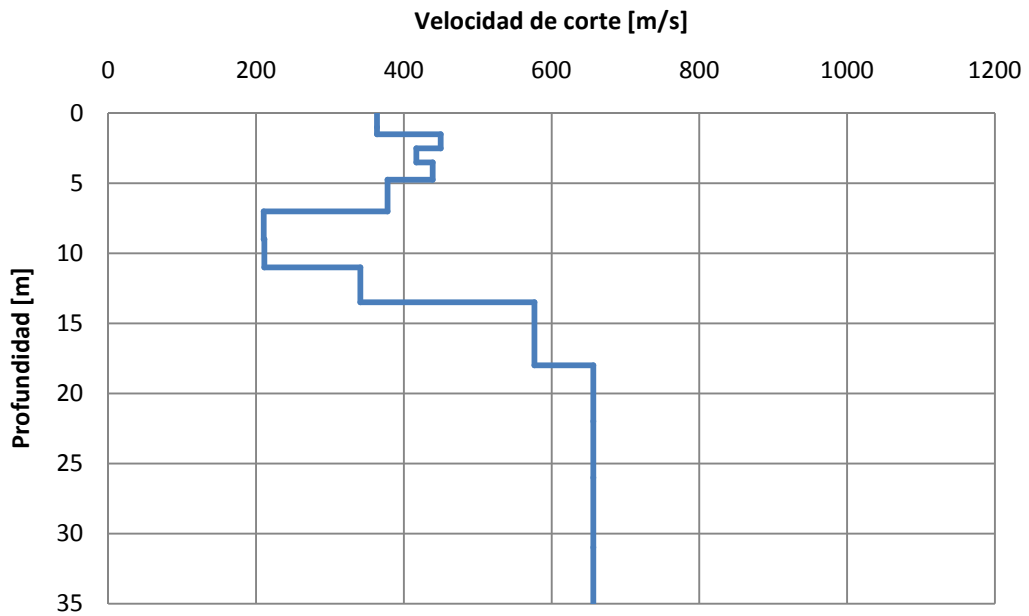


Figura 5.16: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Antumapu.

El perfil de velocidad de ondas de corte muestra la existencia de un estrato blando entre los 7 m y los 11 m de profundidad entre dos estratos rígidos. Entre el nivel de superficie hasta los 7 m de profundidad la velocidad de ondas de corte tiene valores en torno a los 400 m/s y desde los 14 m de profundidad, las velocidades de ondas de corte superan los 600 m/s, lo que indica la existencia de grava en esos horizontes, que está dentro de lo esperado para el suelo de este lugar.

La curva de dispersión tiene un valor constante de 350 m/s de velocidad de fase hasta los 10 m de longitud de onda, punto en el cual tiene un descenso, lo que corresponde al estrato blando detectado en el perfil. En torno a los 22 m de longitud de onda comienza a ascender, con una pendiente pronunciada, lo que se correlaciona con el estrato de grava que comienza a los 11 m.

Curvas de dispersión con una pendiente fuertemente decreciente como las de este sitio son complicadas de invertir, pues cuando hay un estrato rígido sobre otro bastante más blando, hay un rango de longitud de ondas donde no se logra leer bien, produciéndose un vacío en la curva de dispersión global, que requiere de un mayor trabajo y de experiencia invirtiendo curvas para determinar su trayectoria en el plano de velocidad de fase en función de la longitud de onda. Dentro del marco teórico de SASW, cuando se dan estos casos, la matriz de rigidez del suelo toma valores complejos, lo que explica la mayor dificultad de la aplicación del método inverso¹⁸.

¹⁸ K. Stokoe, "Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method"

5.6 Estación de monitoreo sísmico de Casablanca

La Estación de Casablanca está ubicada en el Teatro Municipal de la ciudad, en el kilómetro 66 de la Ruta 68, en la V Región. El Teatro Municipal está ubicado sobre un terraplén formado por arenas medias a un costado del estero Casablanca. Por el tipo de relleno que había en el terraplén, se puede deducir que los suelos de esta estación están conformados por estratos de arenas medias, de no mucha rigidez, lo que es corroborado por la ubicación de la ciudad, aledaña a un estero, los cuales presentan energías bajas de depositación. La figura 5.17 muestra la ubicación de la estación.

La medición de SASW fue realizada sobre el terraplén descrito en el párrafo anterior a menos de 20 m de la estación de monitoreo sísmico. El lugar es plano y presentó niveles casi nulos de ruido. Las figuras 5.18 y 5.19 muestran la curva de dispersión experimental y el perfil de velocidades de ondas de corte respectivamente.

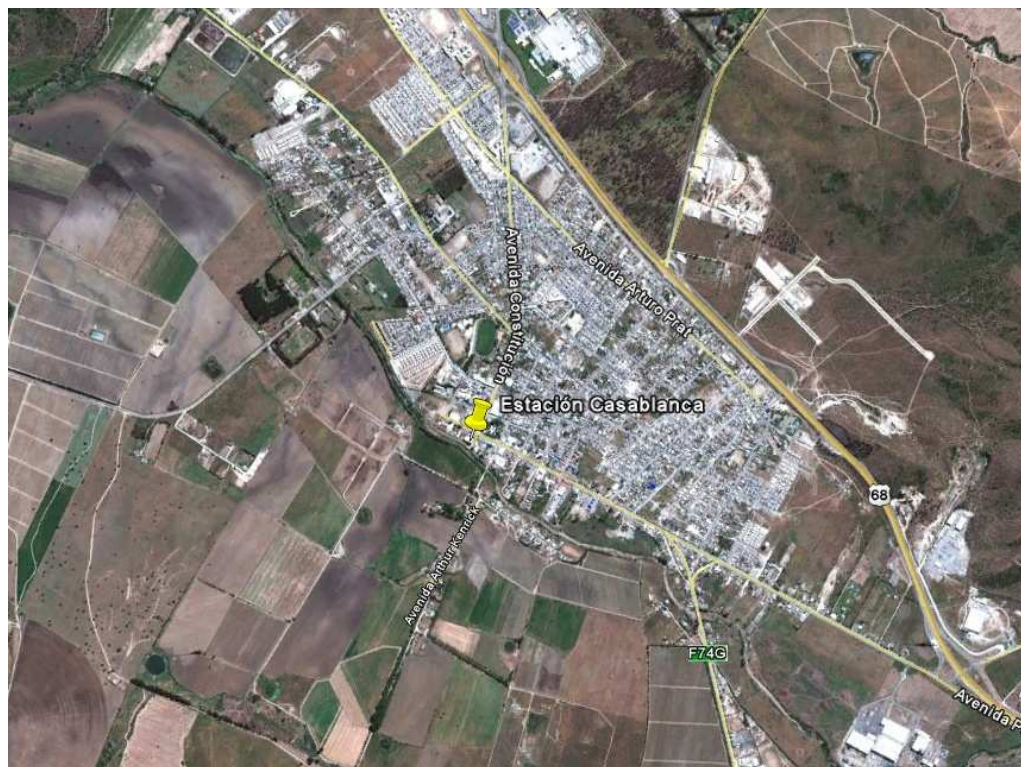


Figura 5.17: Ubicación de la Estación de Casablanca.

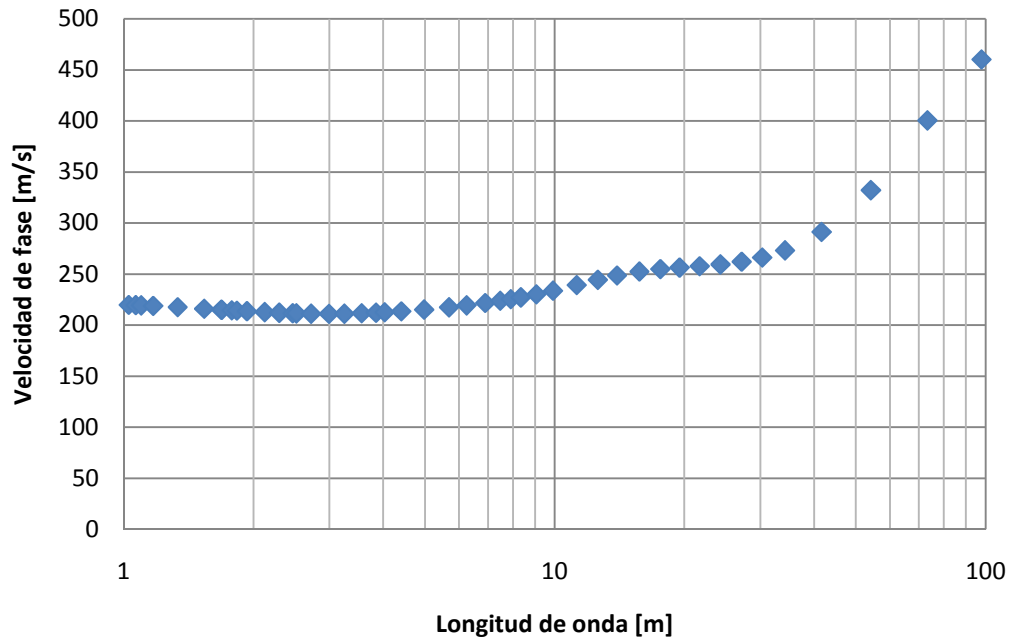


Figura 5.18: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Casablanca.

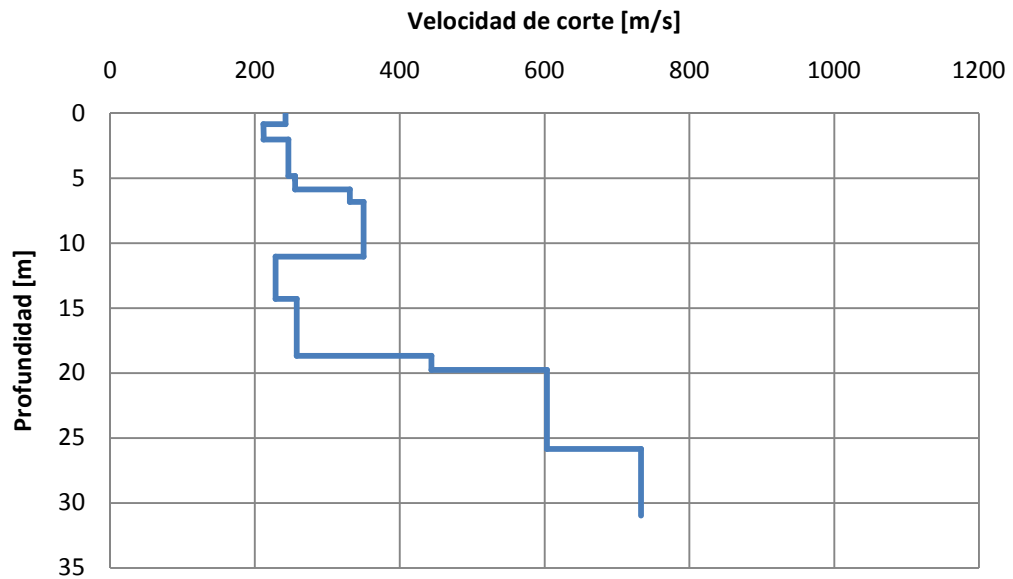


Figura 5.19: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Casablanca.

Del perfil de velocidad de ondas de corte se puede observar que el sitio medido presenta una baja velocidad de ondas de corte hasta los 20 m de profundidad, en donde hay un incremento sustancial en la rigidez del suelo, con valores de la velocidad de ondas de corte sobre 600 m/s, que podría corresponder a un horizonte de grava o de suelo cementado.

Dentro del primer estrato detectado, hay un incremento en la velocidad de ondas de corte entre los 6 m a los 12 m de profundidad, que aumenta su valor de 235 m/s a 345 m/s. Bajo este estrato la velocidad de ondas de corte vuelve a tener valores en torno a los 235 m/s.

Analizando la curva de dispersión se puede inferir que entre los 10 m y los 20 m de longitud de onda hay un incremento en el valor de la velocidad de fase, que corresponde al estrato levemente más rígido detectado entre los 6 m a 12 m de profundidad. Además, desde los 42 m de longitud de onda, la curva de dispersión aumenta drásticamente su pendiente, indicando el inicio del estrato rígido ubicado desde los 20 m de profundidad.

5.7 Estación de monitoreo sísmico de Curicó

Esta estación se encuentra en el Hospital de Curicó, ubicado en el centro de la ciudad, en la VII Región. Los suelos de este sitio están conformados por depósitos fluviales de ríos que pasan por la depresión intermedia, los que se caracterizan por presentar un flujo de alta energía, por lo que se espera que el subsuelo esté constituido por material granular grueso (gravas). La figura 5.20 muestra una planta de la ubicación de la medición y de la estación.

La medición de esta estación presenta un inconveniente; debido a la ausencia de sitios aptos para medir cerca del Hospital de Curicó, se encontró un sitio eriazo que se encuentra a 1.6 Km del hospital. Considerando que Curicó se encuentra en la terraza fluvial generada por la confluencia de los Ríos Mataquito y Lontué, ubicada a 12 Km de distancia, no debería de haber mucha diferencia entre el suelo de la estación de monitoreo sísmico y el sitio medido.

El lugar de la medición de SASW corresponde a un sitio eriazo ubicado a menos de 100 m de la Ruta 5-Sur. El terreno presenta una capa superficial de relleno de escombros, posiblemente de la construcción de la Ruta 5-S, que se espera, de observaciones realizadas en terreno, que no tenga un espesor mayor a 3 m. Debido a la cercanía con la carretera, el flujo de vehículos pesados generó un gran ruido en las mediciones, por lo que hubo que esperar momentos de bajo tráfico para poder ejecutar los golpes.

Las figuras 5.21 y 5.22 muestran la curva de dispersión experimental y el perfil de velocidades de ondas de corte respectivamente.

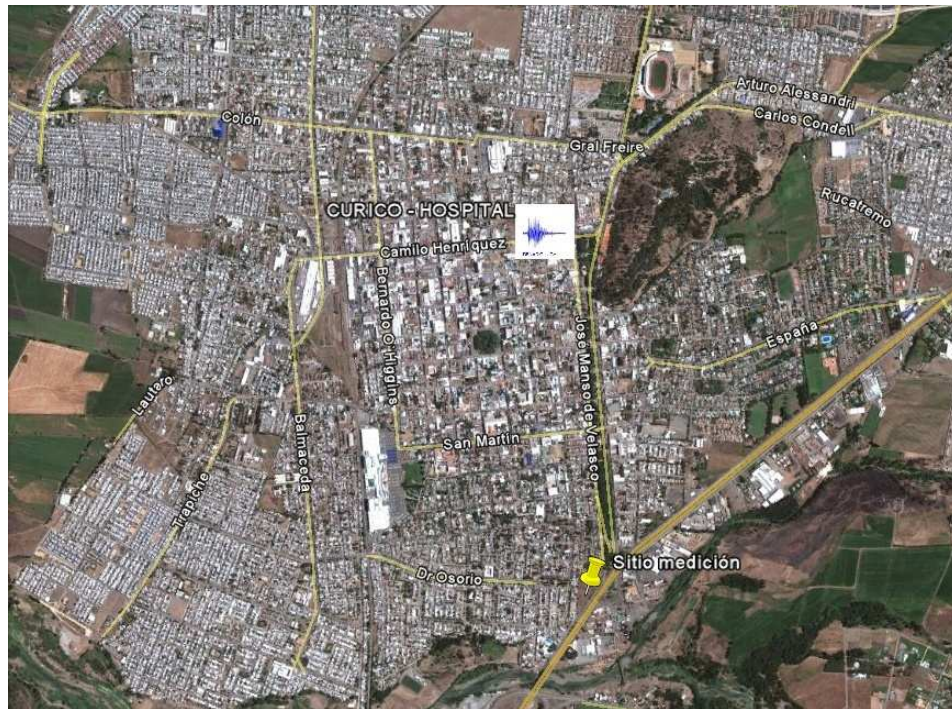


Figura 5.20: Ubicación de la Estación de Curicó.

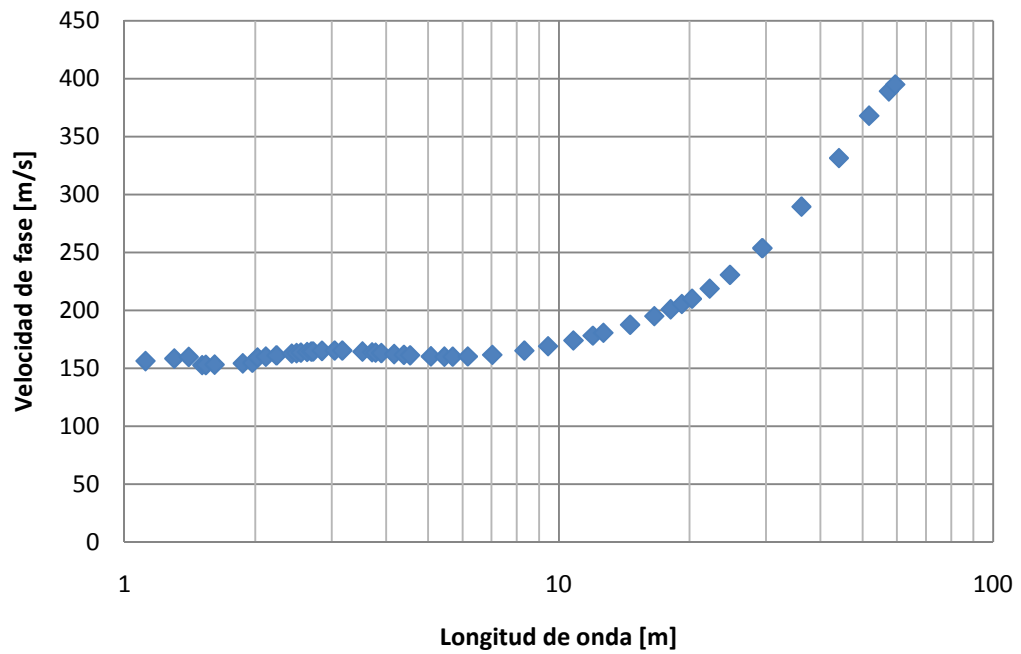


Figura 5.21: Curva de dispersión del experimental subsuelo de la Estación de Curicó.

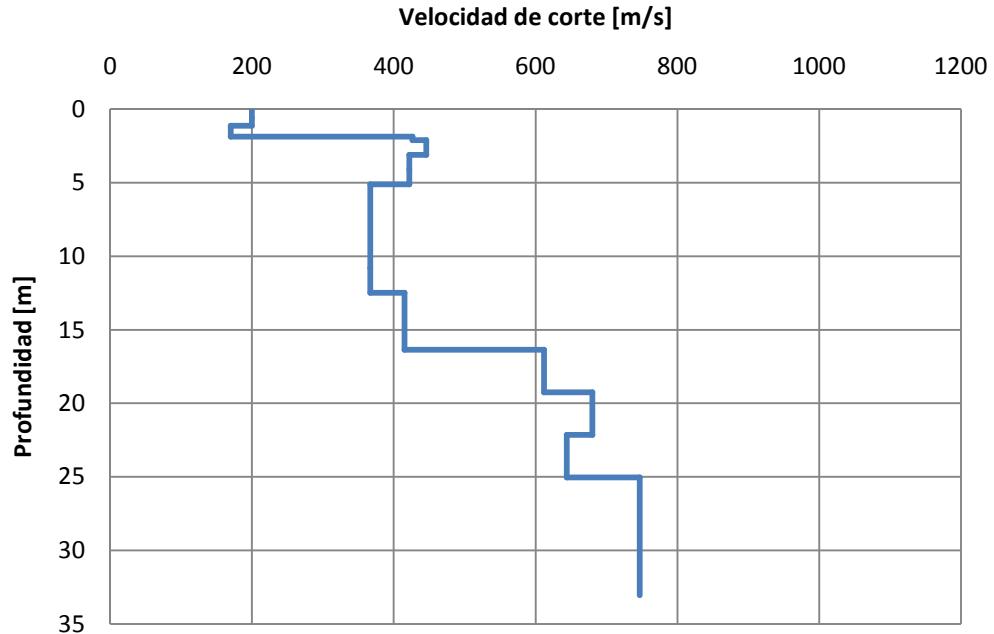


Figura 5.22: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Curicó.

Como era de esperar, se encontró un estrato blando en los primeros 2 m de profundidad, correspondiente al relleno de escombros descrito anteriormente. Entre los 2 m a 17 m de profundidad se encuentra un estrato rígido, con un valor de velocidad de ondas de corte en torno a los 400 m/s. Desde los 17 m se encuentra un estrato más rígido con velocidades de ondas de corte superiores a 600 m/s y crecientes en profundidad. Estos dos estratos estarían conformados por grava.

De la curva de dispersión se puede observar que a los 7 m de longitud de onda cambia su pendiente, comenzando a ser ascendente, lo que nota una leve diferenciación de rigidez entre estratos. A los 30 m de longitud de onda hay un quiebre pronunciado en la pendiente de la curva de dispersión, indicando el inicio del estrato rígido detectado a los 17 m.

5.8 Estación de monitoreo sísmico de Hualañé

La Estación de Hualañé está ubicada en el hospital del pueblo, en la VII Región. Hualañé está emplazado entre un cerro del cordón de la Cordillera de la Costa y la rivera norte del Río Mataquito, por lo que se espera un subsuelo conformado por una terraza fluvial de suelos granulares gruesos intercalados con estratos formados por coluvios provenientes de la ladera del cerro. La figura 5.23 muestra la ubicación de la estación.

La medición con SASW del subsuelo de la estación de monitoreo sísmico fue realizada a 250 m al oriente del hospital, en una calle de tierra formada por un relleno granular compactado. La medición fue realizada en la misma dirección que una pendiente que presentaba el lugar del orden de un 5% y bajo condiciones prácticamente nulas de ruido. Las figuras 5.24 y 5.25 muestran la curva de dispersión experimental y el perfil de velocidades de ondas de corte respectivamente.



Figura 5.23: Ubicación de la Estación de Hualañé.

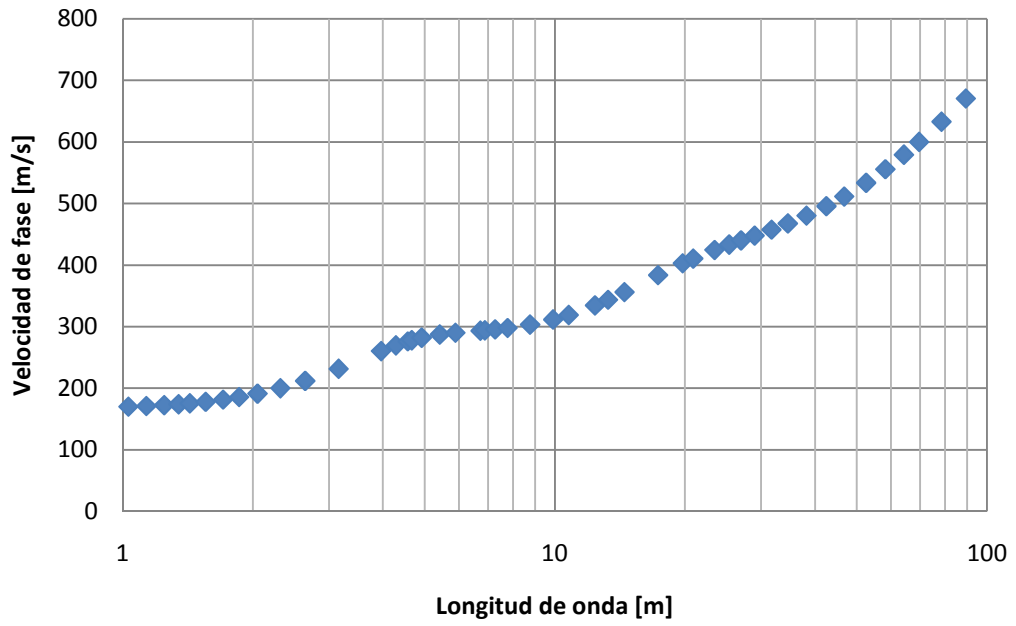


Figura 5.24: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Hualañé.

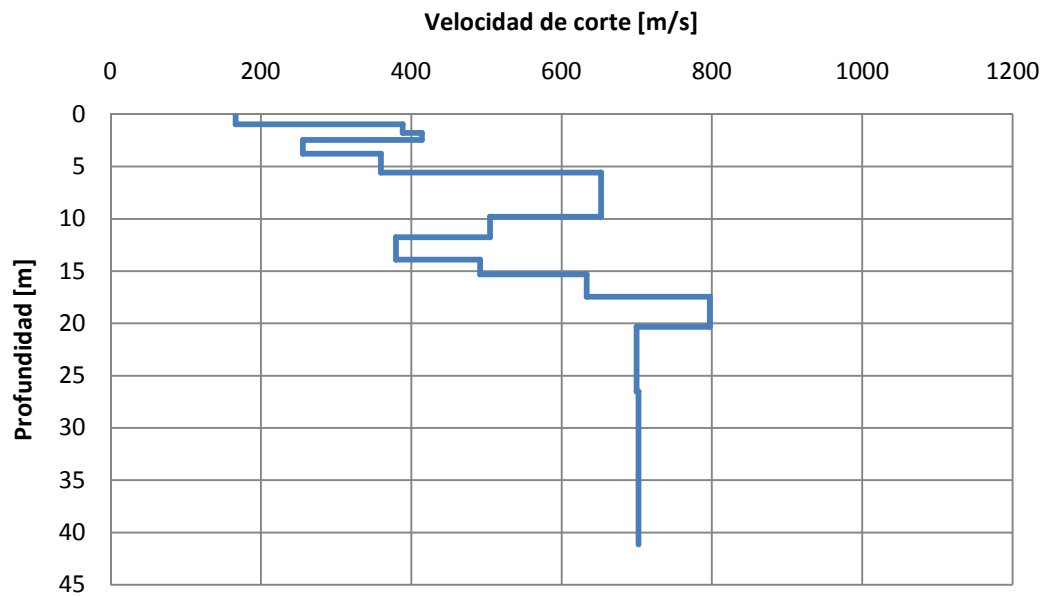


Figura 5.25: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Hualañé.

Del perfil de velocidad de ondas de corte se observa la existencia de estratos rígidos intercalados con otros más blandos, como es de esperar de acuerdo a lo mencionado en la descripción del sitio.

Se puede observar la existencia de dos estratos con una rigidez menor a la del resto del perfil. El primero se encuentra entre 2.5 m a 5.5 m de profundidad, con una velocidad de ondas de corte de 300 m/s. El segundo se encuentra entre 12 m y 14.5 m de profundidad, con una velocidad de ondas de corte de 400 m/s. El espesor de estos estratos corrobora la hipótesis de que su formación podría provenir de coluvios de la ladera del cerro aledaño.

La curva de dispersión de este sitio fue una de las más sencillas y rápidas de invertir, al ser siempre creciente y con una tendencia a una línea recta, (usando escala logarítmica en el eje de la longitud de onda). Se pueden distinguir tres puntos donde la pendiente presenta un cambio importante; el primero en torno a los 6 m de longitud de onda, que representa el primer estrato blando, el segundo en torno a los 23 m de longitud de onda, que está correlacionado con el segundo estrato con una diferencia de rigidez menor y el tercero a partir de los 30 m de longitud de onda, donde se puede observar un punto de inflexión donde la pendiente se incrementa bastante, correspondiendo al estrato más rígido que comienza a visualizarse a los 15 m de profundidad.

5.9 Estación de monitoreo sísmico de Constitución

La estación de monitoreo sísmico de Constitución se encuentra en el hospital de esta ciudad, en la VII Región. Constitución está emplazada en la desembocadura del Río Maule, por lo que sus suelos están constituidos por arenas en estado suelto depositados por los flujos de agua de baja energía que presenta el Río Maule en este lugar, por este motivo se espera que estos suelos tengan una baja velocidad de ondas de corte. La figura 5.26 muestra la ubicación de la estación.

El sitio donde se realizó la medición de SASW corresponde a un sector con suelo natural expuesto, entre una calle y la línea ferroviaria por donde circula el “Buscarril”, donde se puede observar la existencia de arenas finas con presencia de finos. El lugar de la medición dista 150 m de la estación de monitoreo sísmico y presenta un ruido considerable al estar al lado de una calle de concurrido tráfico, por lo que hubo que esperar momentos de bajo flujo vehicular para ejecutar las mediciones.

Las figuras 5.27 y 5.28 muestran la curva de dispersión experimental y el perfil de velocidades de ondas de corte respectivamente. Hay que señalar que en esta medición se trabajó en frecuencias más bajas que 4.5 Hz, correspondiente a la frecuencia natural de los geófonos empleados, lo que implica que en este perfil podría haber un margen de error mayor.



Figura 5.26: Ubicación de la Estación de Constitución.

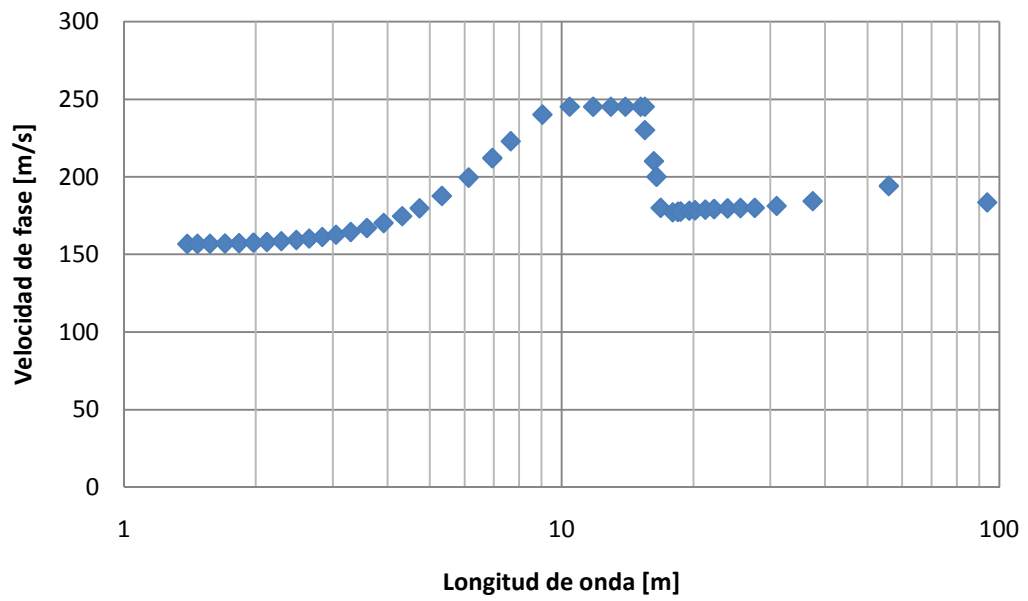


Figura 5.27: Curva de dispersión experimental del subsuelo de la Estación de Constitución.

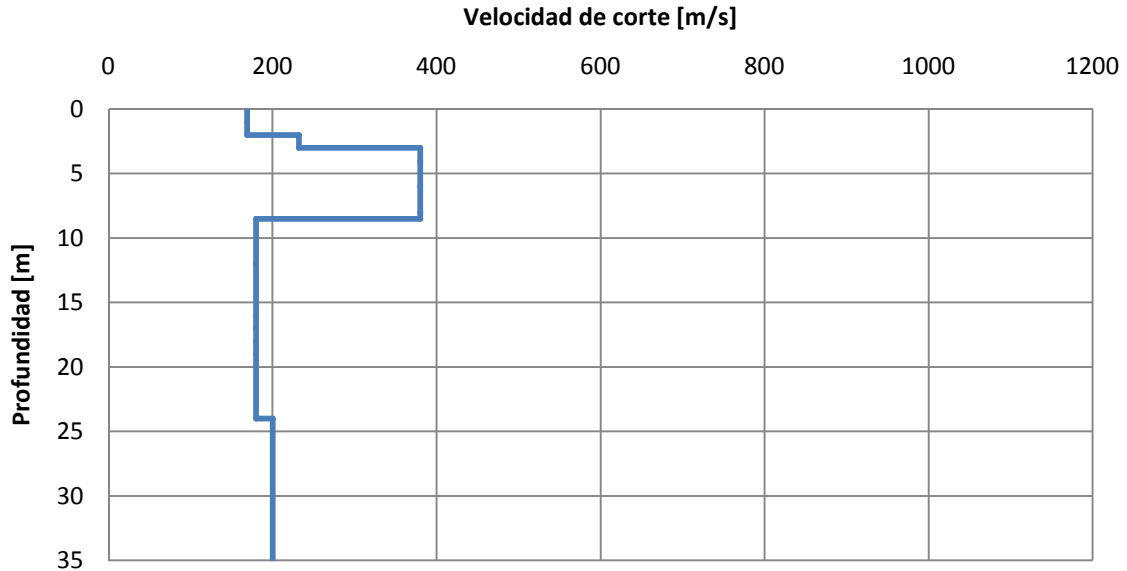


Figura 5.28: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de la Estación de Constitución.

Del perfil de velocidades de ondas de corte se puede observar que el suelo de este lugar tiene una baja velocidad de ondas de corte, incluso menor que 200 m/s entre los 8 m a 25 m de profundidad, salvo en un estrato un poco más rígido ubicado entre los 3 m a los 8 m de profundidad, donde la velocidad de ondas de corte alcanza valores de 370 m/s. Estos resultados están dentro del rango esperado para suelos arenosos sueltos.

Esta curva de dispersión fue bastante difícil de invertir, debido a la gran diferencia de rigidez que presenta el estrato ubicado entre los 3 m a 8 m de profundidad con el estrato subyacente. En la curva de dispersión se puede ver claramente el estrato más rígido, que comienza desde los 4 m de longitud de onda. El resto de la curva tiene una pendiente casi constante, que representa el perfil de velocidades del suelo que desde los 8 m de profundidad es relativamente constante.

5.10 Resumen de las mediciones

La tabla 3 muestra un resumen del V_{S30} obtenido para cada sitio, junto con la clasificación sísmica del suelo de cada estación de acuerdo a la norma Nch433 y el decreto 117 promulgado en Febrero de 2011.

Tabla 3: Resumen del resultado de las mediciones con SASW

Estación	V_{S30} [m/s]	V_{S15} [m/s]	Clasificación Norma Nch433	Clasificación Decreto 117
Llolleo	821	501	I	II
Peñalolén	337	220	III	III
Puente Alto	510	383	II	II
Mirador	583	429	II	II
Antumapu	441	321	II	III
Casablanca	399	282	III	III
Curicó	447	343	II	III
Hualañé	505	397	II	II
Constitución	214	241	III	III

La ecuación (5.1) utilizada para el cálculo de la velocidad de ondas de corte, V_S , corresponde a la propuesta por la norma americana de clasificación de suelos¹⁹ e incluida en el decreto 117 promulgado en Febrero de 2011.

$$V_S = \frac{\sum_i^n h_i}{\sum_i^n \left(\frac{h_i}{V_{S_i}}\right)} \quad (5.1)$$

Donde:

h_i : corresponde al espesor del estrato i

V_{S_i} : corresponde al valor de la velocidad de ondas de corte del estrato i

n : cantidad de estratos hasta los 15 m o 30 m

¹⁹ Norma ASCE 7-05 cap. 11, 2006

De acuerdo a la distribución de velocidad ondas de corte en profundidad, las estaciones de Mirador, Puente Alto, Antumapu, Curicó y Hualañé están ubicadas sobre suelos constituidos por gravas fluviales compactas, por lo que el subsuelo de estos lugares deberían clasificar como tipo II según la norma de emergencia, sin necesidad de considerar el valor de las velocidades de onda de corte en la clasificación²⁰.

Sin embargo como se carece de un muestreo directo, sumado a que la velocidad de ondas de corte hasta los 30 m es menor a 500 m/s en las estaciones de Antumapu y Curicó, éstas serán clasificadas como tipo III según el decreto 117.

De acuerdo al criterio de velocidad de ondas de corte de clasificación del decreto 117, éste pide considerar la menor velocidad de ondas de corte promedio entre los primeros 15 m o 30 m. Las estaciones de Mirador, Puente Alto y Hualañé clasificarían como tipo III, sin embargo hacer esto corresponde a un error, ya que las velocidades de ondas de corte que presentan esos subsuelos, es sobre 500 m/s y que además están sobre suelo constituido por grava.

Incluso la Estación de Lolleo está al límite de la clasificación entre tipo II y tipo III de acuerdo al decreto 117 si se considera el criterio del V_{S15} , siendo que clasifica como tipo I de acuerdo a la norma Nch433 y que además presenta roca a los 10 m de profundidad.

Siguiendo con la idea anterior, si se hubiese clasificado los suelos de acuerdo al menor valor de velocidad de ondas de corte ponderada entre las profundidades de 15 m y 30 m, según el decreto 117, hubiese habido sólo un suelo que clasifique tipo II, por lo que es necesario incluir otros parámetros y criterios para la clasificación de los tipos de suelo.

²⁰ Decreto 117, Nch 433, Febrero de 2011.

6. ANÁLISIS DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA DEL SISMO DEL 27F

6.1 Espectros de respuesta del sismo del 27F

A continuación se presentan los espectros de respuesta del terremoto del 27 de Febrero de 2010 en la dirección este-oeste (E-W) y norte-sur (N-S) con un amortiguamiento de un 5% para cada estación donde se estimó perfiles de velocidad de ondas de corte con el método SASW. Como se cuenta con la clasificación sísmica del subsuelo de cada estación de monitoreo sísmico, a cada gráfico se le insertó el espectro del tipo de suelo correspondiente de acuerdo a la clasificación de la norma Nch433.of96.mod2009 (de ahora en adelante “norma Nch433”) y del decreto 117 promulgado en Febrero de 2011 que la modifica (de ahora en adelante “decreto 117”).

La clasificación del subsuelo de las estaciones de monitoreo sísmico medidos con el método SASW fue resumida en la tabla 3²¹.

²¹ Los espectros de respuesta de las siguientes estaciones fueron desarrollados y proporcionados por Contreras Boroschek; Lolloo, Peñalolén, Puente Alto, Mirador, Maipú, Curicó, Hualañé y Constitución.

6.1.1 Estación de monitoreo sísmico de Lolloe

La figura 6.1 presenta el espectro de respuesta registrado en la Estación de Lolloe emplazada en suelo tipo I de acuerdo a la clasificación de la norma Nch433 y en suelo tipo II de acuerdo al decreto 117. Se puede observar de la figura 6.1 que hay sólo un valor máximo común entre los espectros de respuesta en ambas direcciones en un período con un valor de 0.12 s. Es probable que el valor punta cercano a 2.5 g que presenta el espectro de respuesta en la dirección E-W se deba a un efecto topográfico, ya que sólo se observa en la dirección E-W, considerando que en la dirección N-S se encuentra un afloramiento rocoso (ver Figura 5.2). Además se puede observar un rango de períodos con altos valores de pseudo-aceleración en torno a un período igual a 0.5 s.

El comportamiento del suelo de este lugar es complejo ya que está constituido por roca desde los 10 m de profundidad, debido a esto se espera un comportamiento más semejante a un suelo tipo I (se incluye en la figura 6.1 el espectro de diseño del suelo tipo II de la norma Nch433). Efectivamente presenta altos valores de pseudo-aceleración en períodos bajos desde 0.08 s, sin embargo se observa períodos predominantes hasta un valor igual a 0.5 s, punto donde decae la curva del espectro de respuesta, por lo que la clasificación de suelo tipo II cubre mejor la curva de respuesta del terremoto del 27F, aunque también el espectro de diseño asociado a esta clasificación presenta una falencia en la cobertura de los períodos pequeños.

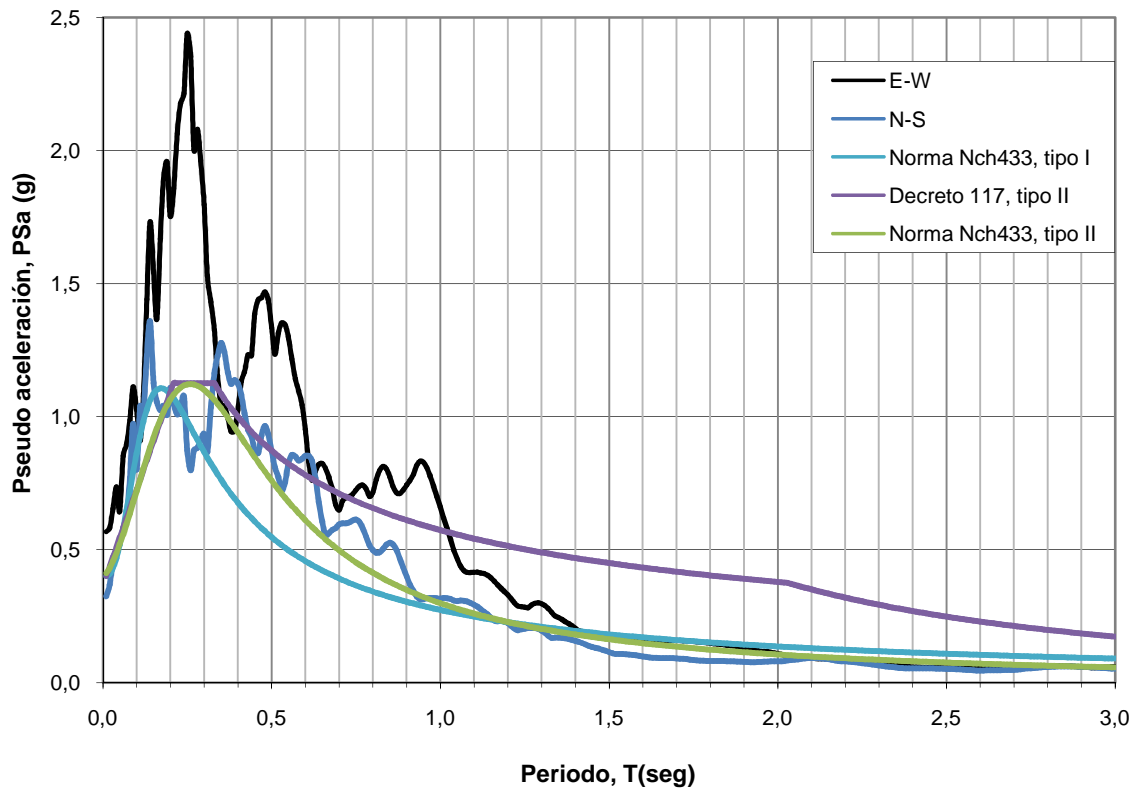


Figura 6.1: Espectros de respuesta de la Estación de Llolleo.

6.1.2 Estación de monitoreo sísmico de Peñalolén

La figura 6.2 presenta los espectros de respuesta de los registros de la Estación de Peñalolén. Éstos tienen un valor máximo de pseudo aceleración de 1.23g acotado por un rango pequeño de períodos en torno a 0.3 s. El espectro de respuesta propuesto por la norma Nch433 no modela bien la respuesta real que tuvo el suelo, al no cubrir bajo su área el período predominante de la respuesta del suelo. El espectro de diseño del decreto 117 tampoco se ajusta adecuadamente al espectro de respuesta del lugar.

Se agregó a la figura 6.2 el espectro de respuesta del decreto 117 para los suelos tipo II. Se puede concluir que este suelo tuvo una respuesta dinámica más semejante a un suelo tipo II, aunque el período de máximo valor de pseudo-aceleración no es cubierto por ningún espectro de la norma. Esto puede deberse a que bajo los 12 m de profundidad, se encuentra grava, la que influencia el comportamiento dinámico del suelo, sin embargo el horizonte de suelo blando sobre la grava produce un comportamiento un poco más flexible, aumentando un poco el período predominante. Lo anterior se discute más a fondo en el capítulo 6.2.3.

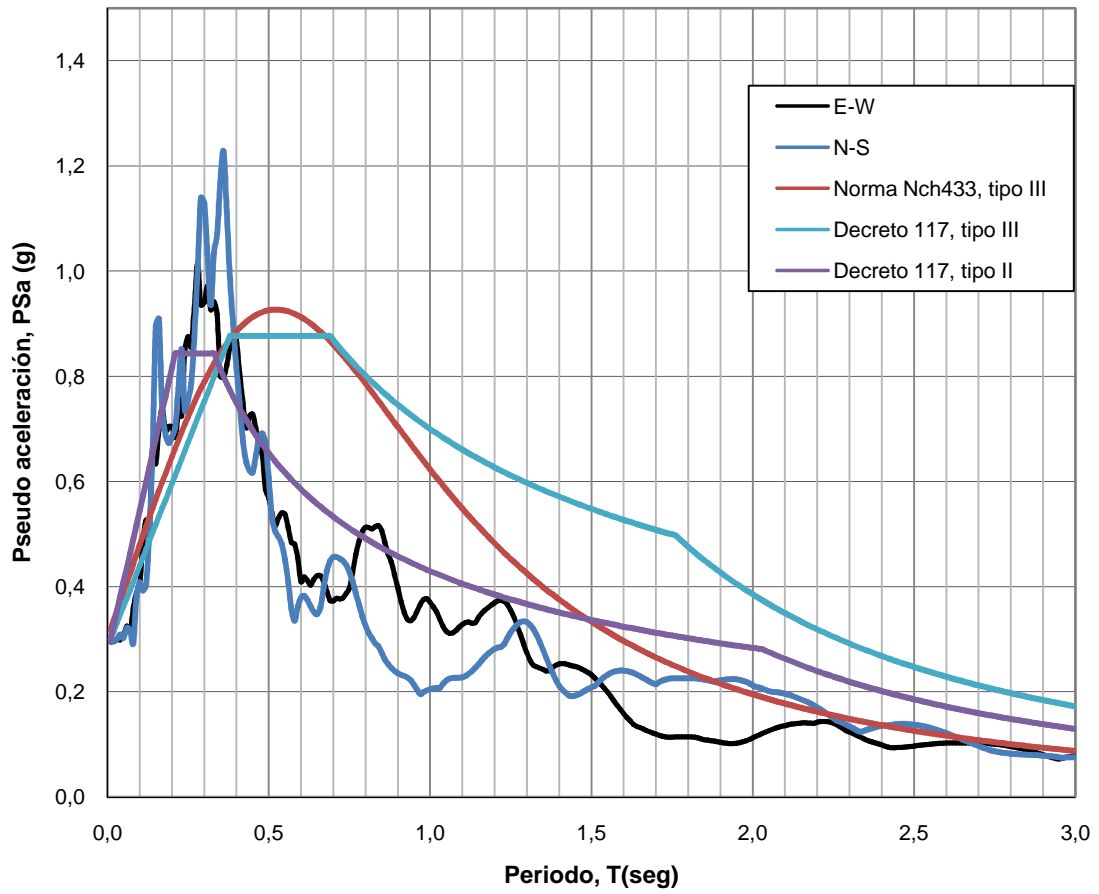


Figura 6.2: Espectros de respuesta de la Estación de Peñalolén.

6.1.3 Estación de monitoreo sísmico de Puente Alto

En la figura 6.3 se puede observar el espectro de respuesta para la Estación de Puente Alto. Se pueden ver dos períodos predominantes, uno con un valor igual a 0.28 s y otro en torno a 0.55 s. Los espectros de diseño propuestos por la norma cubren bastante bien el período predominante ubicado en torno a 0.28 s, sin embargo deja expuesto el segundo rango de períodos con altos valores de pseudo-aceleración.

Además el espectro del decreto 117 logra cubrir bien las curvas del espectro de respuesta del terremoto del 27F en períodos mayores a 0.7 s, donde el espectro de diseño para este tipo de suelos propuesto por la norma Nch433 presentó falencias en la cobertura.

Es probable que el segundo período predominante en los espectros de respuesta haya aparecido debido a la estratigrafía particular de este suelo, que presenta un estrato entre los 10 m a 17 m que genera una diferencia de rigidez considerable entre el estrato superior e inferior a éste.

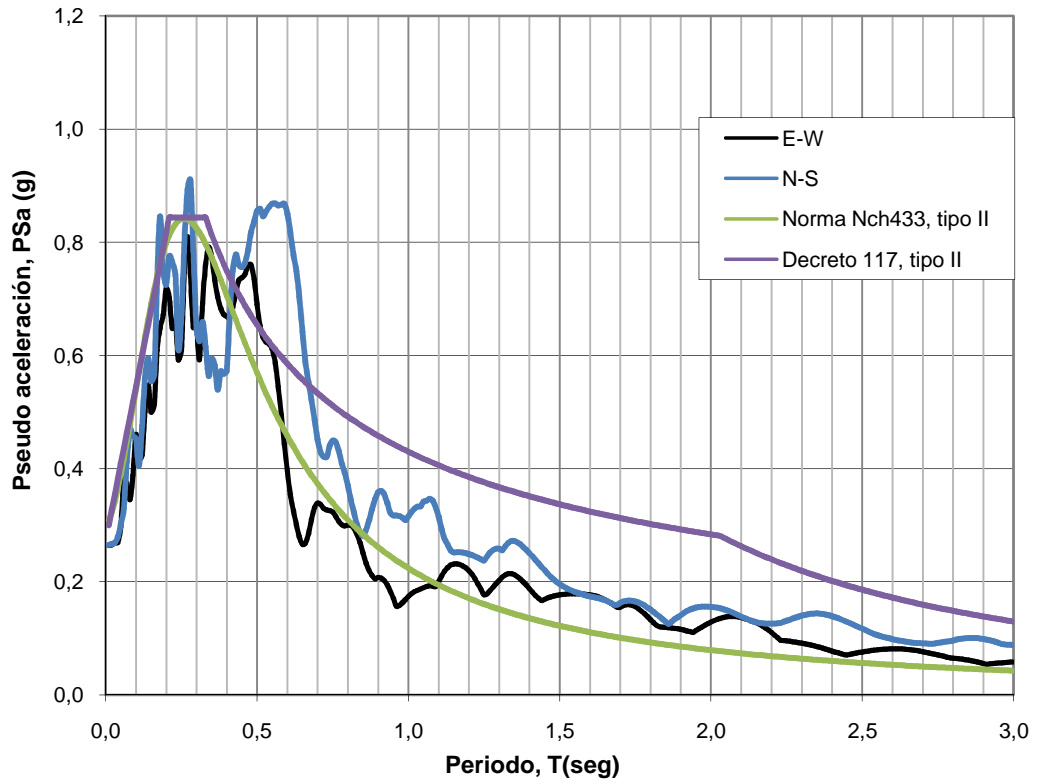


Figura 6.3: Espectros de respuesta estación de la Estación de Puente alto.

6.1.4 Estación de monitoreo sísmico de Mirador

En la figura 6.4 se puede observar el espectro de respuesta para la Estación de Mirador, emplazada sobre suelo tipo II de acuerdo a la clasificación de la norma Nch433 y del decreto 117. En torno al período 0,24 s se encuentra el valor máximo de pseudo-aceleración, el cual es más bajo que el propuesto por los espectros de diseño de la norma. Cabe destacar que éste fue el suelo más rígido de todos los sitios medidos, presentando el mayor valor de V_{S30} .

Al igual que lo analizado en la Estación de Puente Alto, la norma Nch433 no cubre bien la respuesta del suelo en períodos altos, lo que es corregido por el decreto 117. Además, el comportamiento dinámico de este suelo corresponde al clásico que presentan los suelos tipo II, con un valor máximo acotado por un rango de períodos pequeño, seguido de un decaimiento brusco del valor de pseudo-aceleración al aumentar el período.

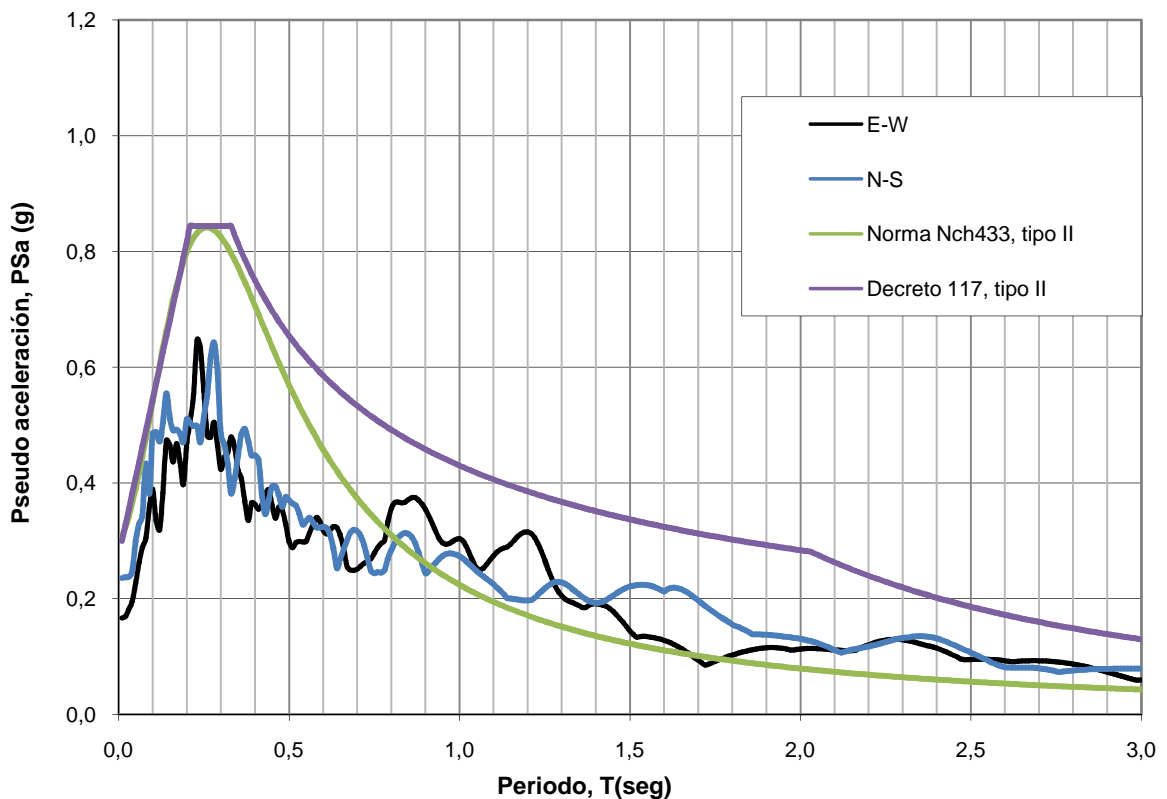


Figura 6.4: Espectros de respuesta estación la Estación de Mirador.

6.1.5 Estación de monitoreo sísmico de Antumapu

En la figura 6.5 se puede observar el espectro de respuesta para la Estación de Antumapu, emplazada en suelo tipo II según la clasificación de la norma Nch433 y en tipo III de acuerdo a la clasificación del decreto 117. La respuesta del suelo de esta estación frente al terremoto del 27F presentó dos períodos predominantes; uno en torno a 0.24 s y otro secundario en torno a 0.5 s con un valor menor de pseudo-aceleración.

El espectro de diseño de la norma Nch433 no cubre bien el espectro de respuesta del suelo desde 0.7 s de período en adelante, donde la envolvente está por debajo de la respuesta real, lo que es corregido por el espectro de diseño del decreto 117 para suelos tipo II. Cabe señalar que se cometería un error al clasificar este suelo como tipo III siguiendo textualmente el criterio de clasificación del decreto 117, sobre todo si se considera que el ensayo de SASW detectó una distribución de velocidad de ondas de corte correspondiente a grava en profundidad.

El segundo rango de períodos activos, con un bajo valor de pseudo-aceleración podría deberse a la existencia de un estrato blando entre dos más rígidos, un fenómeno semejante a lo descrito en los espectros de respuesta de la Estación de Puente Alto.

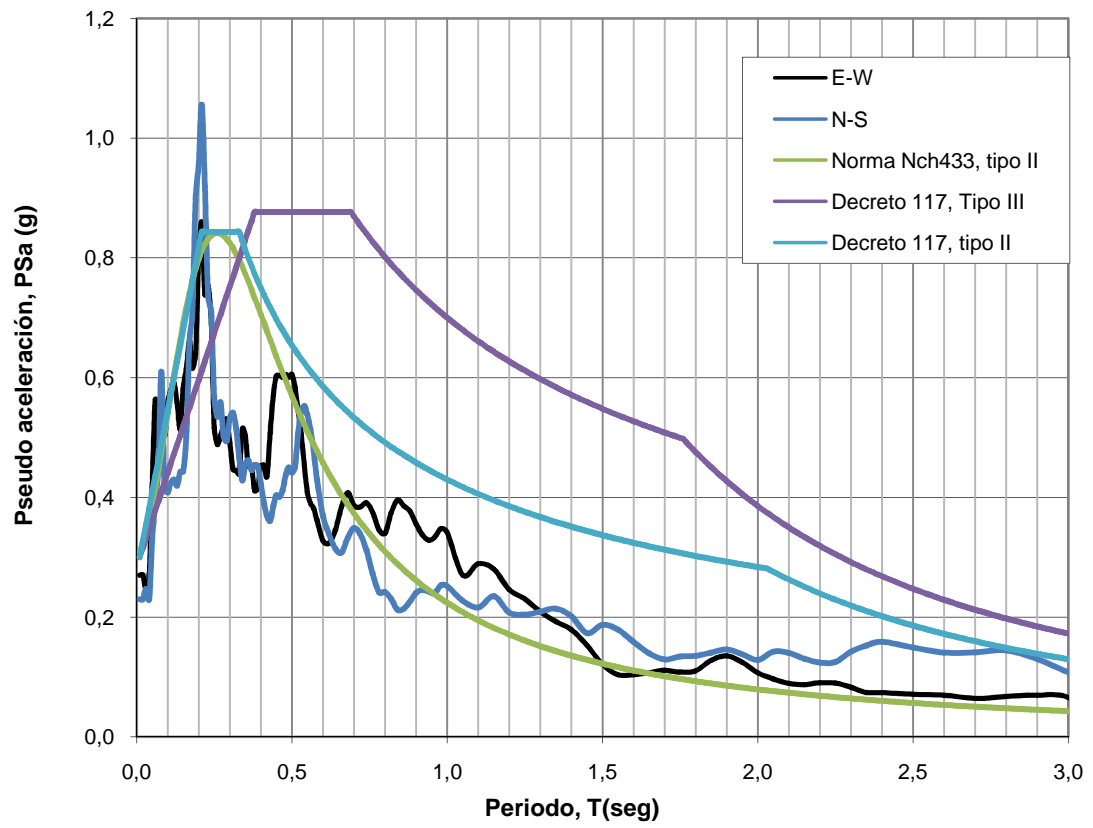


Figura 6.5: Espectros de respuesta de la Estación de Antumapu.

6.1.6 Estación de monitoreo sísmico de Casablanca

En la figura 6.6 se puede observar el espectro de respuesta para la Estación de Casablanca. Su subsuelo está clasificado como tipo III tanto por el criterio de clasificación de la norma Nch433 como por el decreto 117. Se puede observar que hay tres períodos predominantes; uno en torno a un período de 0.7 s, otro con un período de 0.35 s y un tercero de período igual a 0.1 s. Este último período predominante podría ser muy dañino debido al tipo de construcción que hay en Casablanca, haciendo resonancia con estructuras bajas de uno o dos pisos como la mayoría de las construcciones de la ciudad.

Ambos espectros cubren relativamente bien los espectros de respuesta del sismo del 27F, salvo por el período predominante que presenta el valor máximo de pseudo-aceleración que presenta el espectro de respuesta de la dirección Norte-Sur, con valores sobre un 25% del máximo propuesto por el espectro de diseño de la norma.

Cabe destacar que el perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de esta estación es semejante al de la Estación de Peñalolén, pero a diferencia de este último, el subsuelo de la Estación de Casablanca presenta un estrato blando de 20 m de espesor en vez de 12 m. Además se desconoce la velocidad de ondas de corte bajo el límite de la exploración realizada con el método SASW, y si se compara las respuestas sísmicas de estos dos lugares, se podría decir que bajo los 30 m de profundidad en el subsuelo de la Estación de Casablanca se encuentra un suelo de bajas velocidades de ondas de corte, lo que podría explicar la gran diferencia que existe entre la respuesta de estas dos estaciones.

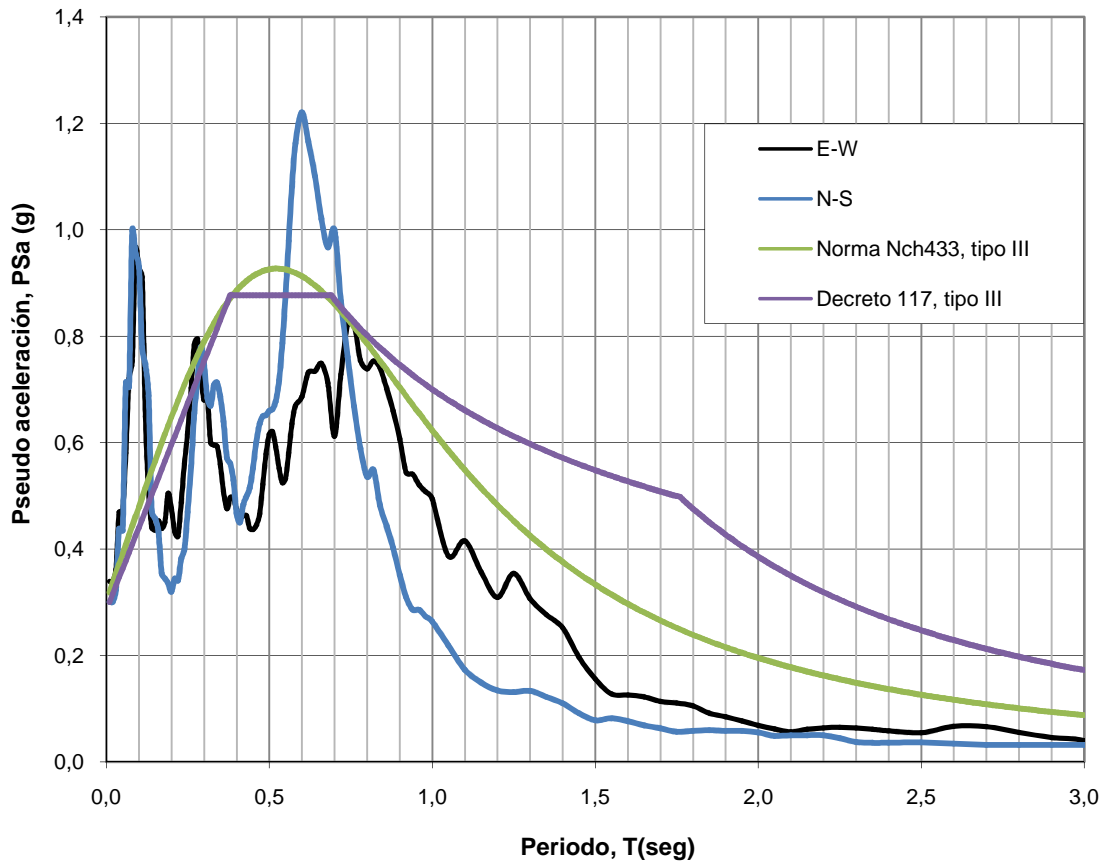


Figura 6.6: Espectros de respuesta de la Estación de Casablanca.

6.1.7 Estación de monitoreo sísmico de Curicó

En la figura 6.7 se puede observar el espectro de respuesta para la Estación de Curicó, emplazada en suelo tipo II según el criterio de clasificación de la norma Nch433 y en tipo III de acuerdo al criterio del decreto 117. El espectro de respuesta de esta estación presenta el comportamiento común de un suelo granular grueso de origen fluvial; un valor punta bien definido en torno a un período de valor 0.24 s que luego decae bruscamente.

Los espectros de diseño que definen la norma Nch433 y el decreto 117 tienen valores máximos de pseudo-aceleración muchos más bajos que los de la respuesta real que se registró en el terremoto del 27F. El gran valor de pseudo-aceleración de los espectros de respuesta observado podría relacionarse a efectos topográficos que amplificarían el contenido de frecuencias naturales del terremoto, sobre todo teniendo en consideración un afloramiento rocoso aledaño al hospital de Curicó, hacia el este.

La clasificación propuesta por el decreto 117 está cometiendo un error al clasificar el suelo como tipo III, ya que su comportamiento claramente es como tipo II, como lo descrito en la estación de Antumapu. Para reforzar lo anterior, se incluyó en la figura 6.7 el espectro de diseño del decreto 117 para los suelos tipo II.

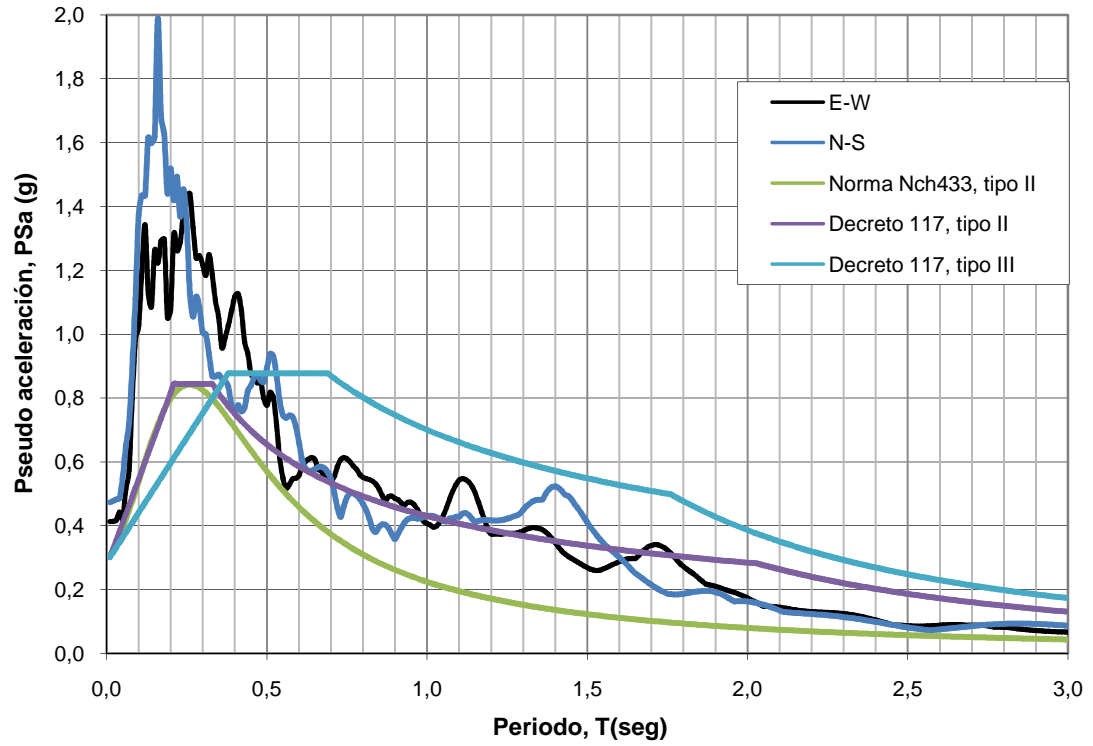


Figura 6.7: Espectros de respuesta de la Estación de Curicó.

6.1.8 Estación de monitoreo sísmico de Hualañé

En la figura 6.8 se puede observar el espectro de respuesta para la Estación de Hualañé, emplazada en suelo tipo II según el criterio de clasificación tanto de la norma Nch433 como del decreto 117. En el espectro de respuesta registrado en esta estación se observan tres períodos predominantes; uno en torno a 0.72 s, otro entorno a 0.44 s y otro con un período igual a 0.13 s.

Los espectros de diseño no cubren bien la respuesta dinámica del suelo de este lugar, dejando expuestos la mayoría de los períodos predominantes. Salvo el valor máximo de 1.9 [g] de pseudo-aceleración observado en el espectro de respuesta en la dirección E-W, los espectros de diseño presentan valores máximos de pseudo-aceleración adecuados para las sollicitaciones del terremoto en ese lugar.

Es importante señalar que el suelo subyacente a esta estación presenta en los primeros metros dos estratos blandos intercalados con otros de mayor rigidez, por lo que puede ser que esto haya generado que en la respuesta sísmica del lugar se observaran varios períodos predominantes, lo que no correspondería a suelos de esta rigidez y por lo tanto de esta clasificación.

Se agregó a la figura 6.8 el espectro de diseño del suelo tipo III del decreto 117. Esta curva logra cubrir algunos períodos predominantes que deja expuesto los espectros de diseño del suelo tipo II tanto de la norma Nch433 como del decreto 117, sin embargo presenta deficiencias en la cobertura del primer rango de períodos activos, que son los que tienen el mayor valor de pseudo-aceleración. Un espectro adecuado para este suelo tendría que considerar un plateau más extendido, que comience en 0.1 s y termine al menos en 0.8 s.

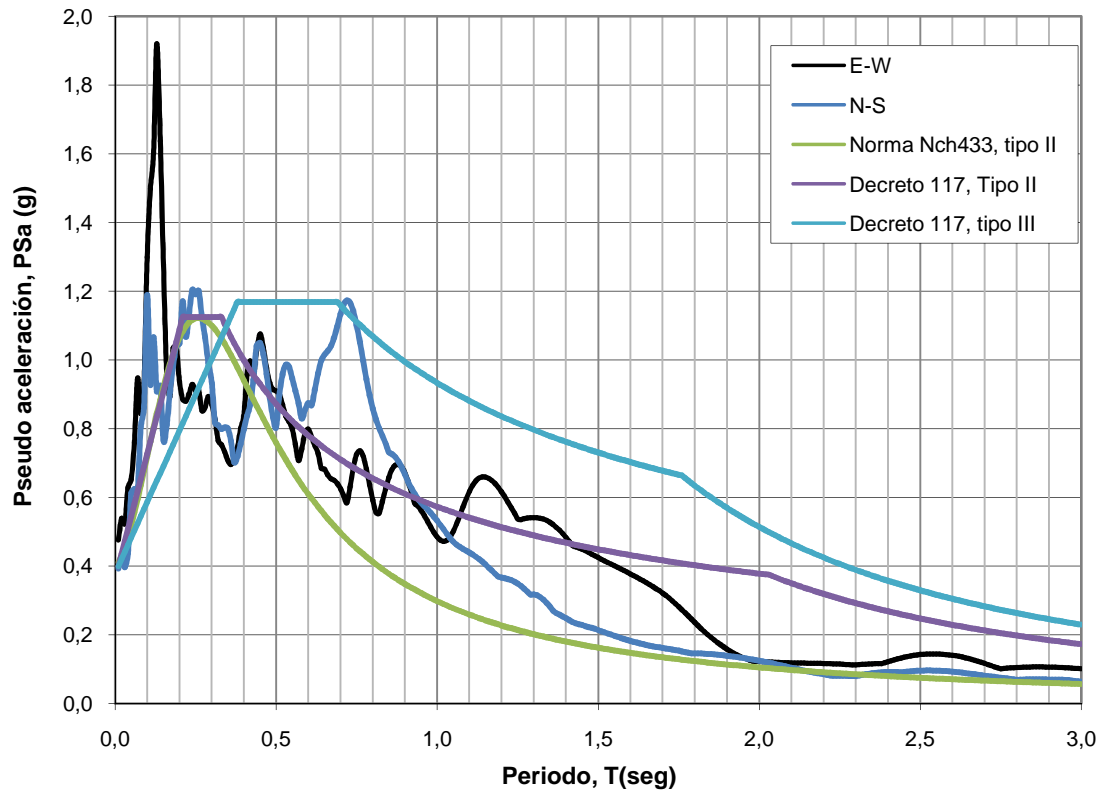


Figura 6.8: Espectros de respuesta de la Estación de Hualañé.

6.1.9 Estación de monitoreo sísmico de Constitución

En la figura 6.9 se puede observar el espectro de respuesta para la Estación de Constitución, emplazada sobre suelo tipo III de acuerdo al criterio de clasificación de la norma Nch433 y del decreto 117.

Se puede observar de la figura 6.9 la existencia de tres períodos predominantes; uno en torno a los 0.45 s, uno secundario en torno a los 0.22 s y un tercer rango con valores menores de pseudo-aceleración en torno a los 0.8 s.

Como se puede ver en la figura 5.25 (foto satelital de la Estación de Constitución), hay un afloramiento rocoso cerca de la estación y es probable que haya roca a no mucha más profundidad del límite del perfil de velocidad de ondas de corte estimado con el método SASW. Por lo que se podría inferir que el efecto de una gran amplificación sísmica observada en los espectros de respuesta haya sido causada por la diferencia de rigidez entre el suelo y la roca. Es probable que por esta razón los espectros de diseño tanto de la norma Nch433 y del decreto 117 hayan presentado una cobertura bastante deficiente de los espectros de respuesta del terremoto del 27F, ya que los valores de pseudo-aceleración de los espectros de respuesta son mucho mayores (casi tres veces los valores propuestos por los espectros de diseño de la norma Nch433 y del Decreto 117).

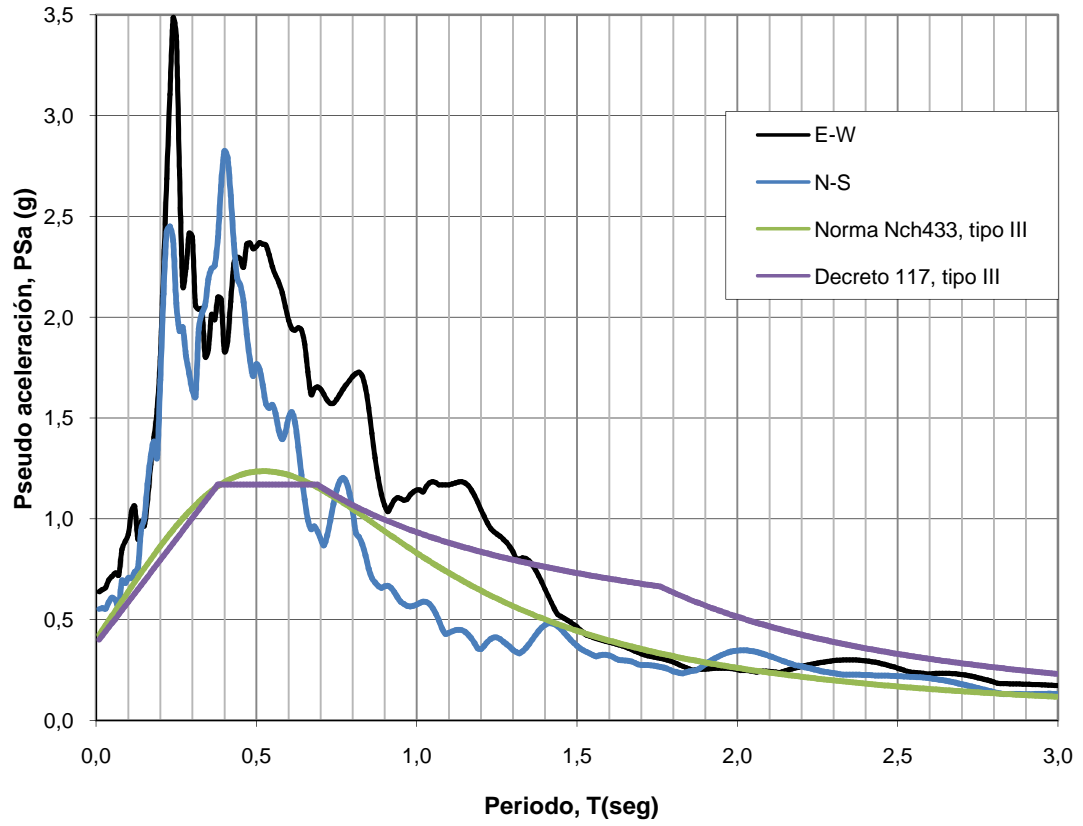


Figura 6.9: Espectro de respuesta de la Estación de Constitución.

6.1.10 Resumen de los espectros de respuesta del terremoto del 27F

A continuación se presenta la tabla 4 con el resumen de los espectros analizados en este capítulo, el cual incluye el período predominante con el mayor valor de pseudo-aceleración, el valor máximo de pseudo-aceleración y la velocidad de ondas de corte promedio de los primeros 30 m del subsuelo de cada estación.

Tabla 4: Resumen del análisis de los espectros de respuesta

Estación	V_{s30} [m/s]	Período predominante [s]*	Pseudo-Aceleración máxima [g]
Lolloe	821	0,25	2,44
Peñalolén	337	0,33	1,23
Puente Alto	510	0,28	0,91
Mirador	583	0,25	0,64
Casablanca	399	0,68	1,22
Antumapu	441	0,21	1,06
Hualañé	505	0,15	1,20
Curicó	447	0,26	1,68
Constitución	210	0,45	3,5

6.2 Análisis de los espectros de respuesta del sismo del 27F

A continuación se presenta un análisis de los espectros de respuesta del terremoto del 27F de las estaciones donde se realizaron las mediciones de perfiles de velocidad de ondas de corte con el método SASW.

6.2.1 Análisis de los espectros de respuesta del 27F por tipo de clasificación

La figura 6.10 presenta todos los espectros de respuesta de los suelos clasificados como tipo II según la clasificación de la norma Nch433, además de los espectros de diseño para la zona 3 y la zona 2.

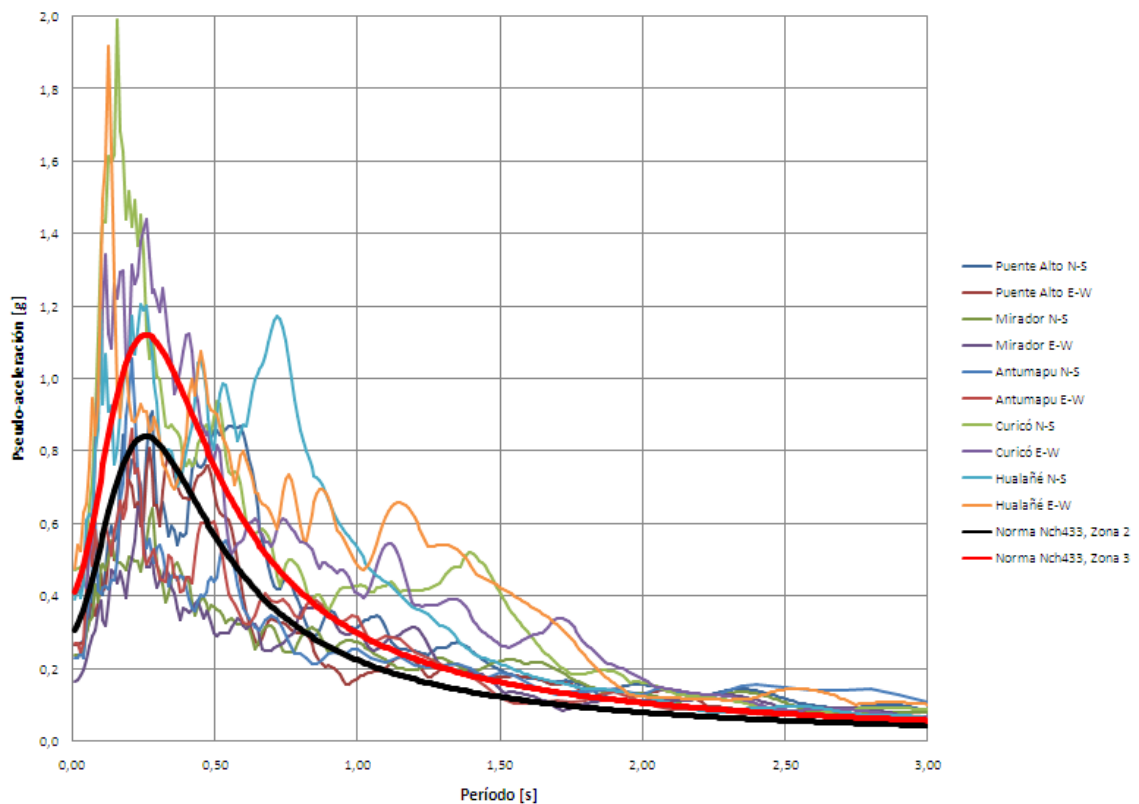


Figura 6.10: Espectros de respuesta de los suelos tipo II de acuerdo a la norma Nch433

Se puede observar en la figura 6.10 que hay una cantidad importante de curvas de espectros de respuesta que no son bien cubiertas por los espectros de diseño de la norma Nch433 . Cabe destacar que sólo una de las estaciones de monitoreo sísmico de las que se presentan en la figura 6.10 está emplazada en la zona 3 (la Estación de Hualañé), el resto en la zona 2.

Sumado a lo anterior, el espectro de diseño de la norma Nch433 para suelos tipo II presentó deficiencias en la cobertura de los espectros de respuesta a partir del período mayores a 0.5 s. Esto es corregido bastante bien por el espectro de diseño del decreto 117 para suelos tipo II como se puede observar en la figura 6.11, que muestra los espectros de respuesta para todos los suelos clasificados como tipo II de acuerdo a este decreto.

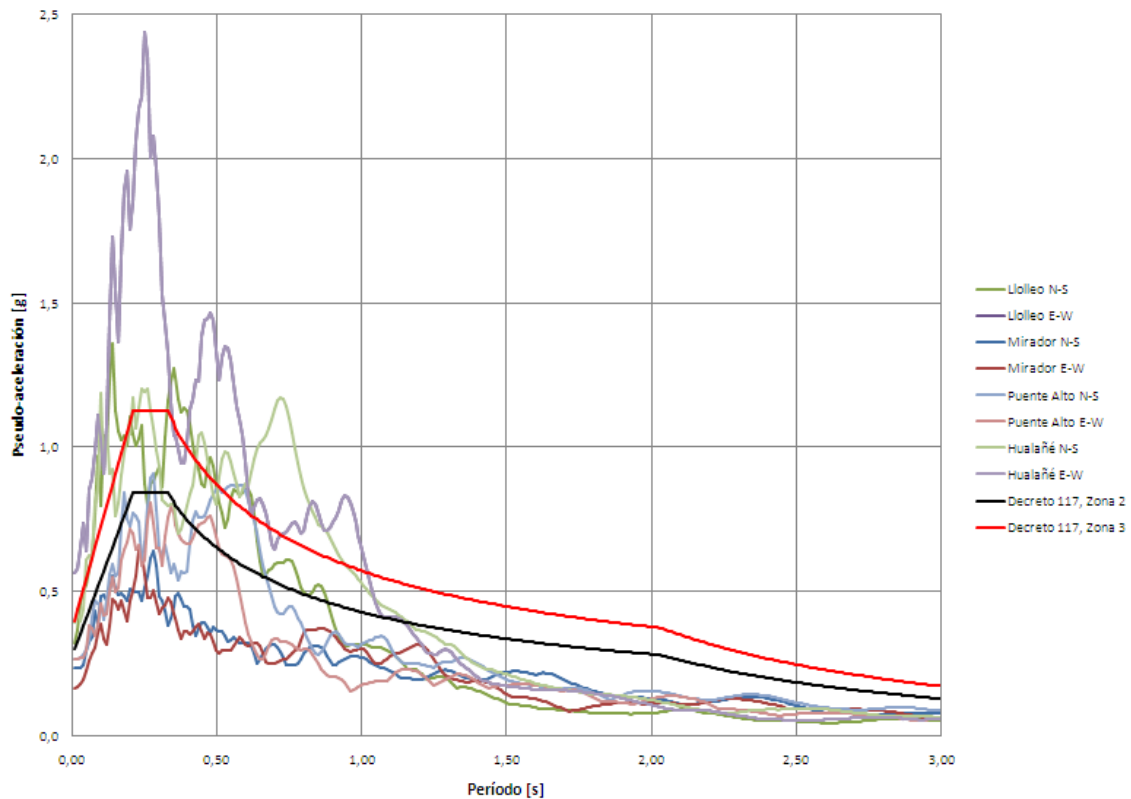


Figura 6.11: Espectros de respuesta de los suelos tipo II de acuerdo al decreto 117

De la figura 6.11 se puede observar que el espectro de diseño del decreto 117 para suelos tipo II presenta problemas en la cobertura de la magnitud de los espectros de respuesta y

además en los períodos predominantes de los espectros de respuesta de algunas estaciones (lo que es analizado en el acápite 6.2.3), donde el plateau de la curva no tiene una extensión suficiente para una cobertura adecuada.

La figura 6.12 presenta todos los espectros de los suelos clasificados como tipo III según la clasificación de la norma Nch433. Se puede observar que este espectro de diseño presenta falencias en la cobertura de períodos bajos. Salvo la Estación de Constitución que presentó un efecto de amplificación importante, los valores de pseudo-aceleración máxima del espectro de diseño presentan relativamente una buena cobertura.

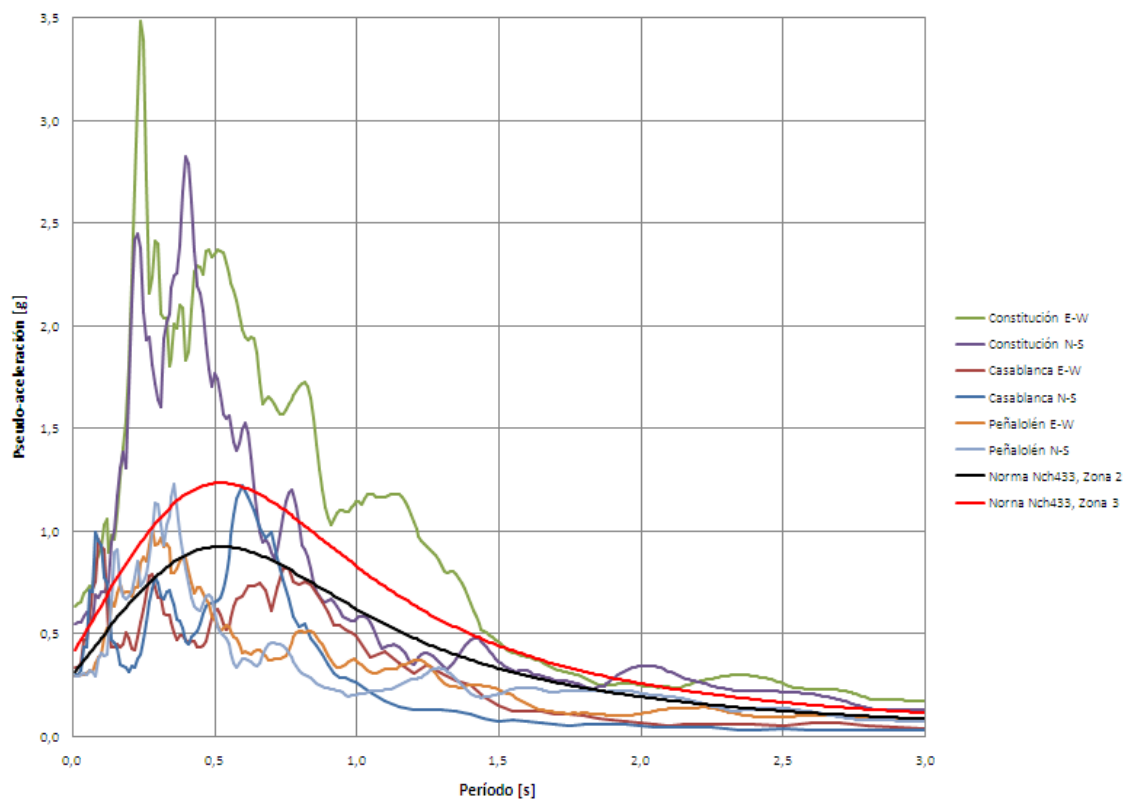


Figura 6.12: Espectros de respuesta de los suelos tipo III de acuerdo a la norma Nch433

La figura 6.13 contiene los espectros de respuesta de todos los suelos clasificados como tipo III de acuerdo al criterio del decreto 117. Hay dos suelos que cambiaron su clasificación de tipo II con la norma Nch433 a tipo III con el decreto 117. Estos dos sitios presentaron un espectro de respuesta que tiene su período predominante fuera del plateau del espectro de

diseño. Además el espectro de respuesta de la Estación de Constitución tiene valores de pseudo-aceleración mucho mayores que los del espectro de diseño.

Los espectros de diseño del decreto 117 para suelos tipo III también presentan una deficiencia al no cubrir con el plateau los períodos bajos, los cuales presentaron altos valores de pseudo-aceleración en algunos sitios.

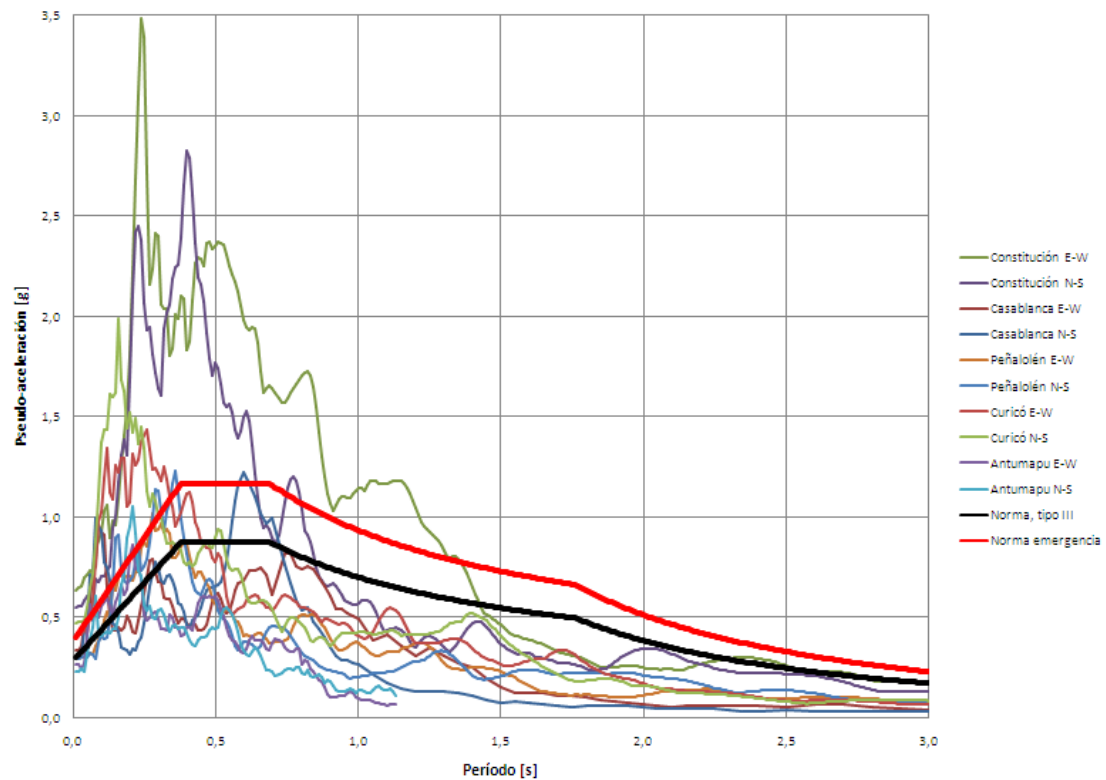


Figura 6.13: Espectros de respuesta de los suelos tipo III de acuerdo al decreto 117

6.2.2 Correlación entre el V_{S30} y el valor máximo de pseudo-aceleración

La figura 6.14 presenta el valor máximo de pseudo-aceleración entre la dirección N-S y E-W en los espectros de respuesta en función del V_{S30} . Se puede ver que no hay una correlación entre los parámetros V_{S30} y el valor máximo de pseudo-aceleración, salvo en los suelos formados por gravas fluviales en la cuenca de Santiago donde en los sitios que presentaron un mayor V_{S30} se observó un valor menor de la pseudo-aceleración punta del espectro de respuesta.

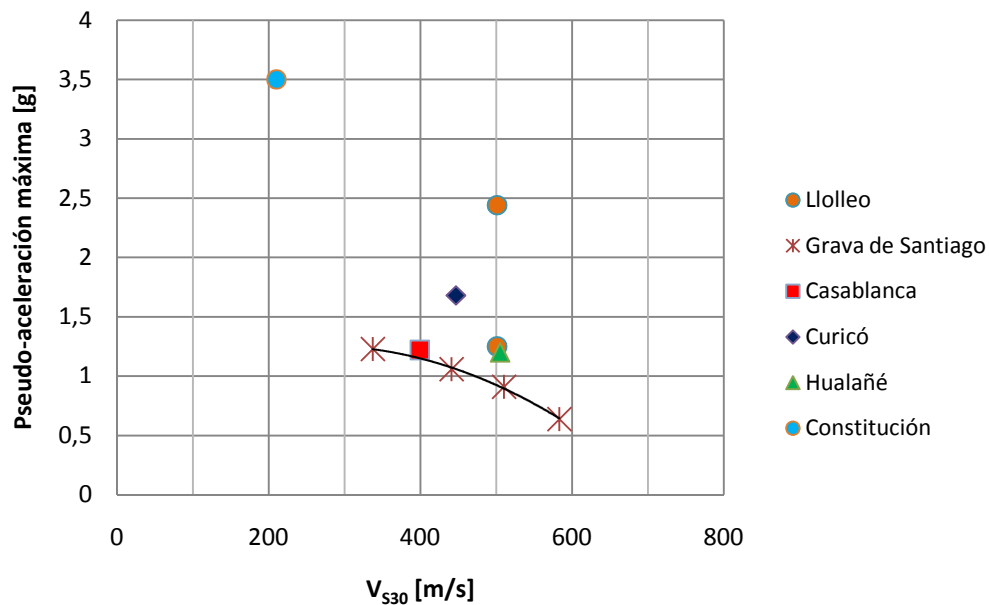


Figura 6.14: Máxima Pseudo-aceleración en función del V_{S30}

Para los datos de la Estación de Lolloe se consideró en la figura 6.14 el V_{S15} y el valor de pseudo-aceleración máxima de ambas direcciones. Por otra parte, las estaciones emplazadas sobre la grava de Santiago tienen en común que están ubicadas en el mismo valle y a una distancia relativamente pequeña unas de otras.

Efectivamente el valor máximo de pseudo-aceleración depende de muchas variables entre las que destacan; la distancia a la zona de ruptura del sismo, la topografía y geología local, la profundidad de la roca, entre otras. Por esto mismo no es de extrañar que no haya habido una

relación entre el V_{S30} y el máximo valor de pseudo-aceleración aplicable a todos los suelos medidos.

Sin embargo para suelos cercanos y con condiciones de formación geológica y topográficas parecidas, como los que subyacen a las estaciones medidas en Santiago, el V_{S30} fue un parámetro que se correlacionó bien con el mayor o menor valor de pseudo-aceleración del espectro de respuesta obtenido del registro en superficie.

La figura 6.15 presenta el perfil de velocidad de ondas de corte del subsuelo de las cuatro estaciones de monitoreo sísmico emplazadas sobre grava de Santiago. El valor máximo de pseudo-aceleración del espectro de respuesta de la Estación de Peñalolén duplica al de la Estación de Mirador, lo que indica que en estos casos la rigidez de los primeros 30 m de profundidad altera el valor máximo de pseudo-aceleración registrado en superficie.

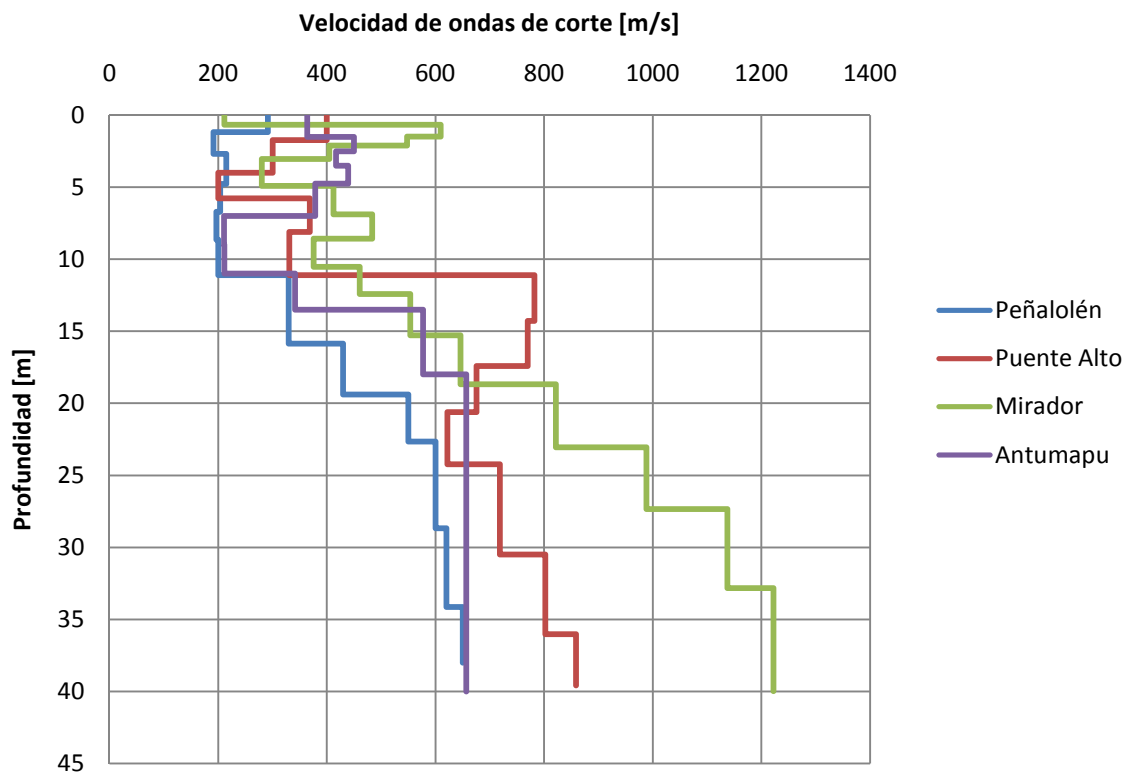


Figura 6.15: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de las estaciones emplazadas sobre grava de Santiago

6.2.3 Comparación de la respuesta sísmica analizando el V_{S30} y perfil de velocidades de ondas de corte

Las estaciones de Peñalolén, Puente Alto, Mirador, Antumapu, Curicó y Hualañé están emplazadas sobre suelos fluviales constituidos por grava, por lo que deberían tener un patrón común en su comportamiento dinámico; sin embargo hay que destacar algunas diferencias en la respuesta sísmica que tuvo cada sitio.

La Figura 6.16 presenta el perfil de velocidad de ondas de corte del subsuelo de las Estaciones de Peñalolén, Mirador y Curicó que corresponden a suelos con una rigidez monótonamente creciente en profundidad. La figura 6.17 presenta los espectros de respuesta para estas estaciones.

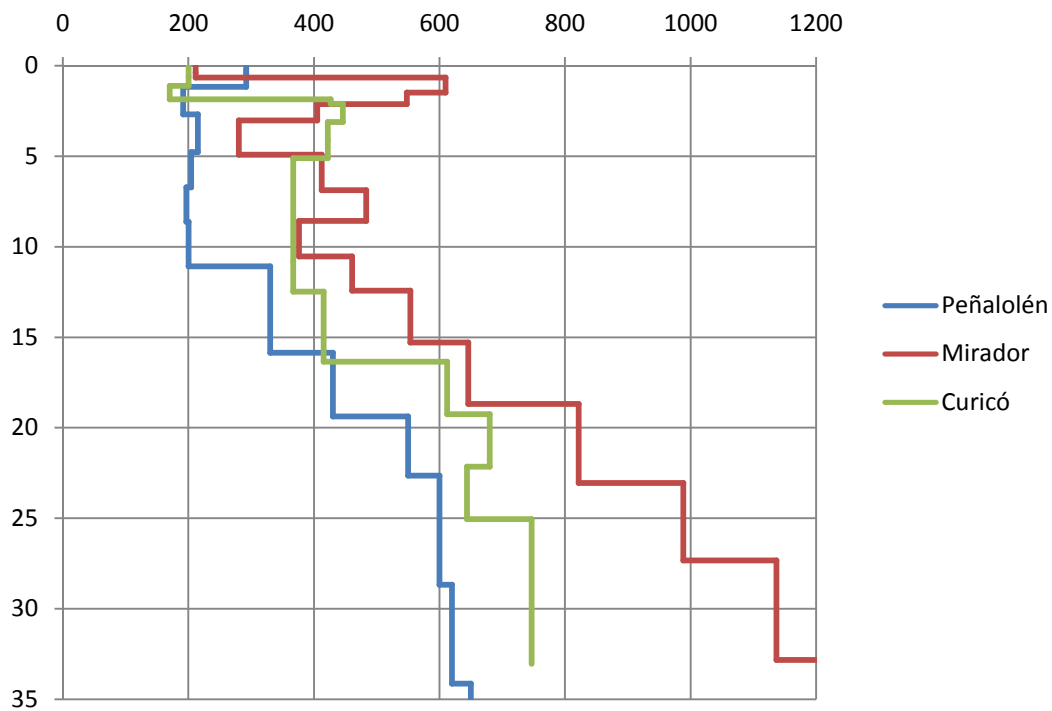


Figura 6.16: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de las estaciones de Peñalolén, Mirador y Curicó

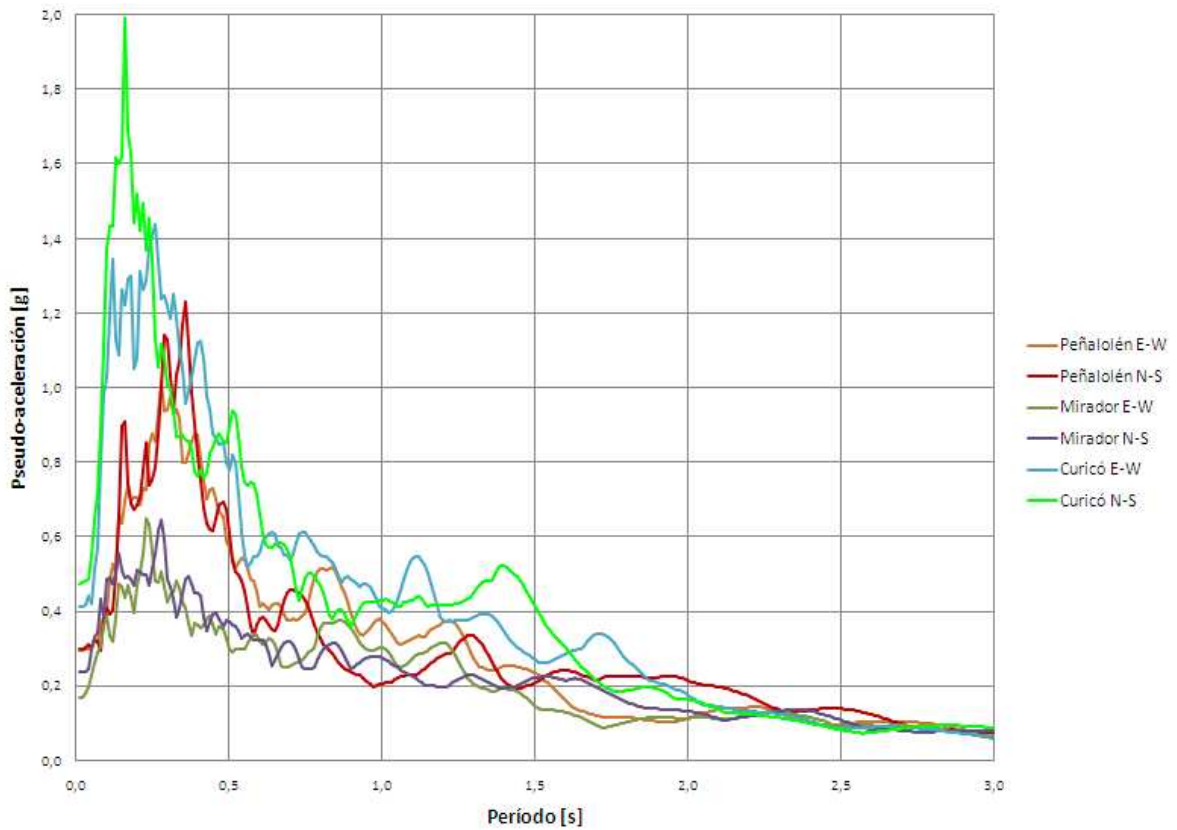


Figura 6.17: Espectros de respuesta de las estaciones de Peñalolén, Mirador y Curicó

Los suelos con una rigidez creciente en profundidad se caracterizaron por tener una curva de espectro de respuesta con un valor máximo bien definido que cubre un limitado rango de períodos y luego presentar un brusco decaimiento.

La figura 6.18 presenta el perfil de velocidad de ondas de corte del subsuelo de las estaciones de Puente Alto, Antumapu y Hualañé, que presentaron perfiles de velocidad de ondas de corte no monótonamente crecientes, lo que implica una distribución variable de rigidez en profundidad. La figura 6.19 presenta los espectros de respuesta para estas estaciones.

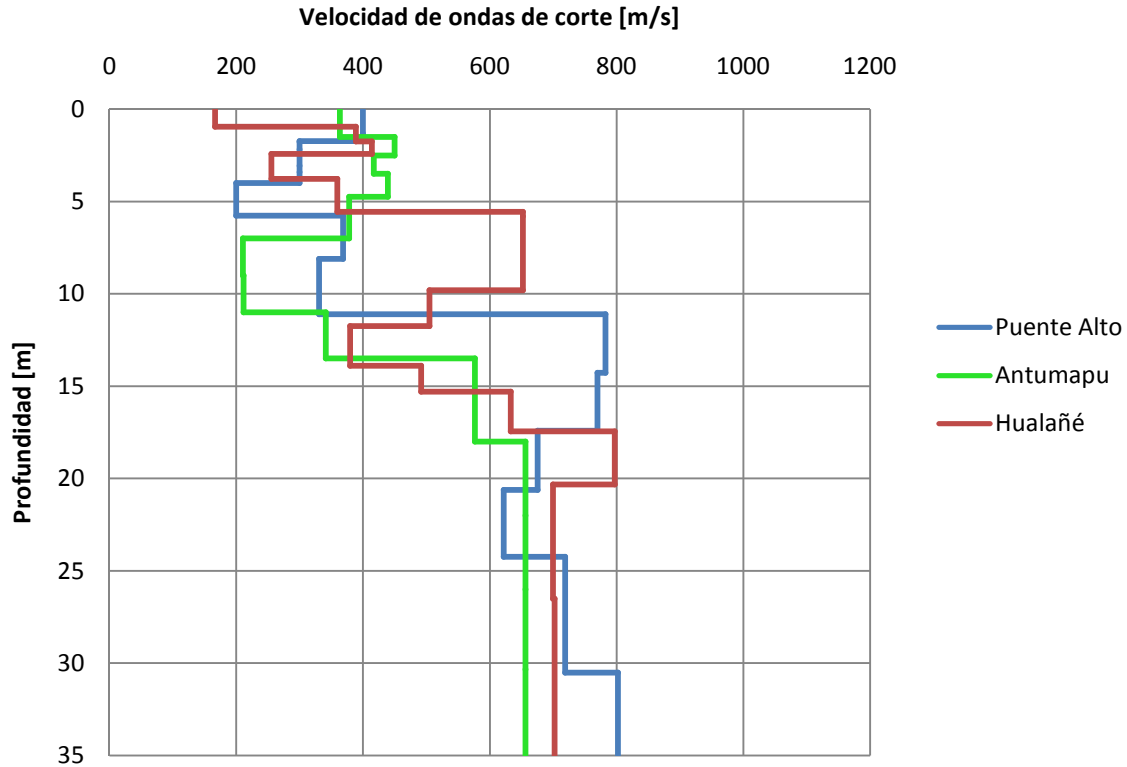


Figura 6.18: Perfil de velocidades de ondas de corte del subsuelo de las estaciones de Puente Alto, Antumapu y Hualañé

Se puede observar en la respuesta sísmica registrada por las estaciones de Puente Alto, Antumapu y especialmente la de Hualañé que sus espectros de respuesta tienen más de un período predominante, con altos valores de pseudo-aceleración, lo que no es lo esperado para suelos con un V_{S30} tan alto, y por lo tanto para ese tipo de clasificación. Esto puede deberse a la estratigrafía del subsuelo del lugar, ya que en estos tres casos se detectan estratos blandos intercalados con depósitos rígidos, lo que puede generar el espectro de respuesta observado, con más de un período predominante en comparación con los sitios con una estratigrafía monótonamente creciente en profundidad.

Lo anterior es interesante ya que indica que la estratigrafía y la distribución de la rigidez de los horizontes de suelo en profundidad en los primeros 30 m generan cambios en la respuesta sísmica del sitio. Además suelos con una distribución de rigidez variable en profundidad requieren de un plateau más extendido para cubrir la respuesta real del suelo del lugar.

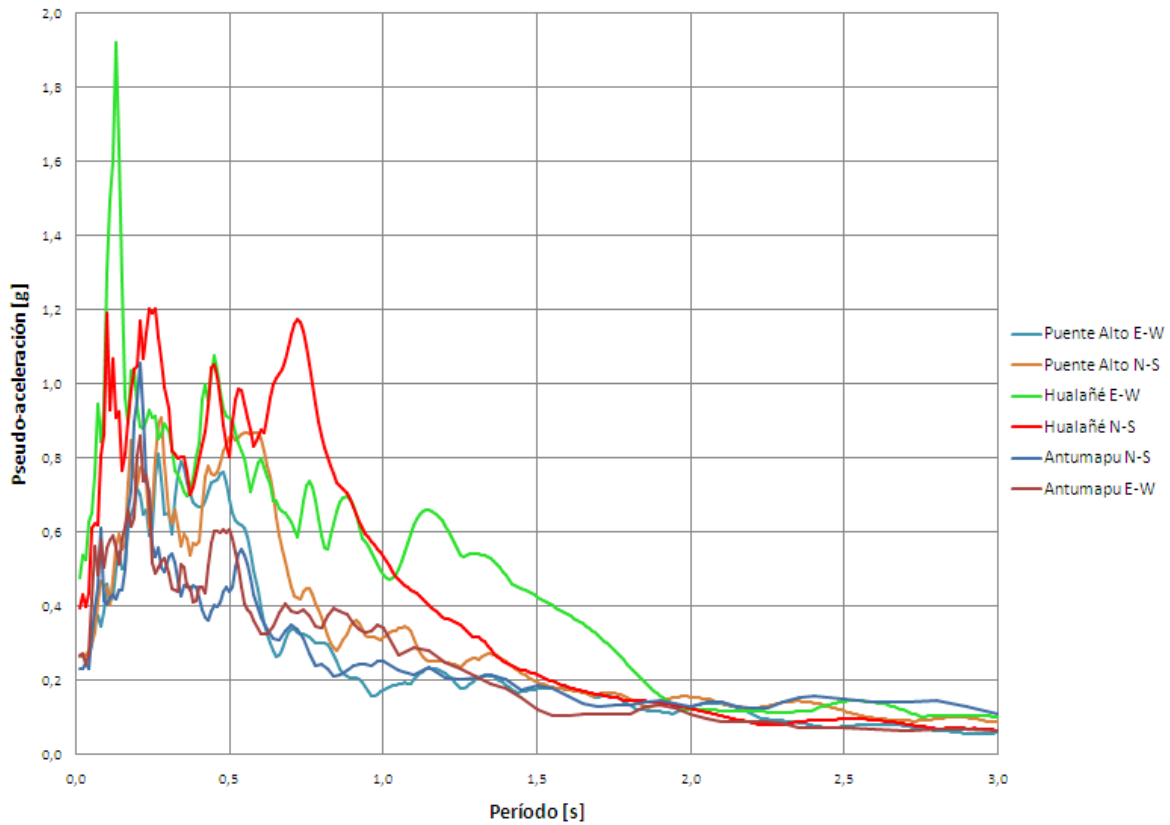


Figura 6.19: Espectros de respuesta de las estaciones de Puente Alto, Antumapu y Hualañé

Así mismo la figura 6.20 presenta un gráfico de la pseudo-aceleración en función del V_{S30} . Sin embargo considerando el análisis de la sección 6.2.2 se puede concluir que no hay una correlación significativa entre el máximo valor de la pseudo-aceleración y la distribución de la rigidez del suelo en profundidad.

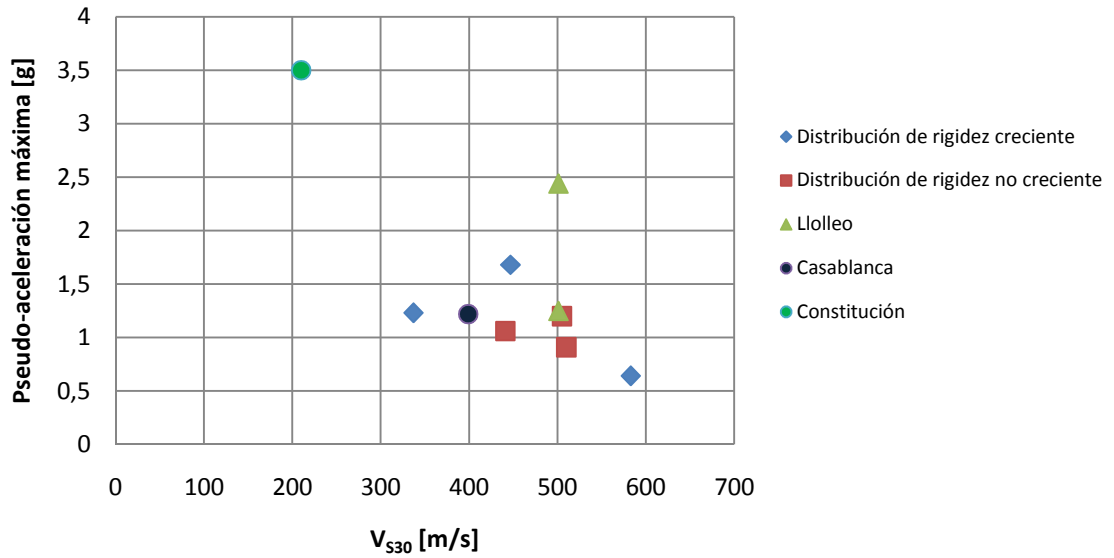


Figura 6.20: Máximo valor de pseudo-aceleración en función del V_{S30}

6.2.4 Correlación entre el período predominante y el V_{S30}

En la figura 6.21 se presenta el período predominante en función del V_{S30} . Se puede observar de esta figura que no hay una correlación entre estos parámetros.

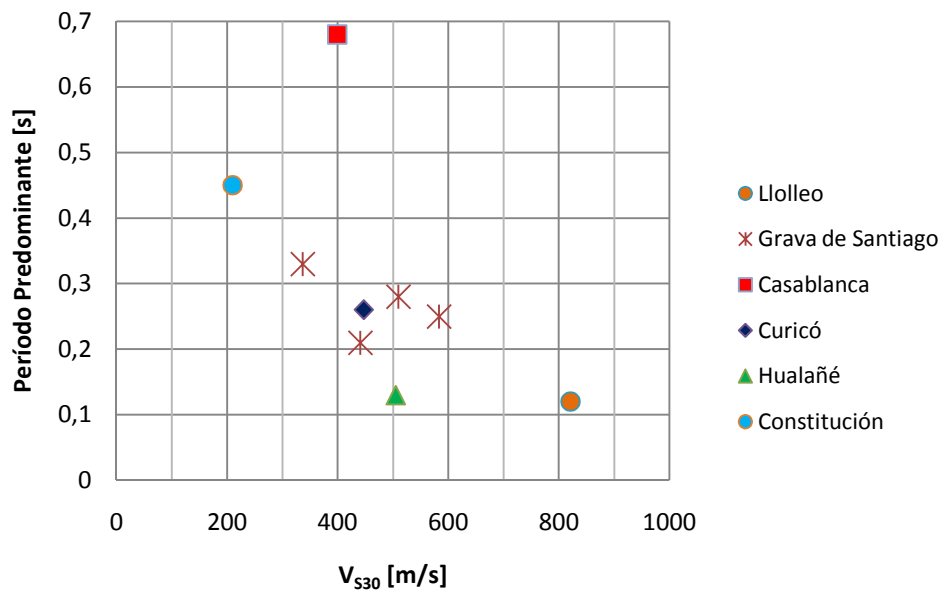


Figura 6.21: Gráfico que presenta el período predominante en función del V_{S30}

Es importante destacar que el período predominante depende de muchas variables; como la profundidad de la roca, la topografía local, el efecto de impedancia, la rigidez del suelo en toda su columna desde la roca, entre otras variables, por lo que no es extraño que no haya una correlación directa entre estos parámetros.

6.2.5 Clasificación sísmica de suelos compuestos por grava

Seis de las estaciones donde se realizaron ensayos de SASW están emplazadas sobre suelos conformados por gravas fluviales; Peñalolén, Puente Alto, Antumapu, Mirador, Curicó y Hualañé, presentándose en la figura 6.22 sus respectivos perfiles de velocidad de ondas de corte. Se podría esperar que los suelos subyacentes a estas estaciones presentarían un comportamiento dinámico semejante a un suelo tipo II (debido a la alta rigidez de las gravas fluviales), con un valor máximo de pseudo-aceleración acotado por un rango limitado de períodos y luego un brusco decaimiento de este parámetro. Incluso en la estación de Peñalolén, que a pesar de tener un valor menor de V_{S30} , comparado con las otras estaciones, presentó un comportamiento dinámico en que predominó la influencia de la grava por sobre los estratos blandos de la superficie, presentando también un espectro de respuesta parecido a un suelo tipo II.

Sin embargo hubo algunas deficiencias en la clasificación sísmica del suelo así como también diferencias entre el espectro de respuesta medido con el espectro de diseño asignado a estos suelos. Los subsuelos de las estaciones de Peñalolén, Antumapu y Curicó presentaron un espectro de respuesta semejante a un suelo tipo II, sin embargo fueron clasificados como tipo III de acuerdo al criterio de clasificación del decreto 117. Lo anterior puede ser observado en la figura 6.23 que presenta los espectros de respuesta de las estaciones de Peñalolén, Antumapu y Curicó.

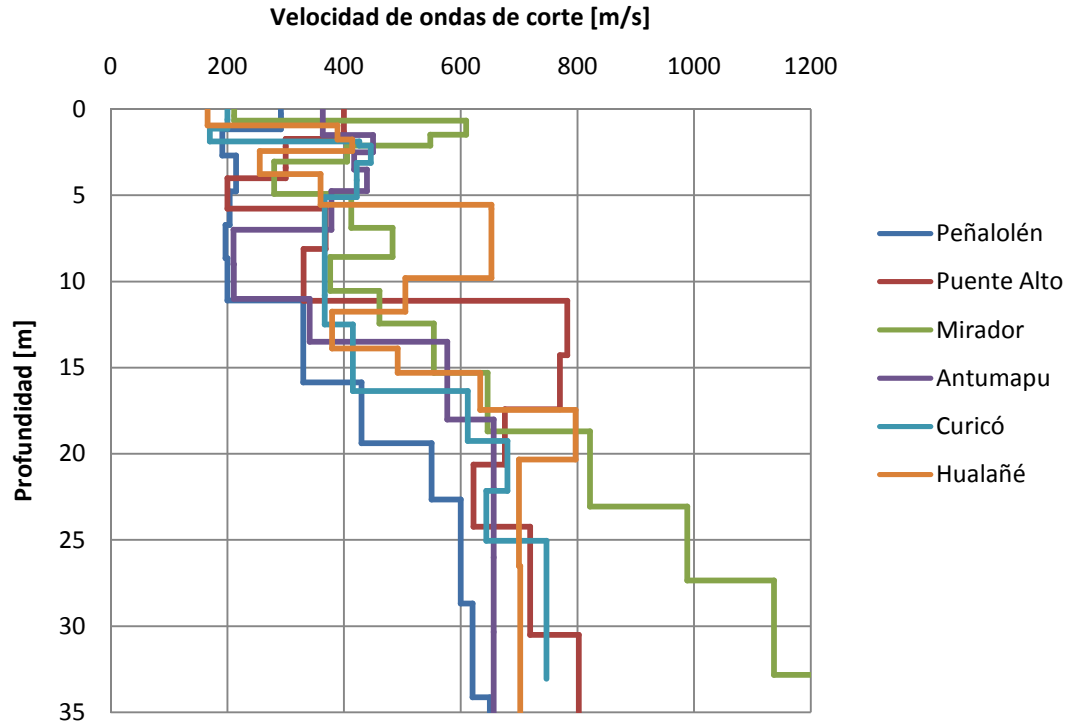


Figura 6.22: Perfiles de velocidad de las estaciones emplazadas sobre gravas fluviales

Por otra parte, la figura 6.24 compara los espectros de respuesta de las estaciones de Peñalolén, Puente Alto y Hualañé con los espectros de diseño para los suelos tipo II de acuerdo a la norma Nch433 y el decreto 117. Se puede observar que estos suelos presentan valores altos de pseudo-aceleración en períodos propios de suelos tipo II, sin embargo también presentaron períodos predominantes fuera del rango que cubre el plateau de la norma. Para reducir esta diferencia habría que extender el plateau del espectro de diseño para lograr una buena cobertura del espectro de respuesta.

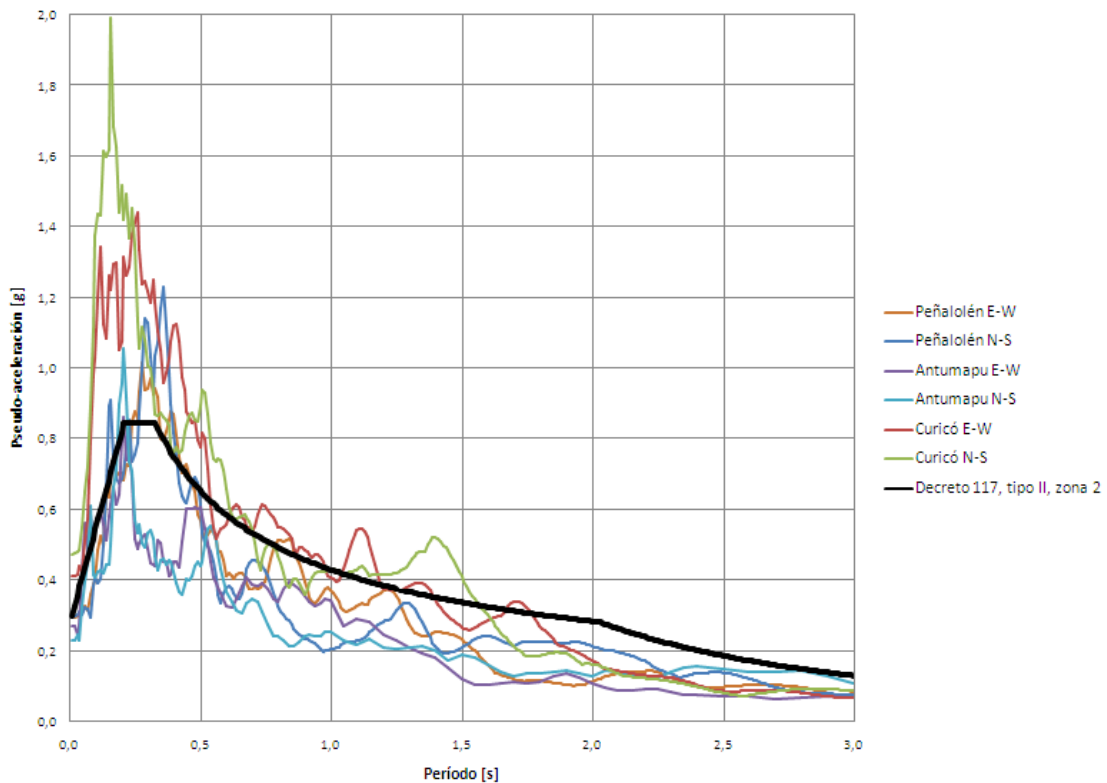


Figura 6.23: Espectros de respuesta de las estaciones de Peñalolén, Antumapu y Curicó

De lo anterior se puede concluir que en suelos donde se sabe que predominará la influencia de gravas fluviales en el comportamiento dinámico del sitio, habría que considerar un espectro de diseño semejante a un suelo tipo II con algunas correcciones en la extensión del plateau de acuerdo a la distribución de rigidez en los primeros 30 m como fue expuesto en la sección 6.2.3. Además según lo observado de los datos obtenidos, si hay grava fluviales desde al menos 10 m a 12 m de profundidad hacia abajo, predominaría el comportamiento dinámico de la grava en el sitio estudiado.

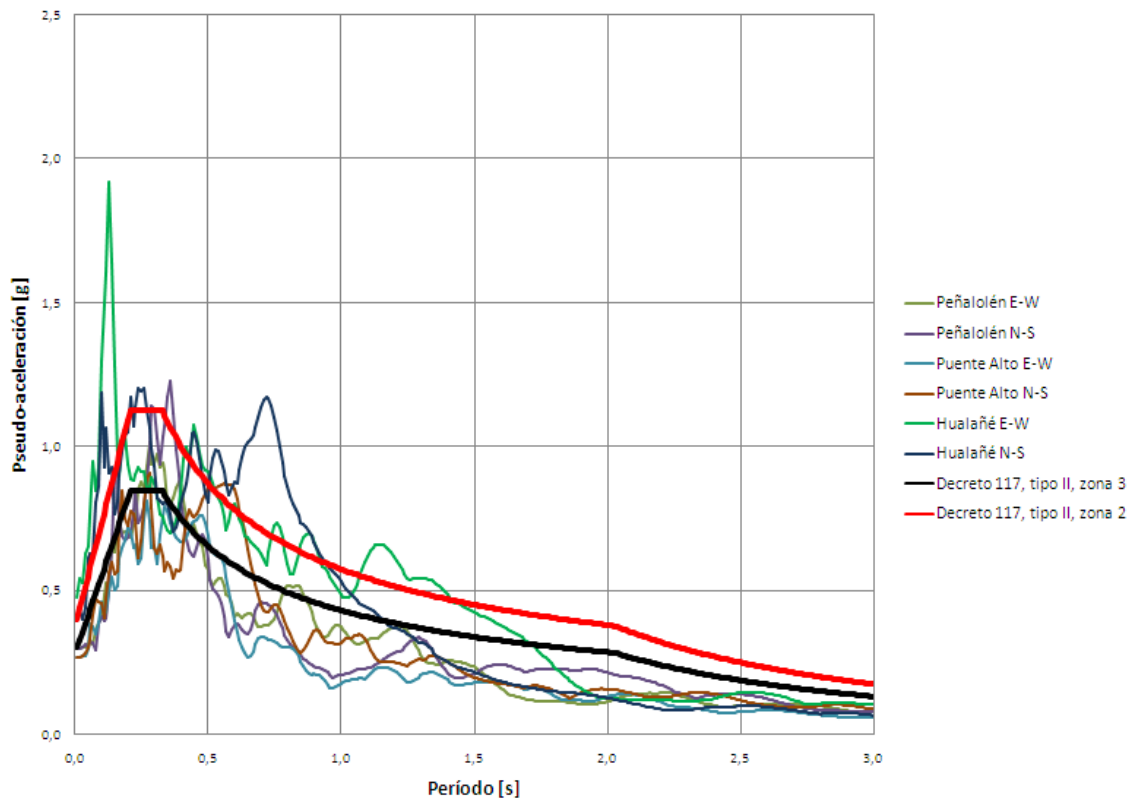


Figura 6.24: Comparación del espectro de respuesta de las estaciones de Peñalolén, Puente Alto y Hualañé con los espectros de diseño de los suelos tipo II

7. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

7.1 Discusión sobre el método SASW

Es indudable que los métodos geofísicos y el análisis espectral de ondas superficiales son un gran avance en las exploraciones geotécnicas, debido a que presentan una mayor precisión en el perfil de velocidad de ondas de corte del suelo en comparación con los métodos de reflexión y refracción sísmica, y además son bastante más económicos que los ensayos de downhole y crosshole. Por esto es que los métodos sísmicos en base a ondas superficiales están siendo insertados tanto en el mercado nacional como en el internacional, masificándose su uso.

SASW es un método eficiente para estudiar y clasificar suelos y rocas, ya que presenta una razonable precisión en la estimación del V_{S30} , con un error estimado entre un 10% a 15 % de acuerdo a dos mediciones realizadas en sitios donde previamente se ejecutó un ensayo de downhole. Además hay que destacar que el método SASW funciona en base a una metodología sencilla, rápida de aplicar en terreno y económica.

Una ventaja del método SASW es que permite la obtención de una estratigrafía indirecta del suelo en estudio, relacionando el perfil de velocidad de ondas de corte y marco geológicos del lugar prospectado. Un ejemplo es el caso de las mediciones del subsuelo de las estaciones de Peñalolén, Curicó y Antumapu, en donde el perfil de velocidades de ondas de corte tiene la distribución clásica de la rigidización de gravas fluviales en profundidad, que complementado con el marco geológico enfocado en la formación de los suelos de esos lugares, indica la existencia de grava en esos sitios.

Además el método SASW permite estimar el perfil de velocidad de ondas de corte en suelos que presentan estratos rígidos sobre otros más blandos. Sin embargo para lograr estimar perfiles de velocidad de ondas de corte en estos casos, es necesario medir al menos unos 10 m de profundidad más abajo del nivel donde se presenta el cambio de estrato para poder detectar el estrato blando en la medición. Esto genera la necesidad de desarrollar una metodología que permita medir hasta al menos 40 m a 45 m de profundidad, para obtener perfiles de velocidad de ondas de corte hasta 30 m de profundidad en todo tipo de suelo.

El método SASW no presentó problemas para estimar el perfil de velocidad de ondas de corte en todos los suelos subyacentes a las estaciones de monitoreo sísmico seleccionadas, pero hay que señalar que se midió mayoritariamente en suelos de una alta rigidez, lo que implica trabajar en altas frecuencias. No obstante, en suelos de baja rigidez se necesita equipos de medición con frecuencias naturales más bajas para poder registrar sin distorsiones todas las frecuencias en que se está trabajando; un ejemplo de esto corresponde a la medición ejecutada en la Estación de Constitución, donde los trenes de ondas superficiales generados presentaron frecuencias bajo 4.5 Hz (correspondiente a la frecuencia natural de los geófonos utilizados en este trabajo), lo que podría haber aumentado el error de la medición. Por esto mismo se recomienda usar geófonos de 1 Hz y de esta manera lograr medir a profundidades mayores a 30 m o 40 m en todo tipo de suelos.

El método SASW tiene algunas deficiencias que son mucho más preponderantes si se mide en emplazamientos urbanos densamente poblado, como el centro comercial de grandes ciudades. Una de estas deficiencias es que el ruido ambiental distorsiona las mediciones, perdiendo nitidez y llegando a casos extremos en que se hace muy difícil la interpretación de datos. Además se requiere de un espacio de medición bastante amplio, mínimo una línea horizontal de 70 m, que puede ser difícil de encontrar en el centro de las grandes ciudades. Sin embargo si se logran controlar bien estas deficiencias, el método SASW es un buen método para estimar el perfil de velocidad de ondas de corte incluso en estos casos.

7.2 Discusión sobre la respuesta sísmica de los suelos

Después de haber realizado un análisis a los espectros de respuesta del sismo del 27F se puede concluir que la norma de diseño sísmico Nch433.Of96.mod2009 y el decreto 117 presentan algunas interrogantes sobre los espectros de diseño que permiten cubrir la respuesta dinámica real de los suelos chilenos.

Para obtener el espectro de diseño de un sitio debería considerarse el perfil de velocidad de ondas de corte, ya que como se presentó en este trabajo, suelos con una distribución de rigidez variable en profundidad en los primeros 20 m a 30 m de profundidad presentaron una respuesta sísmica con más de un período predominante (incluso hasta cuatro períodos predominantes), lo que repercute finalmente en suelos con espectros de respuesta con mayores valores de pseudo-aceleración en períodos que no deberían tenerlos de acuerdo a su rigidez global. Esto implica que debería extenderse el plateau del espectro de diseño en estos casos.

No se observó una correlación entre el V_{S30} y el período predominante de la respuesta sísmica del suelo. Esto era esperable ya que el período predominante depende de muchas variables como; la profundidad a la roca, la rigidez del suelo, el contenido de frecuencias del terremoto, entre otras.

Para los sitios estudiados tampoco se observó una única correlación entre el máximo valor de pseudo-aceleración y el V_{S30} aplicable a todos los suelos. Sin embargo en suelos que tienen una misma formación geológica y ubicados en un mismo valle o cuenca, se observó que a mayor V_{S30} , menor es el valor máximo de pseudo-aceleración. El parámetro que estaría predominando en este caso es la rigidez promedio en los primeros 30 m de profundidad, sin importar la distribución de rigidez en profundidad.

Se puede concluir finalmente que el V_{S30} no es un parámetro que sea suficiente para predecir la respuesta sísmica de los suelos chilenos, requiriéndose más parámetros para la clasificación del suelo y confección del espectro de diseño de un sitio.

Un ejemplo de lo anterior corresponde a la respuesta sísmica observada en cuatro estaciones de monitoreo sísmico donde el subsuelo presenta un valor del V_{S30} entre 330 m/s y 450 m/s, de las cuales tres tuvieron un comportamiento como grava (Peñalolén, Antumapu y Curicó), en cambio la Estación de Casablanca, con un V_{S30} de 399 m/s, presentó un comportamiento totalmente diferente. Esto se podría haber predicho por ejemplo con un estudio o ensayo in-situ de sísmica que estime el período fundamental del suelo para haber entendido mejor la respuesta sísmica de estos lugares y así lograr una correcta clasificación sísmica, como por ejemplo la ejecución del método de Nakamura.

7.3 Discusión final

Dentro del contexto de la discusión sobre la respuesta sísmica de los suelos y después de observar el comportamiento de los suelos chilenos frente al terremoto de magnitud Mw 8.8 que azotó a Chile el 27 de Febrero de 2010, los métodos de sísmica que funcionan en base a ondas superficiales han demostrado ser una buena herramienta para modelar y predecir la respuesta sísmica de los suelos. Por lo tanto, el camino que está desarrollando la ingeniería chilena, de exigir estudios de V_{s30} y espectros locales e insertar estas nuevas tecnologías para obtener nuevos parámetros de estudio del suelo que antes no se consideraban (como el período fundamental), parece ser el correcto.

Para finalizar, la microzonificación surge como una excelente alternativa para comprender el comportamiento dinámico de un determinado lugar, y finalmente desarrollar un espectro de diseño adecuado. Para ello se han desarrollado en las últimas dos décadas una variedad de alternativas de prospecciones sísmicas que en conjunto permiten estimar la respuesta dinámica de un sitio, como son los métodos SASW, MASW, Nakamura y ReMi. Por esto mismo, sería importante que la ingeniería civil chilena implemente estas tecnologías y enfoques del criterio y forma de clasificación con el fin de obtener resultados cada vez más precisos, con el fin de mejorar el diseño sísmico de la edificación chilena.

7.4 Conclusiones finales

Las conclusiones finales del trabajo son:

- Se logró implementar el método SASW para estimar perfiles de velocidad de ondas de corte hasta profundidades de mínimo 30 m con una precisión aceptable en el V_{S30} , incluso en suelos con estratos rígidos sobre otros más blandos, utilizando una metodología sencilla, rápida de aplicar en terreno y económica.
- Suelos con una distribución de rigidez no monótonamente creciente en los primeros 30 m de profundidad presentaron varios períodos con valores altos de pseudo-aceleración. Esto afecta el espectro de diseño debido a que es necesario expandir el plateau en estos casos.
- En suelos con una misma formación geológica y ubicados en un mismo valle o cuenca se observó que a mayor valor de V_{S30} menor es el valor máximo de pseudo-aceleración en el espectro de respuesta.
- El V_{S30} y los parámetros de la respuesta sísmica no presentaron una única correlación significativa, por tanto se requieren más parámetros para poder hacer una correcta clasificación y un espectro de diseño adecuado al lugar en estudio, que cubra bien la respuesta sísmica real registrada.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez L., Grimme K., 1964, "El suelo de fundación de Valparaíso y Viña del Mar", Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile.
- Boroschek R., 2010, "Registros del terremoto del Maule Mw=8.8 27 Febrero de 2010", RENADIC.
- Corvalán D. J., Munizaga S. F., 1972, "Edades radiométricas de rocas intrusivas y metamórficas de la Hoja Valparaíso – San Antonio", Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile.
- de la Oz K., 2007, "Estimación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares gruesos". Tesis, Universidad de Chile.
- Decreto 117 que modifica la norma Nch 433, promulgado el Febrero de 2011
- Das B. M., "Principles of Soil Dynamics", Southern Illinois University at Carbondale.
- Granda A., Granda T., Madrid A., "Caracterización geotécnica del terreno en el trazado de túneles en zonas urbanas mediante el método de la sísmica pasiva", International Geophysical Technology, S.L.
- Green R. A., Lee J., Cameron W. and Arenas A., SICEGE "Evaluation of various definitions of characteristic period of earthquake ground motions".
- Joh S.-H. (1996) "Advances in the data interpretation technique for Spectral-Analysis-of Surface-Waves (SASW) measurements", *Requirements for the degree of Doctor of Philosophy*, The University of Texas at Austin.
- Karzulovic K. J., "Sedimentos cuaternarios y aguas subterráneas en la cuenca de Santiago".
- Kramer S., "Earthquake and Soil Dynamics".
- Nakamura Y., 1987, "A Method for Dynamic Characteristics Estimation SubSurface using Microtremor on the Ground Surface".
- Nakamura Y., 2000, "Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura Technique and Its Applications".
- Nakamura Y., 2008, "On the H/V Spectrum".

- Norma NCh433.Of1996.mod2009, “Diseño sísmico de edificios”, Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
- Norma ASCE 7-05 cap. 11, 2006.
- Ochoa F., 2007, “Caracterización geotécnica a través del uso de ondas Rayleigh”, *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil*, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Peredo V., 2011, “Aplicación método SASW en suelos”, *Memoria para optar al título de Ingeniera Civil*, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Rodríguez-Marek A., Bay J. A., Park K., Boroschek R., 2010, “Engineering Analysis of Ground Motion Records from the 2001 M_w 8.4 Southern Peru Earthquake”.
- Satoh T., Yamagak K., Rodriguez J.A., 1991, “Soil profiling by Spectral Analysis of Surface Waves”, 2° International Conference on Recent Advances in Geotechnical.
- Stokoe K. H., Joh S.-H., Woods R. D., “Some Contributions of In Situ Geophysical Measurements to Solving Geotechnical Engineering Problems”, ISSMFE Technical Committee 10 for XIII ICSMFE, Geophysical Characteristics of Sites, A. A. Balkema Publishers/Rotterdam & Brookfiel, Netherlands, pp. 146.
- Stokoe K. H., Wright S. G., Bay J. A., Roësset J. M., “Characterization of geotechnical sites by SASW method”, University of Texas at Austin.
- Stokoe K. H., 2004, “SASW Measurements at the NEES Garner Valley Test Site, California”.
- Stokoe K. H., Yin-Cheng Lin, Farn-Yuh Menq, Brent Rosenblad, Abril de 2005, “SASW Measurements in Taiwan at 26 Strong-Motion Recording Stations: Summary Report of the Shear Wave Velocity Profiles, for Pacific Earthquake Engineering Research”.
- Stokoe K. H., NEES Presentation, “Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) Test at Mount Princeton, Colorado”, June 2009.
- Verdugo R., 2002, “Amplification phenomena observed in downhole array records generated on a subductive environment”.
- Wall Z. R., Gana P., Gutiérrez P. A., 1996, “Mapa geológico del área de San Antonio – Melipilla”, Subdirección Nacional de Geología.

ANEXO A: OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE DISPERSIÓN

Estación de Lolloe

Obtención de la curva de dispersión

A continuación se presenta la metodología de cómo se obtuvo de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Lolloe, siguiendo la expuesta en el capítulo 3. Primero se incluyen las curvas de dispersión de los registros con espaciamentos entre geófonos menores a 32 m (Figura A.1). Luego se agregan las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 32 m (Figura A.2). A continuación se eliminan las curvas que no se traslapan con las insertadas en el paso anterior (Figura A.3). Se repite este procedimiento para las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 40 m (Figuras A.4 y A.5). Finalmente se obtiene la curva de dispersión experimental del subsuelo promediando las curvas de dispersión que se seleccionaron en las etapas previas.

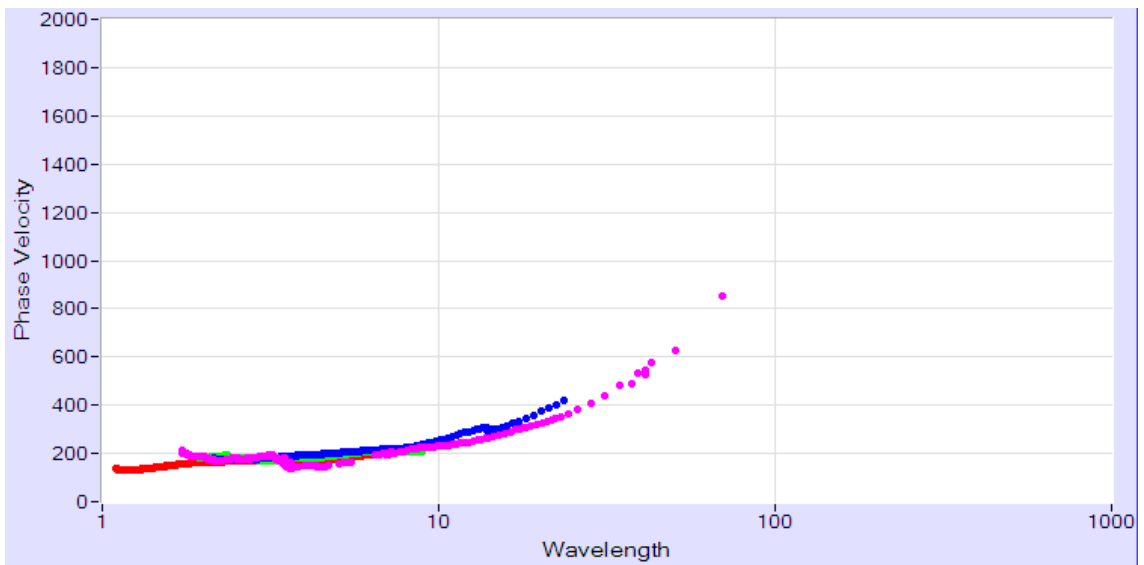


Figura A.1: Paso 1, inserción de las curvas de dispersión de los registros con espaciamentos de 2 m, 4 m, 8 m y 24 m.

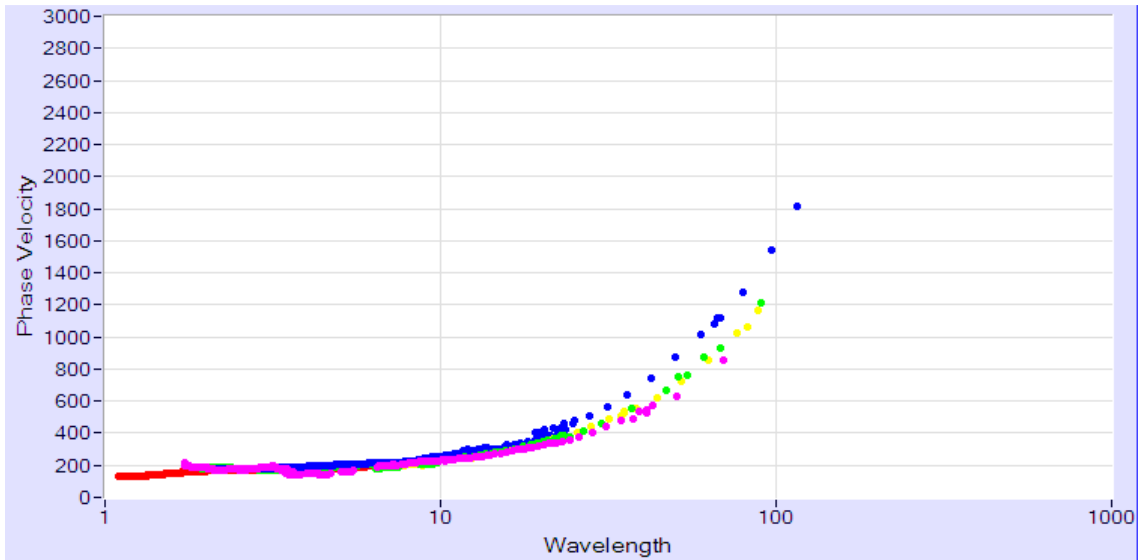


Figura A.2: Paso 2, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 32 m

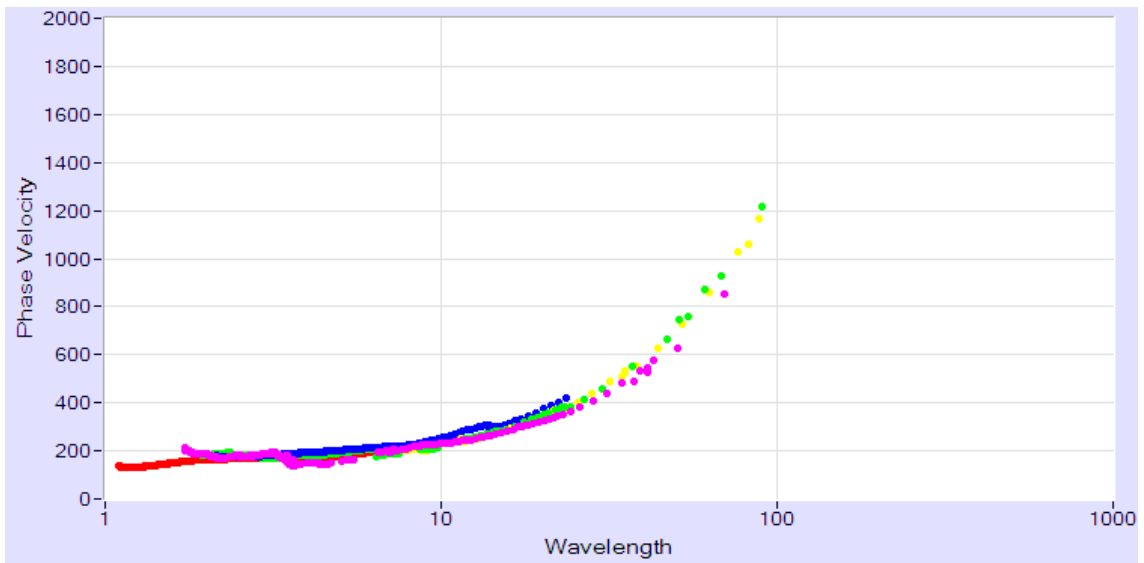


Figura A.3: Paso 3, después de la eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 32 m que no se traslapan con las insertadas

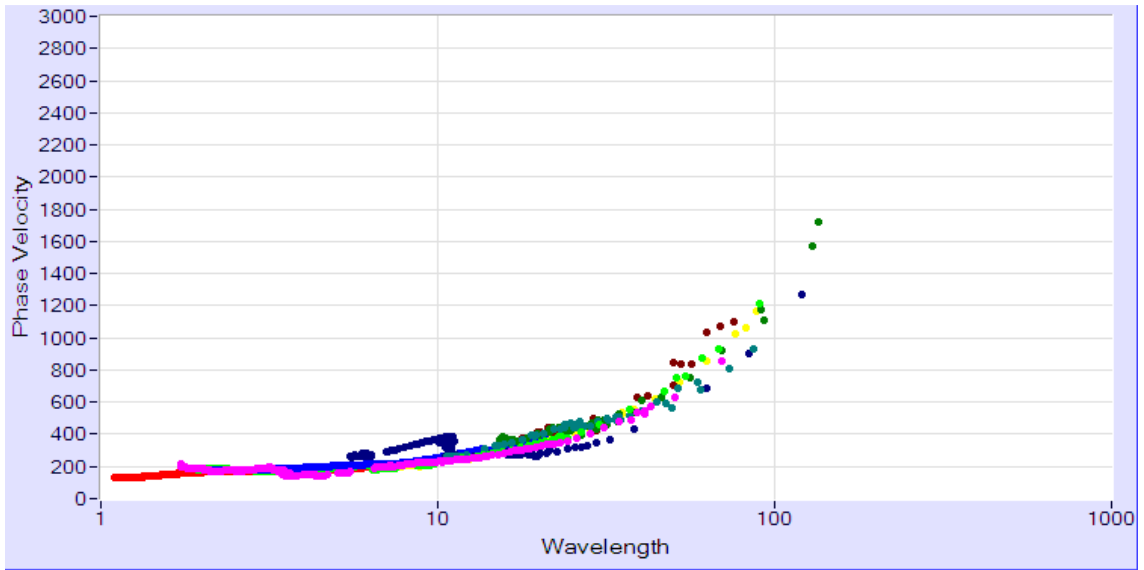


Figura A.4: Paso 4, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 40 m

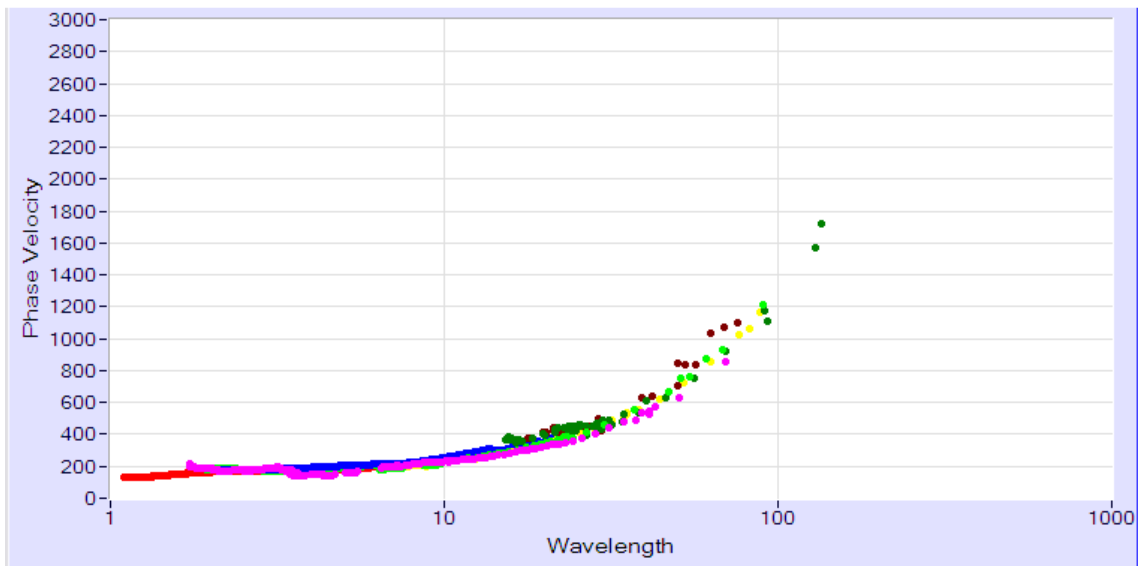


Figura A.5: Paso 5, eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 40 m que no se traslapan con las insertadas en los anteriores

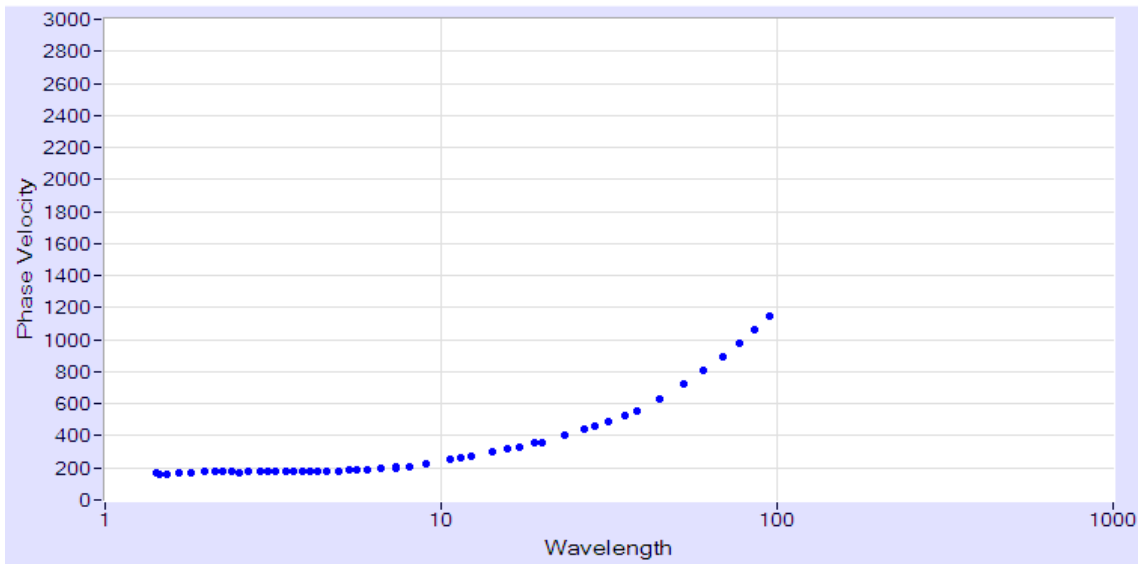


Figura A.6: Paso 6, curva de dispersión experimental del subsuelo del lugar, promediando las curvas de dispersión presentadas en la figura A.5

Análisis espectral de los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión de la Estación de Lollole

A continuación se presentan las figuras obtenidas del análisis espectral realizado a los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Lollole. Estas figuras incluyen los espectros de potencia para el registro de cada geófono y el ángulo de fase empaquetado y desempaquetado, para los distintos espaciamientos.

Es importante mencionar que para algunos espaciamientos, se usaron más de una medición.

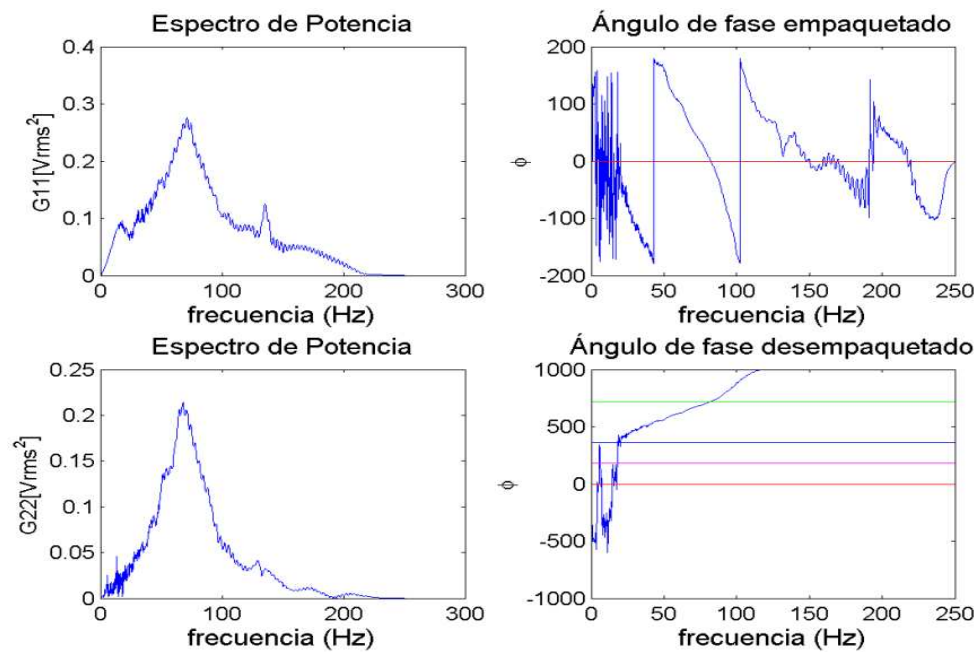


Figura A.7: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 2 m

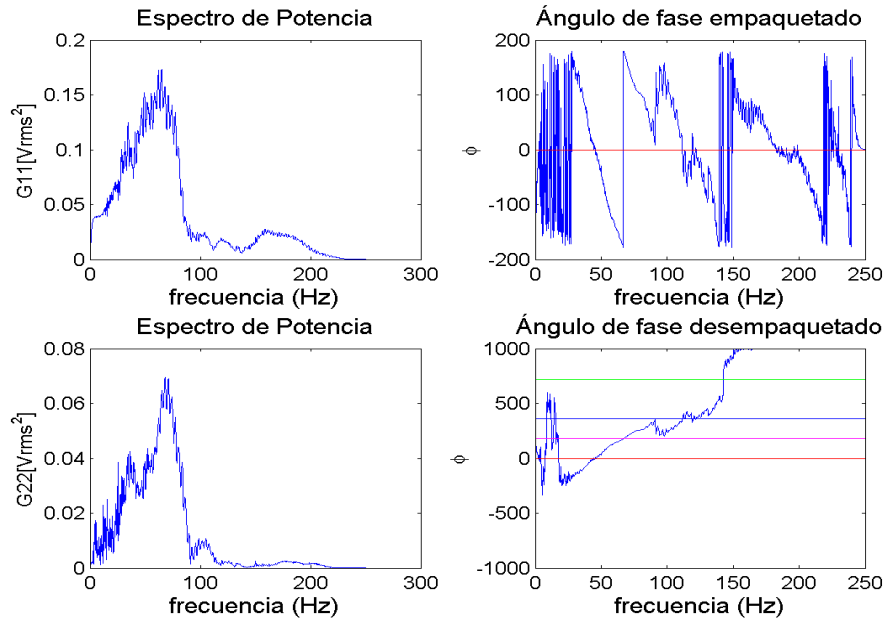


Figura A.8: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamento igual a 4 m

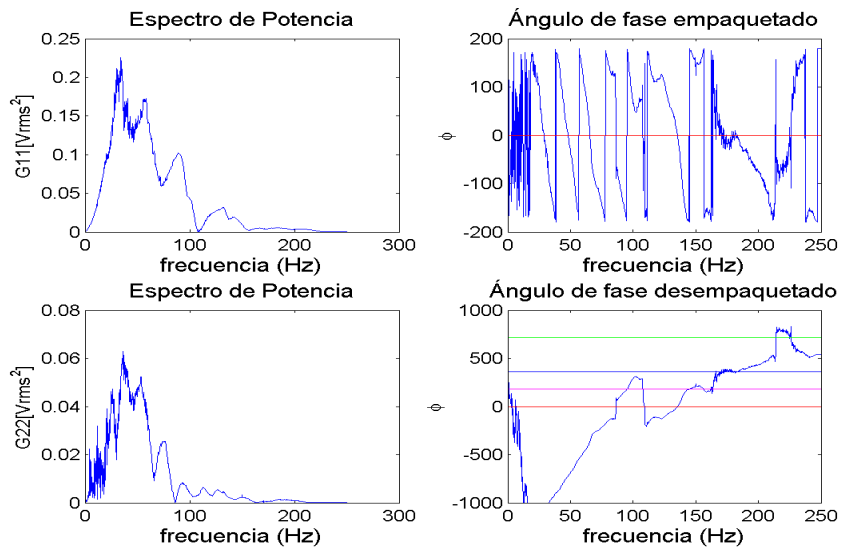


Figura A.9: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamento igual a 8 m

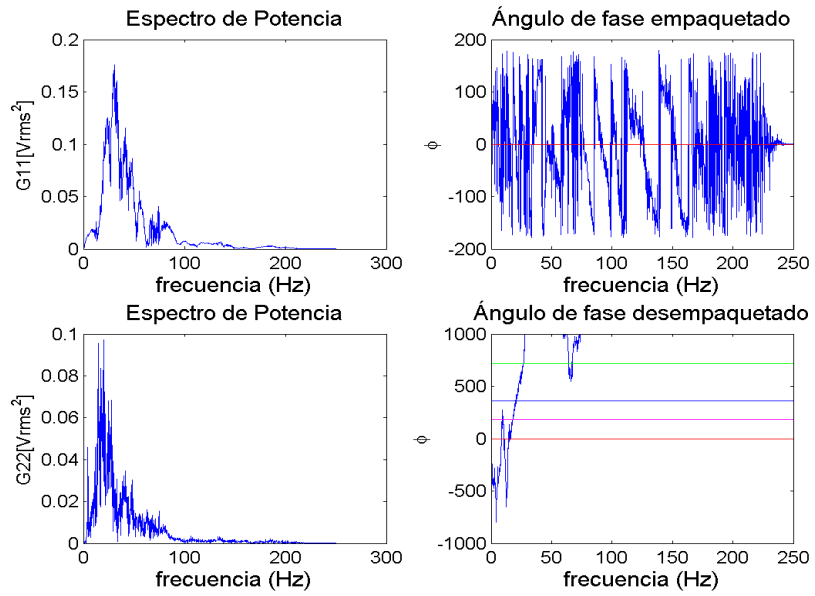


Figura A.10: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciado igual a 24 m

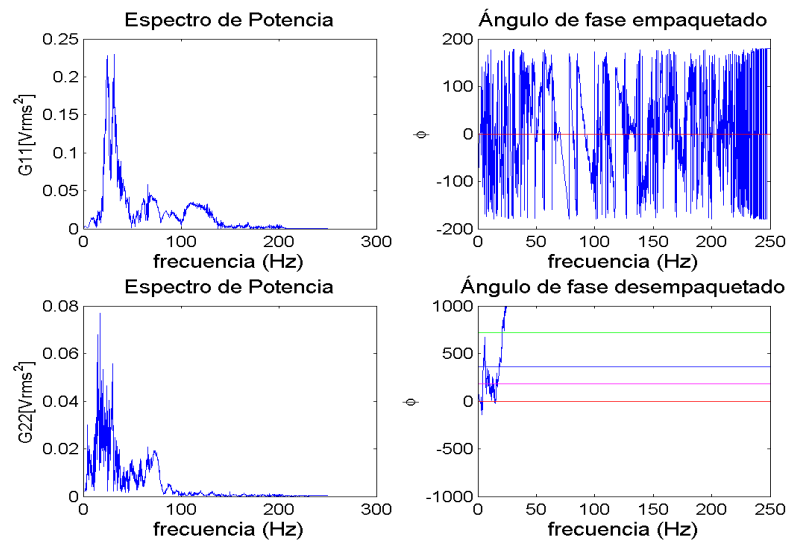


Figura A.11: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciado igual a 32 m

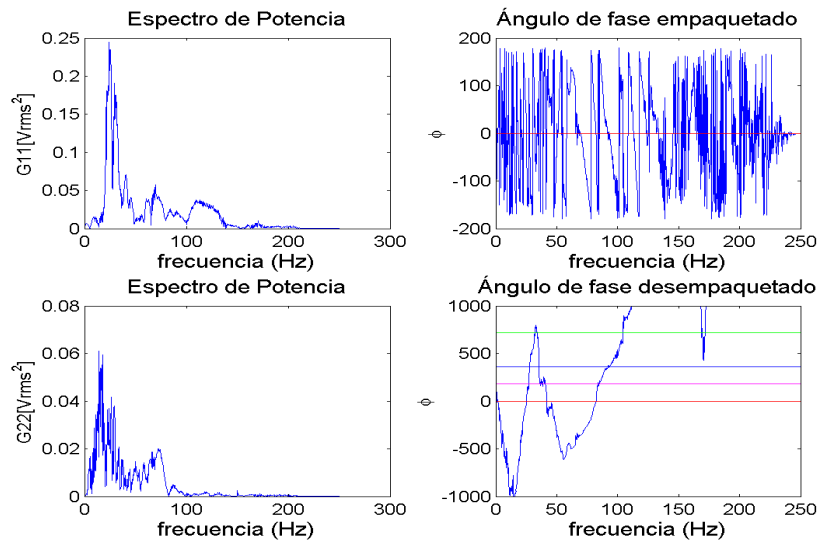


Figura A.12: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 32 m

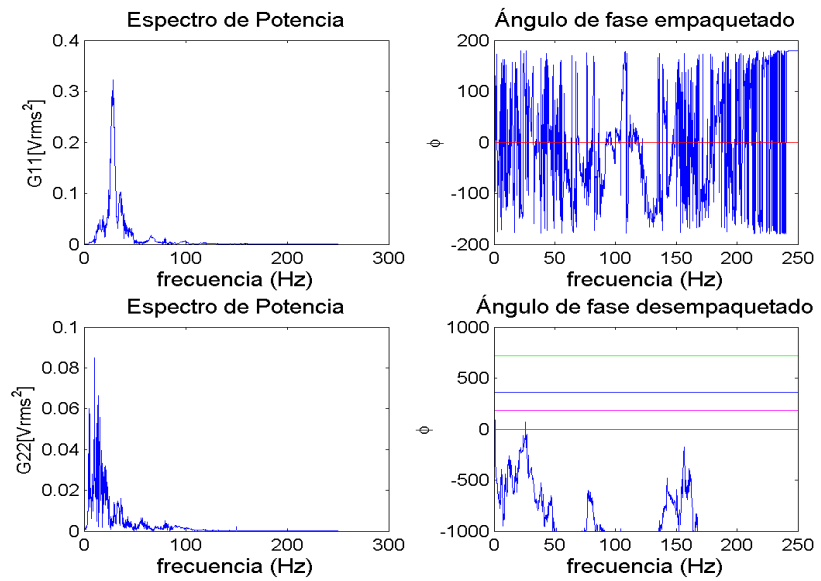


Figura A.13: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 40 m

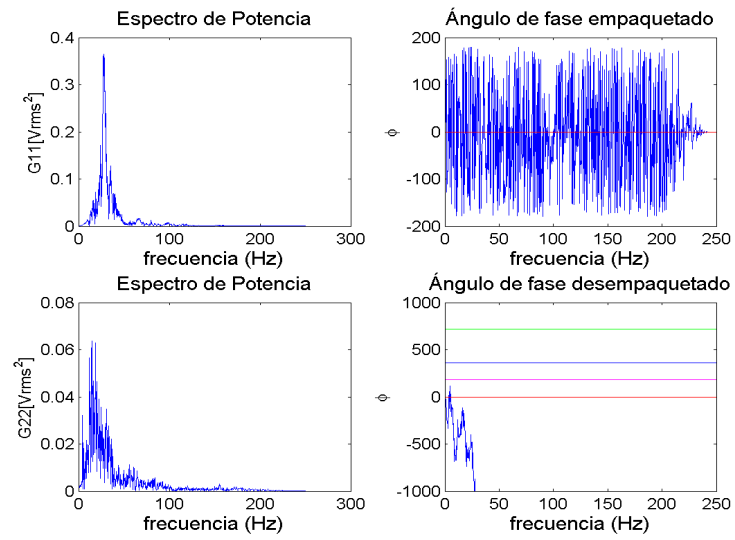


Figura A.14: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 40 m

Estación de Peñalolén

Obtención de la curva de dispersión

A continuación se presenta la metodología de cómo se obtuvo de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Peñalolén, siguiendo la expuesta en el capítulo 3. Primero se incluyen las curvas de dispersión de los registros con espaciamentos entre geófonos menores a 32 m (Figura B.1). Luego se agregan las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 32 m (Figura B.2). A continuación se eliminan las curvas que no se traslapen con las insertadas en el paso anterior (Figura B.3). Se repite este procedimiento para las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 40 m (Figuras B.4 y B.5). Finalmente se obtiene la curva de dispersión experimental del subsuelo promediando las curvas de dispersión que se seleccionaron en las etapas previas.

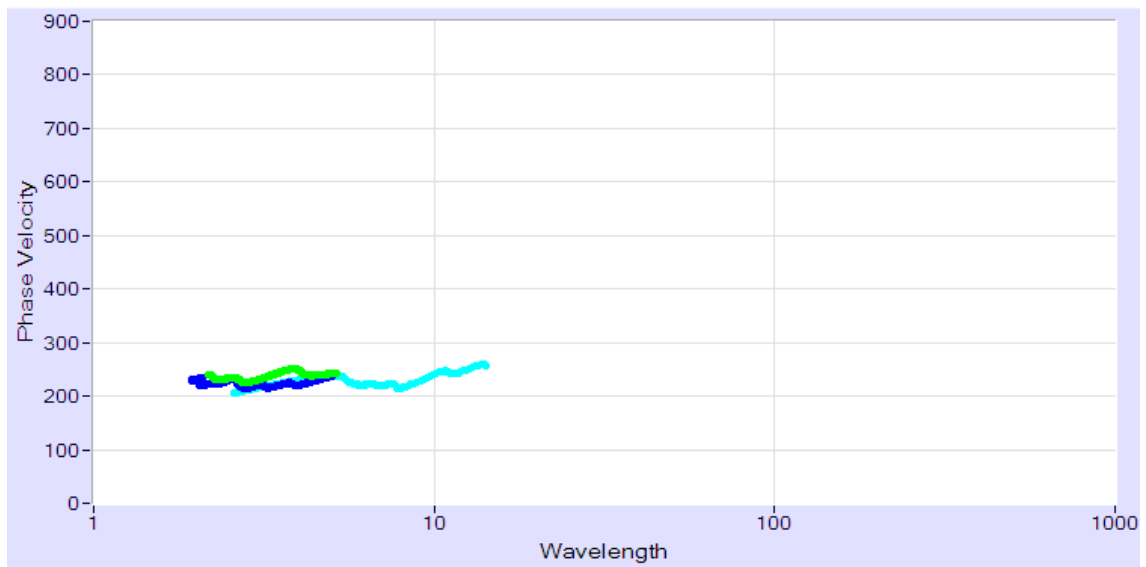


Figura B.1: Paso 1, inserción de las curvas de dispersión de los registros con espaciamientos de 2 m, 4 m y 8 m

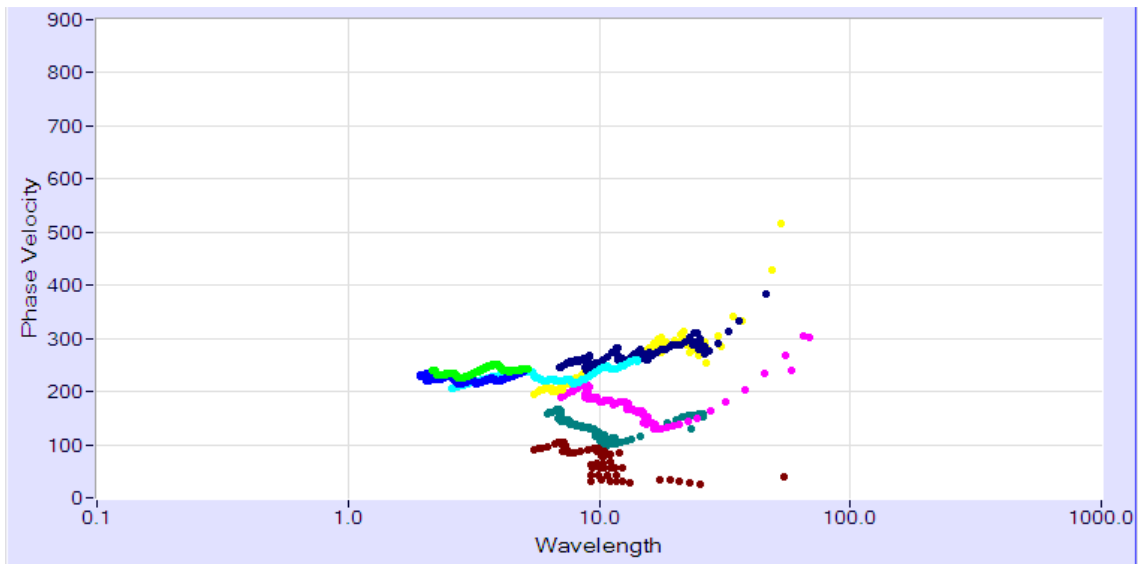


Figura B.2: Paso 2, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 32 m

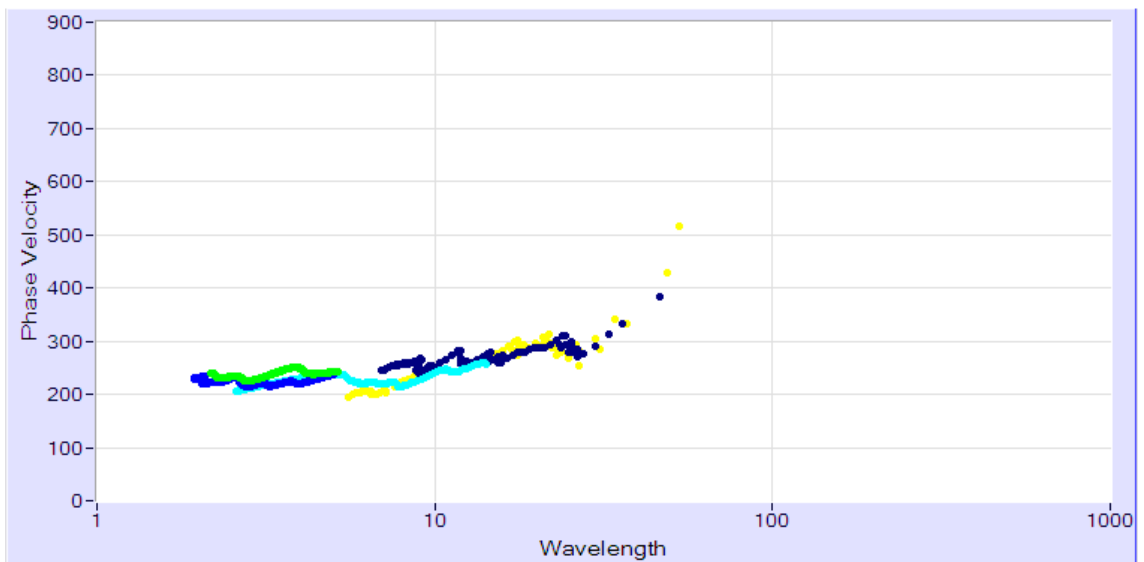


Figura B.3: Paso 3, después de la eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 32 m que no se traslapen con las insertadas

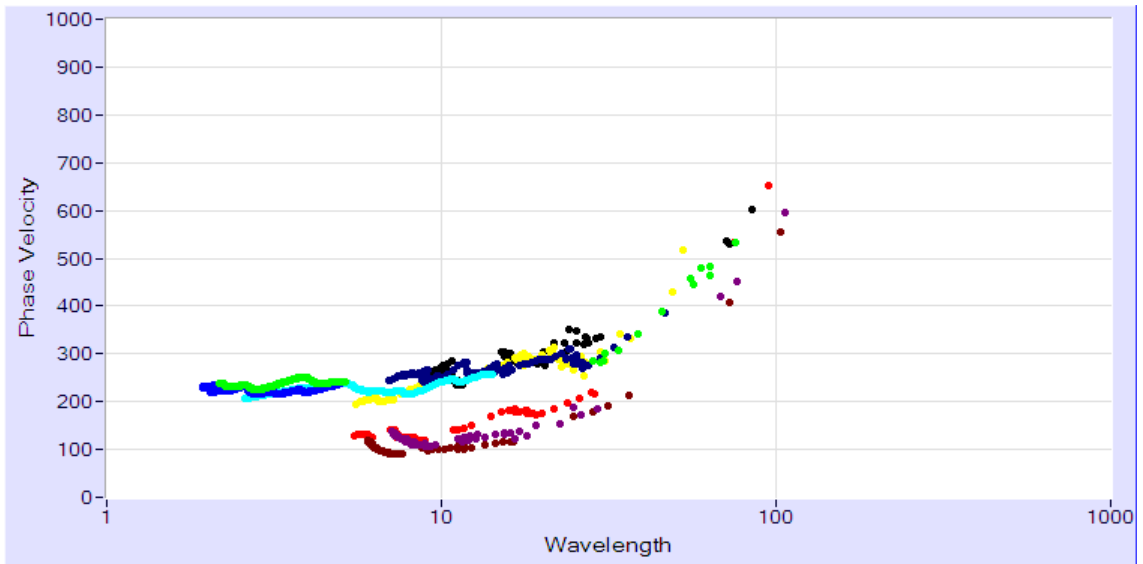


Figura B.4: Paso 4, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 40 m

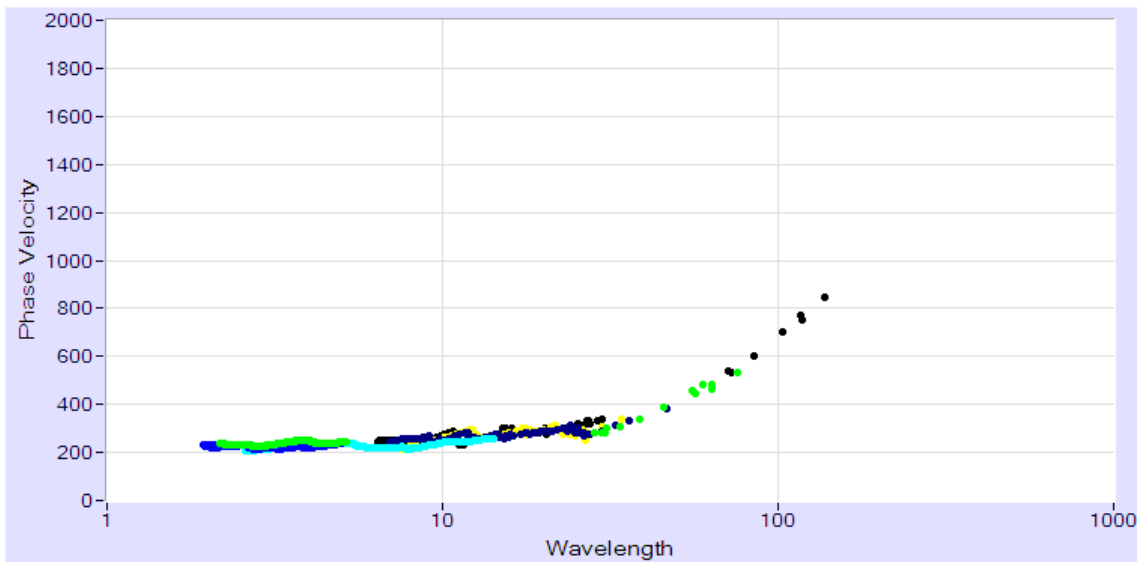


Figura B.5: Paso 5, eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 40 m que no se traslapan con las insertadas en los anteriores

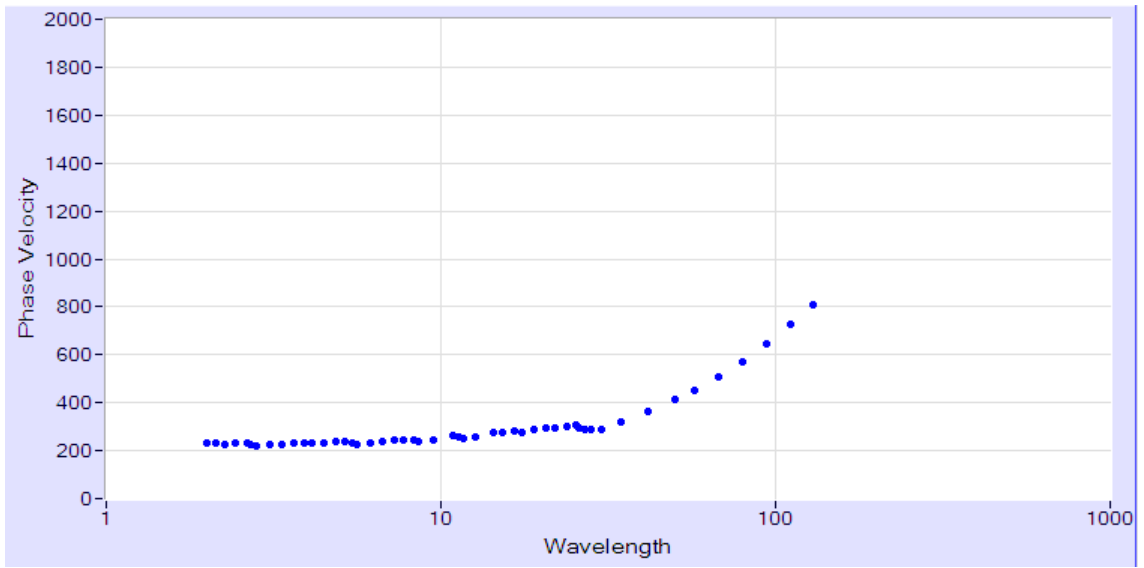


Figura B.6: Paso 6, curva de dispersión experimental del subsuelo del lugar, promediando las curvas de dispersión presentadas en la figura B.5

Análisis espectral de los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión de la Estación de Peñalolén

A continuación se presentan las figuras obtenidas del análisis espectral realizado a los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Peñalolén. Estas figuras incluyen los espectros de potencia para el registro de cada geófono y el ángulo de fase empaquetado y desempquetado, para los distintos espaciamientos.

Es importante mencionar que para algunos espaciamientos, se usaron más de una medición.

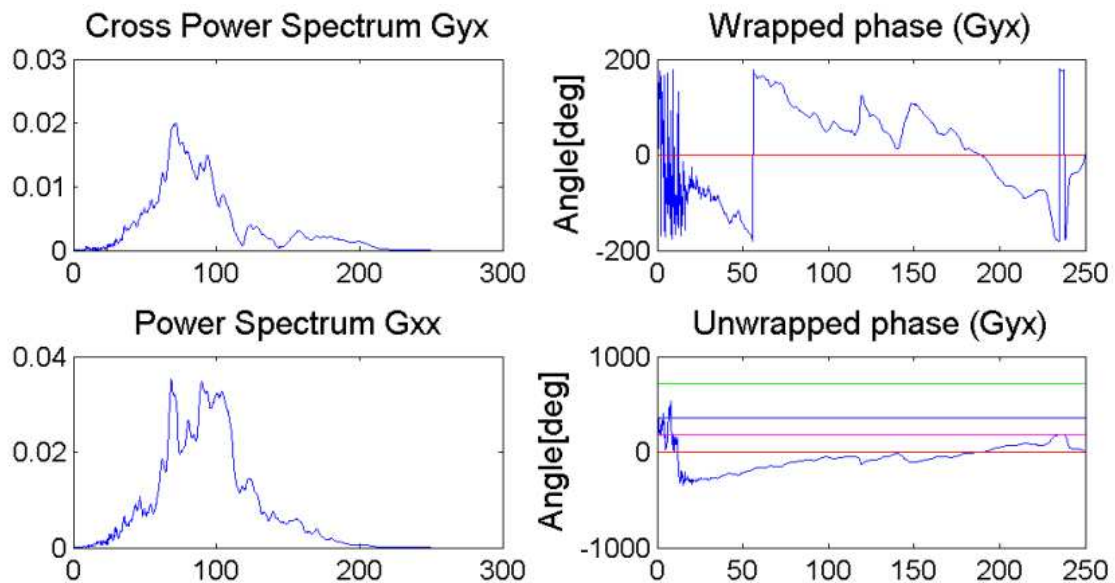


Figura B.7: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 2 m

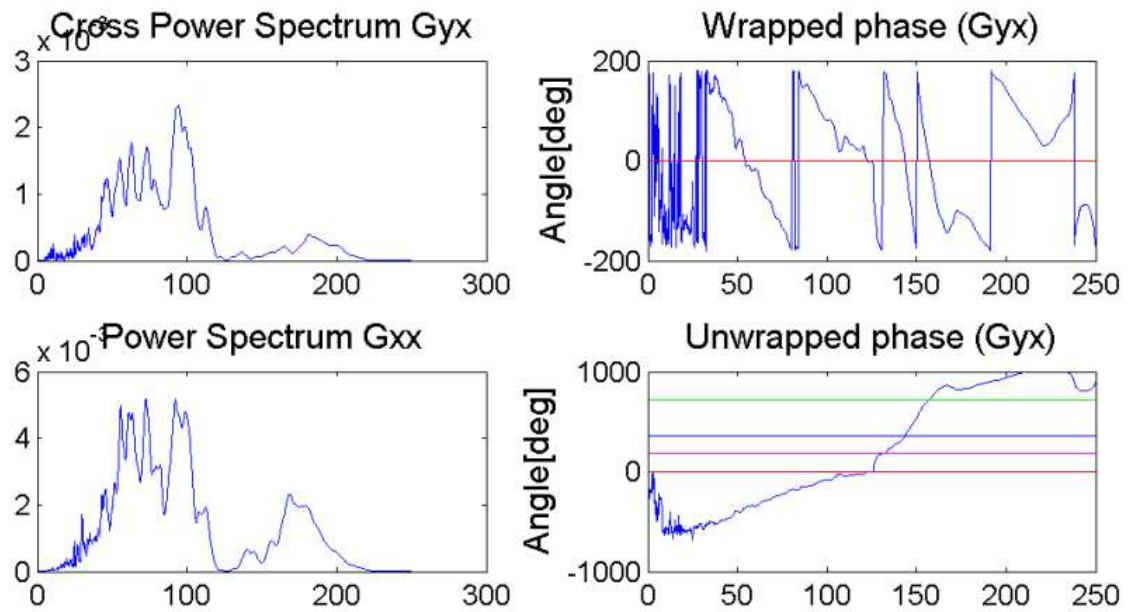


Figura B.8: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 4 m

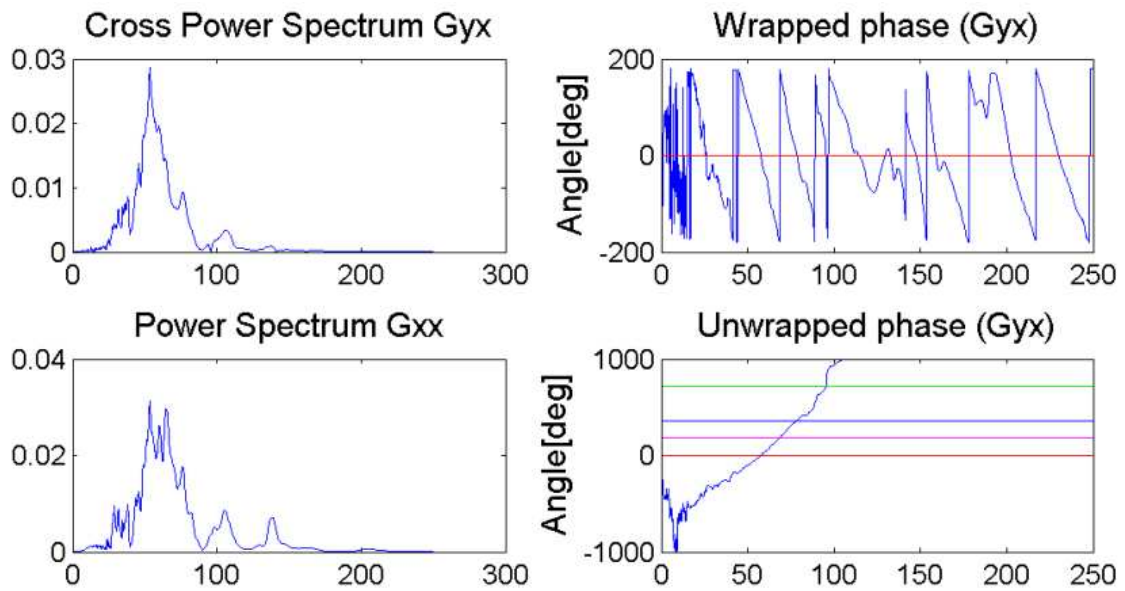


Figura B.9: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 8 m

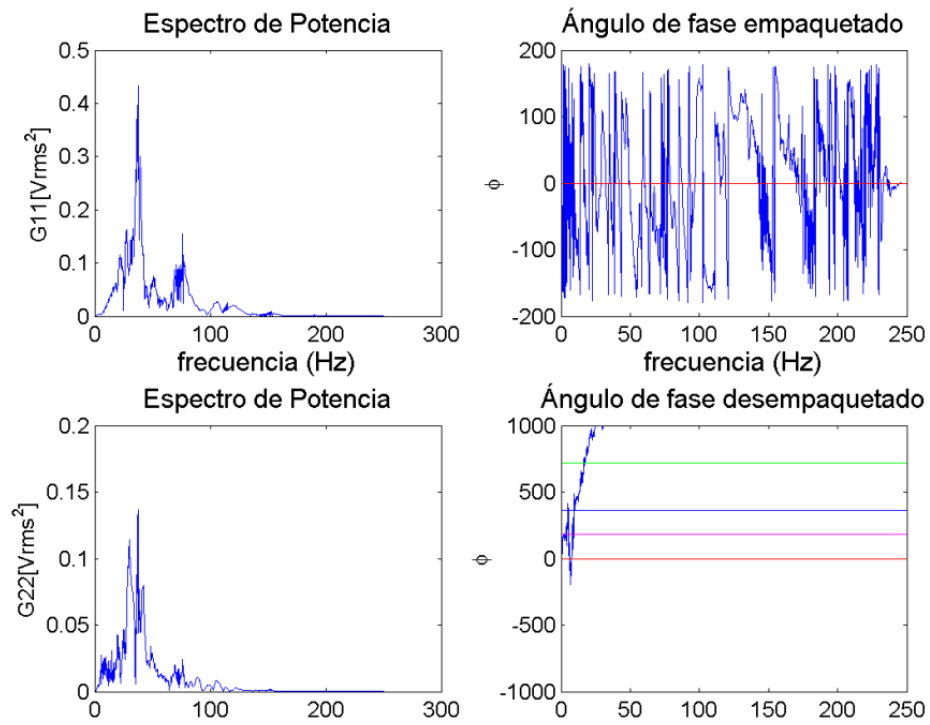


Figura B.10: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamento igual a 32 m

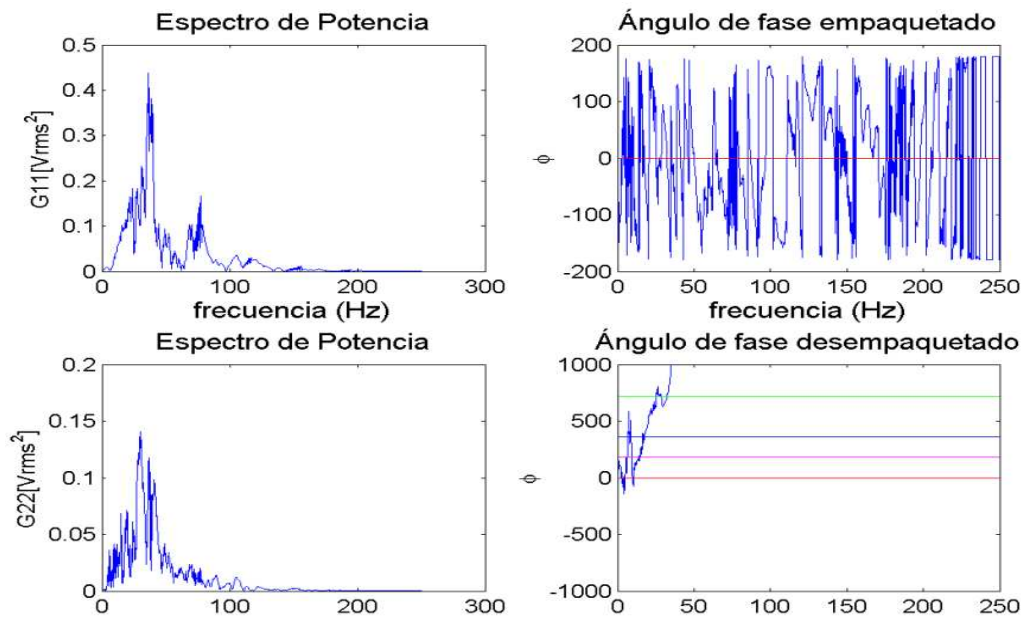


Figura B.11: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamento igual a 32 m

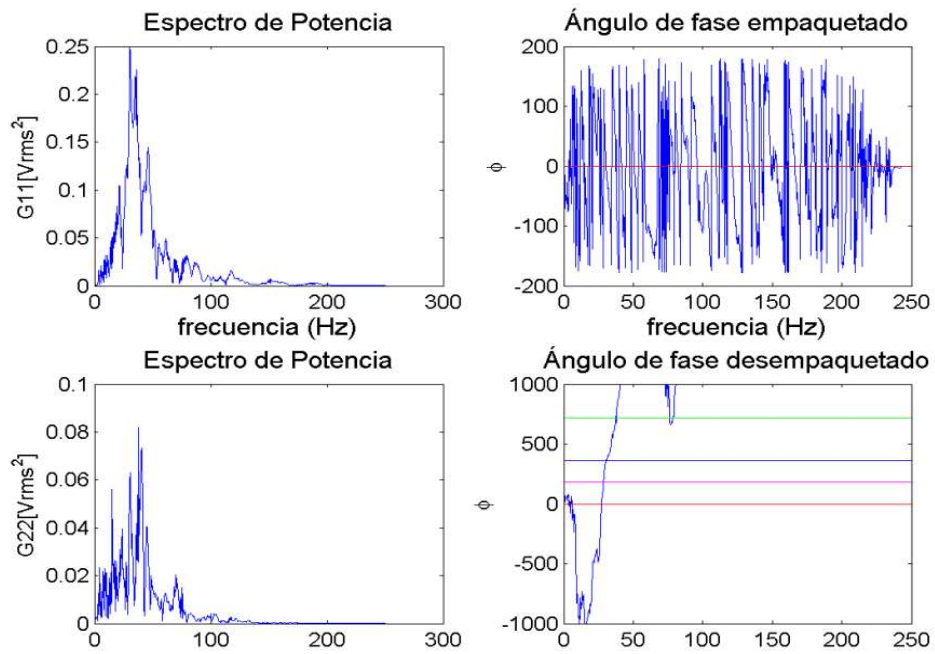


Figura B.12: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 40 m

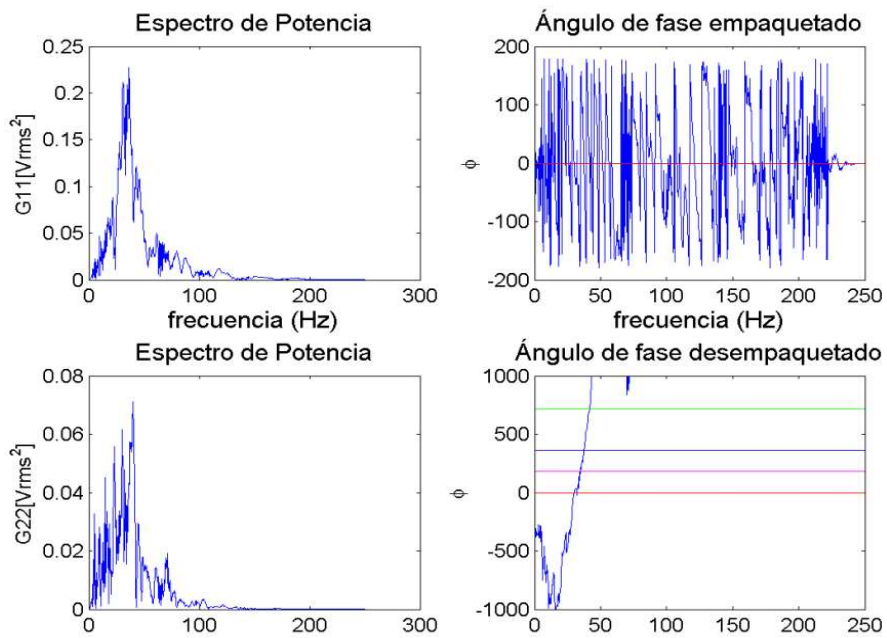


Figura B.13: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 40 m

Estación de Puente Alto

Obtención de la curva de dispersión

A continuación se presenta la metodología de cómo se obtuvo de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Puente Alto, siguiendo la expuesta en el capítulo 3. Primero se incluyen las curvas de dispersión de los registros con espaciamentos entre geófonos menores a 32 m (Figura C.1). Luego se agregan las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 32 m (Figura C.2). A continuación se eliminan las curvas que no se traslapen con las insertadas en el paso anterior (Figura C.3). Se repite este procedimiento para las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 40 m (Figuras C.4 y C.5). Finalmente se obtiene la curva de dispersión experimental del subsuelo promediando las curvas de dispersión que se seleccionaron en las etapas previas.

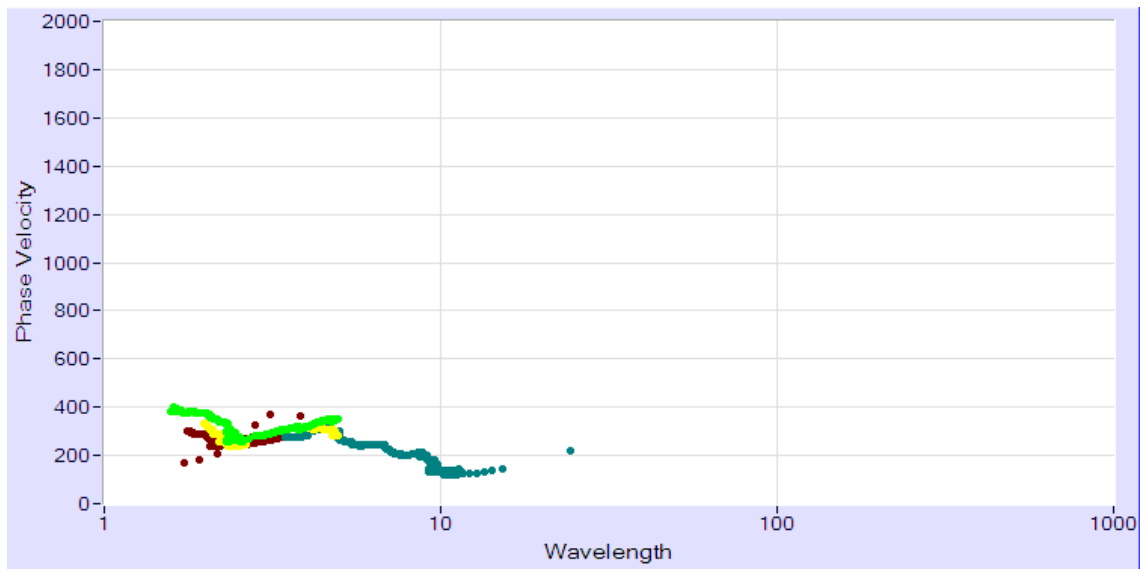


Figura C.1: Paso 1, inserción de las curvas de dispersión de los registros con espaciamientos de 8 m, 16 m y 24 m.

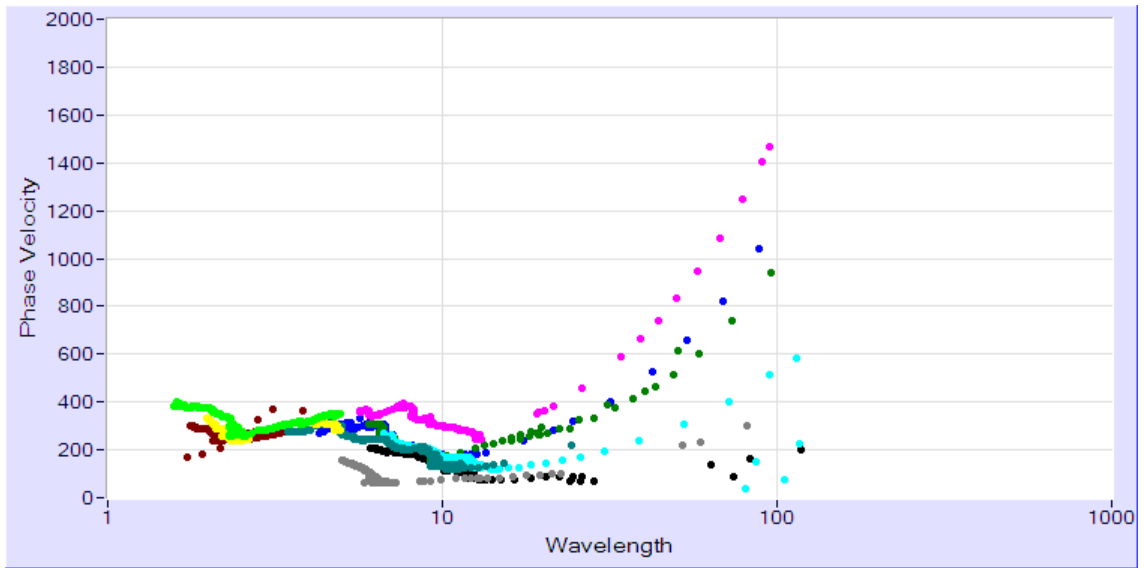


Figura C.2: Paso 2, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento de 32 m

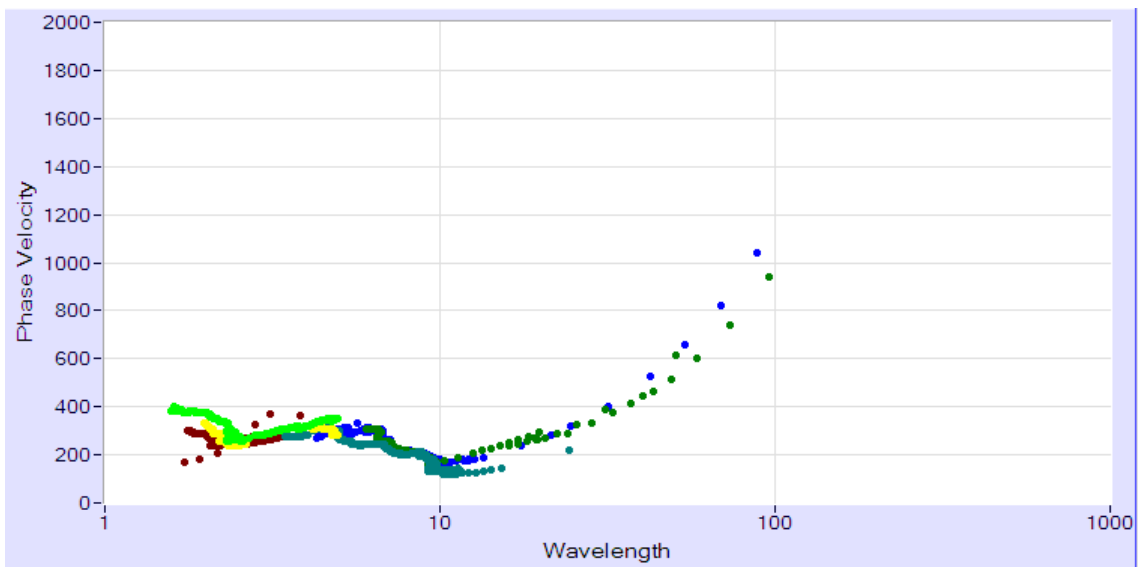


Figura C.3: Paso 3, después de la eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento de 32 m que no se traslapen con las insertadas

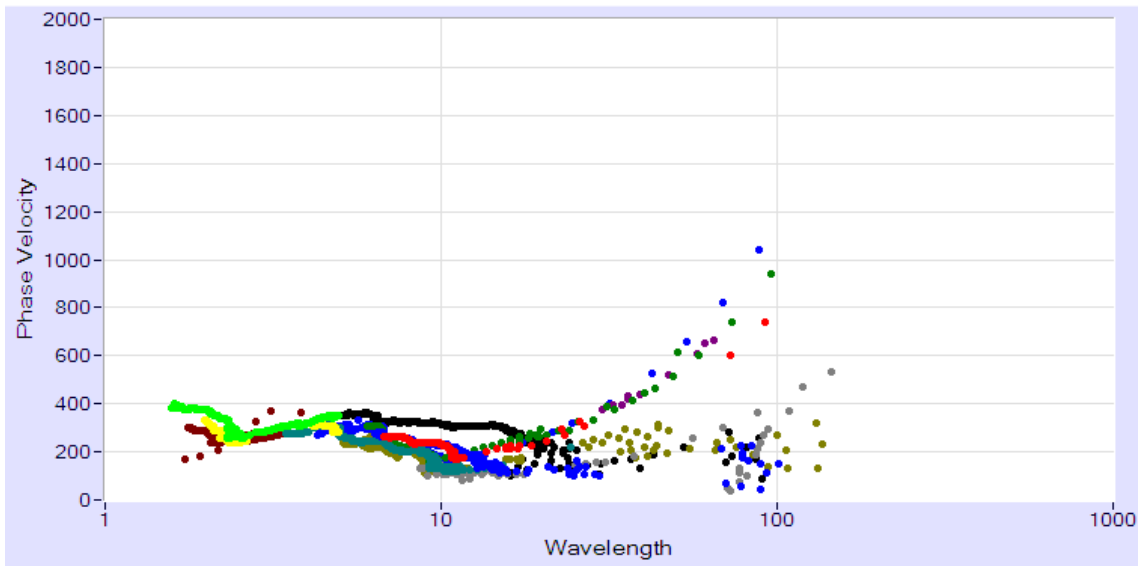


Figura C.4: Paso 4, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento de 40 m

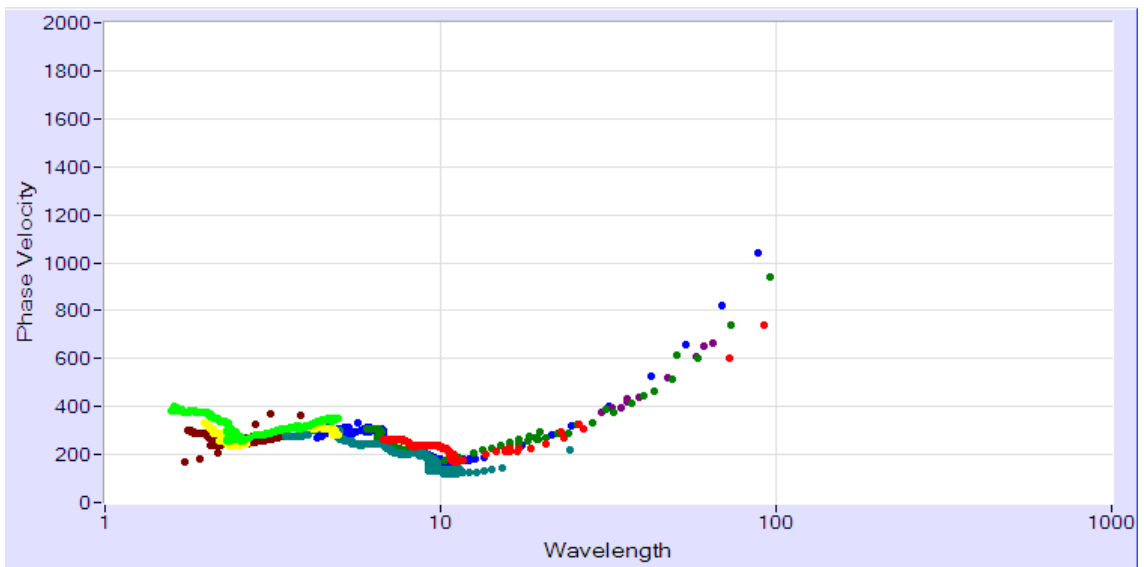


Figura C.5: Paso 5, eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento de 40 m que no se traslapan con las insertadas en los anteriores

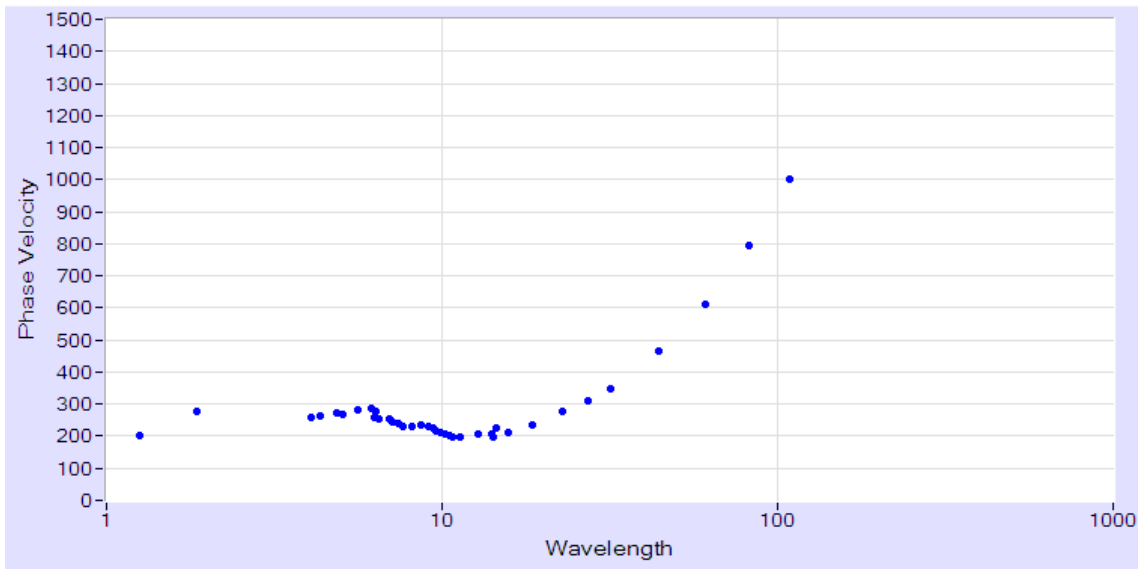


Figura C.6: Paso 6, curva de dispersión experimental del subsuelo del lugar, promediando las curvas de dispersión presentadas en la figura C.5

Análisis espectral de los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión de la Estación de Puente Alto

A continuación se presentan las figuras obtenidas del análisis espectral realizado a los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Puente Alto. Estas figuras incluyen los espectros de potencia para el registro de cada geófono y el ángulo de fase empaquetado y desempquetado, para los distintos espaciamientos.

Es importante mencionar que para algunos espaciamientos, se usaron más de una medición.

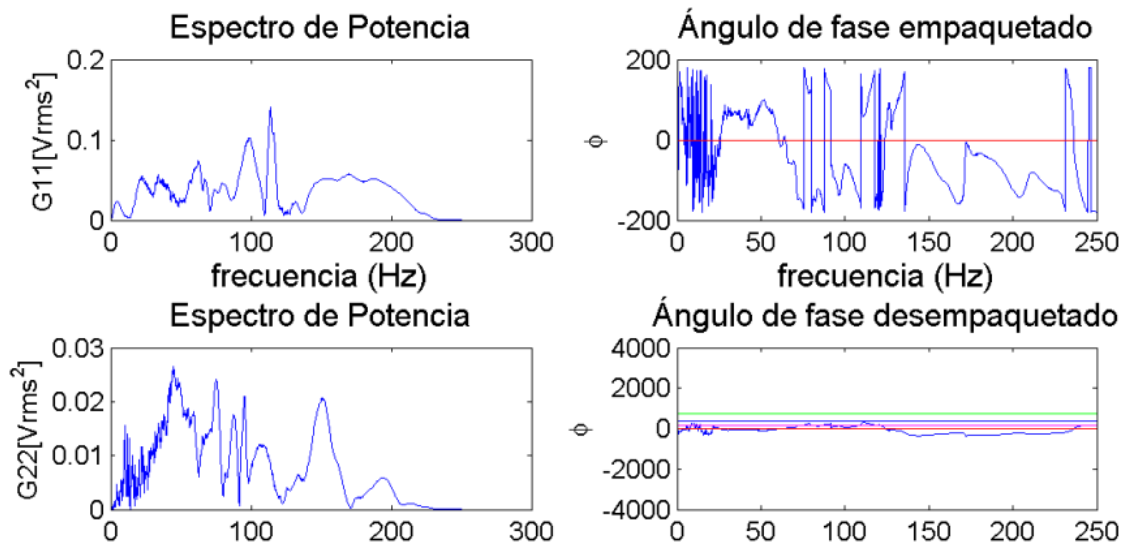


Figura C.7: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 8 m

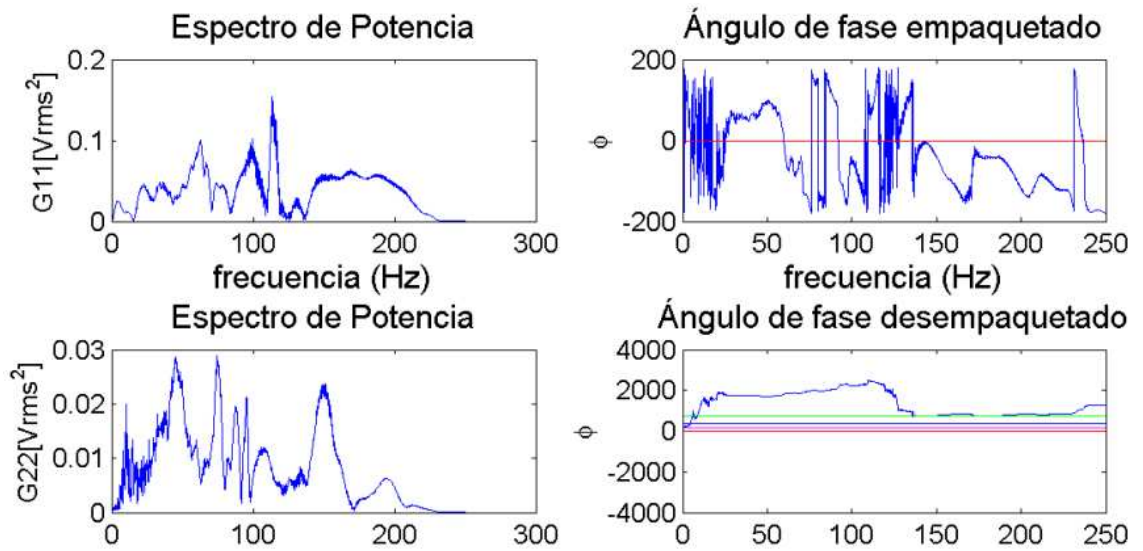


Figura C.8 Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 8 m

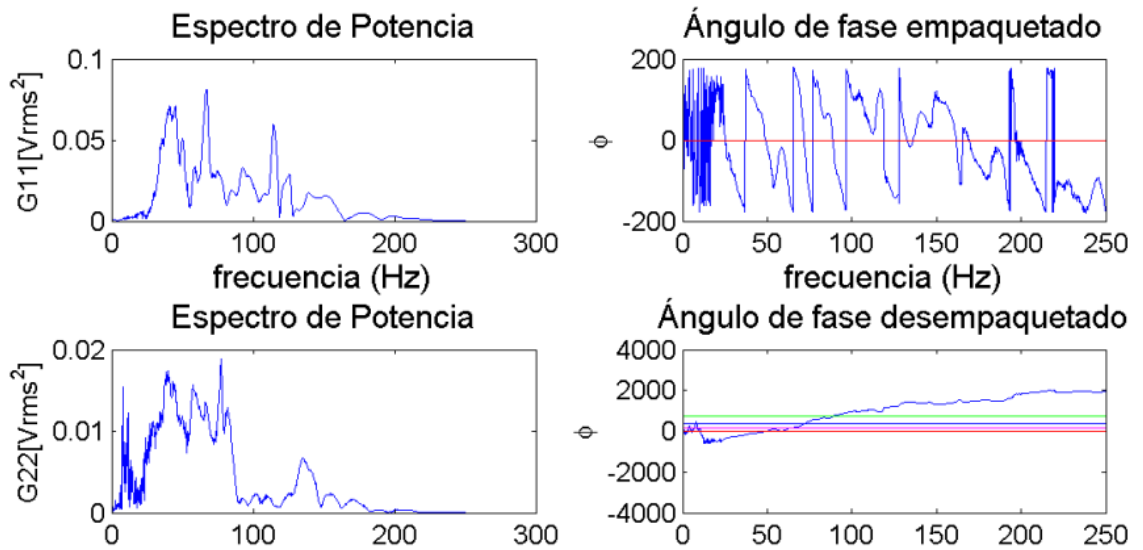


Figura C.9: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 16 m

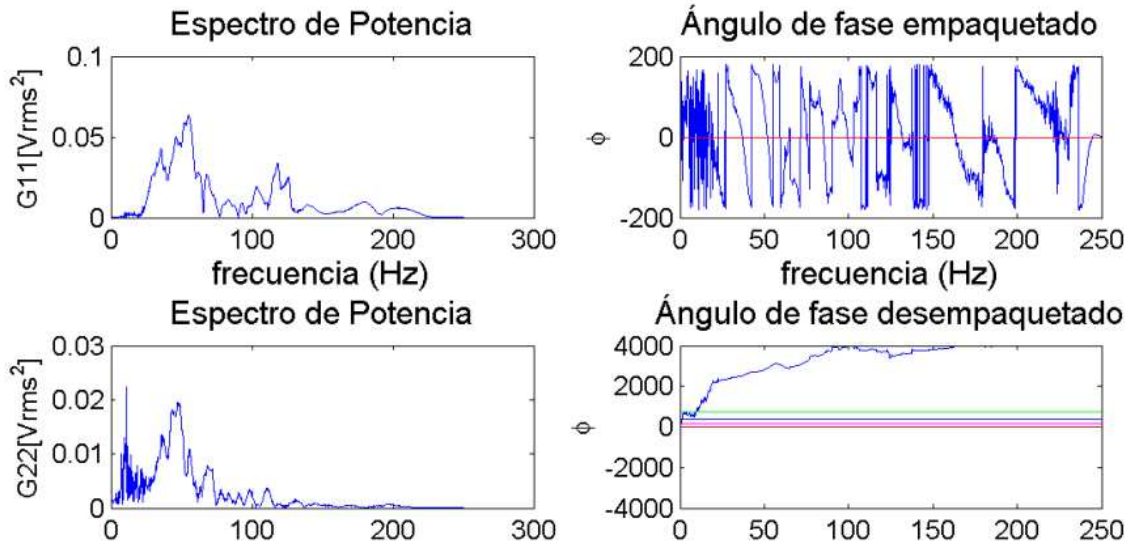


Figura C.10: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 24 m

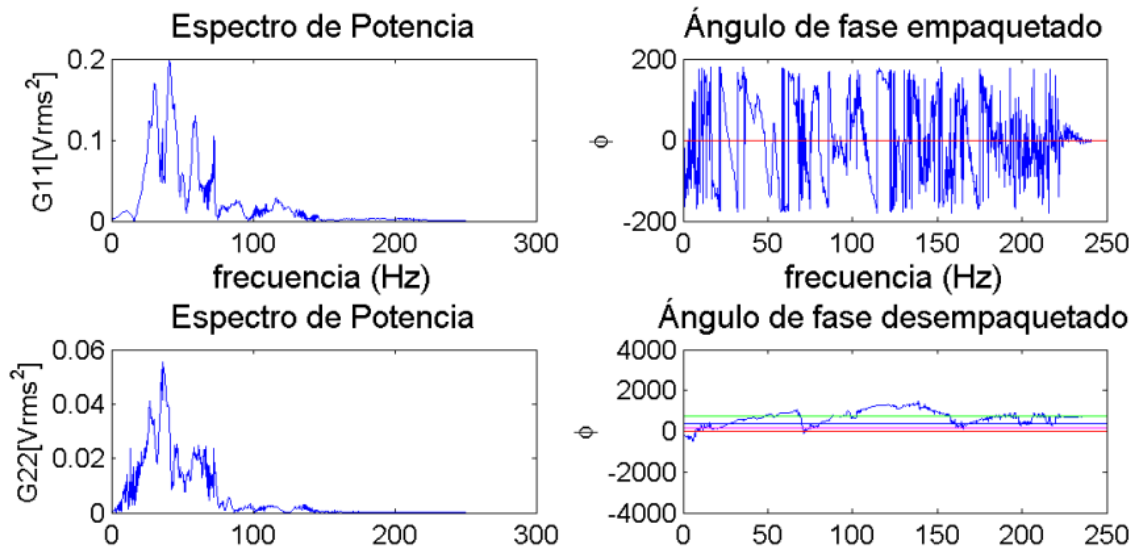


Figura C.11: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 32 m

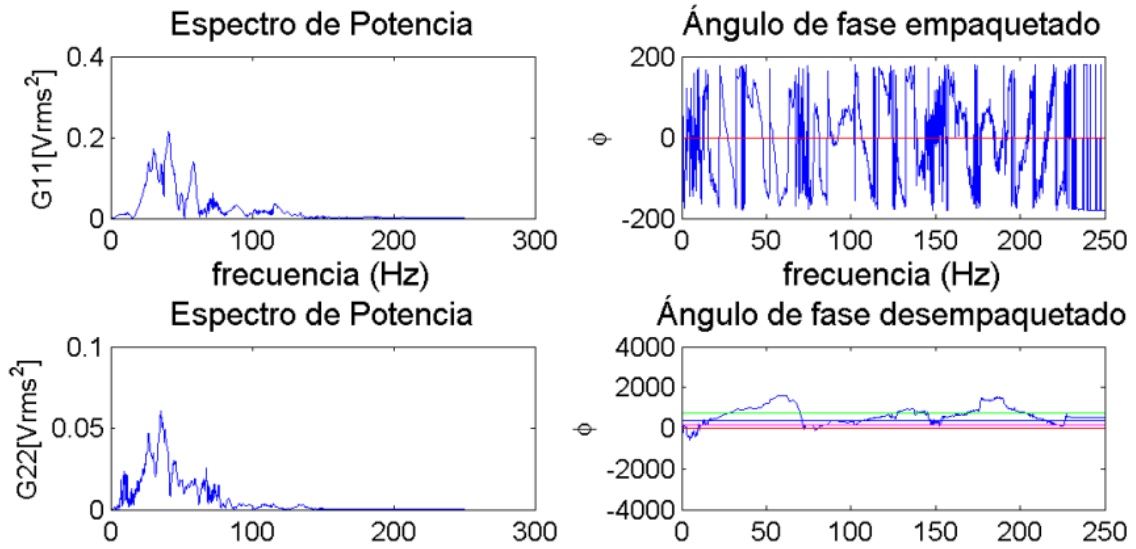


Figura C.12: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciado igual a 32 m

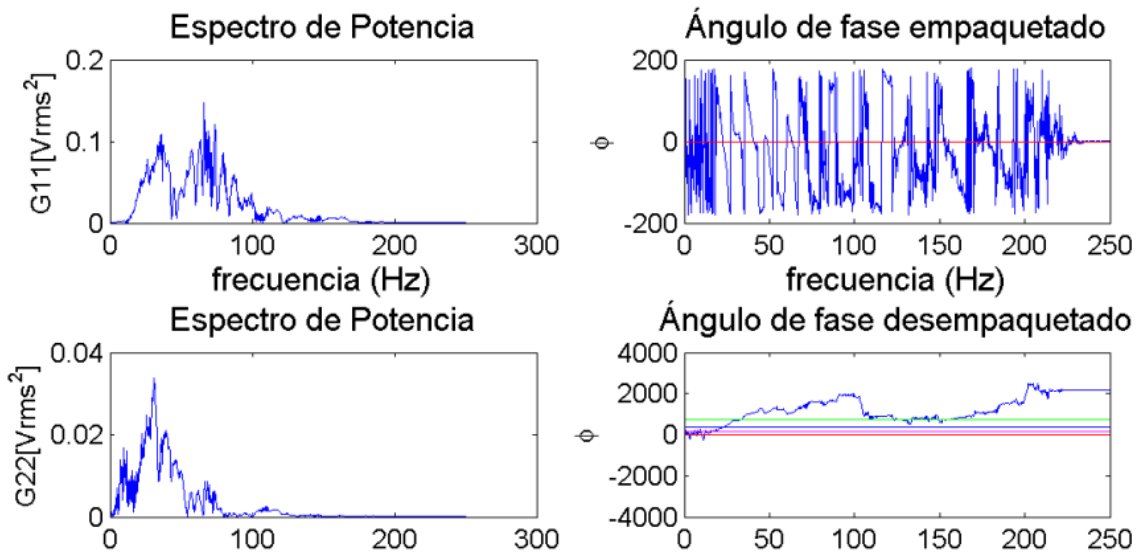


Figura C.13: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciado igual a 40 m

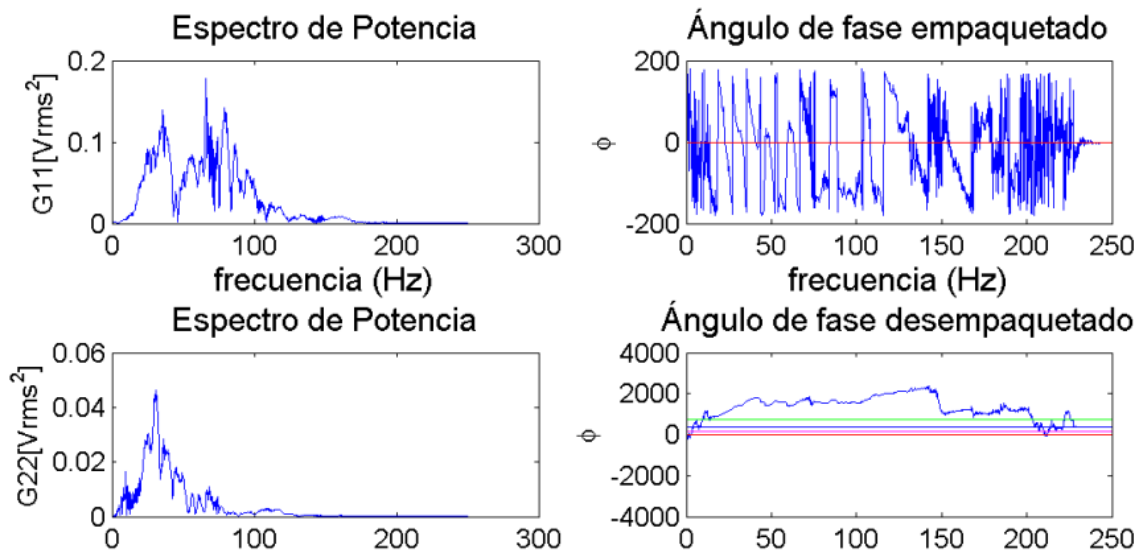


Figura C.14: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 40 m

Estación Mirador

Obtención de la curva de dispersión

A continuación se presenta la metodología de cómo se obtuvo de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Mirador, siguiendo la expuesta en el capítulo 3. Primero se incluyen las curvas de dispersión de los registros con espaciamentos entre geófonos menores a 32 m (Figura D.1). Luego se agregan las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 32 m (Figura D.2). A continuación se eliminan las curvas que no se traslapen con las insertadas en el paso anterior (Figura D.3). Se repite este procedimiento para las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 40 m (Figuras D.4 y D.5). Finalmente se obtiene la curva de dispersión experimental del subsuelo promediando las curvas de dispersión que se seleccionaron en las etapas previas.

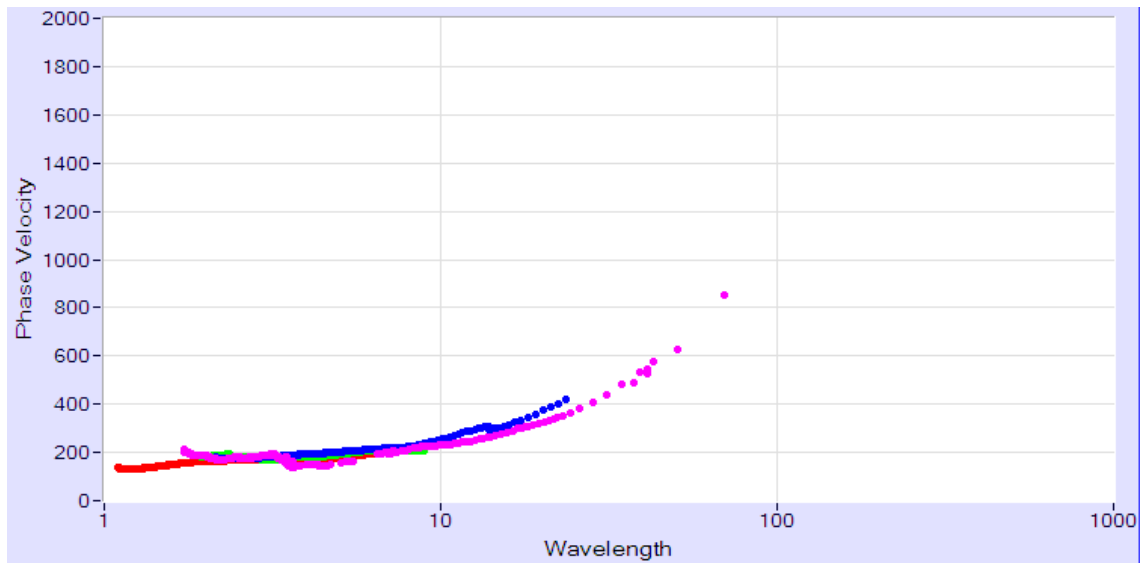


Figura D.1: Paso 1, inserción de las curvas de dispersión de los registros con espaciamientos de 2 m, 4 m, 8 m y 24 m.

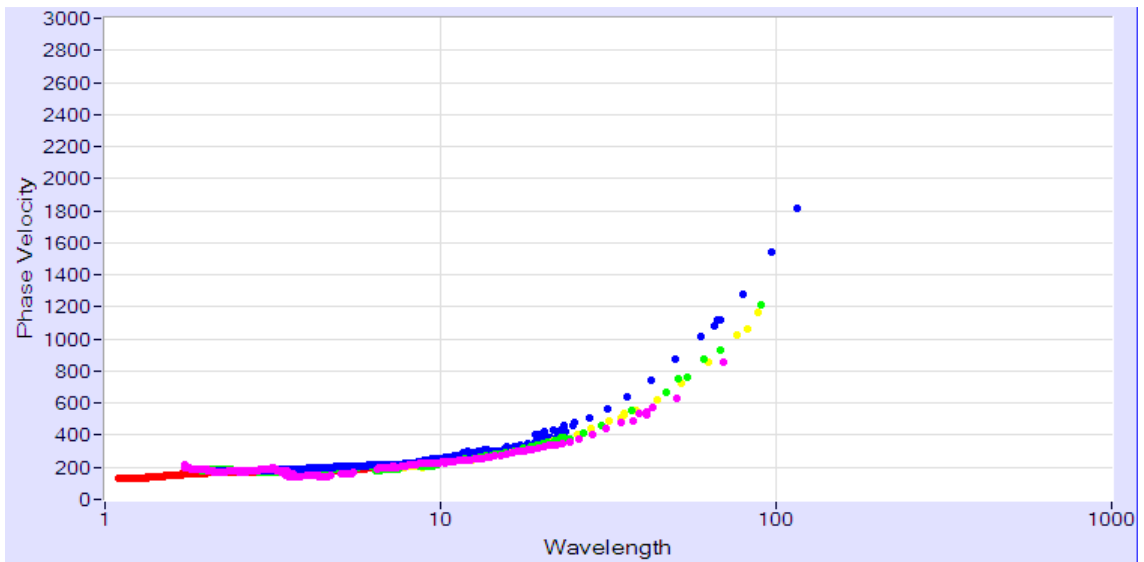


Figura D.2: Paso 2, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 32 m

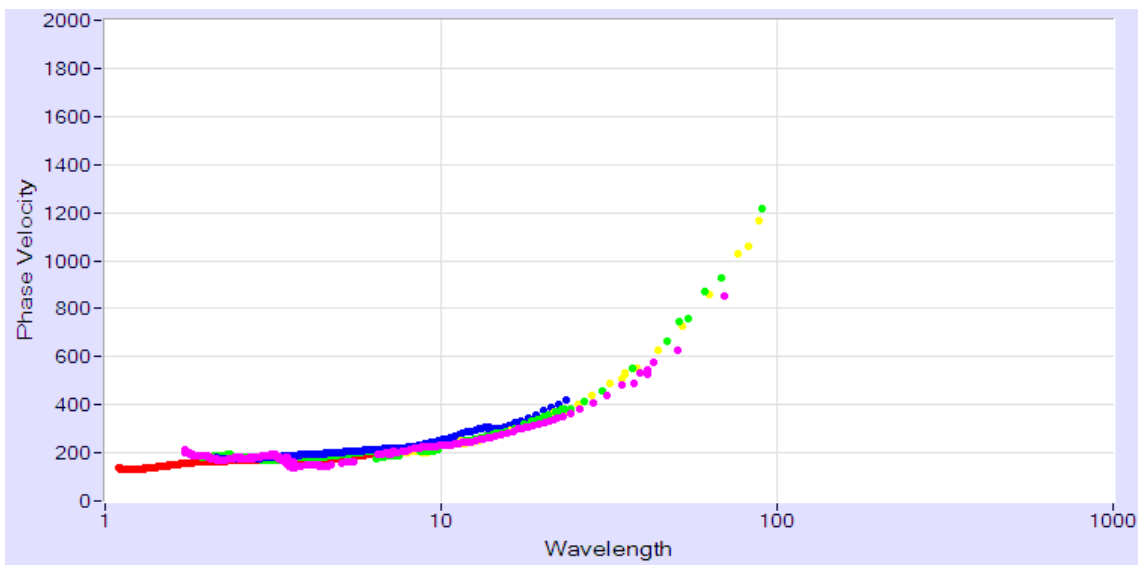


Figura D.3: Paso 3, después de la eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 32 m que no se traslapan con las insertadas

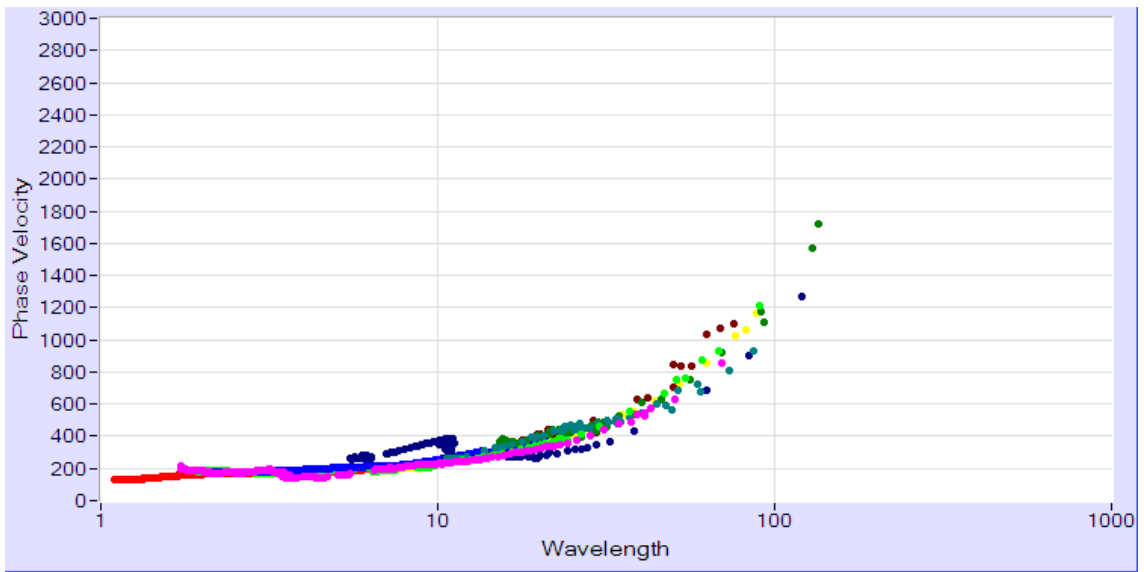


Figura D.4: Paso 4, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 40 m

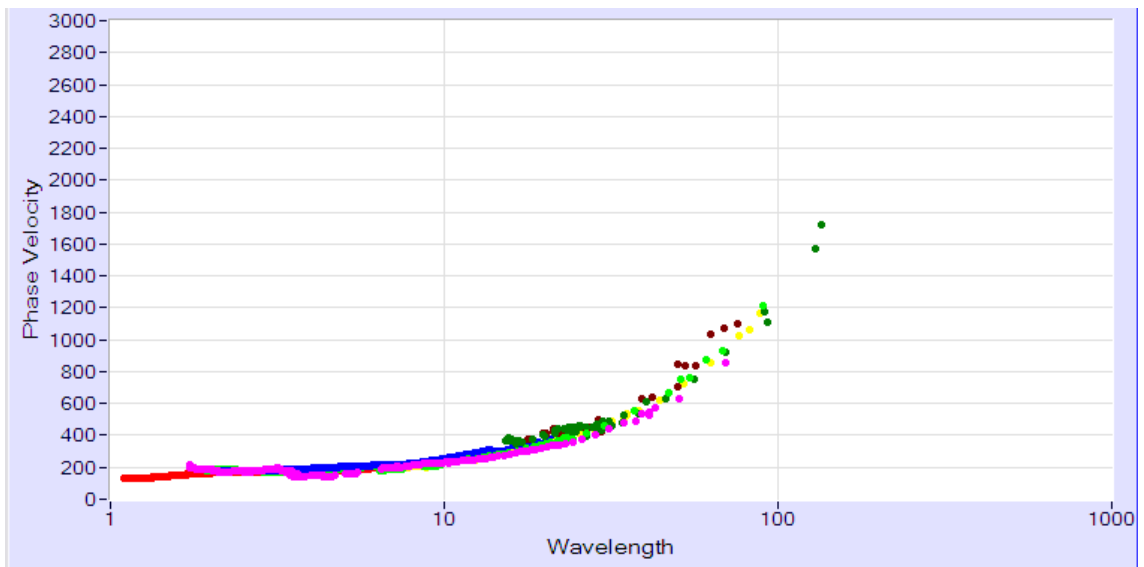


Figura D.5: Paso 5, eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 40 m que no se traslapan con las insertadas en los anteriores

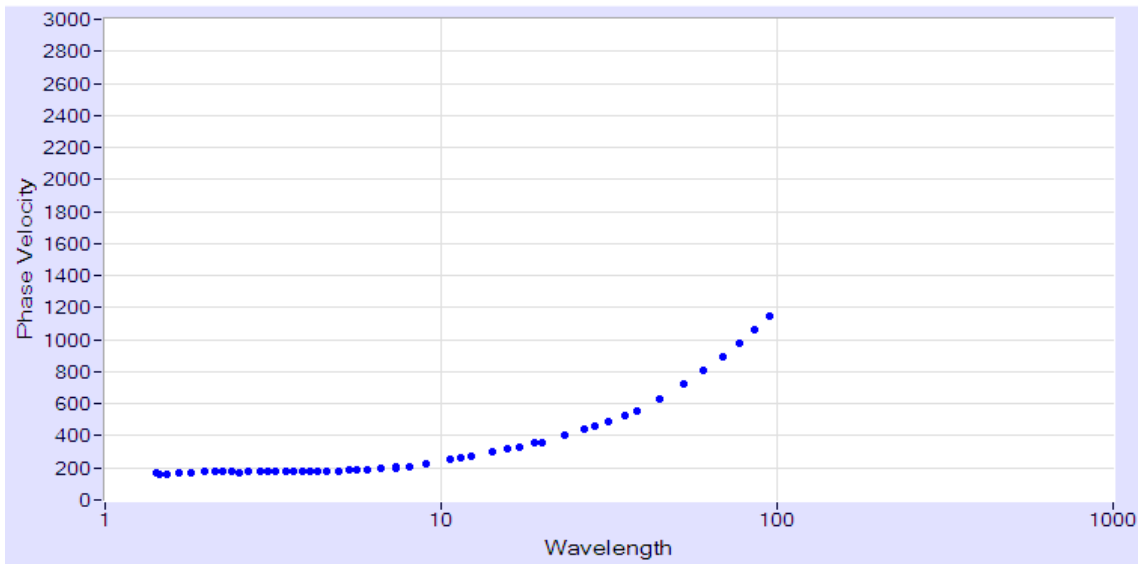


Figura D.6: Paso 6, curva de dispersión experimental del subsuelo del lugar, promediando las curvas de dispersión presentadas en la figura D.5

Análisis espectral de los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión de la Estación de Mirador

A continuación se presentan las figuras obtenidas del análisis espectral realizado a los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Mirador. Estas figuras incluyen los espectros de potencia para el registro de cada geófono y el ángulo de fase empaquetado y desempaquetado, para los distintos espaciamientos.

Es importante mencionar que para algunos espaciamientos, se usaron más de una medición.

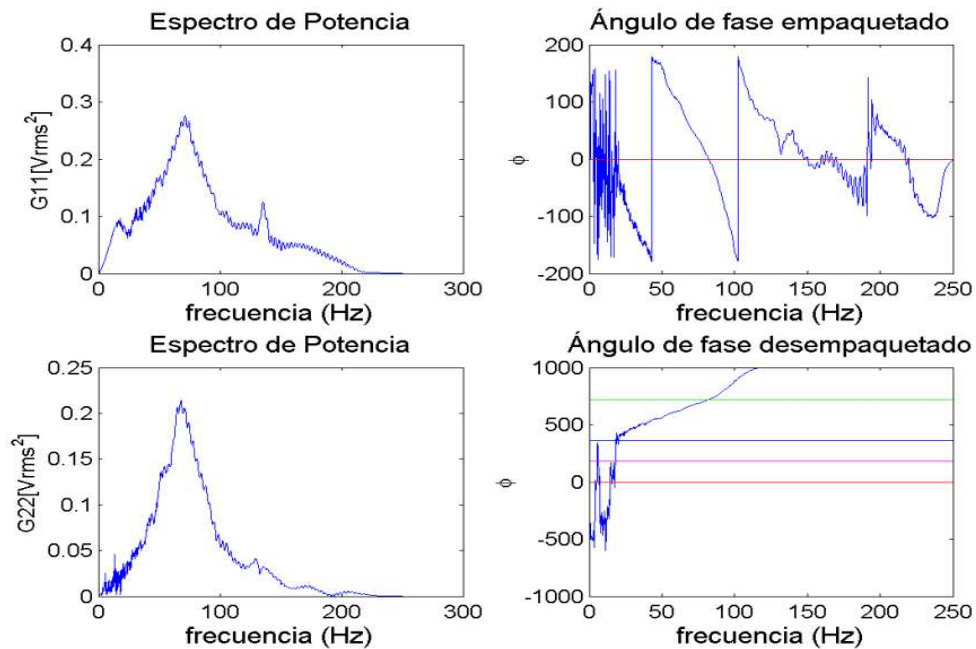


Figura D.7: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 2 m

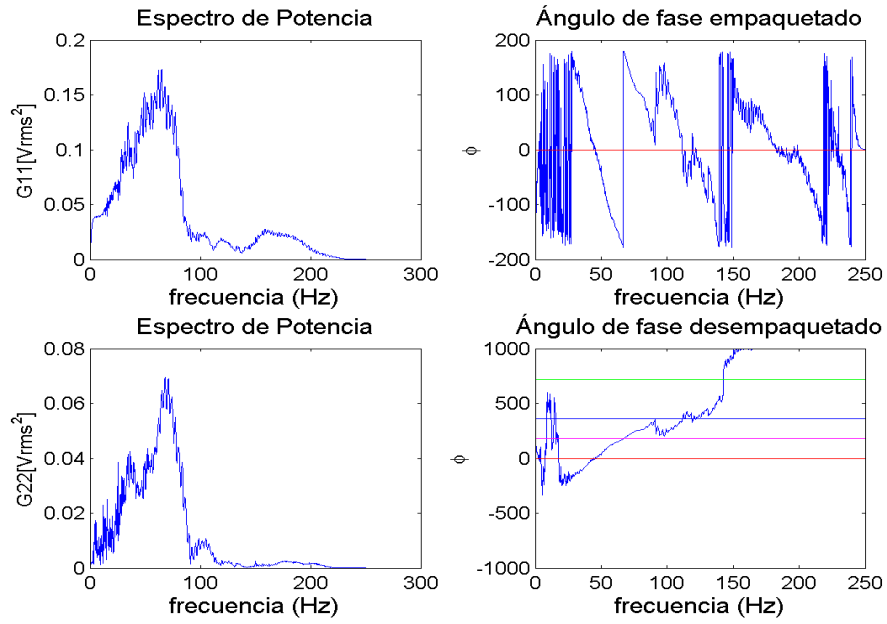


Figura D.8: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciado igual a 4 m

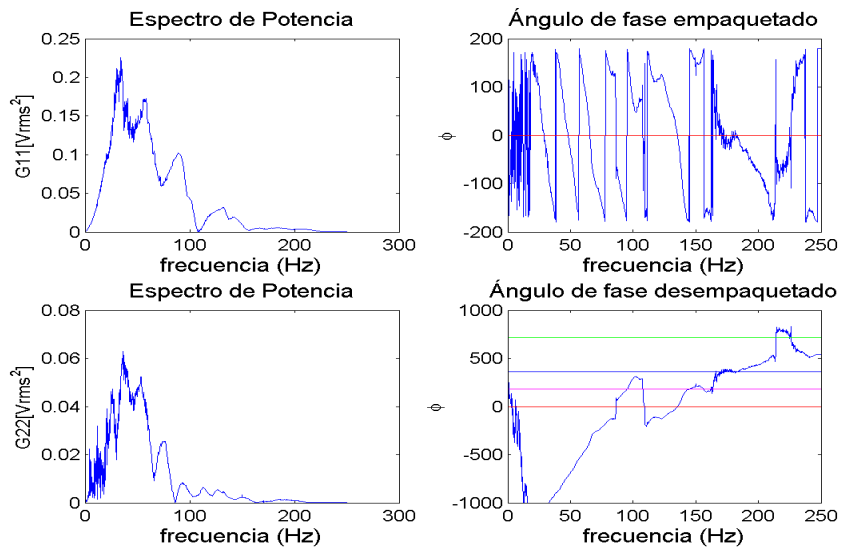


Figura D.9: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciado igual a 8 m

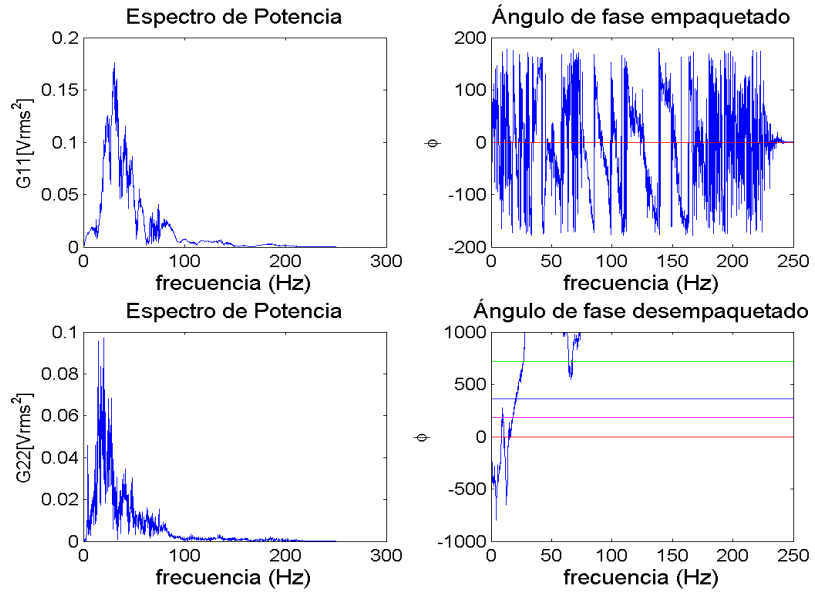


Figura D.10: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 24 m

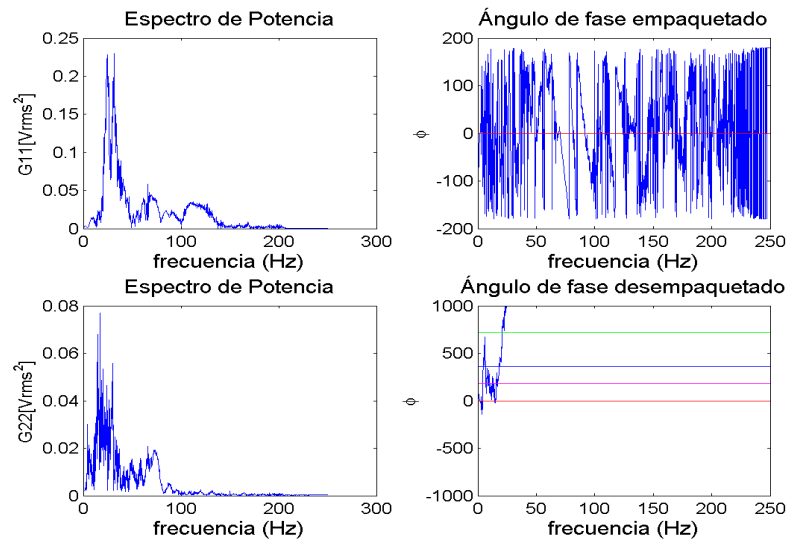


Figura D.11: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 32 m

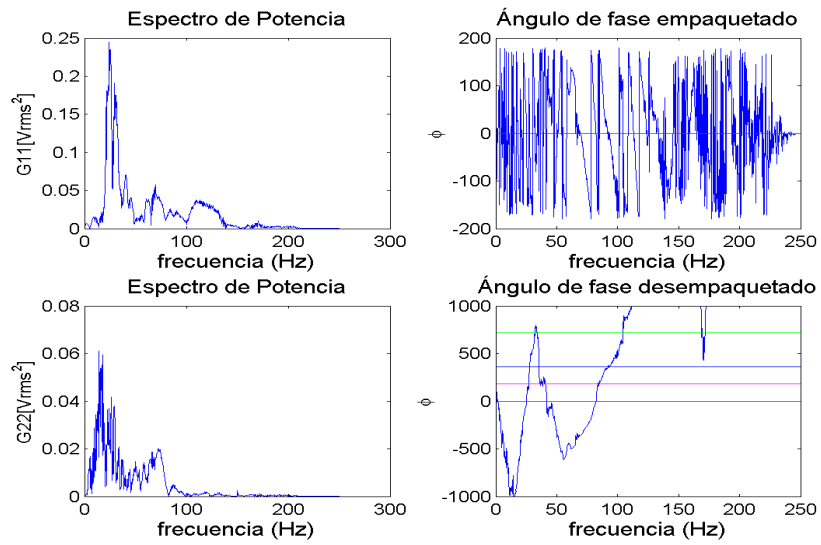


Figura D.12: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 32 m

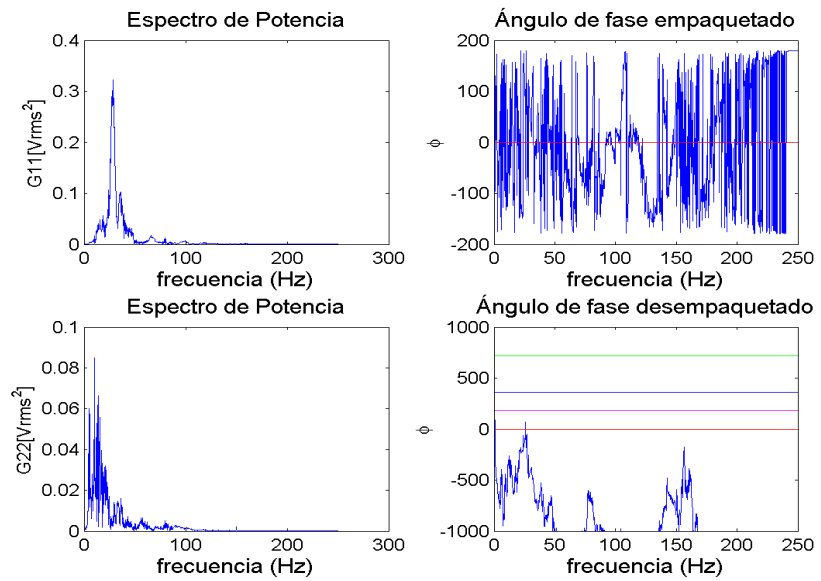


Figura D.14: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 40 m

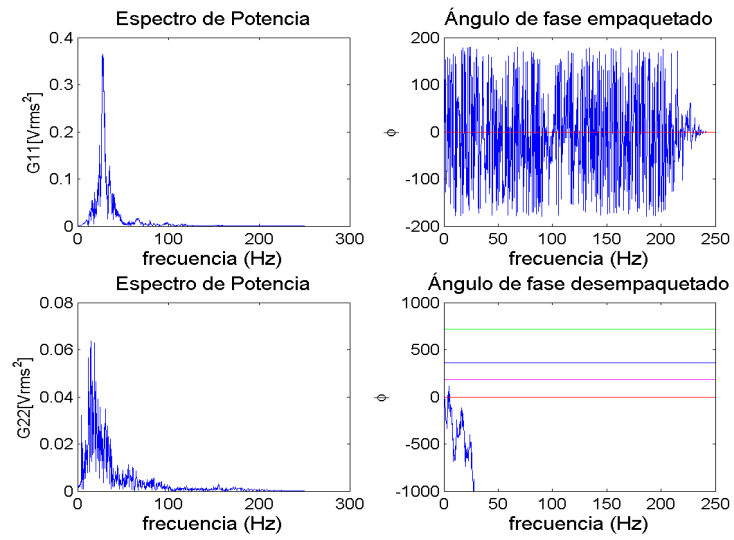


Figura D.15: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 40 m

Estación de Antumapu

Obtención de la curva de dispersión

A continuación se presenta la metodología de cómo se obtuvo de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Antumapu, siguiendo la expuesta en el capítulo 3. Primero se incluyen las curvas de dispersión de los registros con espaciamentos entre geófonos menores a 32 m (Figura E.1). Luego se agregan las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 32 m (Figura E.2). A continuación se eliminan las curvas que no se traslapen con las insertadas en el paso anterior (Figura E.3). Se repite este procedimiento para las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 40 m (Figuras E.4 y E.5). Finalmente se obtiene la curva de dispersión experimental del subsuelo promediando las curvas de dispersión que se seleccionaron en las etapas previas.

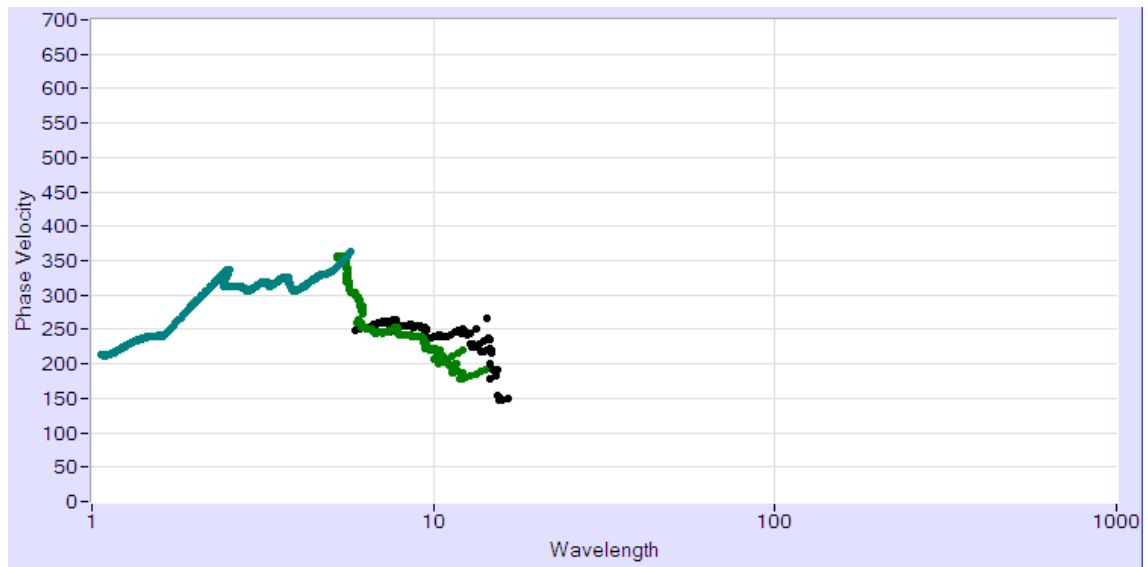


Figura E.1: Paso 1, inserción de las curvas de dispersión de los registros con espaciamentos de 4 m, 8 m y 16 m.

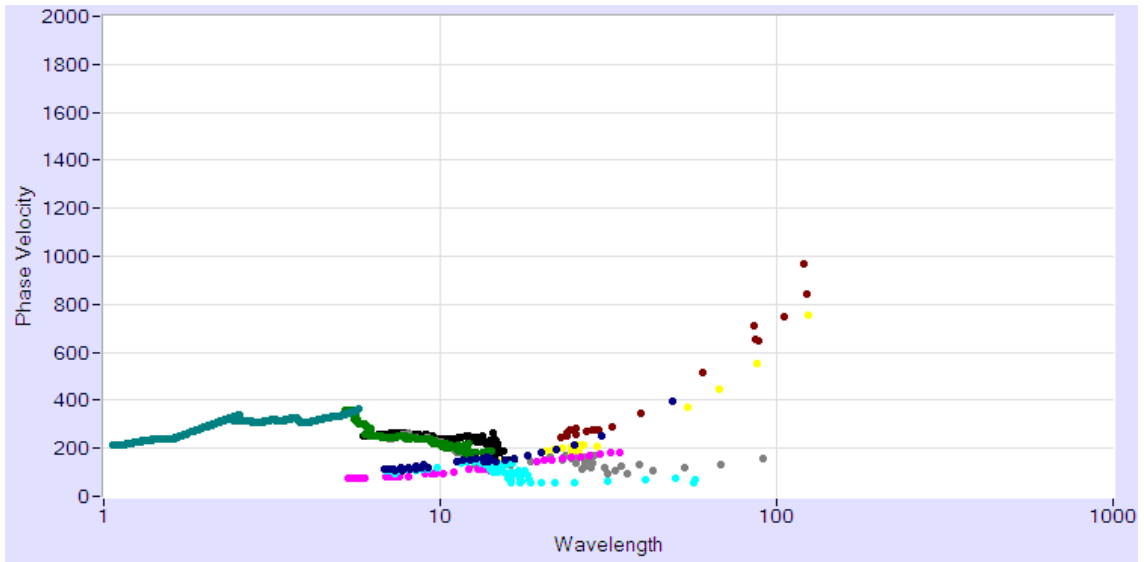


Figura E.2: Paso 2, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 32 m

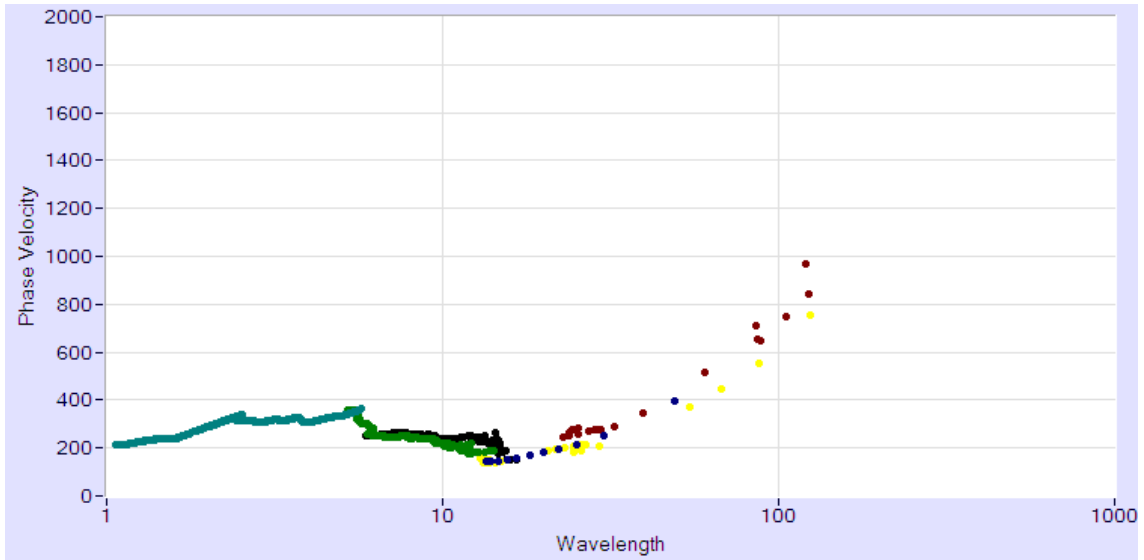


Figura E.3: Paso 3, después de la eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 32 m que no se traslapan con las insertadas

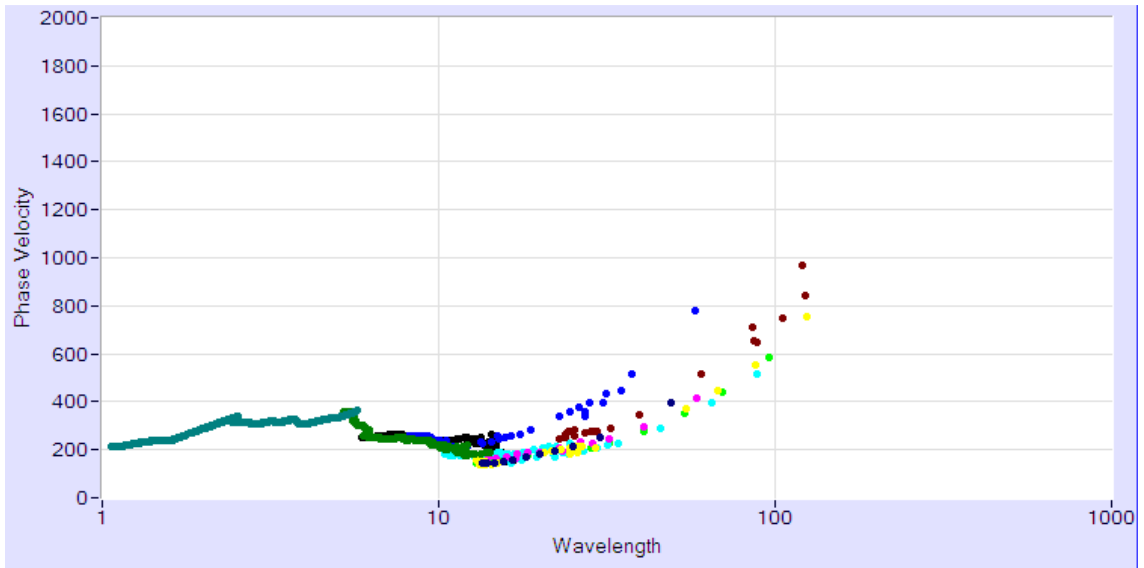


Figura E.4: Paso 4, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 40 m

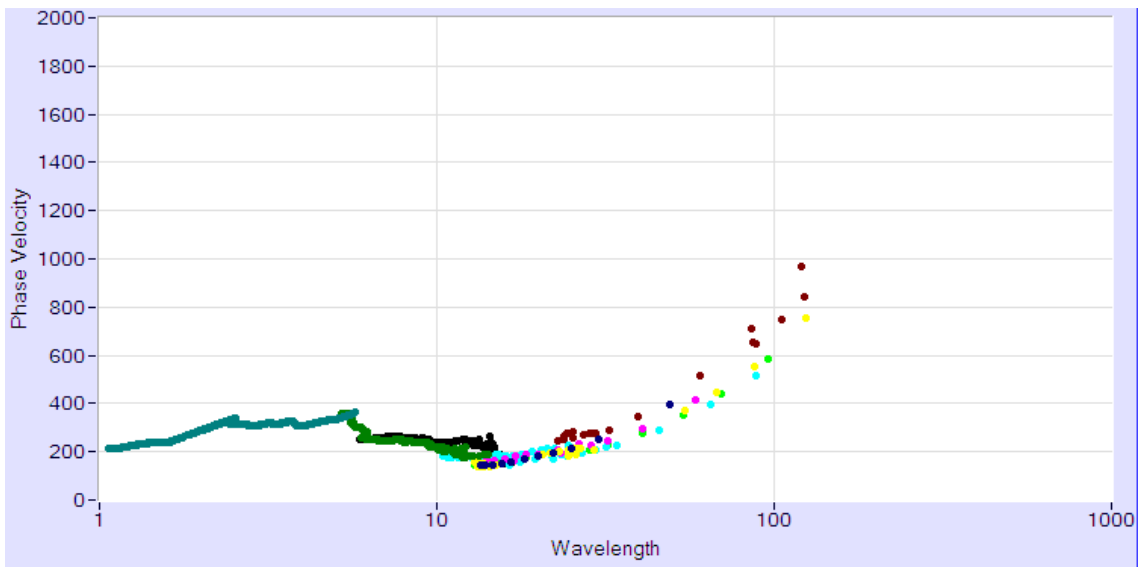


Figura E.5: Paso 5, eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 40 m que no se traslapen con las insertadas en los anteriores

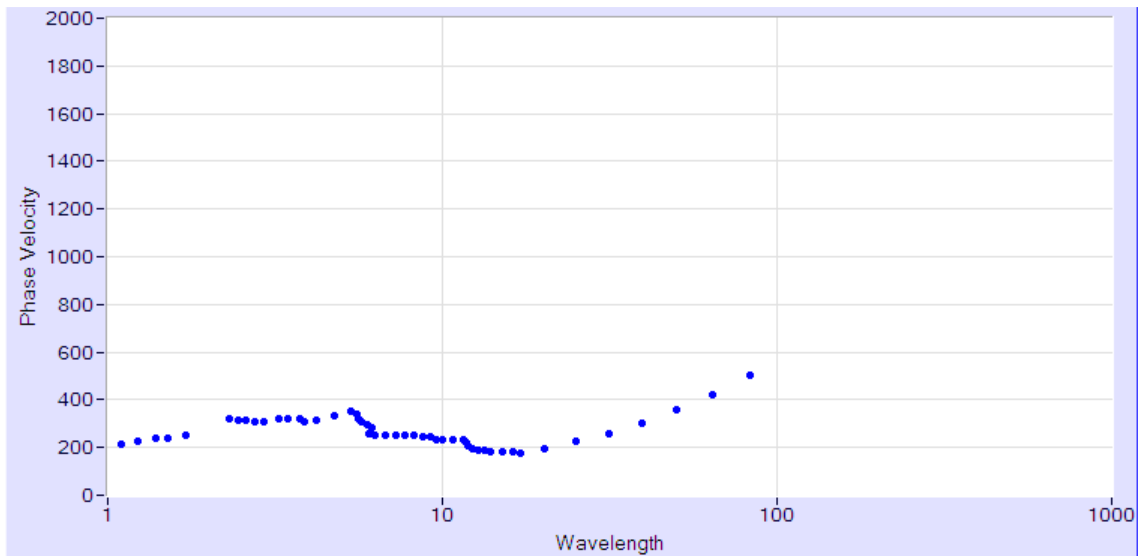


Figura E.6: Paso 6, curva de dispersión experimental del subsuelo del lugar, promediando las curvas de dispersión presentadas en la figura E.5

Análisis espectral de los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión de la Estación de Antumapu

A continuación se presentan las figuras obtenidas del análisis espectral realizado a los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Antumapu. Estas figuras incluyen los espectros de potencia para el registro de cada geófono y el ángulo de fase empaquetado y desempaqueado, para los distintos espaciamientos.

Es importante mencionar que para algunos espaciamientos, se usaron más de una medición.

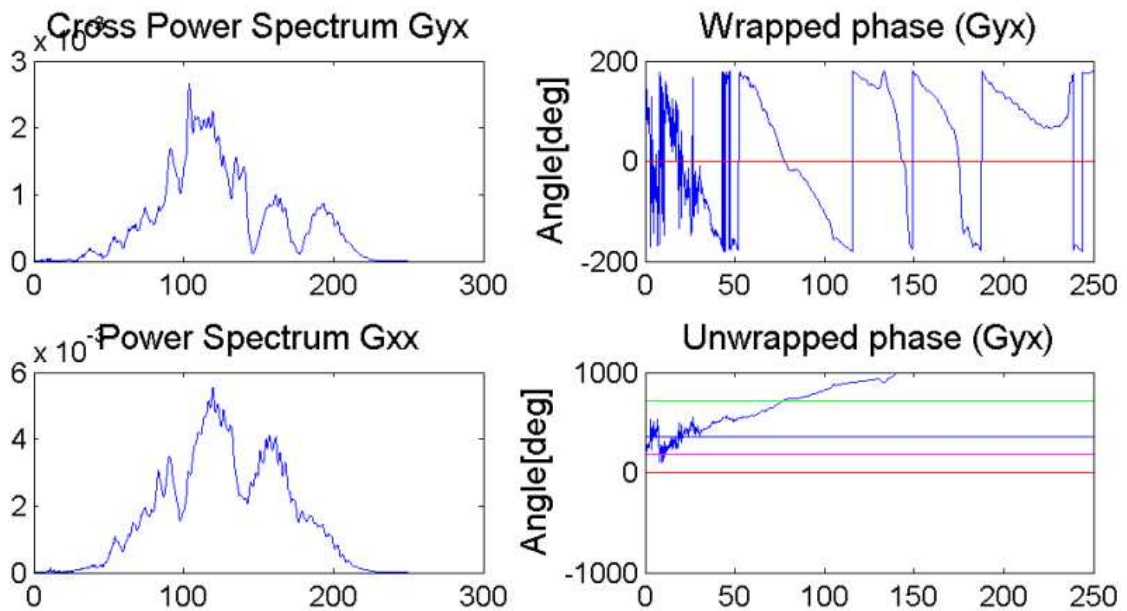


Figura E.7: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 4 m

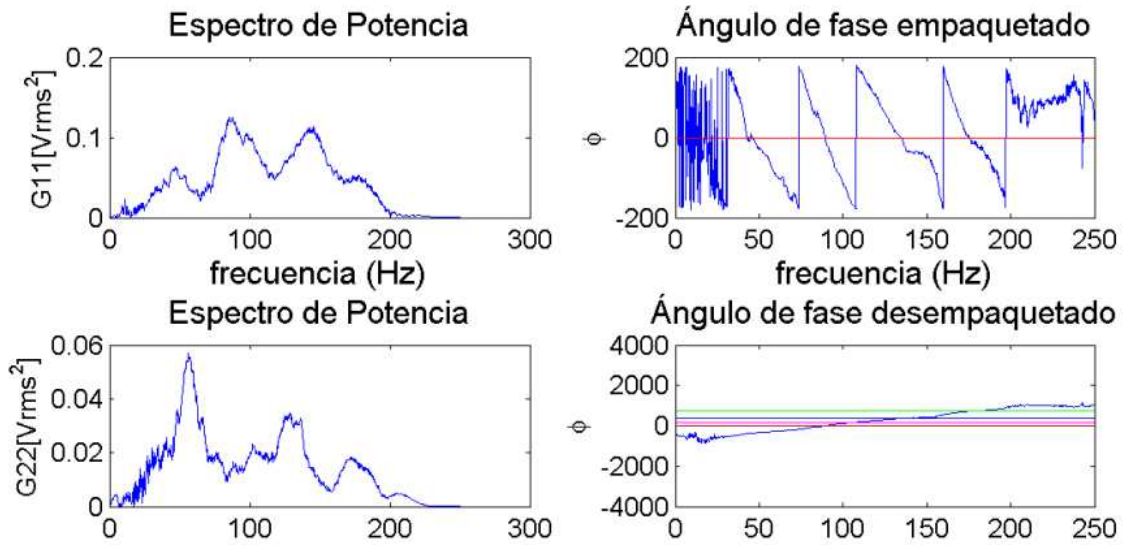


Figura E.8: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 8 m

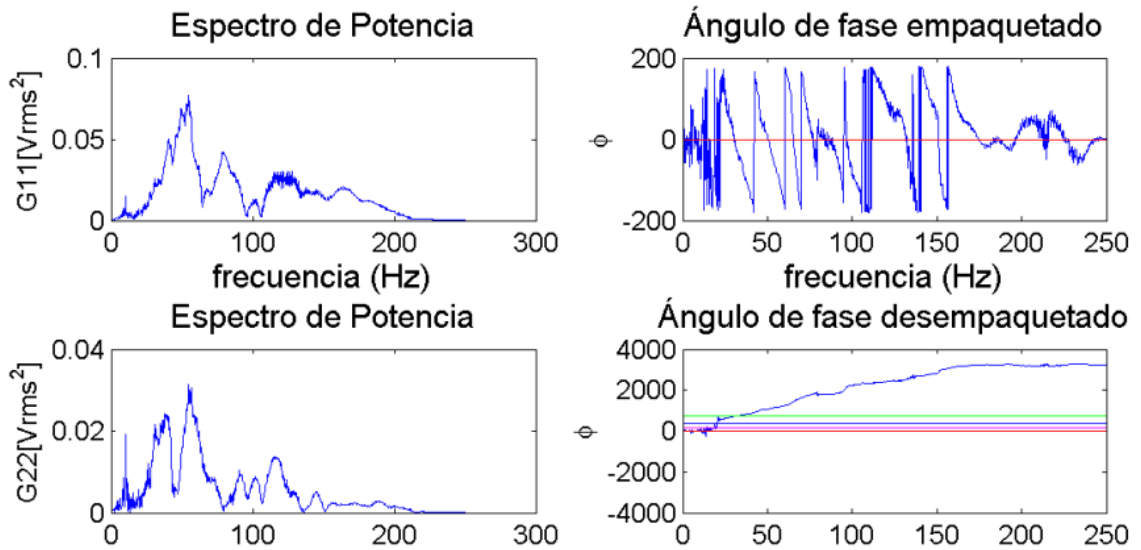


Figura E.9: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 16 m

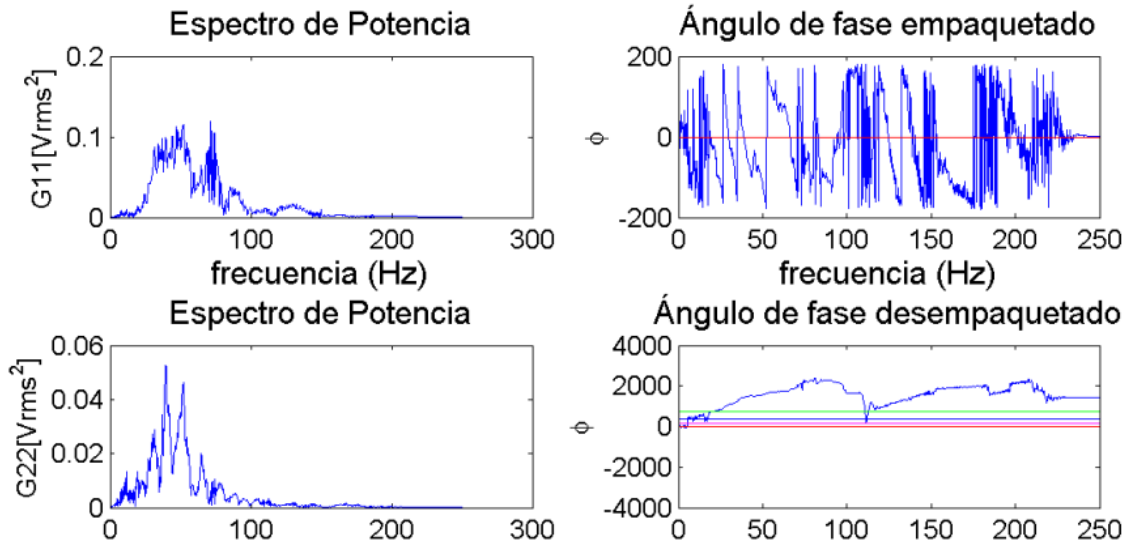


Figura E.10: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 32 m

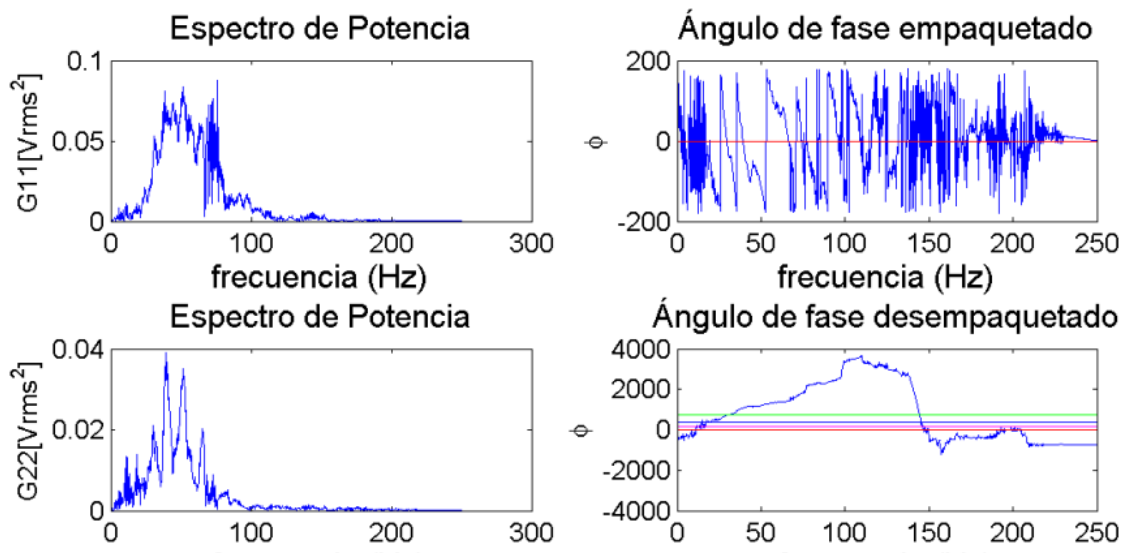


Figura E.11: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 32 m

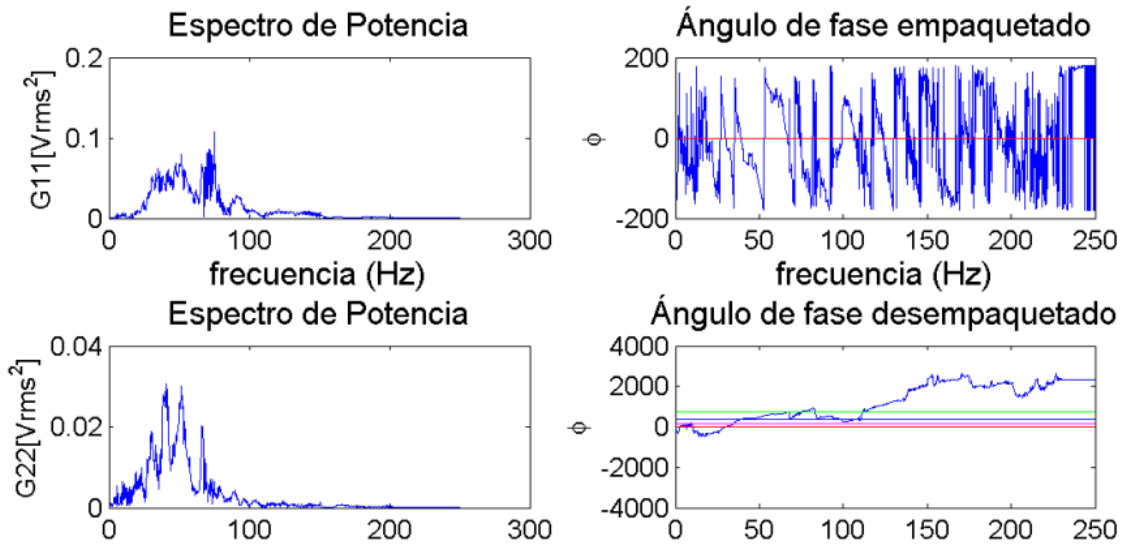


Figura E.12: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 32 m

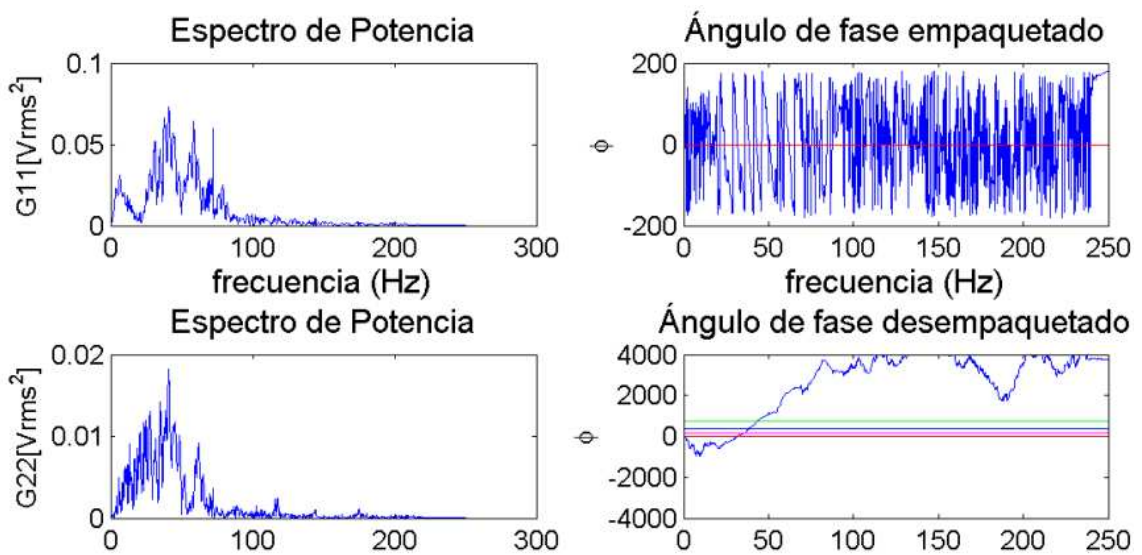


Figura E.13: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 40 m

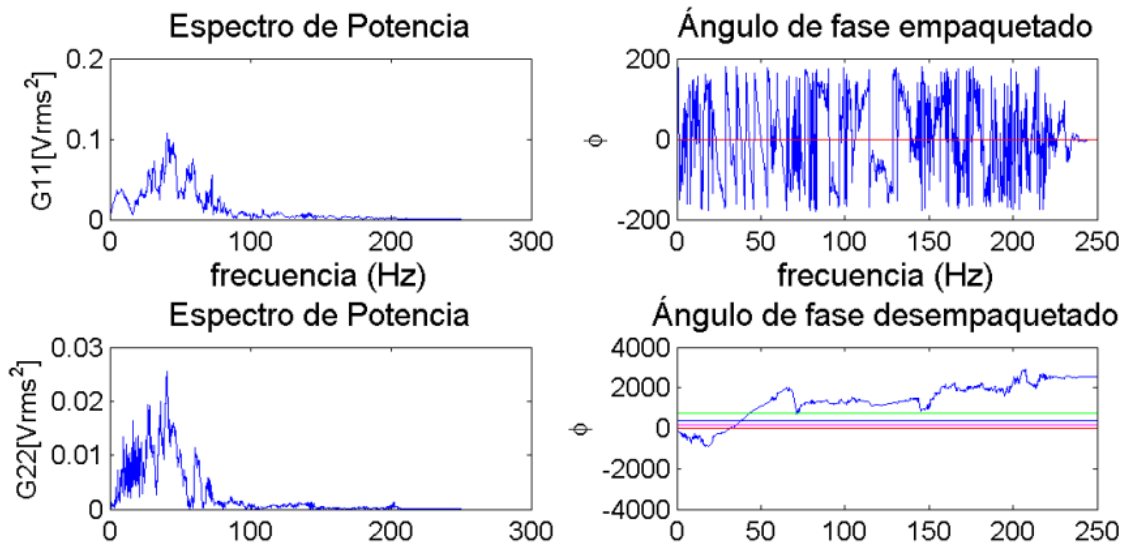


Figura E.14: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 40 m

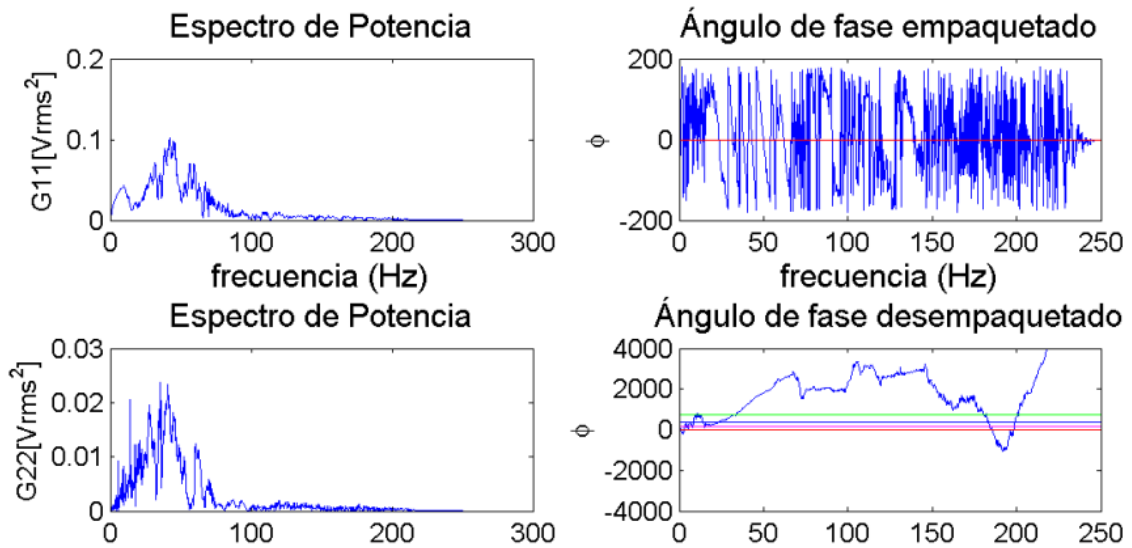


Figura E.15: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 40 m

Estación de Casablanca

Obtención de la curva de dispersión

El desarrollo de la obtención de esta curva de dispersión fue explicado detalladamente en el capítulo 3.

Análisis espectral de los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión de la Estación de Casablanca

A continuación se presentan las figuras obtenidas del análisis espectral realizado a los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Casablanca. Estas figuras incluyen los espectros de potencia para el registro de cada geófono y el ángulo de fase empaquetado y desempaquetado, para los distintos espaciamientos.

Es importante mencionar que para algunos espaciamientos, se usaron más de una medición.

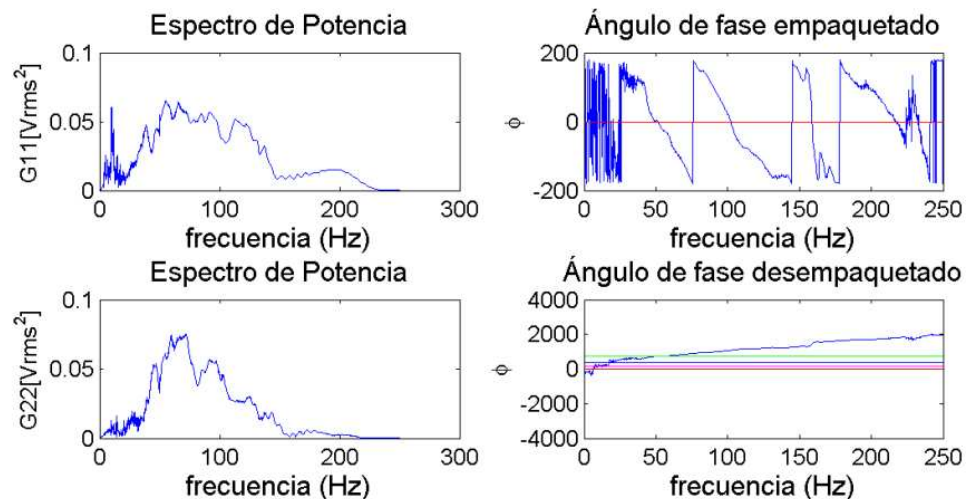


Figura F.1: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 4 m

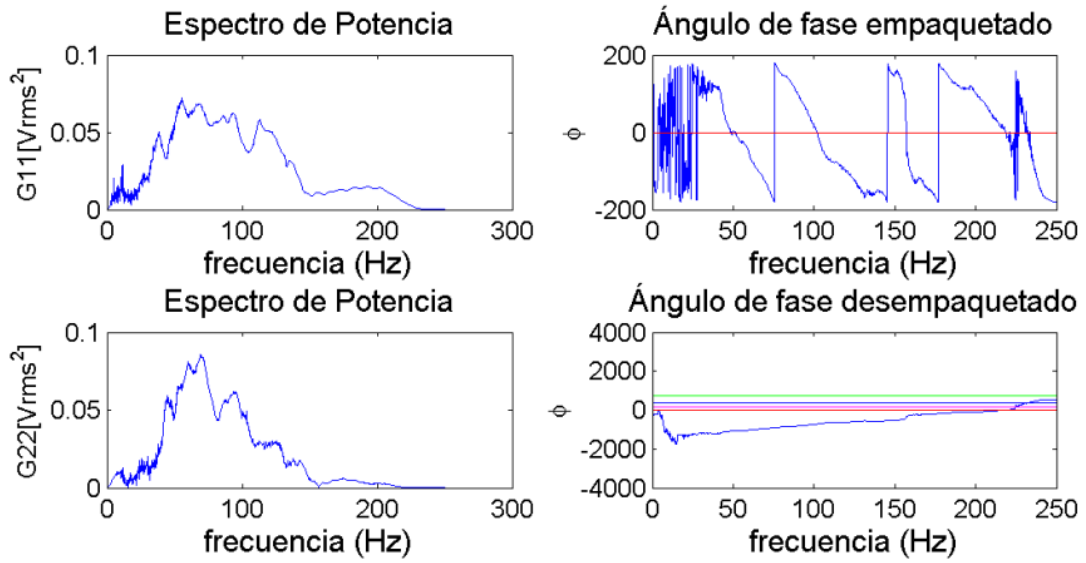


Figura F.2: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 4 m

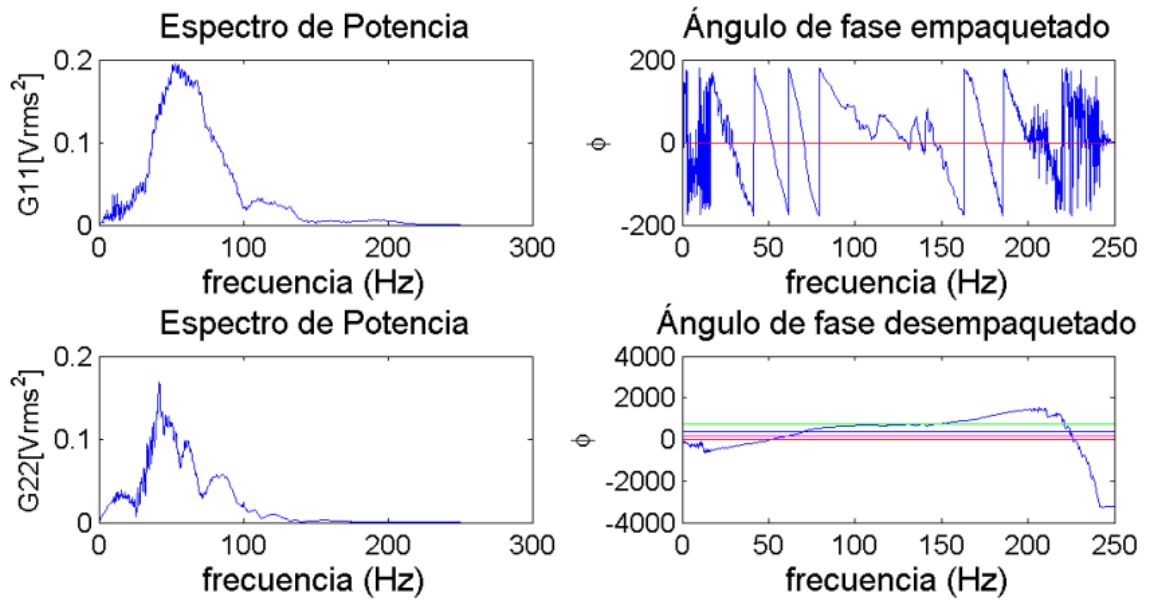


Figura F.3: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 8 m

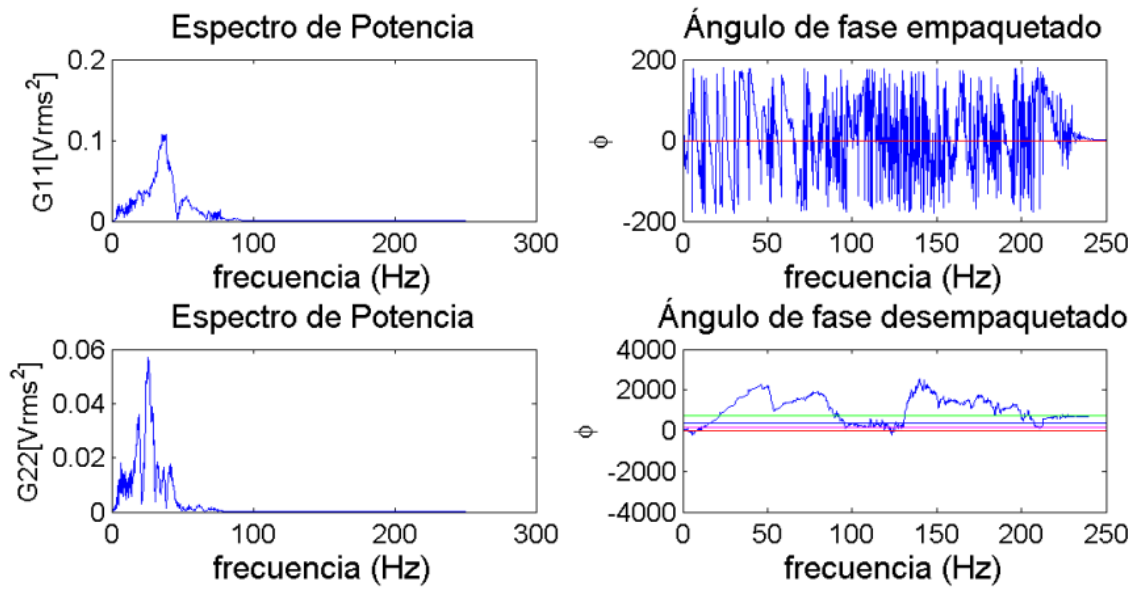


Figura F.4: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamento igual a 32 m

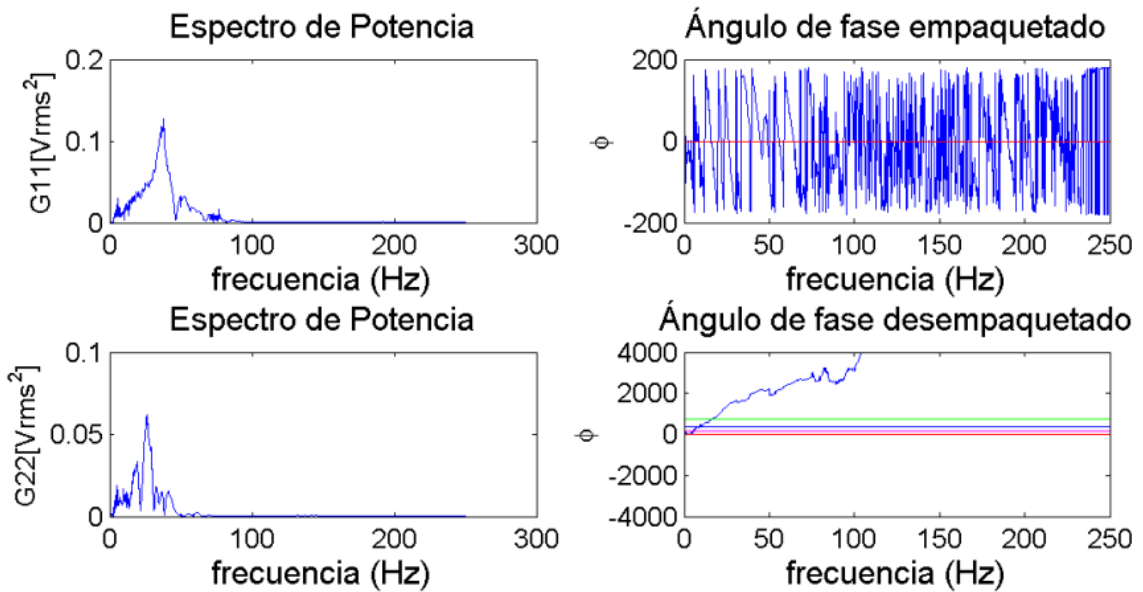


Figura F.5: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamento igual a 32 m

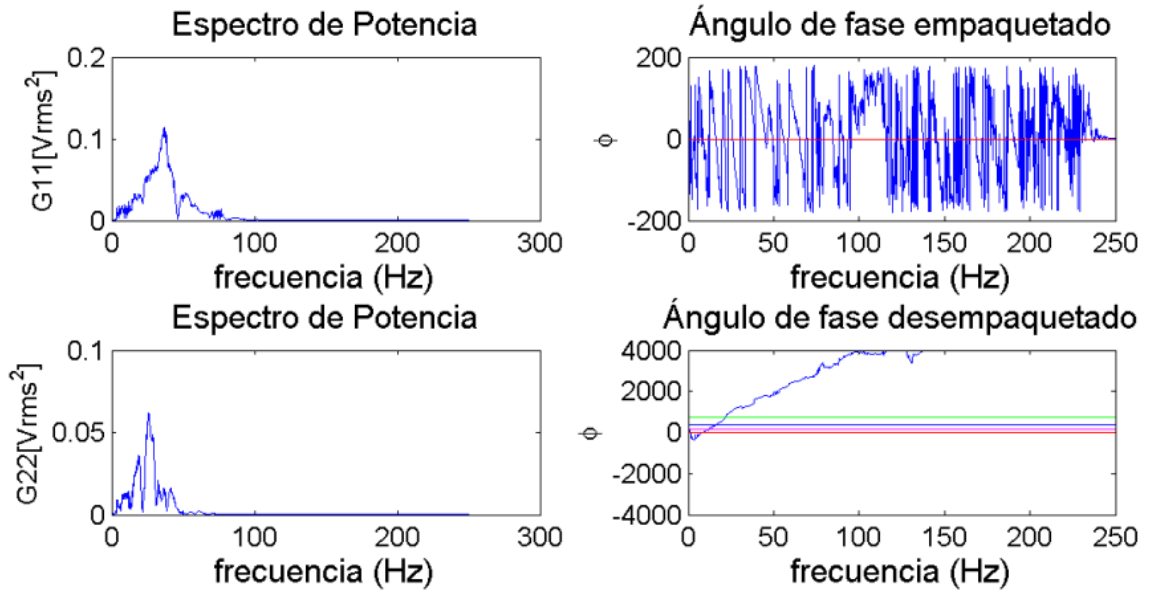


Figura F.6: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 32 m

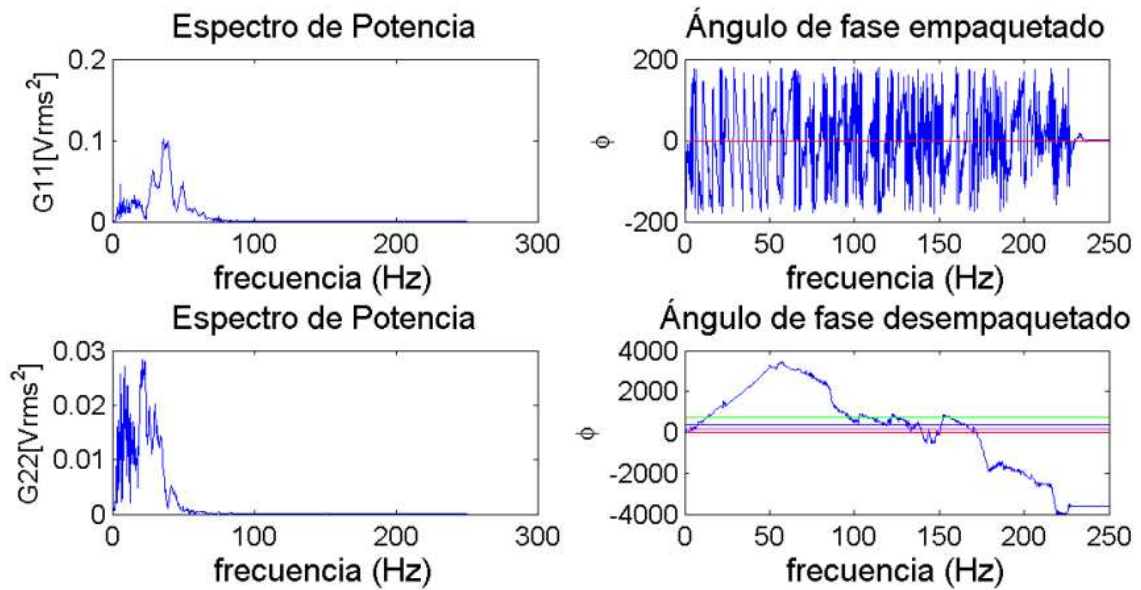


Figura F.7: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 40 m

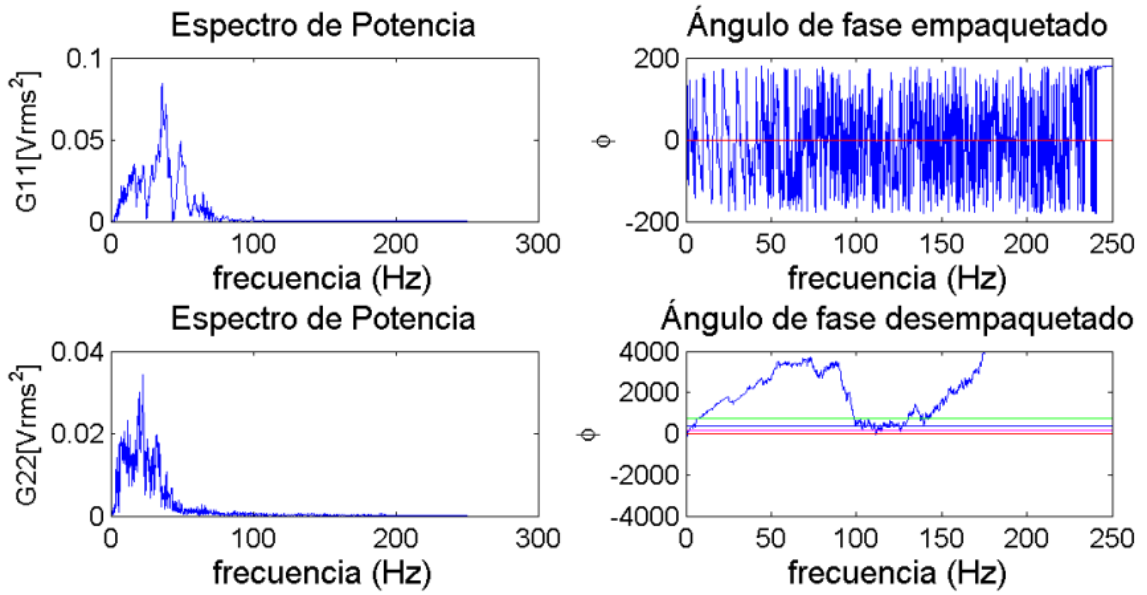


Figura F.8: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 40 m

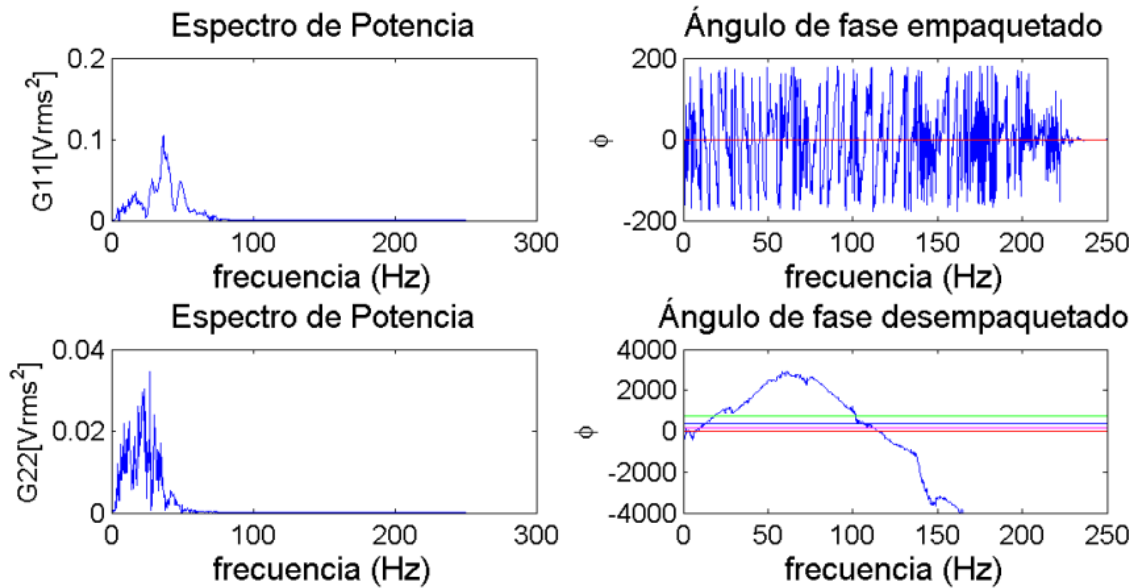


Figura F.9: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 40 m

Estación de Curicó

Obtención de la curva de dispersión

A continuación se presenta la metodología de cómo se obtuvo de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Lolloo, siguiendo la expuesta en el capítulo 3. Primero se incluyen las curvas de dispersión de los registros con espaciamentos entre geófonos menores a 32 m (Figura G.1). Luego se agregan las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 32 m (Figura G.2). A continuación se eliminan las curvas que no se traslapen con las insertadas en el paso anterior (Figura G.3). Se repite este procedimiento para las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 40 m (Figuras G.4 y G.5). Finalmente se obtiene la curva de dispersión experimental del subsuelo promediando las curvas de dispersión que se seleccionaron en las etapas previas.

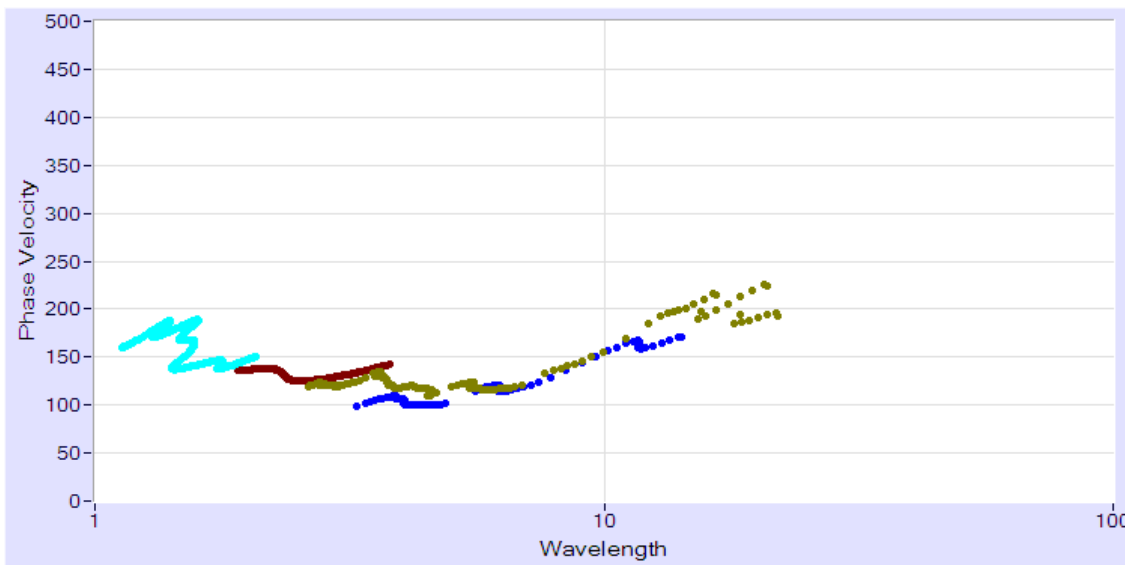


Figura G.1: Paso 1, inserción de las curvas de dispersión de los registros con espaciamentos de 2 m, 4 m, 16 m y 24 m.

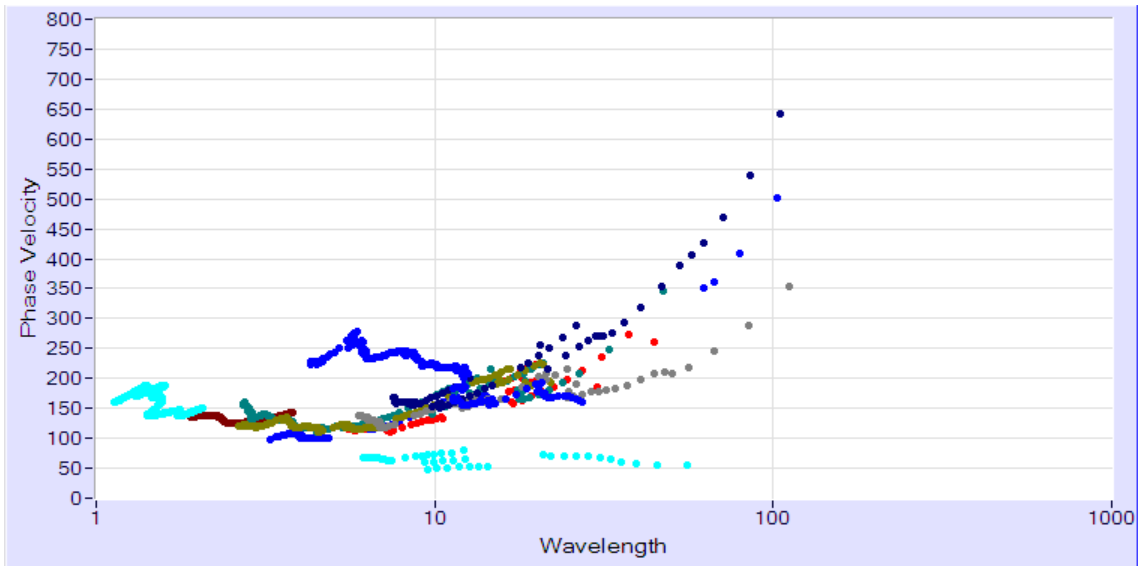


Figura G.2: Paso 2, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 32 m

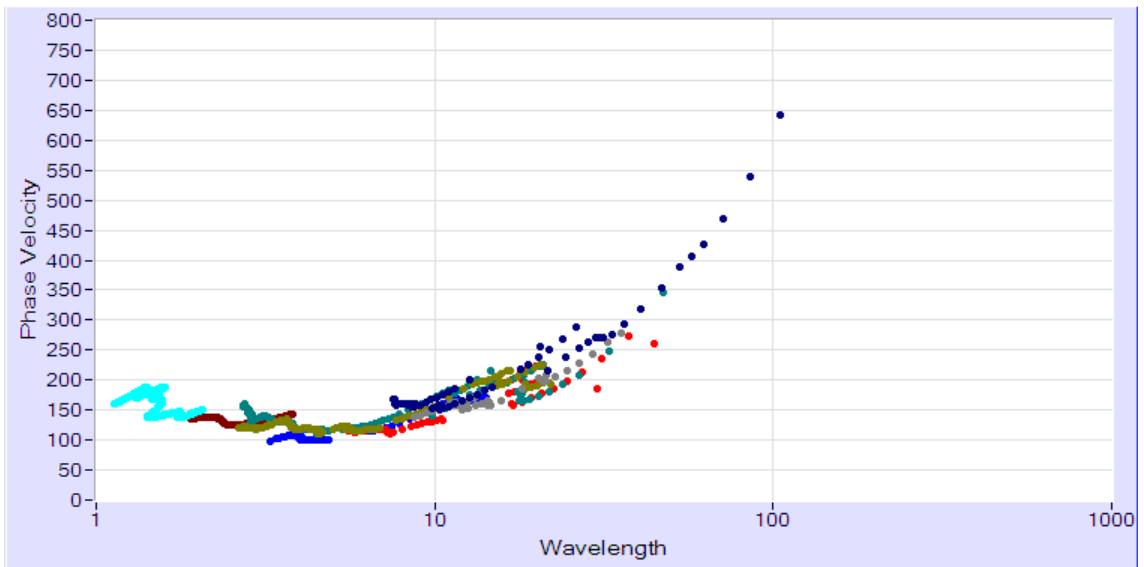


Figura G.3: Paso 3, después de la eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 32 m que no se traslapen con las insertadas

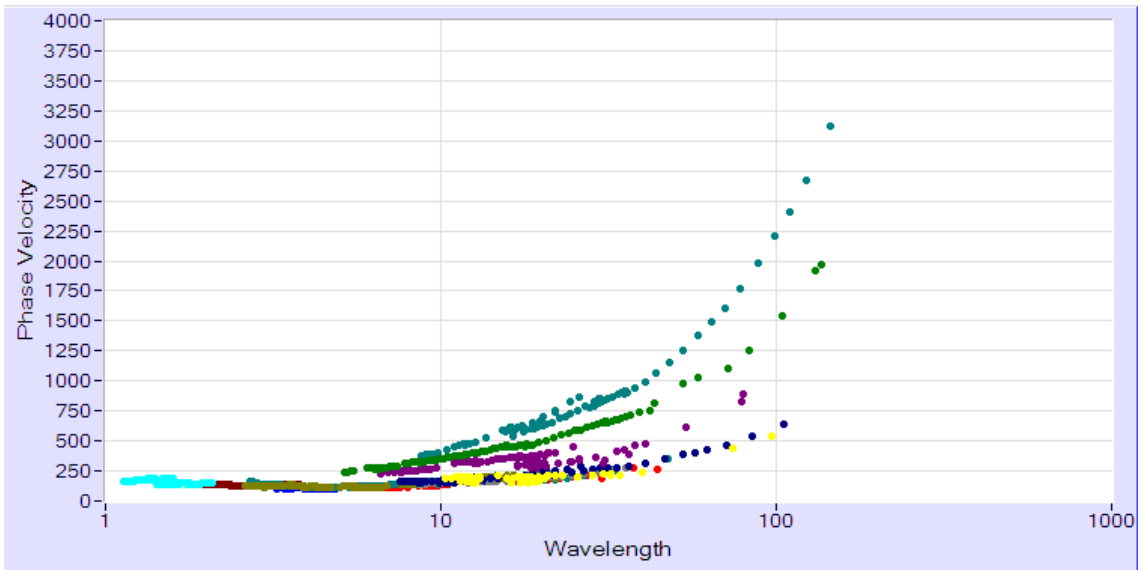


Figura G.4: Paso 4, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 40 m

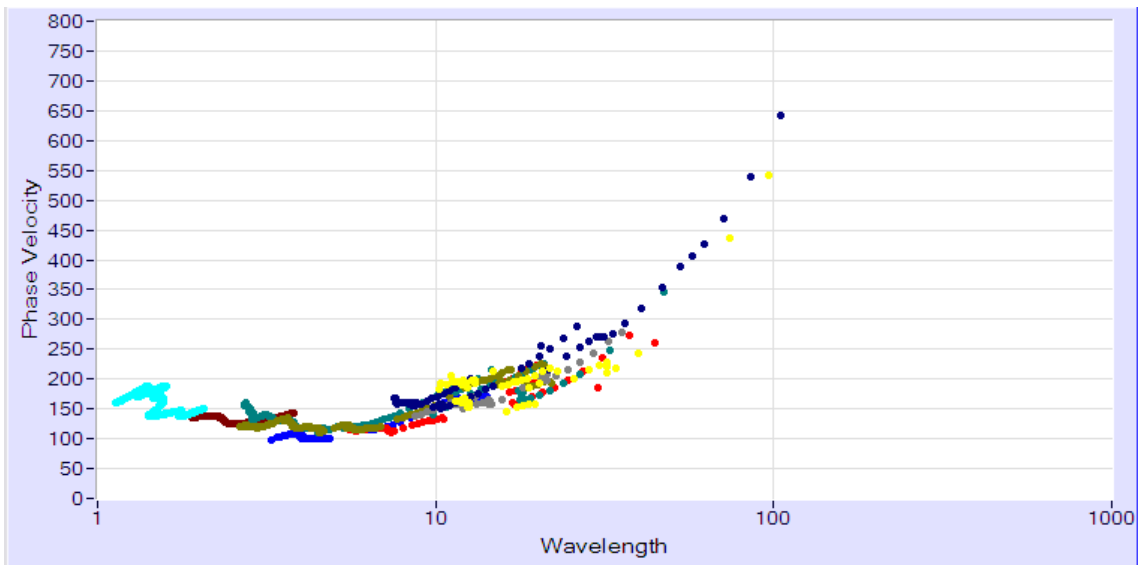


Figura G.5: Paso 5, eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 40 m que no se traslapan con las insertadas en los anteriores

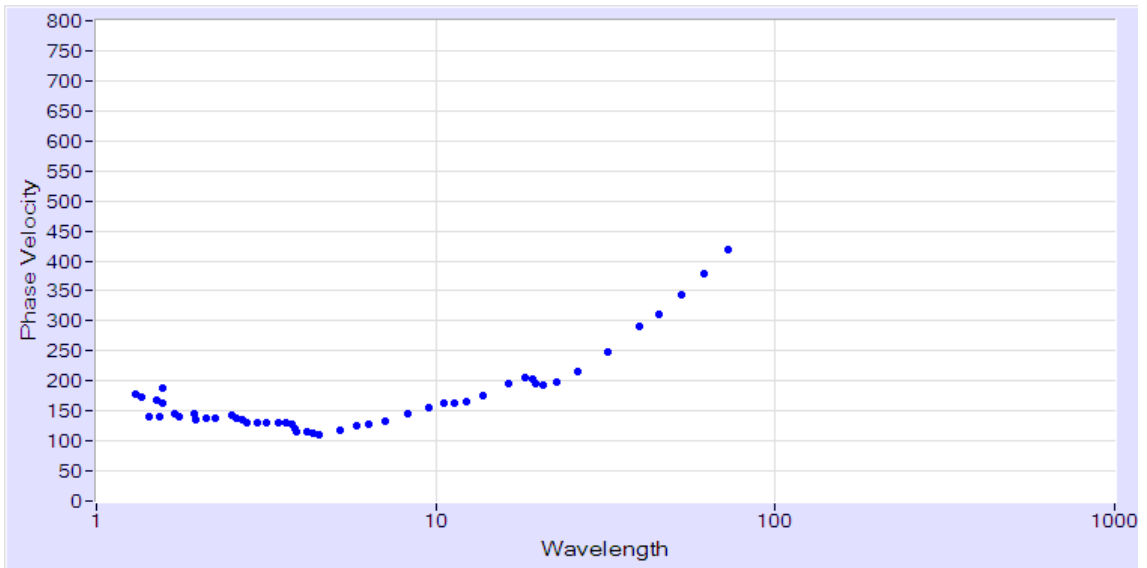


Figura G.6: Paso 6, curva de dispersión experimental del subsuelo del lugar, promediando las curvas de dispersión presentadas en la figura G.5

Análisis espectral de los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión de la Estación de Curicó

A continuación se presentan las figuras obtenidas del análisis espectral realizado a los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Curicó. Estas figuras incluyen los espectros de potencia para el registro de cada geófono y el ángulo de fase empaquetado y desempaquetado, para los distintos espaciamientos.

Es importante mencionar que para algunos espaciamientos, se usaron más de una medición.

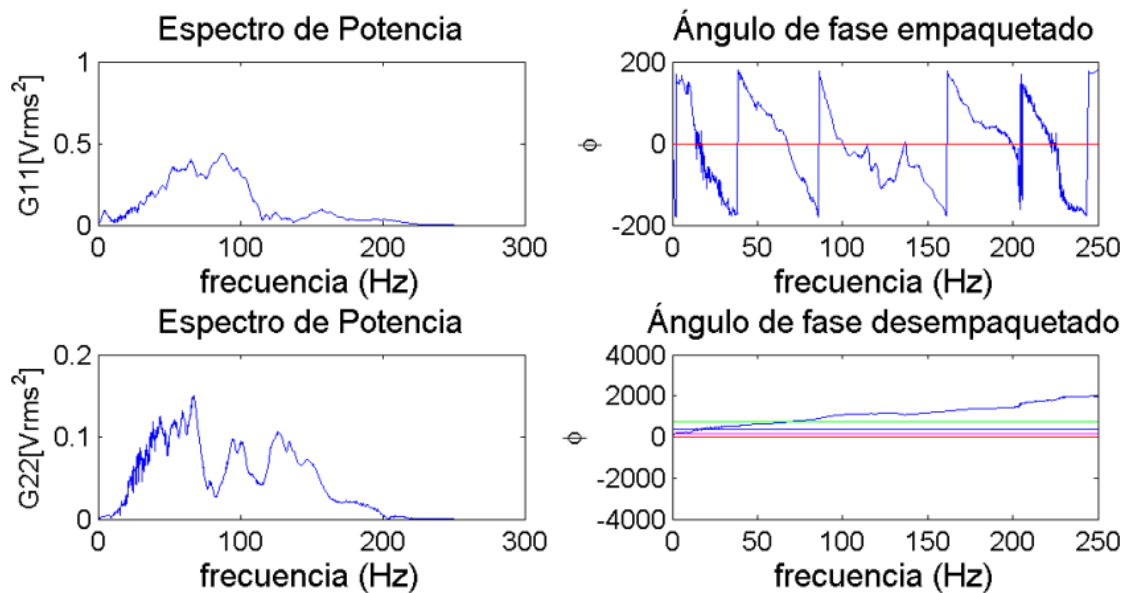


Figura G.7: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 2 m

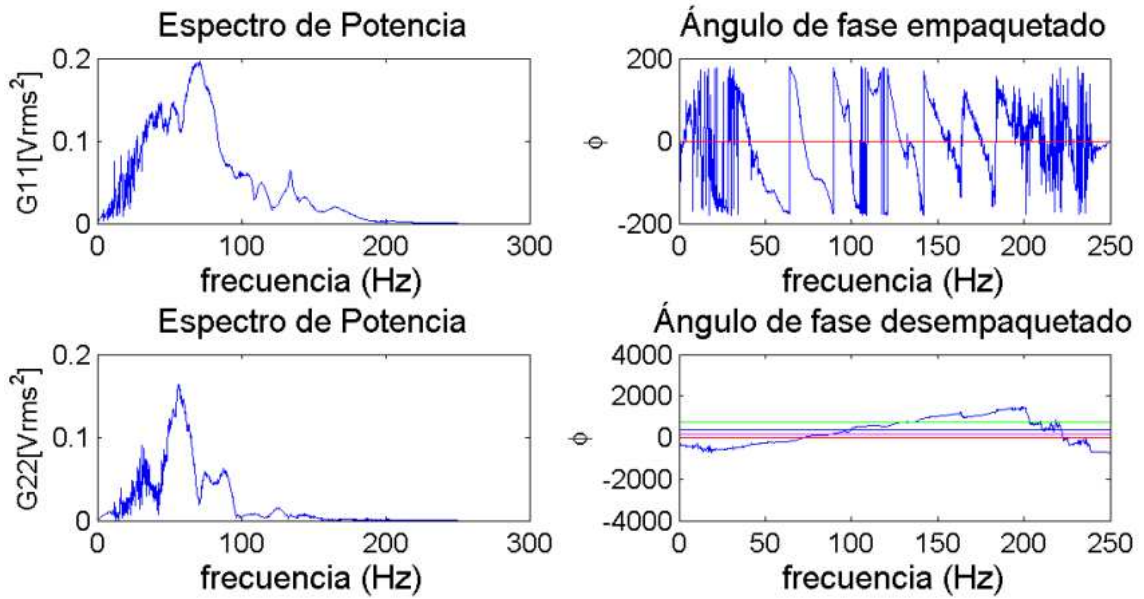


Figura G.8: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 4 m

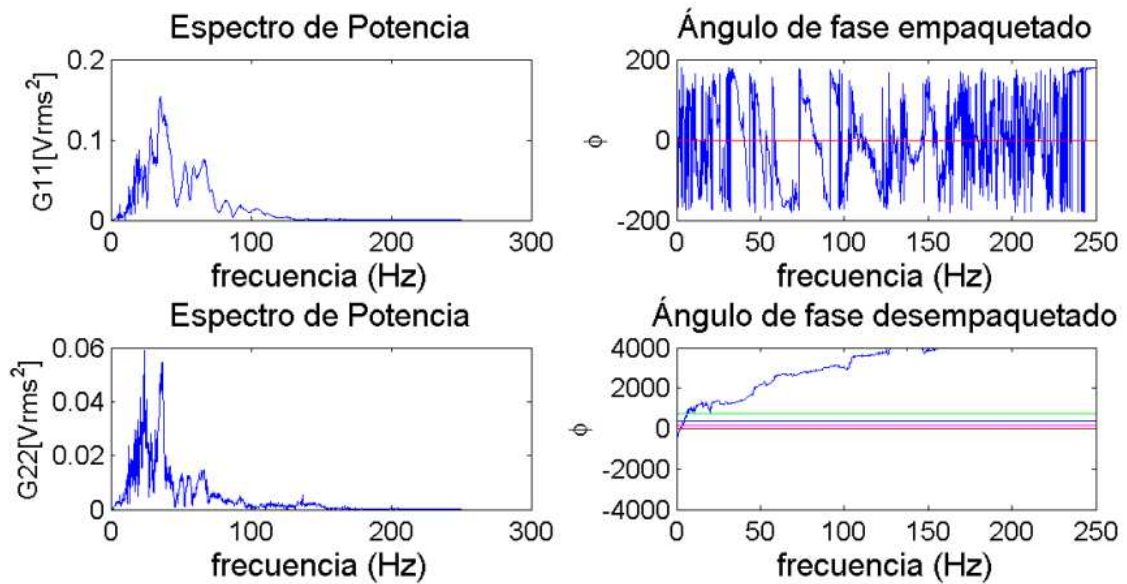


Figura G.9: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 16 m

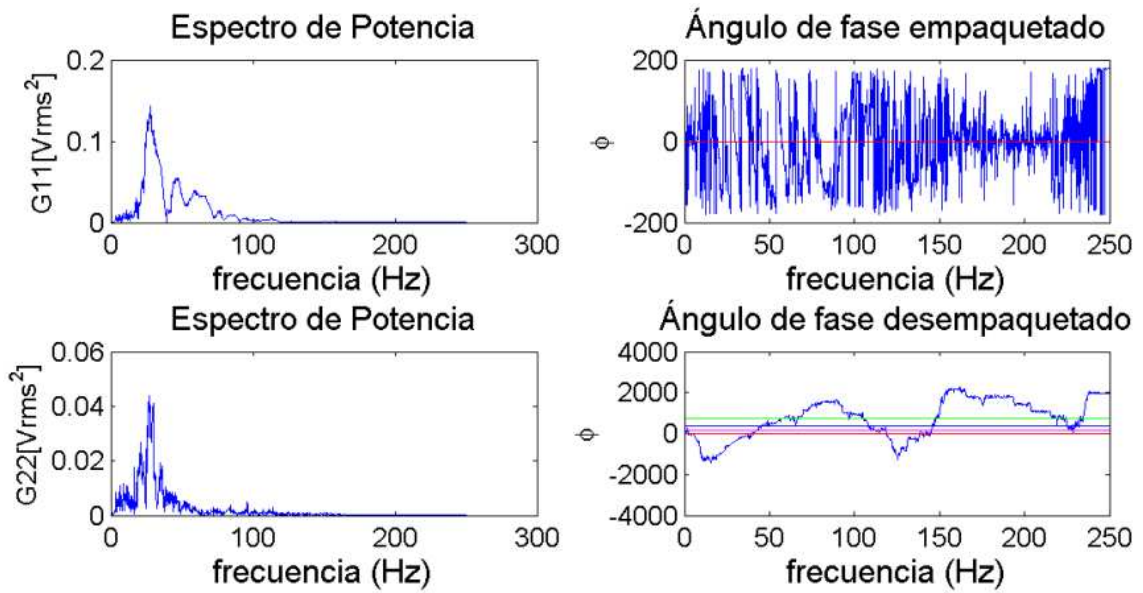


Figura G.10: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 24 m

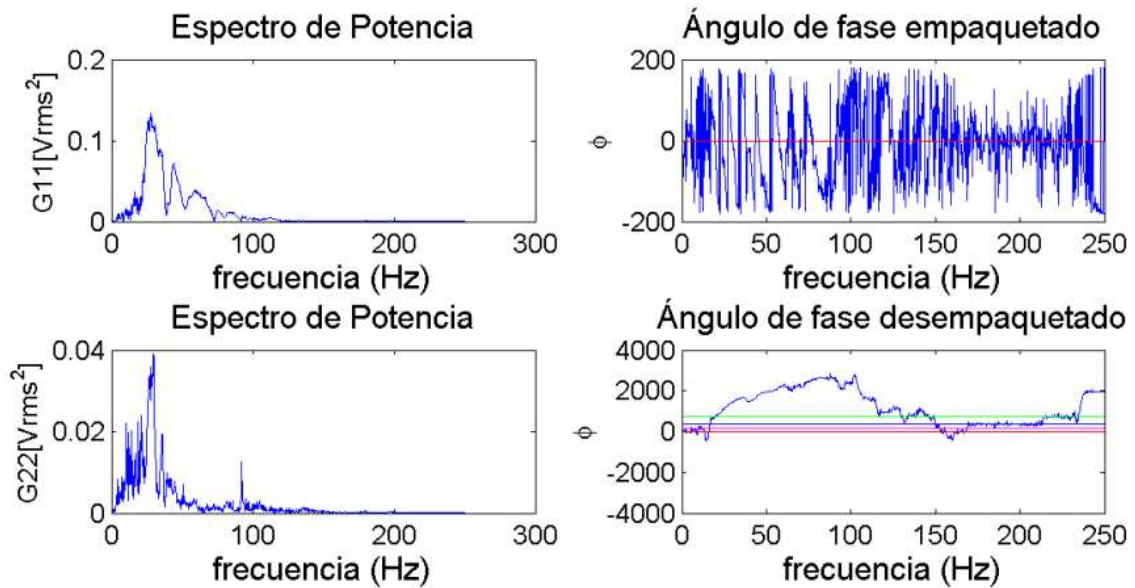


Figura G.11: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 24 m

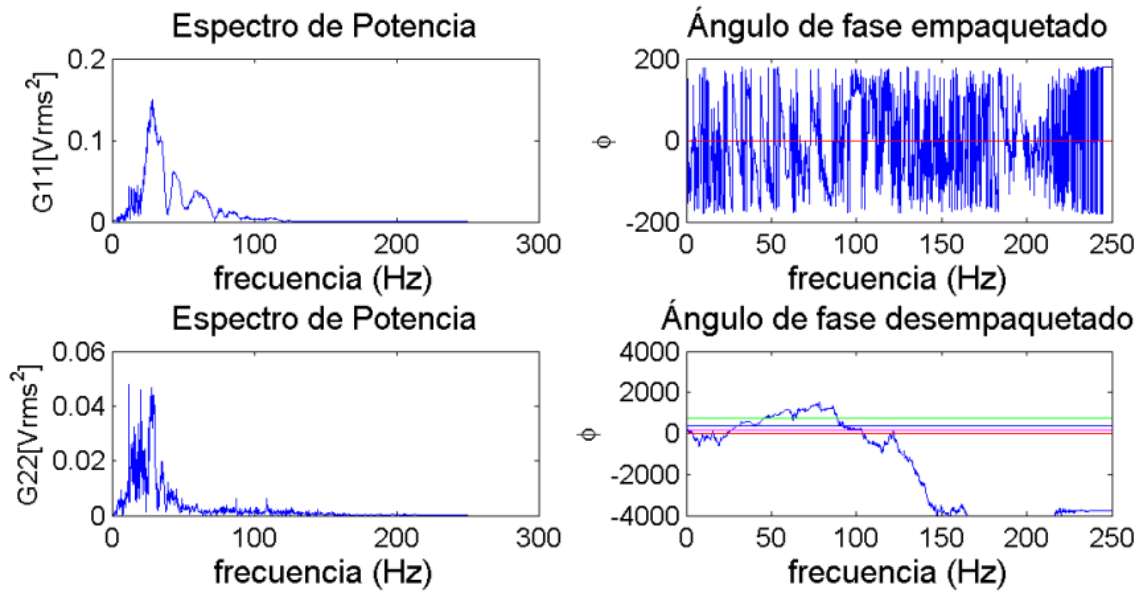


Figura G.12: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamento igual a 24 m

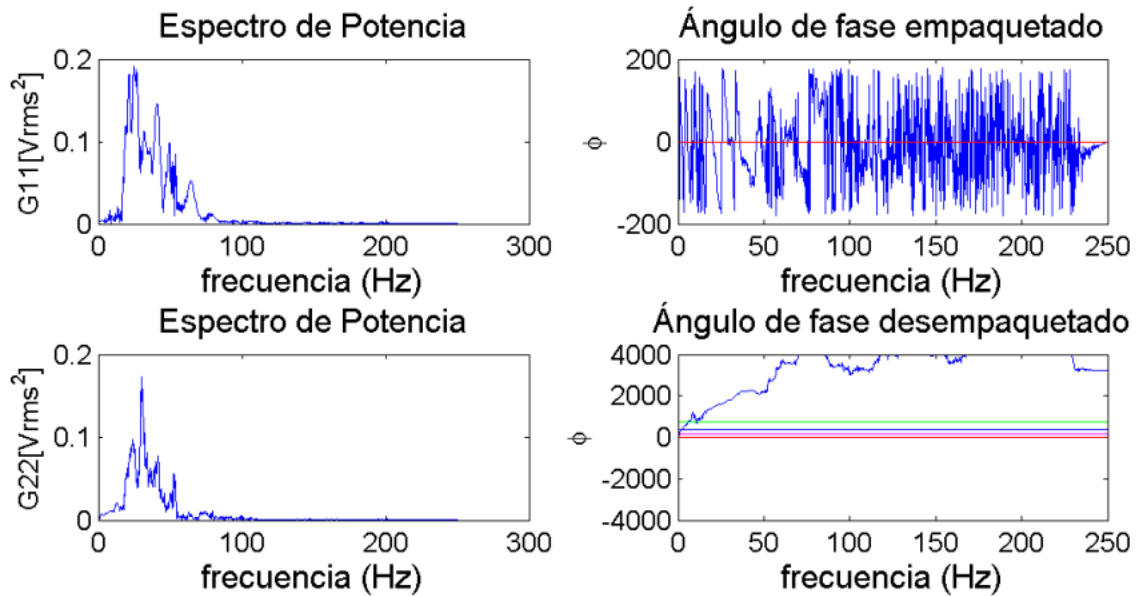


Figura G.13: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamento igual a 32 m

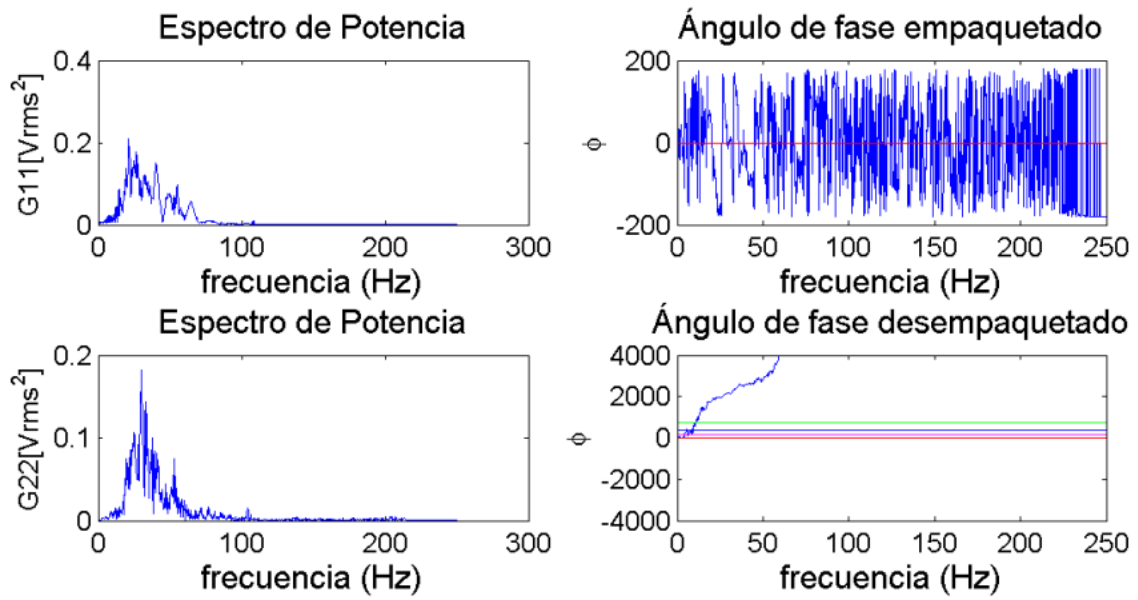


Figura G.14: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 32 m

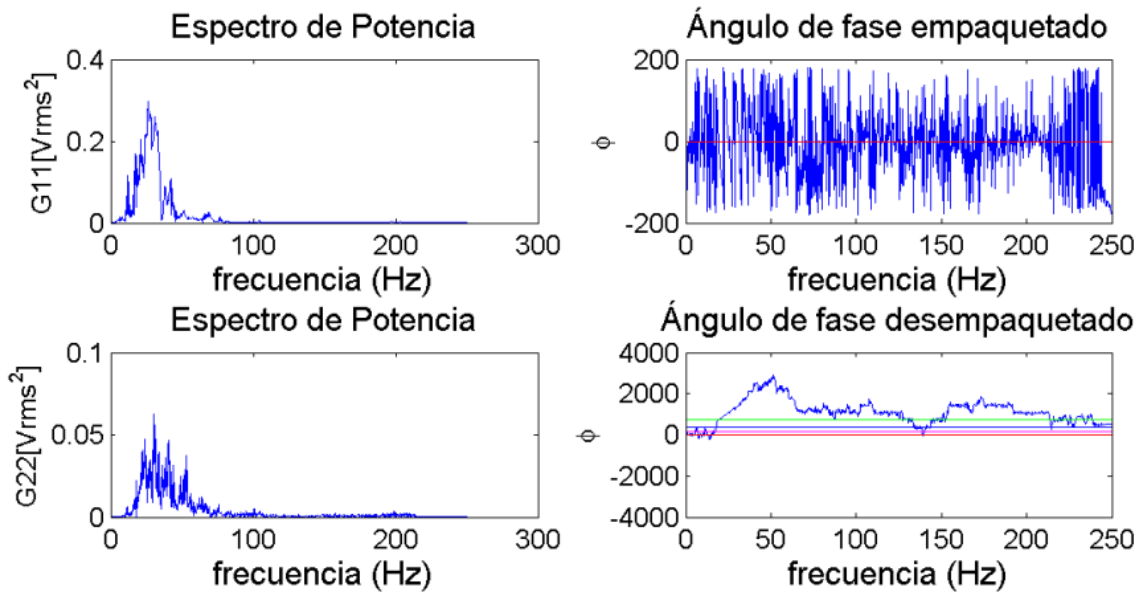


Figura G.15: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 40 m

Estación de Hualañé

Obtención de la curva de dispersión

A continuación se presenta la metodología de cómo se obtuvo de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Hualañé, siguiendo la expuesta en el capítulo 3. Primero se incluyen las curvas de dispersión de los registros con espaciamentos entre geófonos menores a 32 m (Figura H.1). Luego se agregan las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 32 m (Figura H.2). A continuación se eliminan las curvas que no se traslapen con las insertadas en el paso anterior (Figura H.3). Se repite este procedimiento para las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 40 m (Figuras H.4 y H.5). Finalmente se obtiene la curva de dispersión experimental del subsuelo promediando las curvas de dispersión que se seleccionaron en las etapas previas.

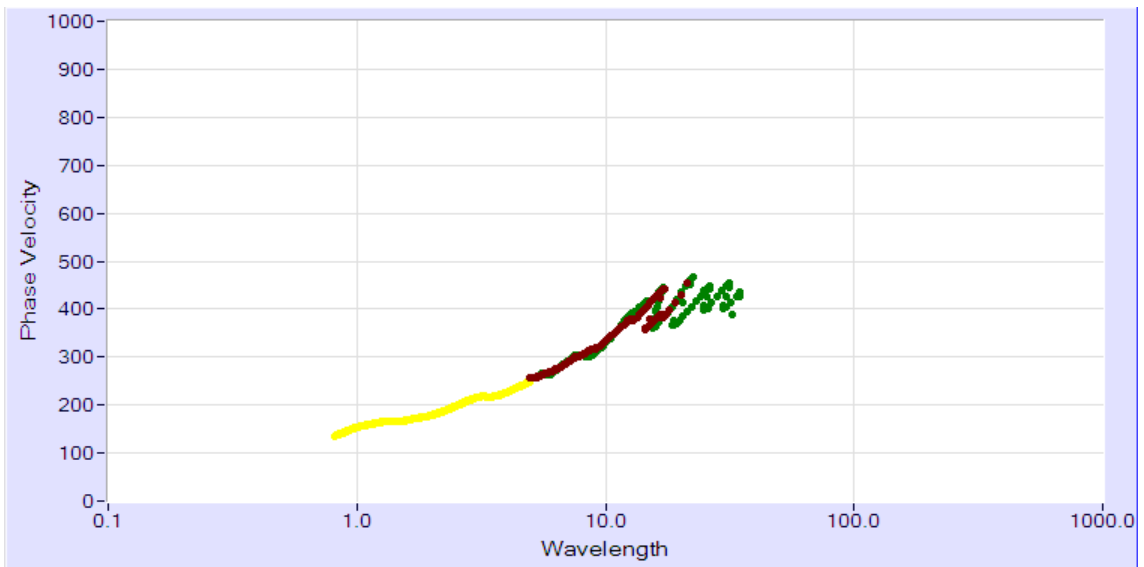


Figura H.1: Paso 1, inserción de las curvas de dispersión de los registros con espaciamentos de 2 m y 16 m.

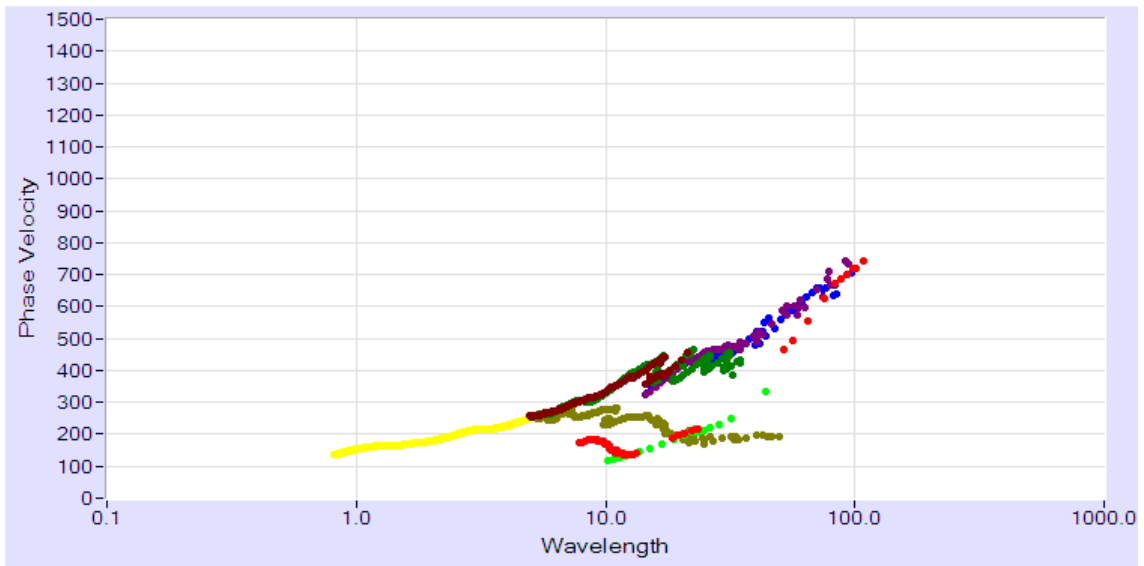


Figura H.2: Paso 2, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento de 32 m

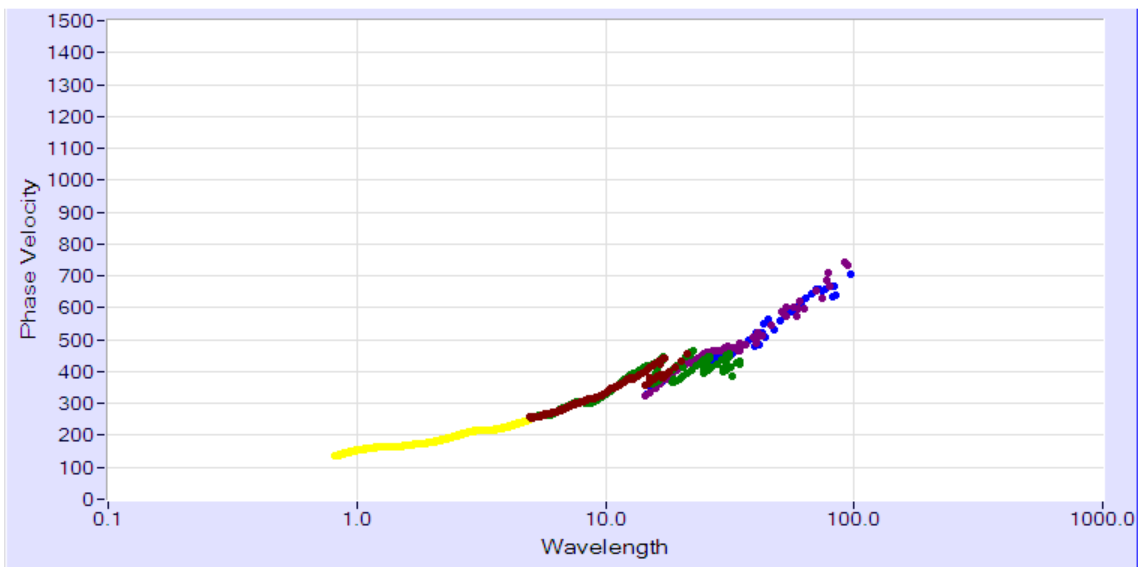


Figura H.3: Paso 3, después de la eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento de 32 m que no se traslapen con las insertadas

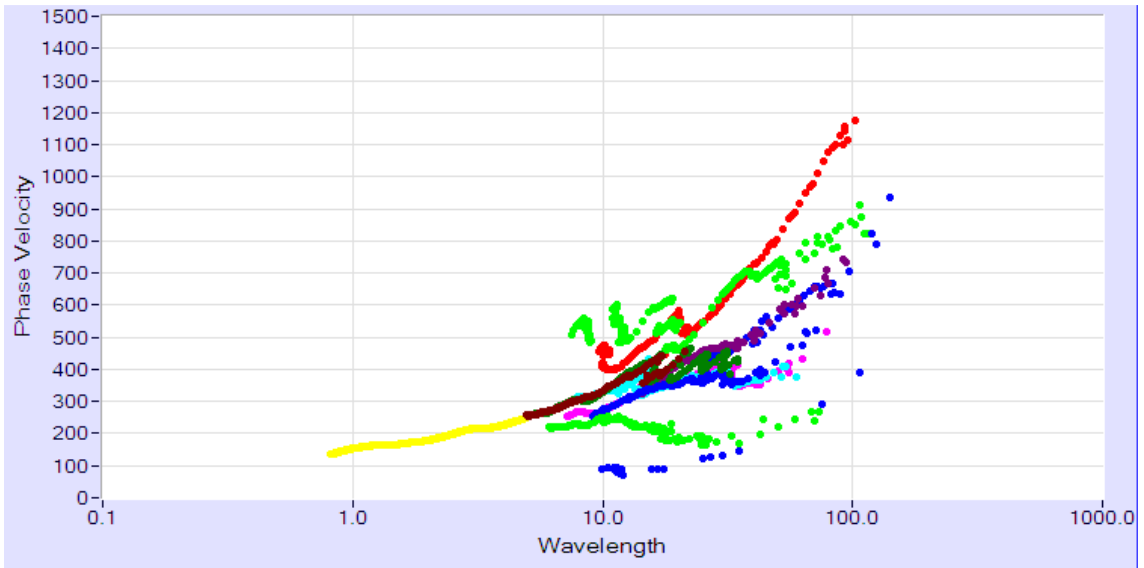


Figura H.4: Paso 4, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 40 m

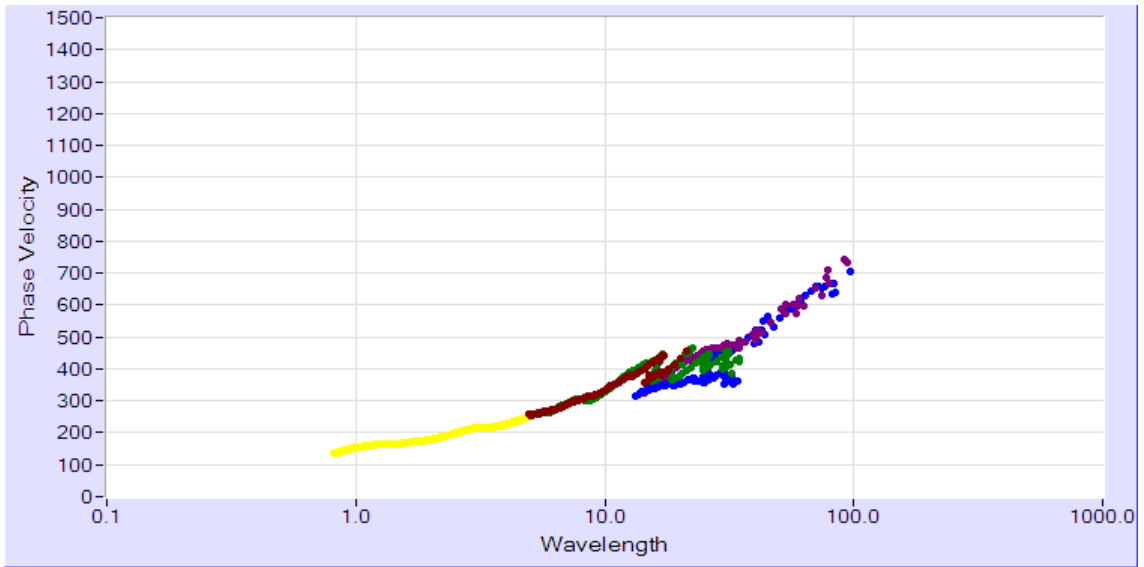


Figura H.5: Paso 5, eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 40 m que no se traslapan con las insertadas en los anteriores

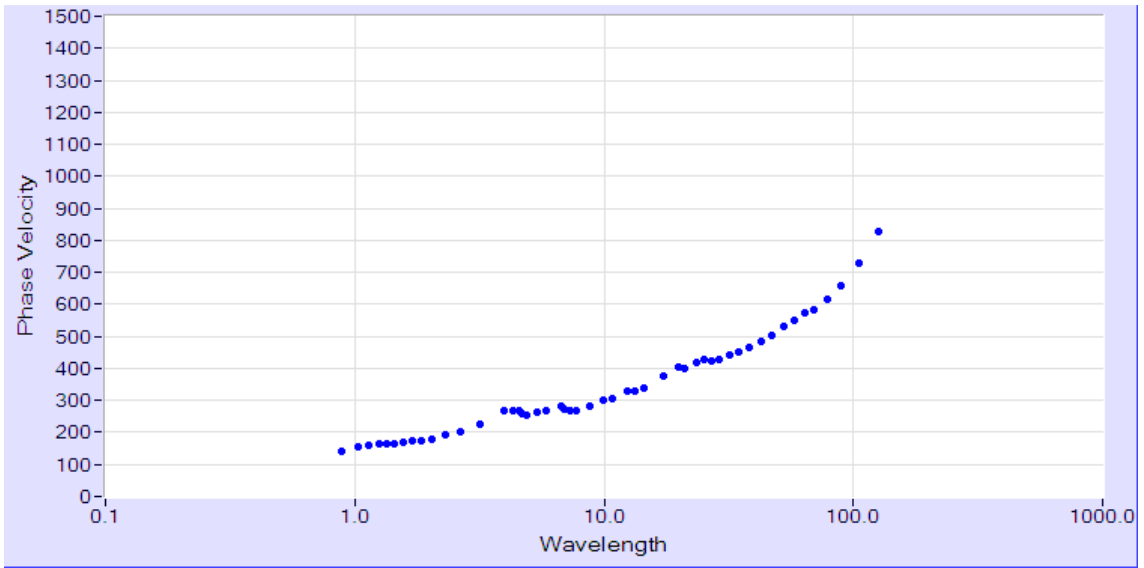


Figura H.6: Paso 6, curva de dispersión experimental del subsuelo del lugar, promediando las curvas de dispersión presentadas en la figura H.5

Análisis espectral de los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión de la Estación de Hualañé

A continuación se presentan las figuras obtenidas del análisis espectral realizado a los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Hualañé. Estas figuras incluyen los espectros de potencia para el registro de cada geófono y el ángulo de fase empaquetado y desempacotado, para los distintos espaciamientos.

Es importante mencionar que para algunos espaciamientos, se usaron más de una medición.

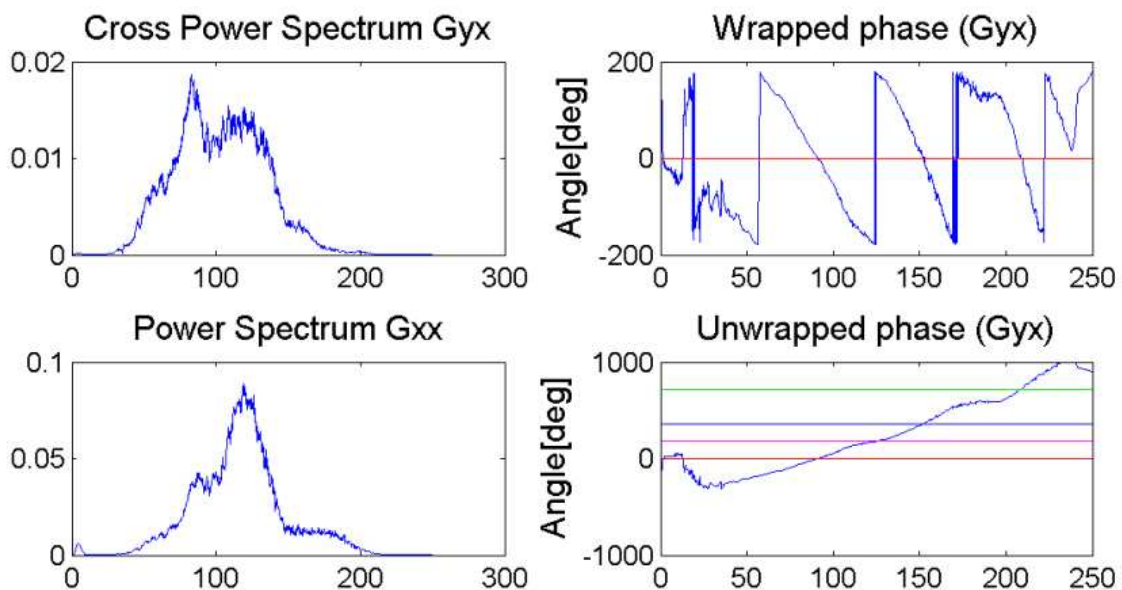


Figura H.7: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 2 m

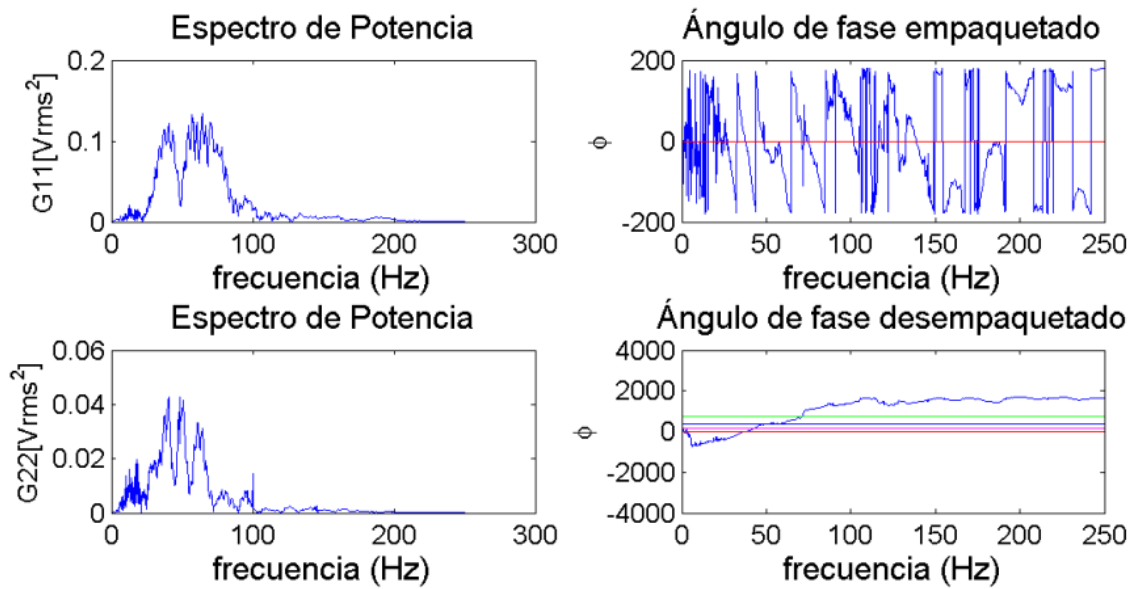


Figura H.8: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamento igual a 16 m

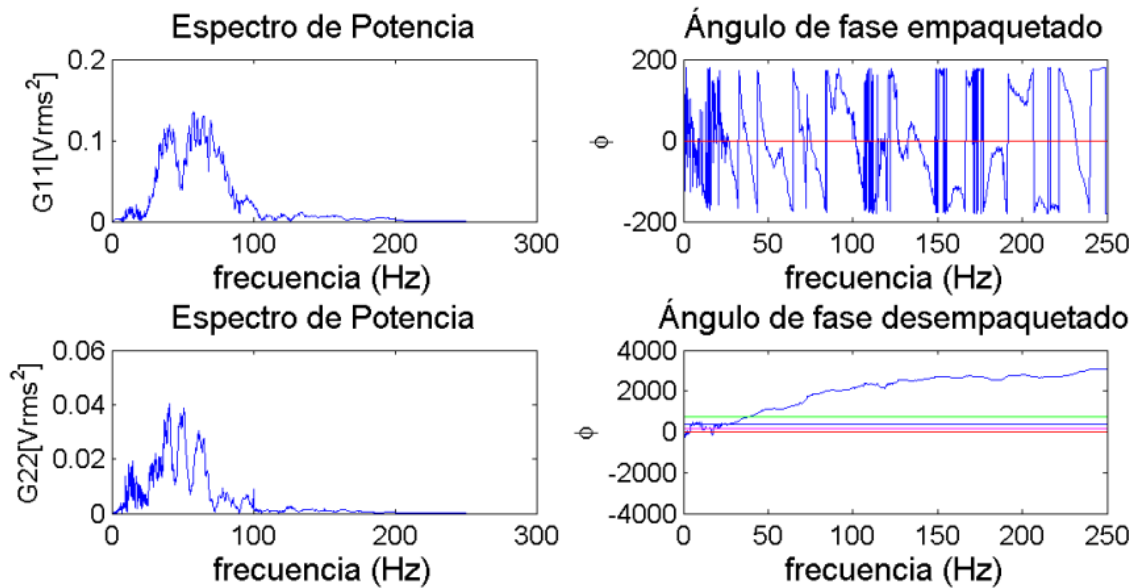


Figura H.9: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamento igual a 16 m

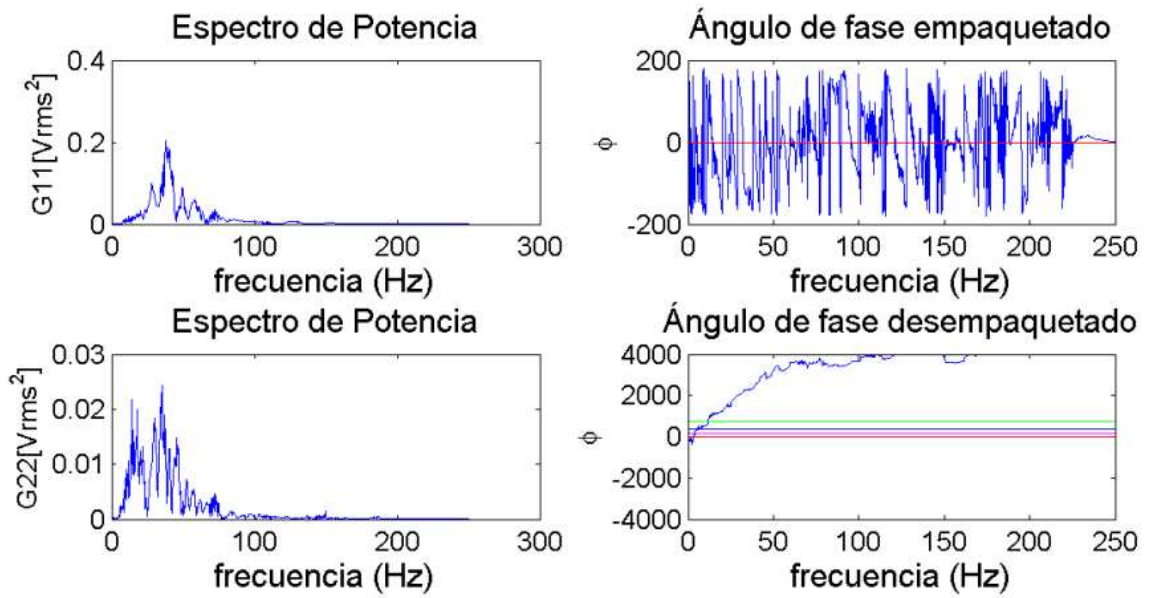


Figura H.10: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 32 m

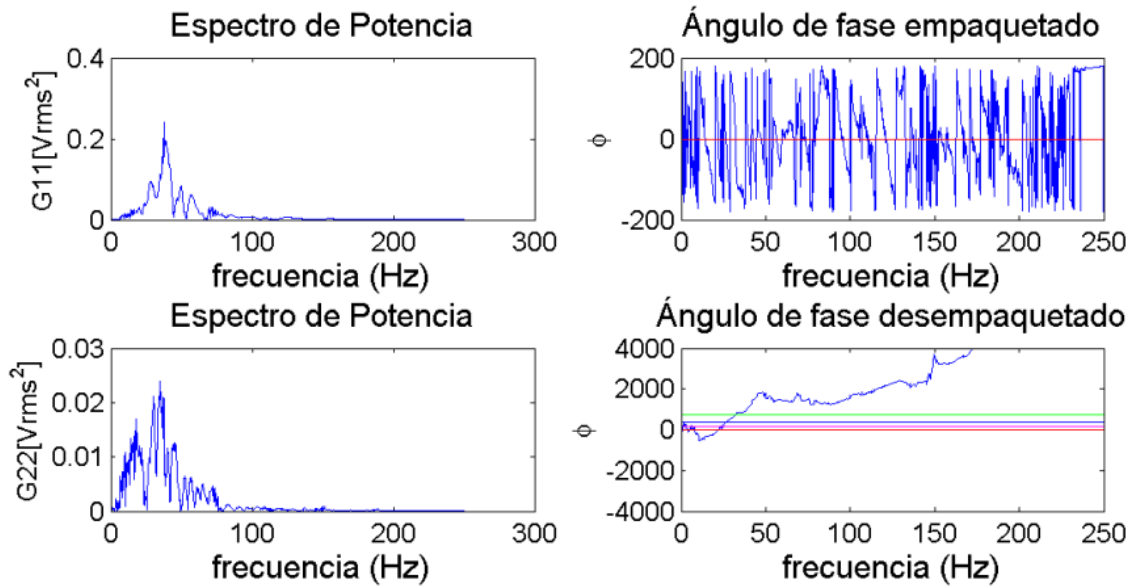


Figura H.11: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 32 m

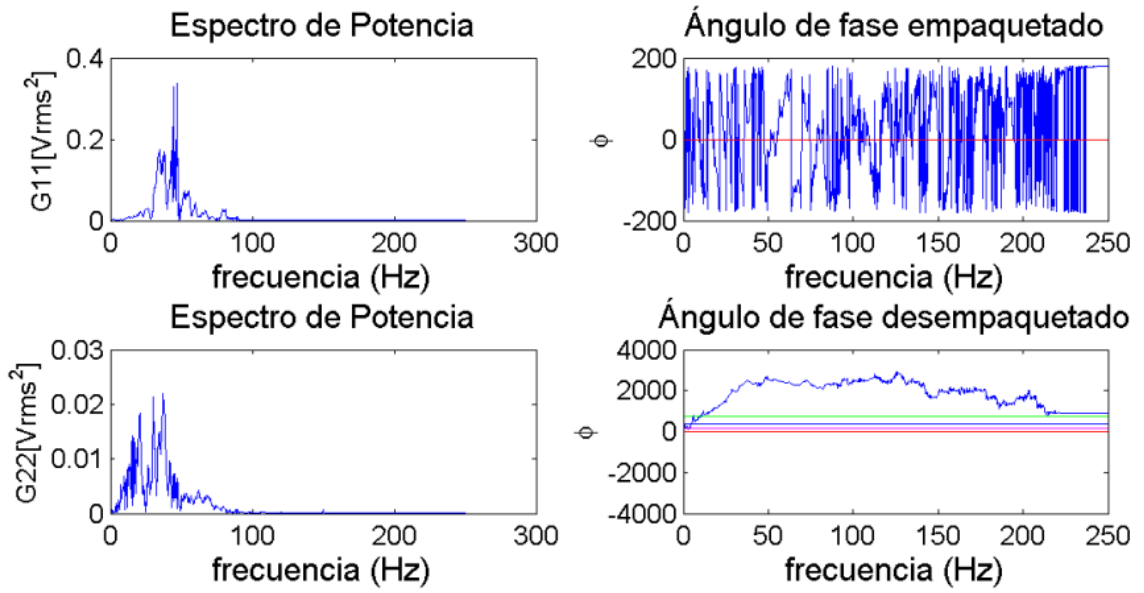


Figura H.12: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 40 m

Estación de Constitución

Obtención de la curva de dispersión

A continuación se presenta la metodología de cómo se obtuvo de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Constitución, siguiendo la expuesta en el capítulo 3. Primero se incluyen las curvas de dispersión de los registros con espaciamentos entre geófonos menores a 32 m (Figura I.1). Luego se agregan las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 32 m (Figura I.2). A continuación se eliminan las curvas que no se traslapen con las insertadas en el paso anterior (Figura I.3). Se repite este procedimiento para las curvas de dispersión de los registros con un espaciamento igual a 40 m (Figuras I.4, I.5 e I.6). Finalmente se obtiene la curva de dispersión experimental del subsuelo promediando las curvas de dispersión que se seleccionaron en las etapas previas.

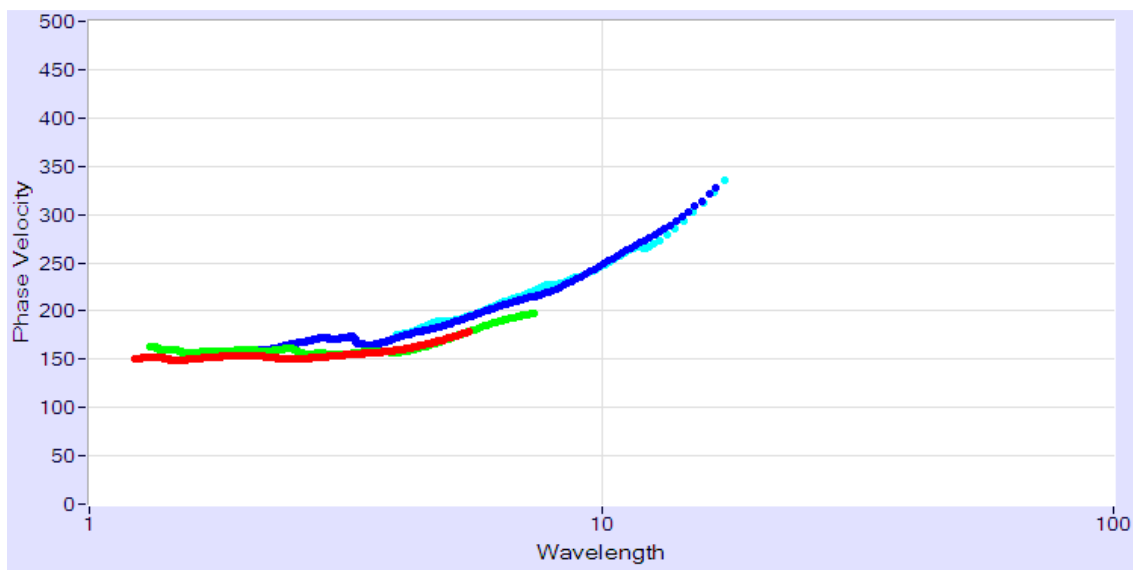


Figura I.1: Paso 1, inserción de las curvas de dispersión de los registros con espaciamentos de 2 m, 4 m, 8 m y 16 m.

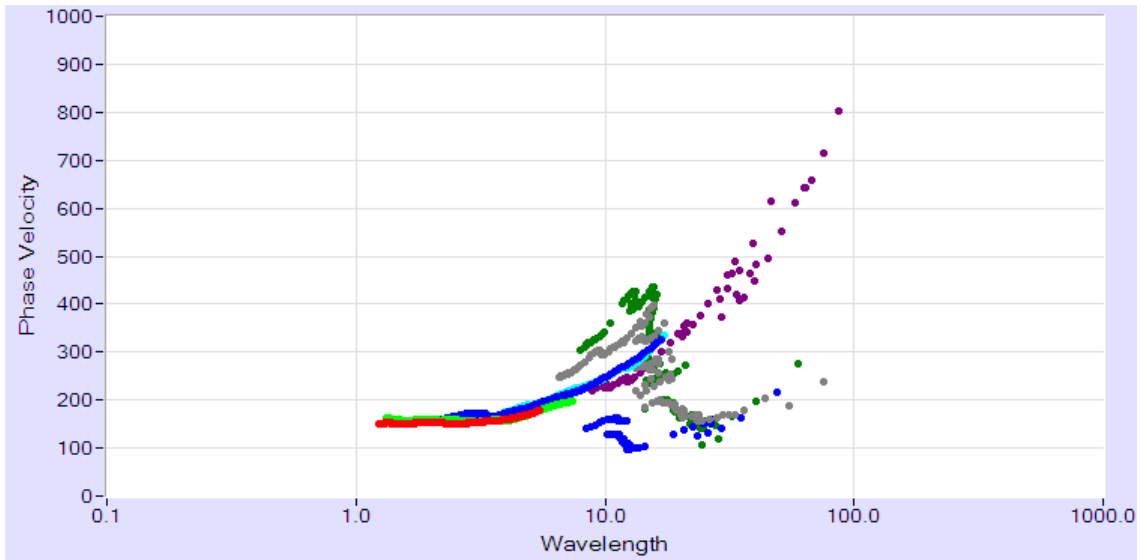


Figura I.2: Paso 2, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 32 m

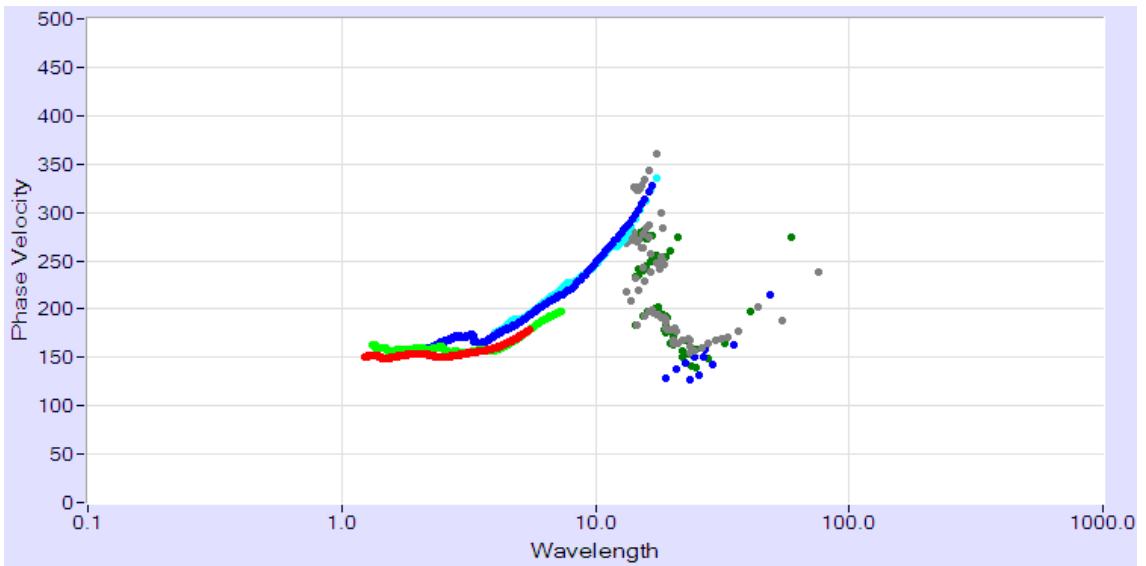


Figura I.3: Paso 3, después de la eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 32 m que no se traslapan con las insertadas

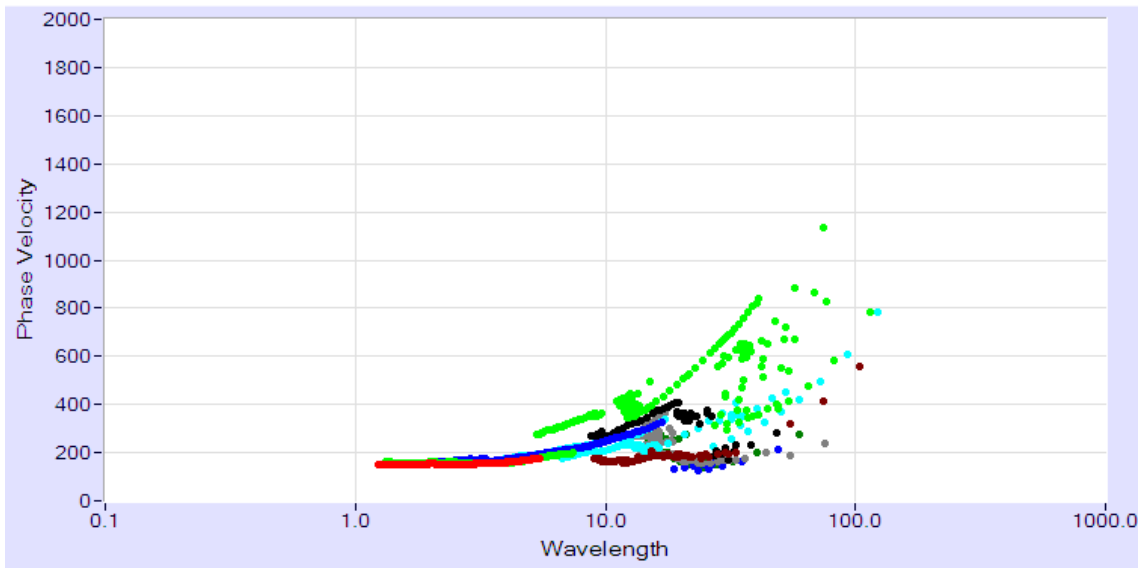


Figura I.4: Paso 4, inserción de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 40 m

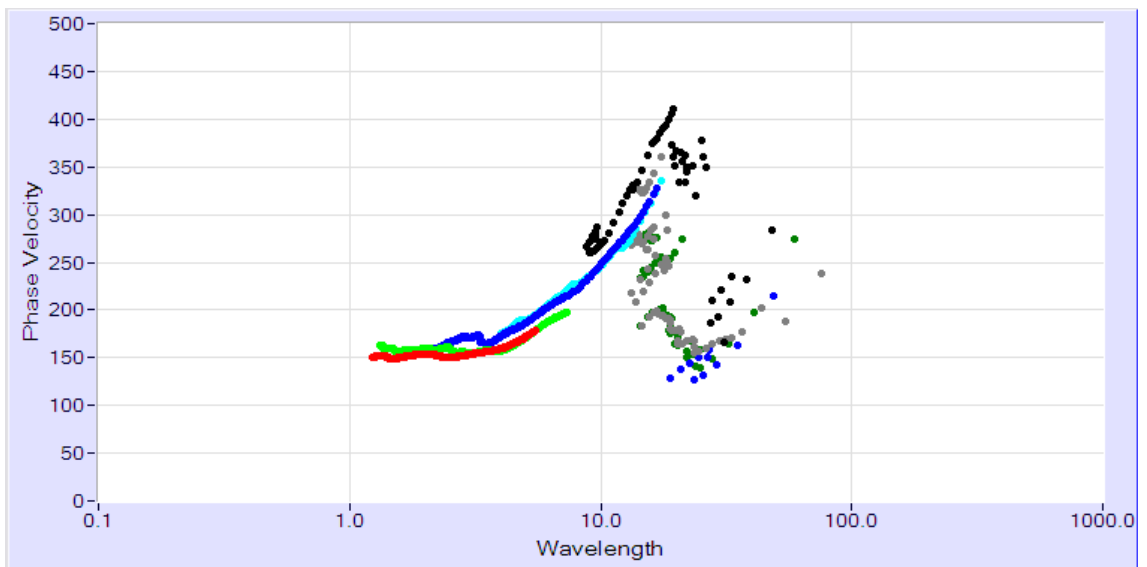


Figura I.5: Paso 5, etapa intermedia entre el paso 4 y 6

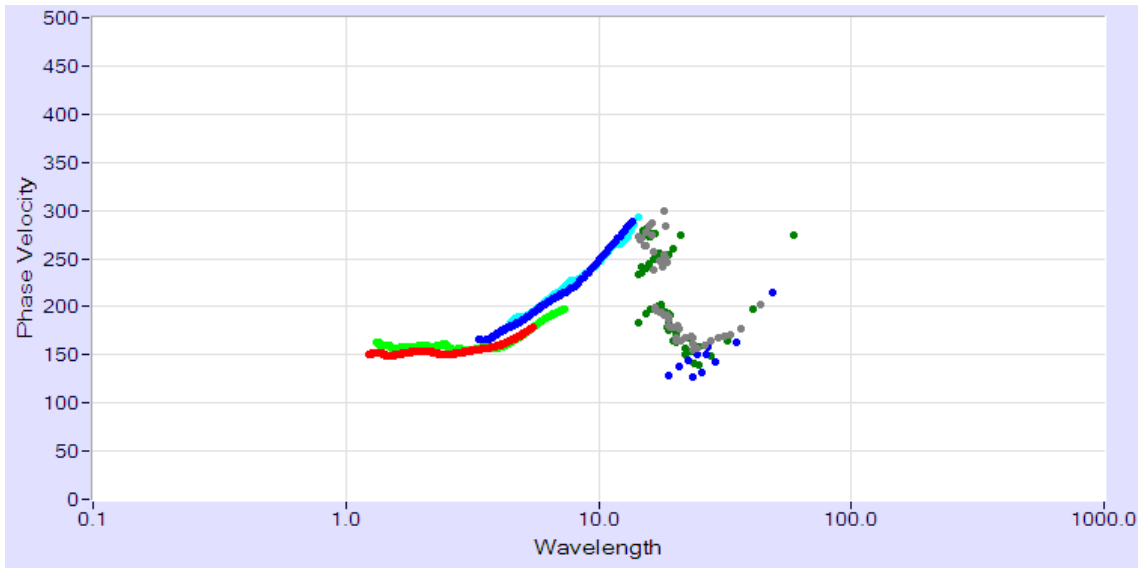


Figura I.6: Paso 6, después de la eliminación de las curvas de dispersión de los registros con un espaciamiento de 40 m que no se traslapen con las insertadas

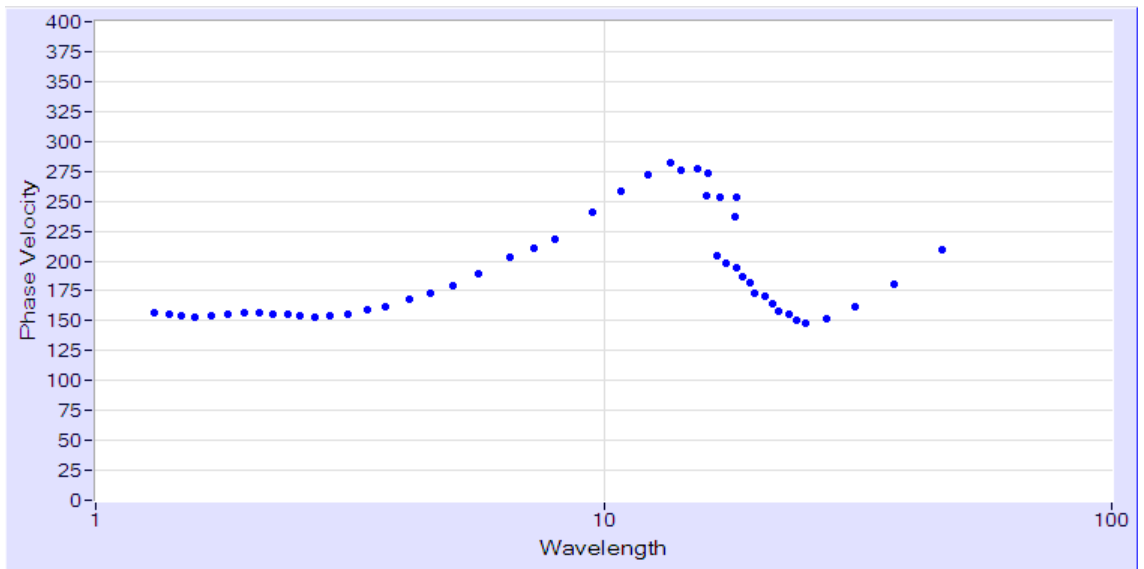


Figura I.7: Paso 7, curva de dispersión experimental del subsuelo del lugar, promediando las curvas de dispersión presentadas en la figura I.5

Análisis espectral de los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión de la Estación de Constitución

A continuación se presentan las figuras obtenidas del análisis espectral realizado a los registros seleccionados para la obtención de la curva de dispersión del subsuelo de la Estación de Constitución. Estas figuras incluyen los espectros de potencia para el registro de cada geófono y el ángulo de fase empaquetado y desempaquetado, para los distintos espaciamientos.

Es importante mencionar que para algunos espaciamientos, se usaron más de una medición.

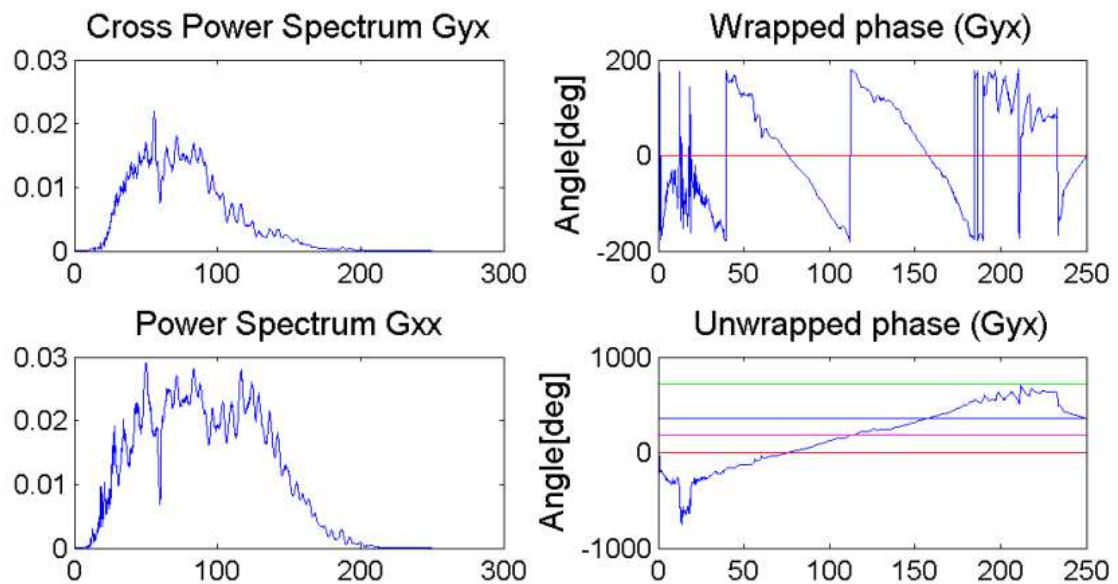


Figura I.8: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 2 m

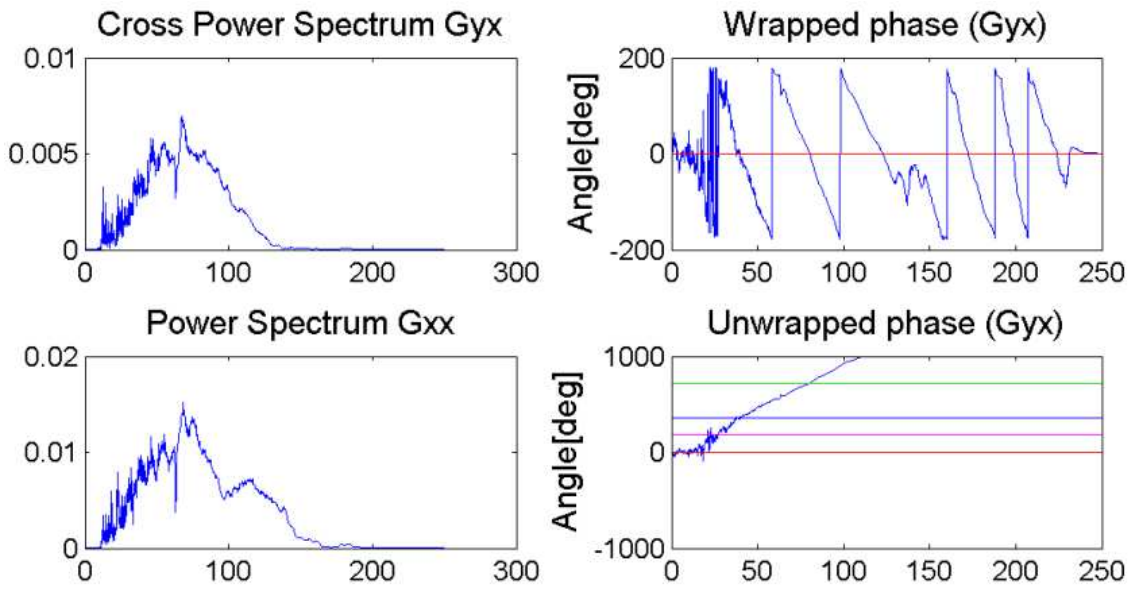


Figura I.9: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 4 m

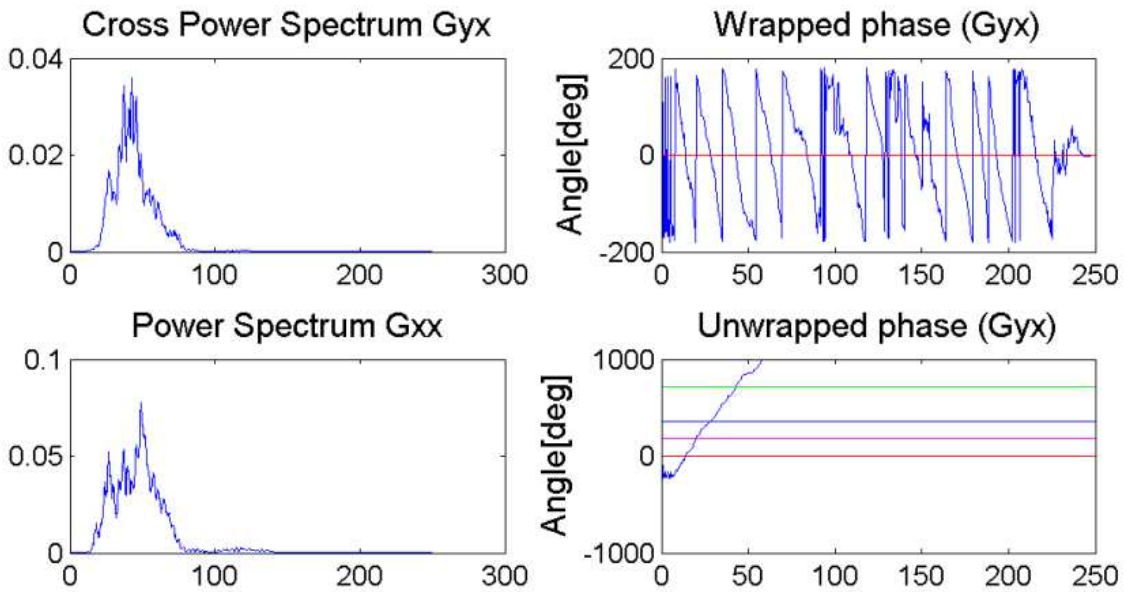


Figura I.10: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 8 m

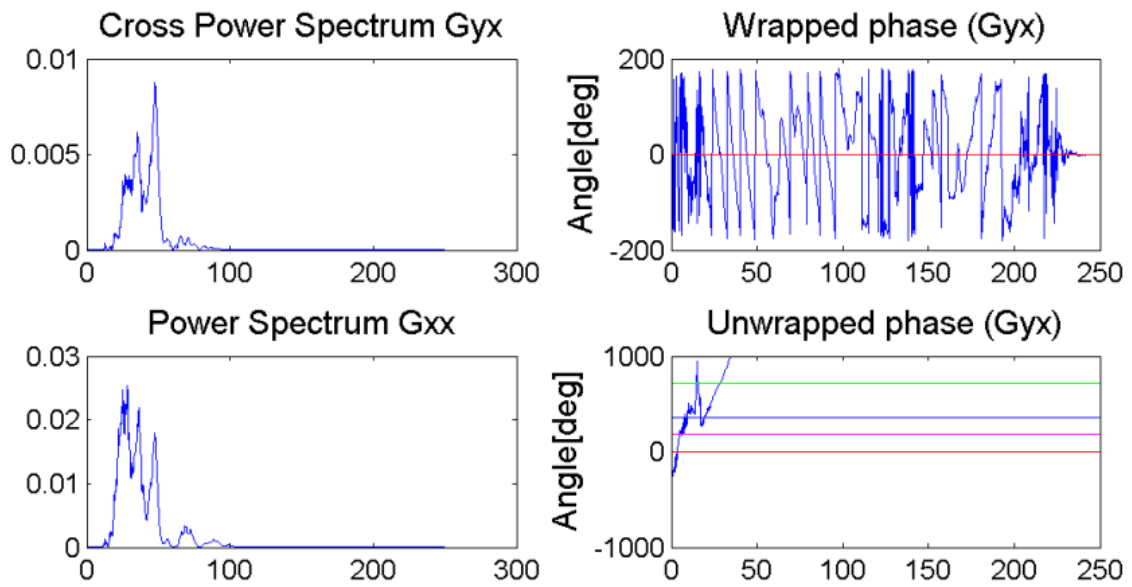


Figura I.11: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 16 m

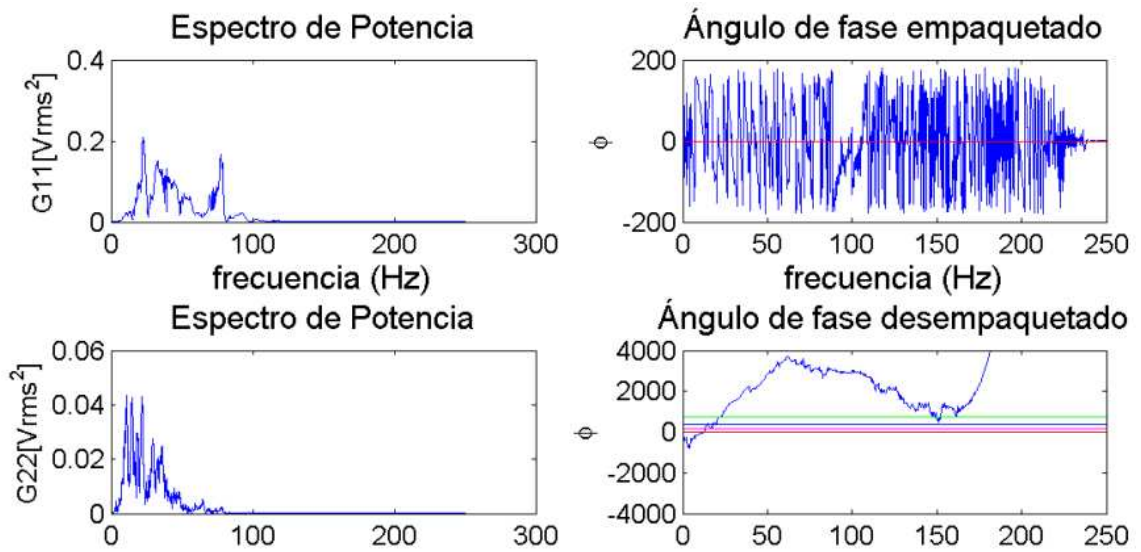


Figura I.12: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 32 m

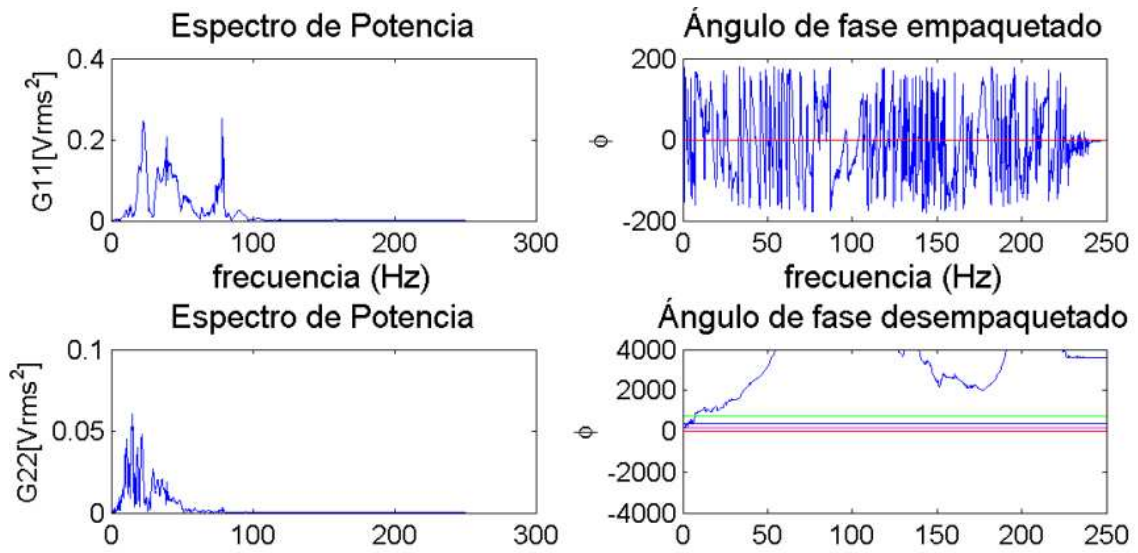


Figura I.13: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 32 m

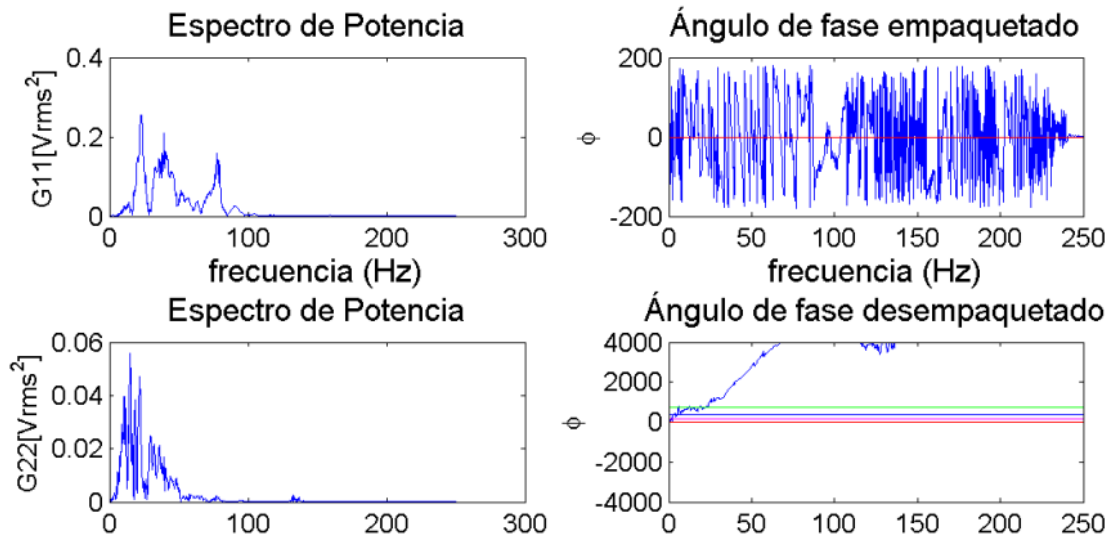


Figura I.14: Espectro de potencia para el registro de ambos geófonos y ángulos de fase, espaciamiento igual a 32 m

ANEXO B: REGISTRO FOTOGRÁFICO

En este anexo se presenta un registro fotográfico de algunas de las mediciones realizadas en este trabajo.



Fotografía 1: Lugar de medición del subsuelo de la Estación de Peñalolén



Fotografía 2: Ejecución de los golpes con el combo de 12.5 kg. Estación de Peñalolén



Fotografía 3: Instalación de los equipos en la medición del subsuelo de la Estación de Puente Alto



Fotografía 4: Geode y laptop usado en las mediciones. Estación de Puente Alto



Fotografía 5: Montaje del trípode en la camioneta para su transporte. Medición del subsuelo de la Estación de Mirador



Fotografía 6: Medición del subsuelo de la Estación de Casablanca. En la fotografía, a la derecha de la camioneta se encuentra el Teatro Municipal de la ciudad.



Fotografía 7: Despliegue de los equipos electrónicos. Estación de Casablanca



Fotografía 8: Sitio donde se realizó la medición del subsuelo de la Estación de Curicó



Fotografía 9: Montaje del trípode en terreno. Estación de Curicó



Fotografía 10: Calle donde se midió el subsuelo de la Estación de Hualañé



Fotografía 11: Despliegue de los equipos en la medición del subsuelo de la Estación de Hualañé



Fotografía 12: Ejecución de golpes con el combo de 12.5 kg en la medición del subsuelo de la Estación de Constitución. De fondo se puede ver el trípode desplegado



Fotografía 13: Equipos electrónicos utilizados. Estación de Constitución



Fotografía 14: Equipos electrónicos utilizados en las mediciones. Se puede ver en esta fotografía la textura fina del suelo de la Estación de Constitución

ANEXO C: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN UTILIZADO EN LA OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE FASE

A continuación es presentado el código de programación, realizado en el Software Matlab, que fue empleado para la obtención de la curva de fase a partir de los datos registrados por los geófonos luego de cada golpe:

```
function phase(file1,file2,delta,delay)
    h1=load(file1);           %file1: archivo con el registro del geófono 1
    h2=load(file2);           %file2: archivo con el registro del geófono 2
    n = max(size(h1));        %Número de datos del registro

    nHalf = n/2;
    H1 = fft(h1)/nHalf;       %FFT del registro del geófono 1
    H2 = fft(h2)/nHalf;       %FFT del registro del geófono 2
    H21=H2./H1;

    deltaT = delta;
    fNyq=1./2/deltaT;
    freq=[0:nHalf-1]'/nHalf*fNyq; %vector frecuencia

    tiempo=[0:n-1]*delta;    %vector tiempo

    y=[freq, real(H21(1:nHalf)), imag(H21(1:nHalf))]; %creación del archivo
    .hyx para usar en el Software

    save([file1,'_',file2,'.hyx'],'y','-ascii');

    II=figure;
    set(II,'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);

    %ploteo de los de espectros de potencia y de la curva de fase empaquetada y
    desempaquetada

    subplot(2,2,2);
    plot(freq,angle(H21(1:nHalf))*(360/(2*pi)))
    set (gca,'FontName','Symbol')
    ylabel('f');
    set (gca,'FontName','Helvetica')
    axis([0 fNyq -200 200]);
    title('Ángulo de fase empaquetado');
    xlabel('frecuencia (Hz)')
    set(get(gca,'xlabel'),'fontsize',15);
    set(get(gca,'ylabel'),'fontsize',12);
    set(get(gca,'title'),'fontsize',15);
    set(gca,'fontsize',12);
```

```

wrap=angle(H21(1:nHalf));
unwrap=-unwrap(wrap)*360/(2*pi);

subplot(2,2,4);
plot(freq,unwrap)
set(gca,'FontName','Symbol')
ylabel('f');
set(gca,'FontName','Helvetica')
axis([0 fNyq -4000 4000]);
title('Ángulo de fase desempquetado');
xlabel('frecuencia (Hz)')
set(get(gca,'xlabel'),'fontsize',15);
set(get(gca,'ylabel'),'fontsize',12);
set(get(gca,'title'),'fontsize',15);
set(gca,'fontsize',12);

Y1=abs(fft(h1))/nHalf; %valor absoluto de la FFT
Y2=abs(fft(h2))/nHalf; %valor absoluto de la FFT

G11=Y1(1:nHalf);
G22=Y2(1:nHalf);

subplot(2,2,1);
plot(freq,G11);
title('Espectro de Potencia');

ylabel('G11[Vrms^2]');

xlabel('frecuencia (Hz)')
set(get(gca,'xlabel'),'fontsize',15);
set(get(gca,'ylabel'),'fontsize',12);
set(get(gca,'title'),'fontsize',15);
set(gca,'fontsize',12);

subplot(2,2,3);
plot(freq,G22);
title('Espectro de Potencia');

ylabel('G22[Vrms^2]');

xlabel('frecuencia (Hz)')
set(get(gca,'xlabel'),'fontsize',15);
set(get(gca,'ylabel'),'fontsize',12);
set(get(gca,'title'),'fontsize',15);
set(gca,'fontsize',12);

print(II,'-dpng',[file1,'_',file2,'.png']);
print(II,'-dpng','finproceso.png');

pause(delay);

```


A continuación es presentado el código de programación, realizado en el Software Matlab, que fue empleado para el cálculo del promedio espectral para el conjunto de registros obtenidos para cada espaciamento:

```
function promedio_espectral(dir,fileArray2N,N,delta,D)
    H=[];
    HH=[];
    GG=[];
    GGpares=[];
    GGimpares=[];
    HHpares=[];
    HHimpares=[];
    nHalf=0;
    n=0;

    for i=1:N
        i1=2*i-1;           %archivos del primer canal
        i2=2*i;            %archivos del segundo
        hi1=load(char(strcat(dir,'\ ',fileArray2N(i1))));
        hi2=load(char(strcat(dir,'\ ',fileArray2N(i2))));
        n=max(size(hi1));
        %nHalf=nextpow2(n)/2;
        nHalf=n/2;
        Hi1=fft(hi1)/nHalf;
        Hi2=fft(hi2)/nHalf;
        H=[H,Hi1,Hi2];
    HHi=Hi2./Hi1;
        HH=[HH,HHi];           %funciones de transferencia
        GGi=Hi2.*conj(Hi1);
        GG=[GG,GGi];         %espectros de potencia
    cruzados
        HHpares=[HHpares,Hi2];
        HHimpares=[HHimpares,Hi1];
        GGpares=[GGpares,Hi2.*conj(Hi2)]; %espectros de potencia del
primer canal G1
        GGimpares=[GGimpares,Hi1.*conj(Hi1)]; %espectros de potencia del
segundo canal G2
    end

    deltaT=delta;
    fNyq=1./2/deltaT;
    freq=[0:nHalf-1]'/nHalf*fNyq;

    %Promedios
    Hxx=(1/N)*(sum(HHimpares'))';
    Hyy=(1/N)*(sum(HHpares'))';
    Gxx=(1/N)*(sum(GGimpares'))';
    Gyy=(1/N)*(sum(GGpares'))';
    Hyx=(1/N)*(sum(HH'))';
    Gyx=(1/N)*(sum(GG'))';
    unwrapHyx=-unwrap(angle(Hyx(1:nHalf)))*360/(2*pi()); %grados
    unwrapGyx=-unwrap(angle(Gyx(1:nHalf)))*360/(2*pi()); %grados

    y=[freq, real(Gyx(1:nHalf)), imag(Gyx(1:nHalf))]; %creación del archivo .hyx
para usar en en Software
```

```

save(['Espectro_cruzado_',D,'_m','.hyx'],'y','-ascii');

II=figure;
set(II,'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);

subplot(2,2,3);
plot(freq,abs(Gxx(1:nHalf))); %for plotting power spectrum
title('Espectro de Potencia');
set(get(gca,'xlabel'),'fontsize',15);
set(get(gca,'ylabel'),'fontsize',15);
set(get(gca,'title'),'fontsize',15);
set(gca,'fontsize',12);

ylabel('G22[Vrms^2]');
xlabel('frecuencia (Hz)')

subplot(2,2,1);
plot(freq,abs(Gyx(1:nHalf))); %for plotting cross power spectrum
title('Espectro de Potencia');
set(get(gca,'xlabel'),'fontsize',15);
set(get(gca,'ylabel'),'fontsize',15);
set(get(gca,'title'),'fontsize',15);
set(gca,'fontsize',12);

ylabel('G11[Vrms^2]');
xlabel('frecuencia (Hz)')

subplot(2,2,2);
plot(freq,angle(Gyx(1:nHalf))*(360/(2*pi)),'b-',freq,ceros,'r-') % for
plotting phase spectrum
ylabel('f');
xlabel('frecuencia (Hz)');
axis([0 fNyq -200 200]);
title('Ángulo de fase empaquetado');
set(get(gca,'xlabel'),'fontsize',15);
set(get(gca,'ylabel'),'fontsize',15);
set(get(gca,'title'),'fontsize',15);
set(gca,'fontsize',12);

subplot(2,2,4);
plot(freq,unwrapGyx); % for plotting phase spectrum
ylabel('f');
xlabel('frecuencia (Hz)');
axis([0 fNyq -1000 1000]);
title('Unwrapped phase (Gyx)');
set(get(gca,'xlabel'),'fontsize',15);
set(get(gca,'ylabel'),'fontsize',15);
set(get(gca,'title'),'fontsize',15);
set(gca,'fontsize',12);

print(II,'-dpng',['Espectro_cruzado_',D,'_m','.png'])

```