



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE CURVAS DE DISPERSIÓN Y CURVAS
ELÍPTICAS PARA GENERACIÓN DE CRITERIOS DE INVERSIÓN
CONJUNTA EN TÉCNICAS GEOFÍSICAS REQUERIDAS POR
NORMATIVA DE DISEÑO SÍSMICO

MATÍAS NICOLÁS ARAYA SEGURA

Memoria para optar al título de:
Ingeniero Civil

Profesor guía:
Gonzalo Suazo Fuentealba

28 de diciembre de 2022



Contenidos

Lista de Figuras	3
Lista de Tablas	7
1. Agradecimientos	8
2. Resumen	9
3. Abstract	10
4. Introducción	11
4.1. Objetivo general	14
4.2. Objetivos particulares	14
5. Estado del arte	15
5.1. Método de curvas de dispersión en vibraciones ambientales y registros sísmicos	15
5.2. Método HVSR en vibraciones ambientales y registros sísmicos	16
5.3. Clasificación sísmica de suelos	17
5.4. Limitaciones de V_{S30} y T_g en la clasificación sísmica de suelos	20
5.5. Inversión conjunta	21
6. Marco teórico	23
6.1. El suelo como medio continuo	23
6.2. Ondas sísmicas	26
6.2.1. Ondas de cuerpo	26
6.2.2. Ondas superficiales	28
6.3. Efectos de sitio	29
6.4. Estimación del perfil de V_s del suelo	30
6.4.1. Método CSW y SASW	32
6.4.2. Método MASW y ReMi	33
6.4.3. Curva dispersiva del suelo	33
6.5. Estimación del periodo fundamental del suelo	35
6.5.1. Métodos numéricos	36
6.5.2. Razón espectral estándar (SSR)	39
6.5.3. Razón espectral horizontal a vertical (HVSR)	39



6.5.4. Curva elíptica del suelo	41
7. Análisis de sensibilidad	43
7.1. Generación de modelos	43
7.2. Cálculo de curvas de dispersión mediante GEOPSY	49
7.3. Cálculo de curvas elípticas mediante GEOPSY	60
8. Casos de estudio	70
8.1. Caso 1: Limache	70
8.1.1. Ensayo ReMi-MASW	70
8.1.2. Curva dispersiva e inversión de datos	73
8.1.3. Ensayo HVSR	78
8.1.4. Curva elíptica e inversión de datos	79
8.1.5. Inversión conjunta	83
8.2. Caso 2: San Esteban	88
8.2.1. Ensayo ReMi-MASW	88
8.2.2. Curva dispersiva	88
8.2.3. Ensayo HVSR	91
8.2.4. Curva elíptica e inversión de datos	91
8.2.5. Inversión conjunta	92
9. Criterios de inversión conjunta	96
9.1. Compendio de resultados	96
9.2. Recomendaciones generales	98
10. Conclusiones	99
11. Referencias	101



Lista de Figuras

4.1. Geófono basado en computador Raspberry PI Zero (parte izquierda) y Controlador General basado en Raspberry PI 3 (parte derecha), desarrollados por Geotecnia UTFSM para mediciones ReMi y MASW.	12
4.2. Registro de equipo comercial y equipo desarrollado para medición ReMi-MASW, donde se observa la igualdad de los datos tomados.	12
4.3. Geófono tri-axial en su carcasa (a la izquierda), y equipo controlador basado en Raspberry PI 3 (a la derecha), desarrollados por Geotecnia UTFSM para mediciones HVSR.	13
5.1. Datos sísmicos sintéticos y su curva dispersiva asociada.	15
5.2. Comparación de frecuencias naturales obtenidas mediante relación H/V y SSR en distintos sitios.	16
5.3. Comparación entre periodo espectral y periodo de Nakamura en distintos sitios en Chile.	17
5.4. Comparación de diferentes normativas con el tipo de suelo que se definen en cada una y el parámetro de velocidad de onda de corte.	19
5.5. Funciones de transferencia de dos perfiles de suelo distintos, con valores de V_{S30} iguales.	20
5.6. Comparación de amplitudes espectrales del método H/V y SSR para distintos sitios.	21
6.1. Esfuerzo de corte τ /s deformación angular	23
6.2. Esfuerzo de corte τ /s deformación angular.	24
6.3. Ondas de cuerpo, arriba el efecto de ondas P y abajo el efecto de ondas S.	26
6.4. Registro sísmico en donde se aprecia la llegada desfasada de cada tipo de ondas.	28
6.5. Deformaciones producidas por ondas de Rayleigh (arriba) y de Love (abajo).	28
6.6. Velocidad de fase para suelo homogéneo (izquierda) y estratificado (derecho).	29
6.7. Concepto de efecto de sitio.	30
6.8. Nivel de energía de las ondas de cuerpo y superficiales para distintas frecuencias.	30
6.9. Ensayos de medición de ondas superficiales.	31
6.10. Esquema SASW.	32
6.11. Esquema MASW.	33
6.12. Curvas de dispersión obtenidas por métodos pasivos y activos.	34
6.13. Deposito horizontal de suelo sometido a una perturbación de corte basal.	36
6.14. Efecto de la frecuencia natural en el factor de amplificación.	38



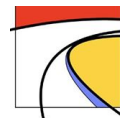
6.15. Efecto de la frecuencia y amortiguamiento en el factor de amplificación.	38
6.16. Estructura geológica típica de un depósito sedimentario.	40
6.17. Algoritmo para selección de ventanas de tiempo.	42
6.18. Comparación entre espectro de frecuencia en bruto y con distintos grados de suavizado.	42
6.19. Promedio de curvas H/V con peak de frecuencia claro.	42
7.1. Interfaz gráfica del paquete gplivemodel de GEOPSY.	43
7.2. Modelo 000.	44
7.3. Modelo 001A, B y C.	45
7.4. Modelo 002A, B y C.	45
7.5. Modelo 003A, B y C.	46
7.6. Modelo 004A, B y C.	46
7.7. Modelo 005A y B.	47
7.8. Modelo 006A y B.	47
7.9. Modelo 007A, B y C.	48
7.10. Modelo 008A, B y C.	48
7.11. Modelo 009A, B, C y D.	49
7.12. Curva dispersiva modelo 000.	50
7.13. Curva dispersiva modelo 001.	51
7.14. Curva dispersiva modelo 002.	52
7.15. Curva dispersiva modelo 003.	53
7.16. Curva dispersiva modelo 004.	54
7.17. Curva dispersiva modelo 005.	55
7.18. Curva dispersiva modelo 006.	56
7.19. Curva dispersiva modelo 007.	57
7.20. Curva dispersiva modelo 008.	58
7.21. Curva dispersiva modelo 009.	59
7.22. Curva elíptica modelo 000.	60
7.23. Curva elíptica modelo 001.	61
7.24. Curva elíptica modelo 002.	62
7.25. Curva elíptica modelo 003.	63
7.26. Curva elíptica modelo 004.	64
7.27. Curva elíptica modelo 005.	65
7.28. Curva elíptica modelo 006.	66



7.29. Curva elíptica modelo 007.	67
7.30. Curva elíptica modelo 008.	68
7.31. Curva elíptica modelo 009.	69
8.1. Ubicación de los perfiles sísmicos de tendidos 1 y 2.	71
8.2. Sensibilidad de geófono utilizado.	72
8.3. Equipos de medición ReMi-MASW desarrollados por Geotecnia UTFSM.	73
8.4. Interfaz de GEOPSY para procesamiento de señales.	74
8.5. Interfaz gráfica de DINVER para definir parámetros de suelo.	75
8.6. Curva dispersiva para ambos tendidos del primer caso de estudio, y comparación con modelos previamente analizados.	77
8.7. Modelos invertidos a partir de la curva dispersiva registrada en el tendido 1.	77
8.8. Modelos invertidos a partir de la curva dispersiva registrada en el tendido 2.	78
8.9. Ubicación de los lugares registrados con ensayo de Nakamura.	79
8.10. Disposición general de los componentes del geófono triaxial desarrollado por Geotecnia UTFSM.	80
8.11. Comparación entre espectro de frecuencia bruto y suavizado con distintas potencias.	81
8.12. Obtención de razón H/V mediante GEOPSY.	82
8.13. Curva elíptica de las tres mediciones HVSR del Caso de Estudio 1, y comparación con otros casos analizados previamente.	83
8.14. Ubicación de mediciones ReMi-MASW y HVSR.	83
8.15. Idea general del proceso asociado a la inversión conjunta de datos.	84
8.16. Curvas elípticas de método HVSR, y curvas obtenidas de modelo invertido desde medición ReMi-MASW para cada tendido y set de parámetros.	85
8.17. Perfil invertido original y modificado del suelo, con criterios de inversión conjunta.	86
8.18. Curvas dispersivas y elípticas del perfil estratigráfico invertido, tanto original como modificado con criterios de inversión conjunta.	87
8.19. Ubicación de los perfiles sísmicos de tendidos 1 y 2 del Caso de Estudio 2.	89
8.20. Curva dispersiva para ambos tendidos del segundo caso de estudio, y comparación con modelos previamente analizados.	89
8.21. Modelos invertidos a partir de la curva dispersiva registrada en el tendido 1.	90
8.22. Modelos invertidos a partir de la curva dispersiva registrada en el tendido 2.	91
8.23. Ubicación de los lugares registrados con ensayo de Nakamura.	92
8.24. Curva elíptica de las tres mediciones HVSR del Caso de Estudio 2, y comparación con otros casos analizados previamente.	93



8.25. Ubicación de mediciones ReMi-MASW y HVSR.	93
8.26. Curvas elípticas de método HVSR, y curvas obtenidas de modelo invertido desde medición ReMi-MASW para cada tendido y set de parámetros	94
8.27. Perfil invertido original y modificado del suelo, con criterios de inversión conjunta.	94
8.28. Curvas dispersivas y elípticas del perfil estratigráfico invertido, tanto original como modificado con criterios de inversión conjunta.	95



Lista de Tablas

5.1. Requisitos de clasificación sísmica de la normativa vigente.	18
5.2. Requisitos de clasificación sísmica propuestos.	18
6.1. Variación de las propiedades del suelo con el nivel de deformación angular	24
8.1. Coordenadas de los perfiles sísmicos de tendidos 1 y 2.	72
8.2. Set de parámetros de suelo a obtener.	76
8.3. Coordenadas de los perfiles sísmicos de tendidos 1 y 2.	79
8.4. Duración recomendada de registros.	80
8.5. Coordenadas de los perfiles sísmicos de tendidos 1 y 2 del Caso de Estudio 2. . .	88
8.6. Coordenadas de los perfiles sísmicos de tendidos 1 y 2.	91



1. Agradecimientos

Este trabajo es dedicado a todas las personas que de una u otra forma son y fueron parte de quien soy el día de hoy. En primer lugar, agradecer a mi madre que dedicó cada día de mi crianza ha darme todas las oportunidades que tuvo y que no tuvo a su disposición, muchas veces postergando sus sueños en pos de los míos. A mi padre, que no descansó un día en muchos años con tal de sustentarnos. A mis hermanas que soportan lo mejor y peor de mí, pero que las pienso cada día. A mi familia entera por preocuparse de mí, velando tanto en la comodidad como en la penuria: mi Yaya, mi tía Paz y mi tía Carol. Los amo infinitamente.

Quiero dejar en cada ola y en cada brisa salina, toda mi gratitud a mi abuelo Tito. Así, hacerle saber que si bien no pude cumplir en vida su sueño de verme obtener mi título profesional, pienso en el cada día y este logro es para el también.

Quiero agradecer a mi familia no sanguínea: Jael y Luna, porque han hecho hogar en mi corazón con cariño y paciencia todos los días. Me siento afortunado al tener su compañía. Las quiero cada día y espero seguir haciéndolo hasta mi ocaso.

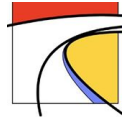
Quiero saludar a todos mis amigos y sus familias, por apoyar mi crecimiento y hacer de cada día, un día emocionante, brillante, interesante, más colorido: Felipe, Víctor, Sergio, Ignacio, Rodrigo, Álvaro, Bayron, Jorge, Daniel, Nicolás, Pablo, Maicol, José, Marcelo, Osvaldo, Javiera, Manuel, Sebastián, Leonel, Nicolás A., Eduardo, Nicolás V., Daniel C., Dante, Cris S., Ale, Misa, aquellos de los que hemos separado caminos y cuanto otro que no recuerdo en esta remembranza. Mi vida solo es posible con ustedes en ella. Gracias totales a cada uno de ustedes.

Quiero agradecer a aquellas personas e instituciones que en el ámbito laboral, han depositado su confianza en mí: nuevamente a Víctor, y a Diego y Christian de MAD. Gracias por darme la oportunidad.

Finalmente, dedico mis últimas palabras al viento, a esta tierra, a los senderos y al mar, porque he recorrido y leído tanto como he querido y podido, y aun así otorgan cada vez:

*Deja que todo suceda,
belleza y horror,
sigue adelante,
ningún sentimiento es el último.*

Rilke



2. Resumen

Para el diseño de obras civiles se requiere la caracterización del suelo sobre el cual se fundará el proyecto con el fin de determinar la respuesta del sistema suelo-estructura frente a distintas solicitaciones. Por ejemplo, la norma NCh 433 (INN, 2009) define espectros de diseño en base a la clasificación del suelo mediante múltiples parámetros, como la velocidad de propagación de ondas de corte equivalente de los primeros 30 metros del suelo (V_{S30}).

El proceso matemático asociado a la determinación de la V_S consta de la proposición de modelos estratigráficos con parámetros variables que permiten obtener curvas de dispersión teóricas, las que se ajustan a curvas dispersivas generadas en terreno mediante método ReMi o MASW (Wathelet, Jongmans, y Ohrnberger, 2005). Este proceso presenta múltiples soluciones, lo que puede traducirse en errores en la clasificación sísmica del suelo por lo cual es de interés usar parámetros adicionales, como el periodo fundamental de vibración del terreno (Verdugo, 2019), que permiten seleccionar la solución más representativa. Este parámetro se determina mediante análisis de curvas elípticas teóricas comparadas con espectros de respuestas medidos con método HVSR (SESAME, 2004).

Al combinar la información geofísica disponible es posible caracterizar dinámicamente el subsuelo con enfoques de inversión conjunta. Este trabajo presenta un análisis de sensibilidad de curvas de dispersión y elípticas invirtiendo las mediciones de MASW y HVSR respectivamente, para generar criterios de inversión conjunta. De esta forma se busca enlazar los procesos mediante el uso de estratigrafía propuesta común para seleccionar la solución más representativa (Haber y Oldenburg, 1997).



3. Abstract

For the design of civil engineering projects, is required the characterization of the soil on which the project will be founded in order to determine the response of the soil-structure system to different solicitations. For example, the NCh 433 (chilean) standard (INN, 2009) defines design spectra based on soil classification using multiple parameters, such as the equivalent shear wave propagation speed of the first 30 meters of soil (V_{S30}).

The mathematical process associated with the determination of V_S consists of the proposition of stratigraphic models with variable parameters that allow obtaining theoretical dispersion curves, which are adjusted to dispersive curves generated in the field using the ReMi or MASW method (Wathelet et al, 2005). This process presents multiple solutions, which can result in errors in the seismic classification of the ground, for which it is of interest to use additional parameters, such as the fundamental period of ground vibration (Verdugo, 2019), which allow selecting the most representative solution. This parameter is determined by analysis of theoretical elliptic curves compared with response spectra measured with the HVSR method (SESAME, 2004).

By combining the available geophysical information it is possible to dynamically characterize the subsurface with joint inversion approaches. This work presents a sensitivity analysis of dispersion and elliptic curves inverting the MASW and HVSR measurements, respectively, to generate joint inversion criteria. In this way, it is sought to link the processes through the use of common proposed stratigraphy to select the most representative solution (Haber y Oldenburg, 1997).



4. Introducción

Todo proyecto de ingeniería civil está regulado por un conjunto de normas que de una u otra forma, requieren de la caracterización del suelo en el que se emplaza el proyecto. Para esto, la identificación de ciertas características del terreno permite determinar el comportamiento de la estructura ante solicitaciones inherentes a la interacción suelo-estructura.

Luego del terremoto del 27 de febrero de 2010 en Chile, y una vez analizados sus efectos en la infraestructura y economía a nivel país, es que desde el 2011 se tienen nuevas exigencias que requieren conocer parámetros geofísicos del sitio específico donde se emplaza cada nuevo proyecto, caracterizándolo mediante una ponderación de la velocidad de ondas de corte en profundidad, más conocido como V_{S30} . Sin embargo, estudios recientes han demostrado que este valor no es completamente efectivo en esta labor, y se espera que en el corto o mediano plazo se incorporen nuevos parámetros del comportamiento del suelo, en específico, su periodo fundamental de vibración. En cualquier caso, la determinación del parámetro de interés queda supeditado a la correcta identificación de las distintas capas de suelo mediante su espesor, densidad, y módulos elásticos lo que no es sencillo ni económico.

En el caso del perfil de velocidad de ondas de corte del suelo, los valores de V_S resultan de un proceso que no posee solución única, el que se conoce como inversión de curvas de dispersión, las que representan bidimensionalmente la velocidad de fase y frecuencia determinadas mediante ensayos de terreno. Por otro lado, el periodo fundamental de vibración del terreno, que como ya se dijo, será exigencia en el futuro, se determina mediante el análisis de curvas elípticas también determinadas a partir de registro de ondas superficiales. Resulta natural entonces, querer usar toda la información disponible del suelo con tal de mejorar la interpretación del objeto de interés, naciendo así el concepto de inversión conjunta donde se utilizan las curvas de dispersión y elíptica para obtener soluciones más acotadas y representativas

Es así, que el Área de Geotecnia del departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María, ha desarrollado equipos costo-eficientes de medición para los parámetros mencionados, siendo este trabajo la continuación de su implementación. Los equipos han sido probados, comparados y validados siendo capaces de reproducir resultados de equipos profesionales.

A continuación, se presenta un trabajo de sensibilización para la inversión conjunta de las curvas de dispersión y elípticas, mediante la variación de los valores característicos del suelo en el software GEOPSY, con el objetivo de desarrollar criterios que guíen el proceso. Finalmente, se procesan mediciones de terreno con tal de evaluar estos criterios.

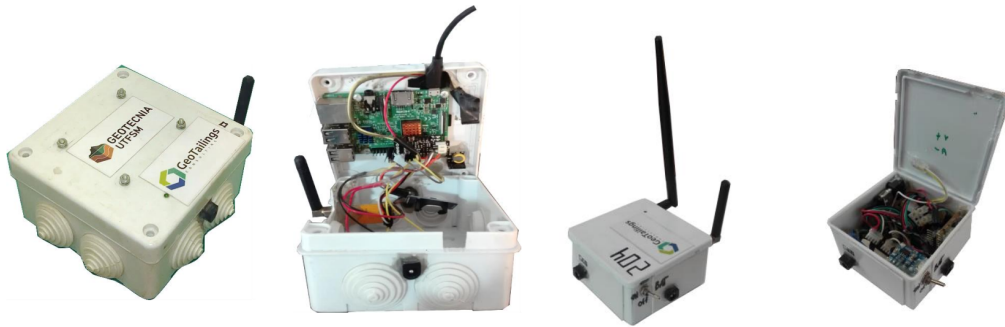


Figura 4.1: Geófono basado en computador Raspberry PI Zero (parte izquierda) y Controlador General basado en Raspberry PI 3 (parte derecha), desarrollados por Geotecnia UTFSM para mediciones ReMi y MASW.

Fuente: Cárdenas (2019).

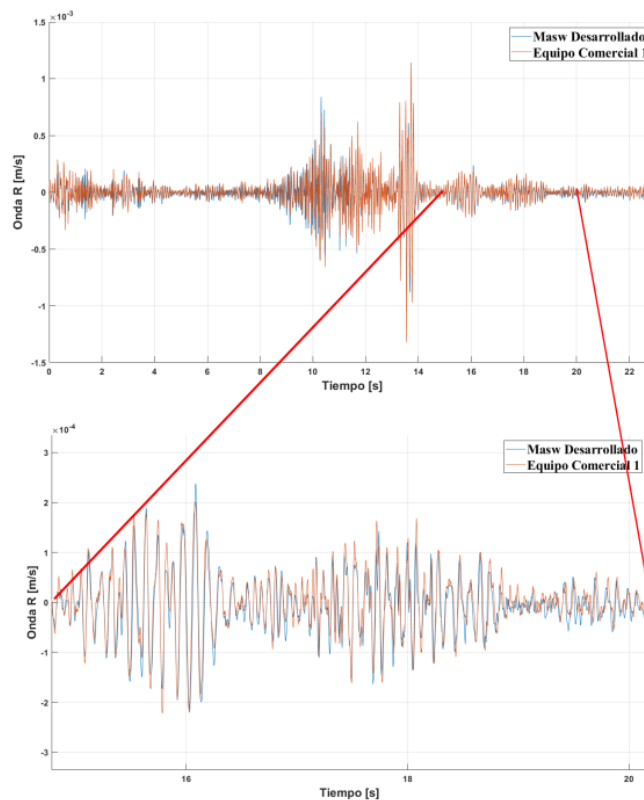


Figura 4.2: Registro de equipo comercial y equipo desarrollado para medición ReMi-MASW, donde se observa la igualdad de los datos tomados.

Fuente: Adaptado de Cárdenas (2019).

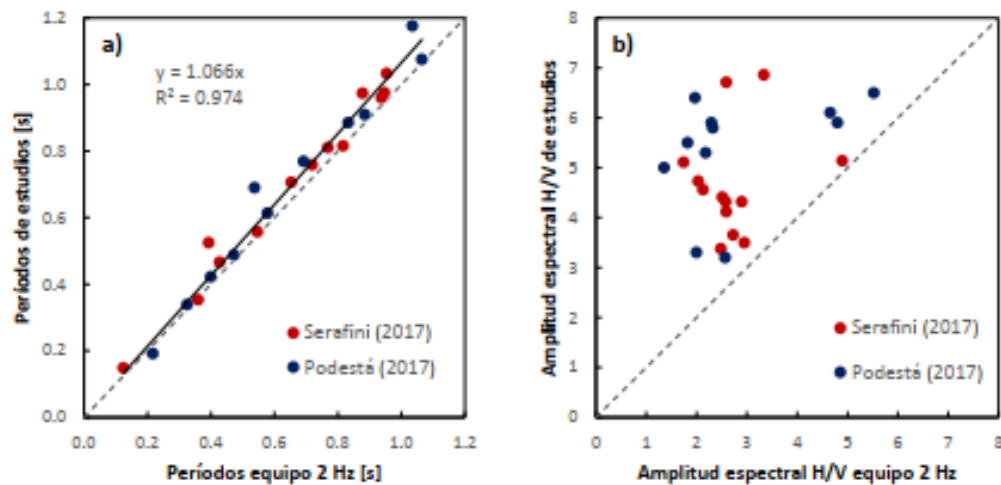


Figura 4.3: Geófono tri-axial en su carcasa (a la izquierda), y equipo controlador basado en Raspberry PI 3 (a la derecha), desarrollados por Geotecnia UTFSM para mediciones HVSR.

Fuente: Adaptado de Álvarez (2020).



4.1. Objetivo general

Generar criterios básicos de ejecución para el proceso de inversión conjunta de curvas elípticas y de dispersión obtenidas a partir de ensayos de medición de ondas mecánicas superficiales para la estimación de perfiles de velocidades de ondas de corte en el subsuelo.

4.2. Objetivos particulares

- Realizar análisis de sensibilidad ante distintos modelos estratigráficos de curvas dispersivas y elípticas mediante programa GEOPSY.
- Estudio del proceso de inversión conjunta en suelos seleccionados donde se cuente con los datos de curvas dispersivas y elípticas.
- Generación de criterios de inversión conjunta mediante análisis de datos obtenidos.
- Comparación de modelos estratigráficos obtenidos mediante inversión de mediciones de terreno, y sus correspondientes modificaciones obtenidas mediante criterios de inversión conjunta.

5. Estado del arte

5.1. Método de curvas de dispersión en vibraciones ambientales y registros sísmicos

A pesar de que actualmente, los análisis de ondas superficiales son populares debido a su rapidez y efectividad en la reconstrucción del perfil vertical de V_S del suelo, existen problemas asociados a la unicidad de la solución (Luke, Calderón-Macías, Stone, y Huynh, 2003), falla en la interpretación del modo principal en el espectro de velocidades (Dal Moro y Ferigo, 2011) y ondas P guiadas en casos particulares debido a fuentes de explosivos enterradas (O'Neill y Matsuoka, 2005).

Para ejemplificar tales problemas en la interpretación de la curva dispersiva, se generaron datos sísmicos sintéticos (Carcione, 1992) y los resultados se muestran en la figura 5.1.

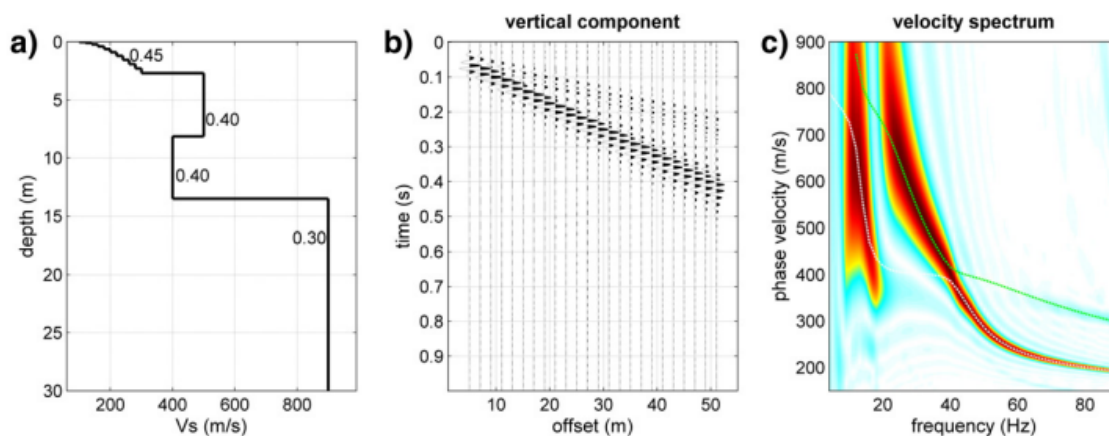


Figura 5.1: Datos sísmicos sintéticos y su curva dispersiva asociada.

Fuente: Dal Moro y Ferigo (2011).

Puede apreciarse en la figura 5.1, que pese a existir una estratigrafía razonable (los valores reportados en el perfil de V_S corresponden a los módulos de Poisson), la curva dispersiva presenta los dos primeros modos traslapados.

Por lo tanto, asumir sencillamente que el modo fundamental es el más energético, y que los modos superiores aparecen a frecuencias superiores, puede resultar en errores severos en la interpretación del espectro de velocidades de onda, y así, generar perfiles de V_S erróneos.

5.2. Método HVSR en vibraciones ambientales y registros sísmicos

Distintos estudios han demostrado la efectividad del método HVSR o de Nakamura. La comisión europea *Site Effects assessment using Ambient Excitations* o SESAME, comparó los resultados de las relaciones H/V en sitios de referencia donde se contaba también con información de las Relaciones de Espectro Estándar (SSR por su sigla en inglés). Los resultados se aprecian en la figura 5.2, donde la relación entre las frecuencias fundamentales de cada sitio, determinado por ambos métodos, son estadísticamente iguales.

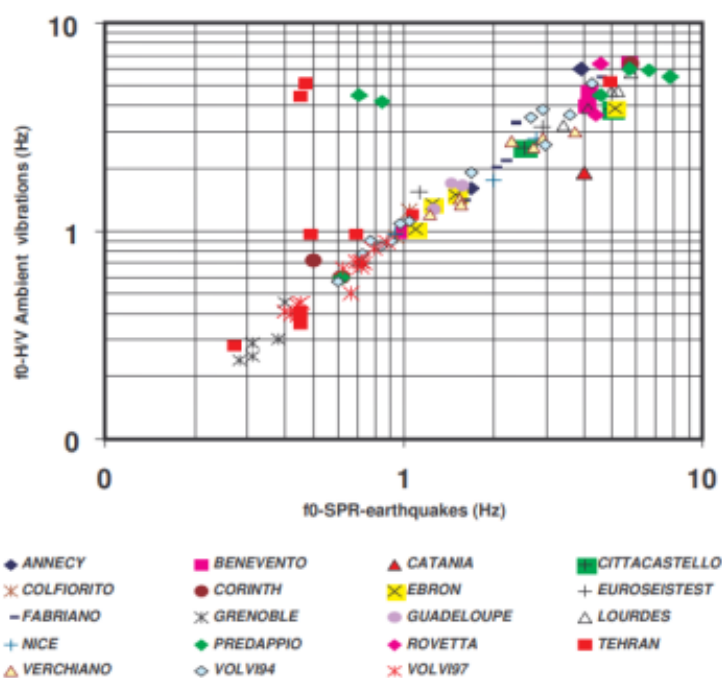


Figura 5.2: Comparación de frecuencias naturales obtenidas mediante relación H/V y SSR en distintos sitios.

Fuente: SESAME (2004).

La SOCHIGE en 2015, analizó distintos registros sísmicos provenientes del terremoto del 27 de febrero de 2010 para distintas localizaciones, de los que se obtuvieron los pseudo-espectros de aceleración de respuesta elástica en ambas componentes horizontales que permiten definir el periodo espectral (T_f). Por otra parte, se realizaron mediciones de la razón espectral H/V en los mismos sitios, con lo que se obtuvieron los periodos de Nakamura (T_{NAK}). Los resultados pueden apreciarse en la siguiente figura.

Como se aprecia, la similitud de los periodos hallados es alta y demuestra la confiabilidad de

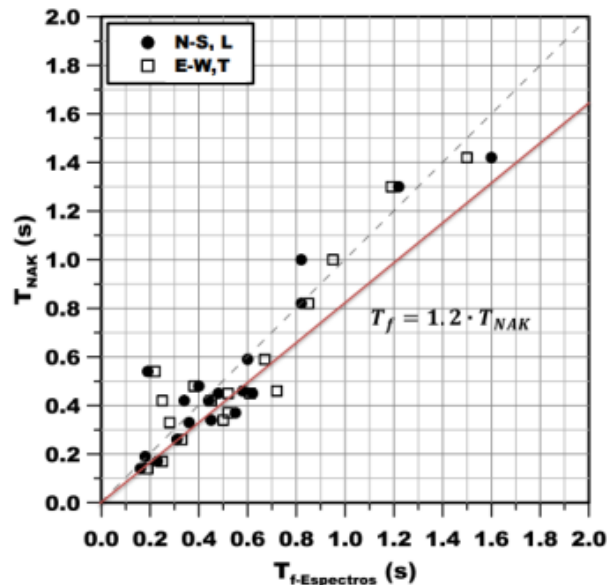


Figura 5.3: Comparación entre periodo espectral y periodo de Nakamura en distintos sitios en Chile.

Fuente: SOCHIGE (2015).

la estimación del periodo predominante del suelo mediante el método de Nakamura.

5.3. Clasificación sísmica de suelos

Actualmente en Chile, para clasificar sísmicamente el suelo se utiliza la NCh 433 Of.96 Mod. 2009 (INN, 2009), la que es modificada nuevamente por el Decreto 61 (MINVU, 2011) con el objetivo de incorporar requerimientos adicionales creados a partir del conocimiento adquirido posterior al terremoto de 2010 y sus efectos en distintas edificaciones nacionales.

En ella se especifica conocer el parámetro de velocidad de onda equivalente de los primeros 30 metros del suelo (V_{S30}), además de otros parámetros asociados a la resistencia del suelo como compresión no confinada (q_u), índice de penetración estándar normalizado ($N1$) y resistencia no drenada del terreno (S_u) (el uso de cada parámetro depende de V_{S30} y el tipo de suelo). Verdugo (2019) realizó comparaciones de los pseudo-espectros de aceleración obtenidos de los registros sísmicos del terremoto del 27 de febrero de 2010, con los espectros de diseño definidos por el Decreto 61 de 2011, y observó que las solicitaciones sísmicas requeridas por norma son menores a las registradas en el evento sísmico mencionado, por lo que se estableció la necesidad de revisar los requerimientos de diseño.

Desde 2013, el comité NCh 433 del Instituto Nacional de Normalización trabaja en una actualización normativa, que entre otras cosas, busca incluir el periodo predominante del suelo (T_g) junto a V_{S30} para evaluar los efectos de sitio, lo que como ventaja cuenta con ser rápido y simple de obtener, de bajo costo y no invasivo. La nueva propuesta de clasificación de suelos conserva los cinco tipos de suelos que se definían en la NCh 433 del 2009, pero modifica los requerimientos de cada uno, como se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 5.1: Requisitos de clasificación sísmica de la normativa vigente.

Fuente: Adaptación del Decreto 61 (MINVU, 2011).

Suelo Tipo	V_{S30} (m/s)	RQD	q_u (Mpa)	(N1) (golpes/pies)	S_u (Mpa)
A Roca, suelo cementado	≥ 900	$\geq 50\%$	≥ 10		
B Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		$\geq 0,40$	≥ 50	
C Suelo denso o firme	≥ 350		$\geq 0,30$	≥ 40	
D Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180			≥ 30	$\geq 0,05$
E Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180			≥ 20	$< 0,05$
F Suelo especiales					

Tabla 5.2: Requisitos de clasificación sísmica propuestos.

Fuente: Comité NCh433 (2018).

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

Respecto al resto del mundo, se puede mencionar que la velocidad de ondas de corte (tanto promedio como la equivalente para los primeros 30 metros del suelo) es bastante popular, pero se acompaña de distintos parámetros.

- Estados Unidos. El International Building Code (ICC, 2018) requiere para la clasificación el valor de V_{S30} , q_u , índice de penetración estándar y S_u , lo que es similar a la normativa chilena vigente.

Chile	USA	Europa	Nueva Zelanda	Japón	China
D.S. N°61 (2011)	IBC-2018 (2018)	Eurocode 8 (2008)	NZS 1170.5:2004 (2004)	Specification for Highway Bridges (2012)	Code for seismic design of building (2010)
A: Roca o Suelo Cementado $V_{s30} > 900\text{m/s}$	A: Roca Dura $V_{s30} > 1500\text{m/s}$	A: Roca u Otra Formación Geológica Tipo Roca $V_{s30} > 800\text{m/s}$	A: Roca Fuerte $V_{s30} > 1500\text{m/s}$	Tipo I: Roca o Suelos Diluviales Firmes $TG < 0.2s$ $V_{s30} > 600\text{m/s}$	Roca $V_{s30} > 800\text{m/s}$
B: Roca Blanda o Fracturada, Suelo Muy Denso o Muy Firme $500 < V_{s30} < 900\text{m/s}$	B: Roca $760 < V_{s30} < 1500\text{m/s}$		B: Roca $360 < V_{s30} < 1500\text{m/s}$		
C: Suelo Denso o Firme $350 < V_{s30} < 500\text{m/s}$	C: Suelo Muy Denso o Roca blanda $360 < V_{s30} < 760\text{m/s}$	B: Depositos de Arena o Grava Muy Densa, o Arcilla Muy Rígida $360 < V_{s30} < 800\text{m/s}$	C: Suelo Superficial $TG < 0.2s$ $133 < V_{s30} < 633\text{m/s}$	Tipo II: Suelos Aluviales o Diluviales que no Pertenecen ni a I ni a II $0.2 < TG < 0.6s$ $200 < V_{s30} < 600\text{m/s}$	Suelo Medianamente Firme $250 < V_{s30} < 500\text{m/s}$
D: Suelo Medianamente Denso o Firme $180 < V_{s30} < 350\text{m/s}$	D: Suelo Rígido $180 < V_{s30} < 360\text{m/s}$	C: Depositos de Arena o Grava Medianamente Densa, o Arcilla Rígida $180 < V_{s30} < 360\text{m/s}$	D: Suelo Blando o Profundo $TG > 0.2s$ $V_{s30} < 200\text{m/s}$	Tipo III: Suelos Blandos y Aluviales $TG > 0.6s$ $V_{s30} < 200\text{m/s}$	Suelo Medianamente Blando $150 < V_{s30} < 250\text{m/s}$
E: Suelos de Compacidad o Consistencia Mediana $V_{s30} < 180\text{m/s}$	E: Suelo Blando $V_{s30} < 180\text{m/s}$	D: Depositos de Suelo Sin Cohesión Suelos o Suelo Cohesivo Blando $V_{s30} < 180\text{m/s}$	E: Suelo Muy Blando $V_{s30} < 150\text{m/s}$		Suelo Blando $V_{s30} < 150\text{m/s}$

Figura 5.4: Comparación de diferentes normativas con el tipo de suelo que se definen en cada una y el parámetro de velocidad de onda de corte.

Fuente: Raddatz y cols. (2021).

- Europa. El Eurocódigo 8 (CEN, 2004) requiere V_{S30} , índice de penetración estándar y S_u .
- China. El Código de Diseño Sísmico (MOHURD, 2010) requiere solo V_{S30} .
- Japón. El Specification for Highway Bridges (JRA, 2012) requiere solo T_g .
- Nueva Zelanda. La norma NZS 1170.5:2004 (NZS, 2004), requiere V_{S30} y q_u para suelos de roca, caso contrario requiere T_g , N_1 , S_u , estratigrafía o V_S . Este tipo de clasificación también es usado en Australia.

La figura 5.4, muestra una comparativa de las distintas clasificaciones de suelo mencionadas junto a sus parámetros.

5.4. Limitaciones de V_{S30} y T_g en la clasificación sísmica de suelos

El parámetro V_{S30} corresponde a una ponderación de las velocidades de ondas de corte de las distintas capas de los primeros 30 metros del suelo y el espesor de las mismas, y su fórmula es la siguiente.

$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s-i}}} \quad (5.1)$$

Donde:

V_{s-i} : velocidad de onda de corte del estrato i

h_i : espesor del estrato i

n : número de estratos en los 30 metros superiores del terreno

El problema de la ecuación 5.1, es que no hace distinción en el orden de las capas del suelo, y por tanto podría dar el mismo resultado para suelos con capacidades estructurales completamente distintas, como se aprecia en la figura 5.5.

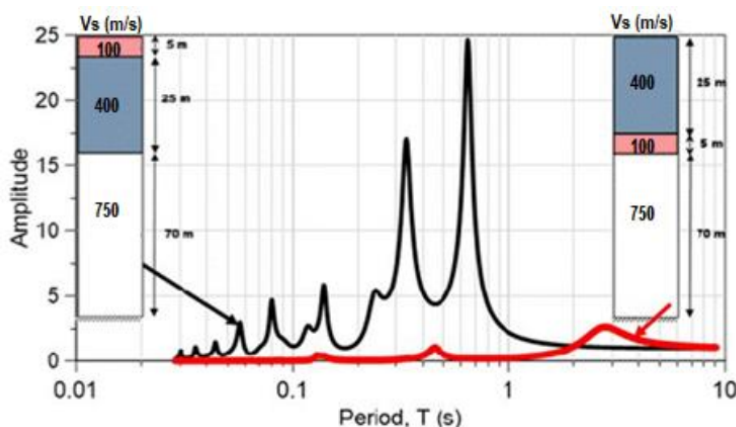


Figura 5.5: Funciones de transferencia de dos perfiles de suelo distintos, con valores de V_{S30} iguales.

Fuente: Adaptado de Verdugo (2019).

Ante esta situación, varios autores han propuesto el uso del periodo fundamental del suelo junto a la ponderación de la velocidad de onda de corte de los estratos superficiales (Verdugo, 2019) (Molnar, Ventura, Boroschek, y Archila, 2015).

Por otro lado, se creía que la amplitud de la relación espectral H/V o método de Nakamura podía entregar información sobre la amplificación sísmica del suelo medido, pero Lachetl y Bard (1994) observaron que este parámetro es muy sensible tanto como al contraste de impedancia del sitio, como al coeficiente de Poisson y la distancia entre origen y receptor. Esto fue estudiado también por SESAME (2004) lo que concluyó en resultados similares a Lachetl (ver figura 5.6).

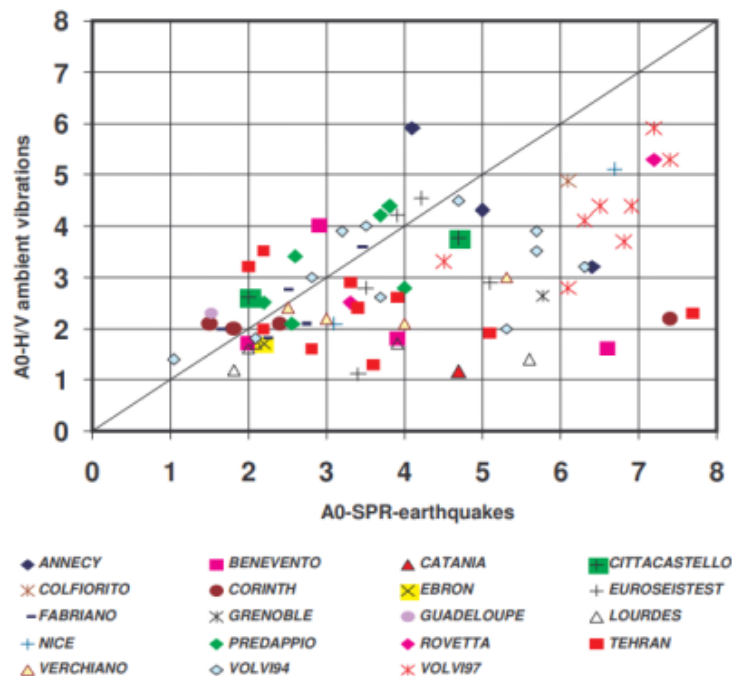


Figura 5.6: Comparación de amplitudes espectrales del método H/V y SSR para distintos sitios. Fuente: SESAME (2004).

Los autores recomiendan complementar los datos obtenidos mediante el método de Nakamura con información adicional del suelo en estudio.

5.5. Inversión conjunta

La idea general de la inversión conjunta, es utilizar varias mediciones geofísicas con tal de minimizar o evitar la indeterminación en la inversión separada de cada método, o bien, complementar la información obtenida de cada una de esas mediciones, con el objetivo último



de mejorar la descripción del subsuelo.

En muchos casos, y debido a las limitaciones de cada método en la obtención de parámetros geofísicos, es que la inversión de datos puede arrojar distintas estratigrafías para mediciones en un mismo sitio. Por lo tanto, la investigación relativa a la inversión conjunta se centra en la búsqueda de algoritmos que puedan relacionar de mejor manera los datos medidos en terreno.

La forma de conexión mas usada y simple, es el uso de relaciones funcionales entre los datos incógnitos, por ejemplo, entre V_p y densidad, o entre V_p y V_S . Lines, Schultz, y Treitel (1988) y Saunders, Herwanger, Pain, Worthington, y De Oliveira (2005) propusieron métodos (conocidos como inversión simultanea, secuencial o cooperativa) donde se invierten registros de distinta índole, imponiendo la estratigrafía elegida como aceptable a la inversión de los datos de interés. De esta forma, datos que arrojan mejor resolución a la existencia y posición de discontinuidades son usados para complementar la inversión de datos menos sensibles a la profundidad de las distintas capas del suelo.

Haber y Oldenburg (1997) y Linde, Tryggvason, Peterson, y Hubbard (2008) propusieron una metodología que denominaron inversión conjunta. En ella, se establece que los modelos estratigráficos de los datos invertidos son compartidos por ellos, y por tanto se busca minimizar el desajuste entre esos modelos mediante una función objetivo que satisface las restricciones de cada variable. Estos estudios demuestran que la inversión conjunta de datos presenta mejores resultados que la inversión por separado de datos.

Usando los gradientes de cada incógnita, Gallardo y Meju (2003) definieron un método de inversión conjunta que es exitoso para estructuras 2D y 3D. Varios otros autores presentan metodologías para combinar funciones de refracción de ondas con mediciones de ondas superficiales y sondeos magneto-telúricos (Moorkamp, Jones, y Fishwick, 2010), o datos audio-magneto-telúricos y resistividad (Santos, Afonso, y Victor, 1997), etc.

El objetivo de este informe, es presentar criterios básicos para la inversión conjunta de datos en el programa de análisis geofísico GEOPSY, el que usa una función objetivo con ponderación para el tratamiento de los datos, que en este caso, son curvas dispersivas y relaciones espectrales H/V. Estos datos son los que se espera sean requeridos en la nueva normativa para el diseño sísmico de edificios en Chile.

6. Marco teórico

Las ondas sísmicas son ondas mecánicas que viajan por las distintas capas del suelo, interactuando con el medio tras pasando su energía al hacer oscilar a las partículas que lo componen. Estas ondas requieren de un ente generador, que puede ser producido por la naturaleza como terremotos, erupciones volcánicas, movimiento magmático, deslizamientos de tierra, o bien antropogénico como medios de transporte e industria, entre otros. En cualquier caso, las ondas mecánicas solo pueden ser producidas en medios con algún grado de elasticidad y que posean inercia.

Al ocurrir un evento sísmico, varios tipos de ondas viajan en múltiples direcciones, reflejándose y refractándose en los límites de las distintas capas alcanzando la superficie en distintos puntos.

6.1. El suelo como medio continuo

Se sabe que el suelo se comporta distintamente ante pequeñas y grandes deformaciones, por lo tanto, es una estructura de comportamiento no lineal en términos generales (Ishihara, 1996).

Pese a aquello, y mediante un ensayo de corte directo (Ortigao, 2007), se puede apreciar en la figura 6.1 como para deformaciones angulares bajas ($\gamma < 10^{-4} \%$) puede definirse un valor de rigidez máximo que se mantiene relativamente constante, el que posteriormente disminuye hasta la falla para deformaciones mayores.

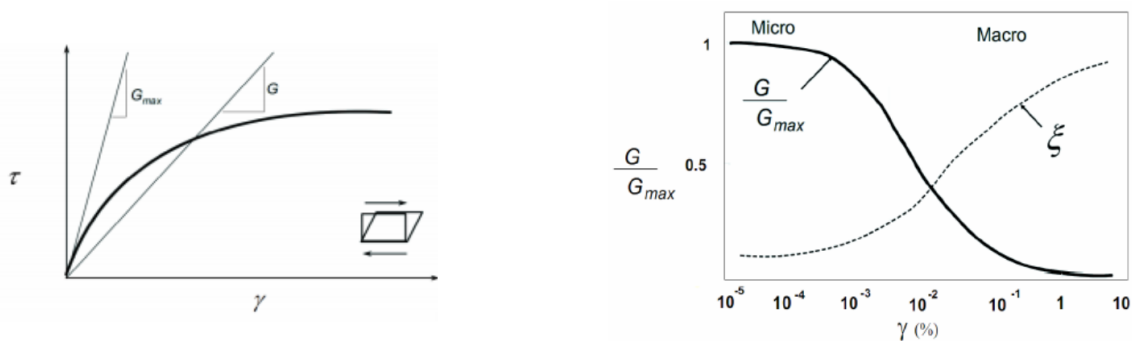


Figura 6.1: Esfuerzo de corte τ /s deformación angular

Fuente: Ortigao (2007).

Ishihara afirma también que las vibraciones producidas por ondas sísmicas generan magnitudes de deformación menores a $10^{-4} \%$ (tabla 6.1). Por lo tanto, se puede asumir que para este tipo de ondas, el suelo se comporta linealmente y existe la posibilidad de definir valores

describe cómo un sólido sufre desplazamientos y deformaciones ante fuerzas exteriores, donde el estado tensional en un punto e instante dado depende solo de las deformaciones en ese punto y no de deformaciones anteriores, siendo todo efecto reversible.

Se define un cubo infinitesimal con sus caras paralelas a los planos del sistema de referencia usado, como se muestra en la figura 6.2. De la aplicación de la ecuación de equilibrio y reordenando por componentes, se obtienen las primeras 3 ecuaciones (ecuaciones 6.1), donde u , v y w corresponden a las componentes del campo de desplazamiento asociado al sistema. Adicionalmente, se tienen las ecuaciones de compatibilidad de deformaciones (ecuaciones 6.2), con $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji}$. Finalmente, de las ecuaciones constitutivas para un material isotrópico, lineal y elástico, se obtienen las ecuaciones 6.3 donde $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\end{aligned}\quad (6.1)$$

$$\begin{aligned}\epsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} & \epsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} & \epsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \epsilon_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & \epsilon_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} & \epsilon_{zx} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\end{aligned}\quad (6.2)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \lambda(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) + 2\mu\epsilon_{xx} & \sigma_{xy} &= \mu\epsilon_{xy} \\ \sigma_{yy} &= \lambda(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) + 2\mu\epsilon_{yy} & \sigma_{yz} &= \mu\epsilon_{yz} \\ \sigma_{zz} &= \lambda(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) + 2\mu\epsilon_{zz} & \sigma_{zx} &= \mu\epsilon_{zx}\end{aligned}\quad (6.3)$$

Los valores λ y μ corresponden al primer y segundo parámetro de Lamé. Reescribiendo en estos términos, se obtienen las ecuaciones 6.4 donde $\bar{\epsilon} = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}$.

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x} \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= \mu \nabla^2 v + (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial y} \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \mu \nabla^2 w + (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial z}\end{aligned}\quad (6.4)$$

A continuación, las ecuaciones 6.5 presentan las equivalencias entre los parámetros de Lamé, las constantes elásticas típicas usadas en ingeniería estructural E (módulo elástico longitudinal) y

ν (coeficiente de Poisson), y los módulos de compresibilidad isotérmica (K) y elástico transversal (G) usados en termodinámica de sólidos deformables.

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} = K - \frac{2G}{3}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} = G \quad (6.5)$$

6.2. Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas son ondas de energía con distintas velocidades de propagación y frecuencia, que viajan a través de las distintas capas de la tierra y son producidas de forma natural como resultado del movimiento tectónico de placas, deslizamientos de tierra o por causas antropogénicas.

Las ondas sísmicas pueden dividirse en dos tipos: ondas de cuerpo y ondas superficiales.

6.2.1. Ondas de cuerpo

Las ondas de cuerpo se propagan a través del medio y pueden clasificarse en ondas primarias y secundarias.

Las ondas primarias (P), también conocidas como longitudinales o compresivas debido a que comprimen sucesivamente el medio en el sentido de propagación como se ve en la figura 6.3, son capaces de viajar en sólidos y fluidos. Para este caso, y considerando ondas planas las ecuaciones 6.4 quedan reducidas a la expresión 6.6:

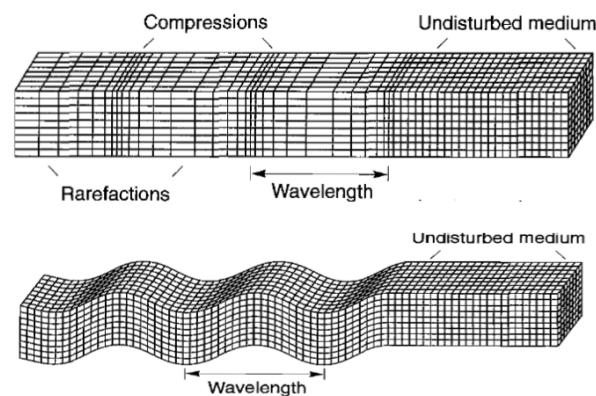


Figura 6.3: Ondas de cuerpo, arriba el efecto de ondas P y abajo el efecto de ondas S.

Fuente: Kramer (1996)



$$\frac{\partial^2 \bar{\epsilon}}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{\epsilon} \quad (6.6)$$

Nótese que $\bar{\epsilon}$ corresponde solo a la variación volumétrica del elemento. Como puede inferirse de la ecuación de la onda, el término que acompaña al laplaciano corresponde al cuadrado de su velocidad de propagación, el que puede expresarse también en términos del módulo de corte G , coeficiente de Poisson ν y la densidad del material ρ .

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{G(2 - 2\nu)}{\rho(1 - 2\nu)}} \quad (6.7)$$

Las ondas secundarias (S), también conocidas como ondas de corte debido a que su efecto es transversal al sentido de propagación, solo viajan en medios sólidos y presentan mayores amplitudes y frecuencias que las ondas P. Suponiendo ondas planas y restando solo las ecuaciones 6.4 en sentido y y z , se obtiene la ecuación 6.8.

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \nabla^2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (6.8)$$

De forma análoga al caso de la onda P, se puede inferir que la velocidad de propagación de la onda S, que genera distorsión angular en el elemento alrededor del eje x será:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (6.9)$$

Comparando las velocidades de propagación de ambas ondas, se obtiene la siguiente expresión que solo es función del coeficiente de Poisson:

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1 - \nu)}{1 - 2\nu}}$$

Para la mayoría de los materiales en ingeniería ν varía entre 0 y 0.5, y para materiales geológicos generalmente se tiene un $\nu = 0.3$, es decir, $v_p/v_s = 1.87$. Esto implica que las ondas P tienen una velocidad de propagación aproximadamente un 60 % mayor que las ondas S, y que por ejemplo, en un evento sísmico podrá diferenciarse fácilmente en un sismograma la llegada de ambos tipos de onda al sitio de registro, como se aprecia en la figura 6.4.

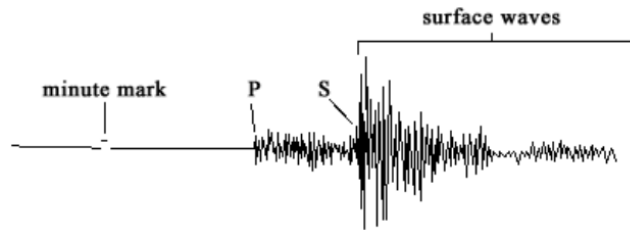


Figura 6.4: Registro sísmico en donde se aprecia la llegada desfasada de cada tipo de ondas.

Fuente: Braile y Smith (1975).

6.2.2. Ondas superficiales

Ondas generadas a partir de la interacción entre las ondas de cuerpo y las capas superficiales del suelo propagándose con amplitudes que decrecen rápidamente con la profundidad y pueden clasificarse en ondas de Love y ondas de Rayleigh, de las que se muestran sus efectos en la figura 6.5.

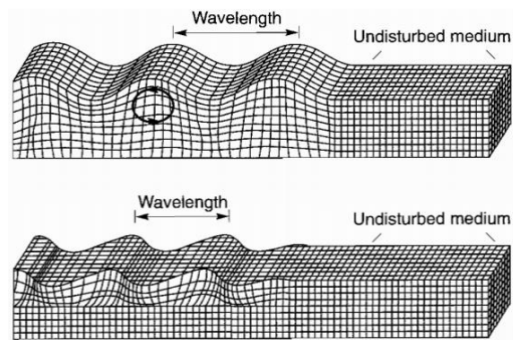


Figura 6.5: Deformaciones producidas por ondas de Rayleigh (arriba) y de Love (abajo).

Fuente: Kramer (1996).

Las ondas de Rayleigh (R) describen un movimiento elíptico retrogrado en la superficie, disminuyendo su amplitud y cambiando su movimiento a elíptico progrado con el aumento de la profundidad, aproximadamente a 0.5λ (Richart, Hall, y Woods, 1970). Su velocidad de propagación es un 92 % de V_S (Reynolds, 2011), siendo esta independiente del módulo de Poisson.

Las ondas R corresponden a la principal componente de vibración vertical en superficie, por lo que son fácil detectarlas y medirlas (Park, Miller, y Xia, 1996) (Park, Miller, y Xia, 1998). Su velocidad depende de las constante elásticas del suelo que varían generalmente en profundidad, específicamente, depende del largo de onda y por ende de su frecuencia. Este fenómeno es llamado dispersión, y permite obtener información estratigráfica del terreno. En la figura 6.6 se observa

un suelo no dispersivo, y otro estratificado, observando que en el primer caso, la velocidad de fase no varía con la longitud de onda.

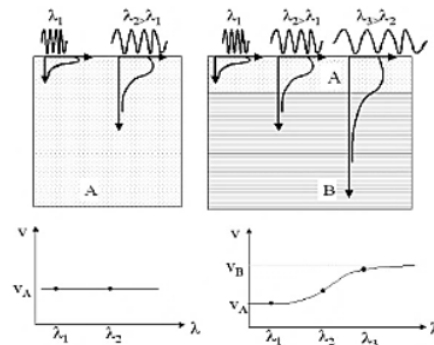


Figura 6.6: Velocidad de fase para suelo homogéneo (izquierda) y estratificado (derecho).

Fuente: Strobbia (2003).

Las ondas de Love (L) generan movimiento horizontal en el medio, perpendicular a la dirección de propagación y son más lentas que las ondas de cuerpo, pero más rápidas que las ondas de Rayleigh. Solo se observan cuando hay capas de suelo con velocidades menores sobre capas de velocidades mayores.

6.3. Efectos de sitio

Cuando las ondas se propagan a través de la estructura del suelo, se enfrentan a capas de distintas características: composición, constantes elásticas, densidad, espesor, etc. Esta interacción genera cambios en los componentes representativos de la onda como su periodo y longitud, y es conocido como efecto de sitio.

Por ejemplo, si la onda pasa de un medio con velocidad de propagación alta a uno con velocidad de propagación baja, se ve obligada a aumentar su amplitud lo que es normal en la superficie del suelo (figura 6.7).

En la práctica, existen dos formas de contabilizar este efecto. La primera forma intenta determinar la geometría y propiedades mecánicas del suelo, para posteriormente simular numéricamente la propagación de las ondas sísmicas. El segundo método consiste en la estimación de los periodos naturales del suelo en cuestión analizando registros sísmicos o vibraciones ambientales.

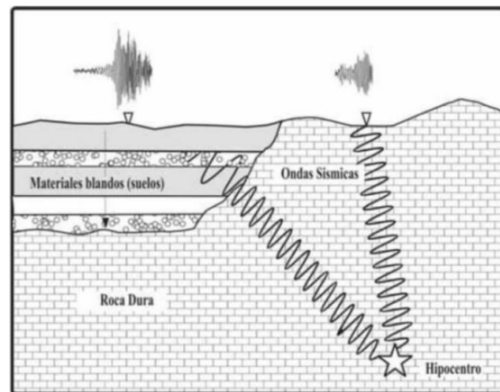


Figura 6.7: Concepto de efecto de sitio.
Fuente: Robles y Jimenez (2017).

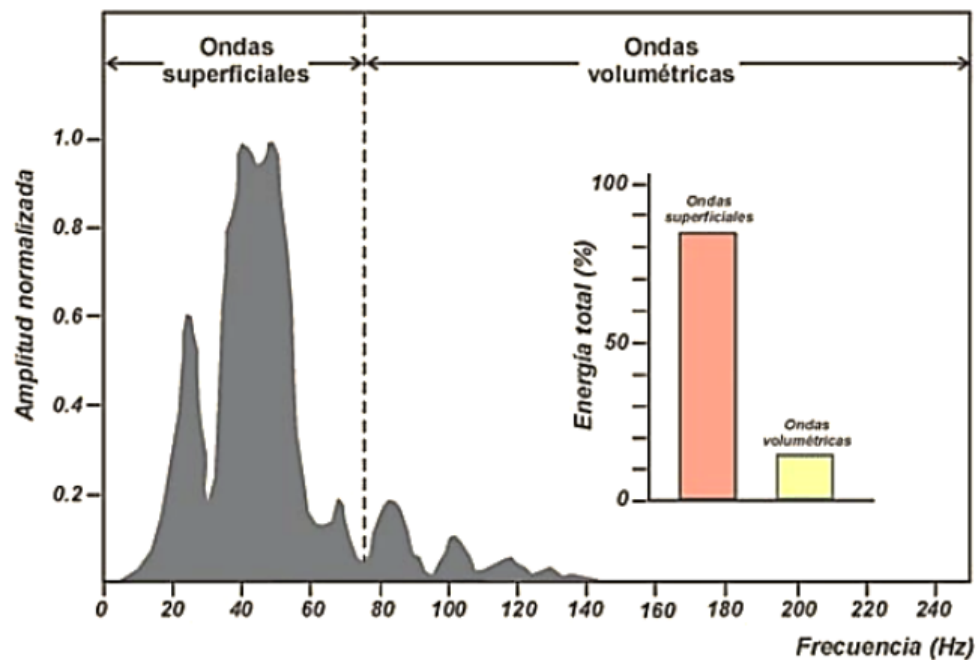


Figura 6.8: Nivel de energía de las ondas de cuerpo y superficiales para distintas frecuencias.
Fuente: Adaptado de Sanz y Granda (2005).

6.4. Estimación del perfil de Vs del suelo

Los métodos geofísicos no miden directamente las velocidades de propagación de ondas P o S, ya que generarlas artificialmente es complejo. En cambio, se miden las ondas superficiales tipo Rayleigh, las que poseen un amplio rango de medición en términos de frecuencia bajo los

80 [Hz], como se aprecia en la figura 6.8, poseen gran amplitud en ese tramo, y además no son perturbadas por las ondas de cuerpo cercanas a la superficie.

Como se mencionó en secciones anteriores, dado que la velocidad de las ondas R son similares a las velocidades de propagación de las ondas de corte para cualquier valor del modulo de Poisson, se obtienen aproximaciones aceptables para estas últimas.

Existen gran cantidad de métodos geofísicos que permiten obtener el perfil de velocidades de onda de corte, pudiendo agruparse según el origen del ruido sísmico: natural (pasivos) o artificial (activos) como se aprecia en la figura 6.9.

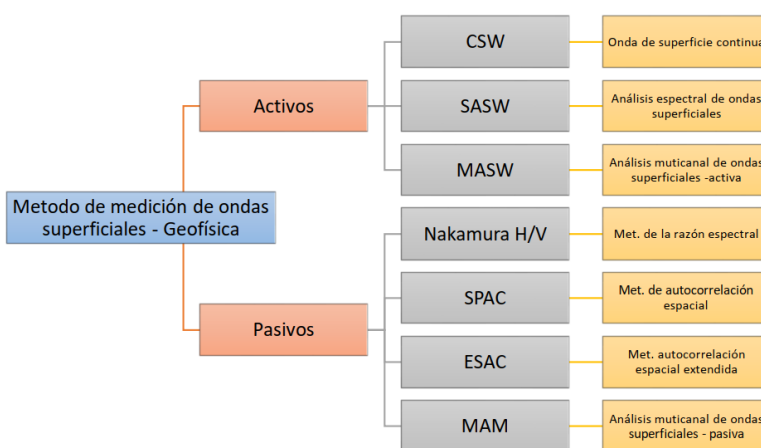


Figura 6.9: Ensayos de medición de ondas superficiales.

Fuente: Álvarez (2020).

Además, distintos autores han propuesto correlaciones entre ensayos invasivos y velocidad de onda de corte en profundidad, por ejemplo usando el Ensayo de Penetración Estándar o SPT por su sigla en inglés. Estas correlaciones son para suelos particulares y por tanto son limitadas en aplicación y extensión.

En el caso de los métodos activos, se usa un generador de ondas o se golpea el suelo con un mazo a través de una placa metálica o polimérica de alta densidad, entre otras formas, lo que genera ondas de Rayleigh y compresivas de gran amplitud y frecuencia alta (entre los 10 y 60 Hz). Los métodos pasivos miden el ruido ambiental o micro-tremores, el que generalmente es de amplitud baja y cuenta con frecuencias entre los 2 y 15 Hz, llegando hasta los 30 Hz excepcionalmente. Así, se recomienda usar combinación de métodos activos y pasivos con lo que se puede abarcar un espectro más amplio de frecuencias, y mediante distintas longitudes de onda llegar a distintas profundidades.

A diferencia de ensayos invasivos, estos métodos pueden aplicarse a cualquier tipo de suelo,

son relativamente más rápidos y económicos, pero el resultado puede verse afectado por una mayor cantidad de factores: capas de suelos no estratificadas horizontalmente, pendientes del terreno en superficie, ruido sísmico no controlado (maquinaria, personas), etc.

6.4.1. Método CSW y SASW

Uno de los primeros métodos (1930) fue denominado Onda de Superficie Continua (CSW por su sigla en inglés), y consistía en un generador de vibraciones superficiales armónicas a las que se les podía ajustar su frecuencia. El receptor se disponía a distintas distancias, y mediante métodos empíricos, se podía obtener el perfil de velocidades de ondas de corte.

En el año 1980 aparece el método de Análisis Espectral de Ondas Superficiales (SASW por sus siglas en inglés), el que se parecía al CSW pero disponía de dos geófonos separados a distancia conocida, y ocupaba un martillo para generar ondas que serían medidas en el dominio del tiempo por los receptores (ver figura 6.10).

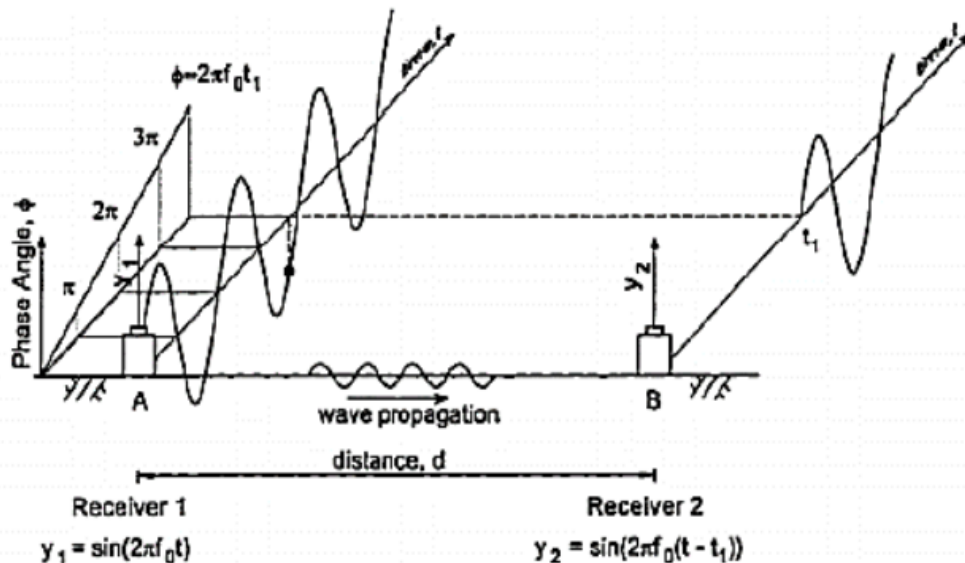


Figura 6.10: Esquema SASW.

Fuente: Joh (1996).

Posteriormente, el registro se convertía al dominio de las frecuencias mediante la Transformada de Fourier, obteniéndose los desfases angulares entre las señales captadas por cada geófono y sus frecuencias, lo que permite obtener sus curvas de dispersión.

6.4.2. Método MASW y ReMi

A finales de los 90', aparece el método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales o MASW por su sigla en ingles (Park, Miller, y Xia, 1999). Este, utiliza gran cantidad de receptores (12 o 24 elementos) acoplados al suelo o pavimento, y una fuente activa. La fuente, generalmente un golpe de martillo sobre una placa rígida, genera ondas de frecuencia entre los 4 y 100 [Hz] lo que implica longitudes de onda pequeña, y por tanto, la prospección del suelo no es muy profunda, entregando datos más confiables para los estratos superficiales.

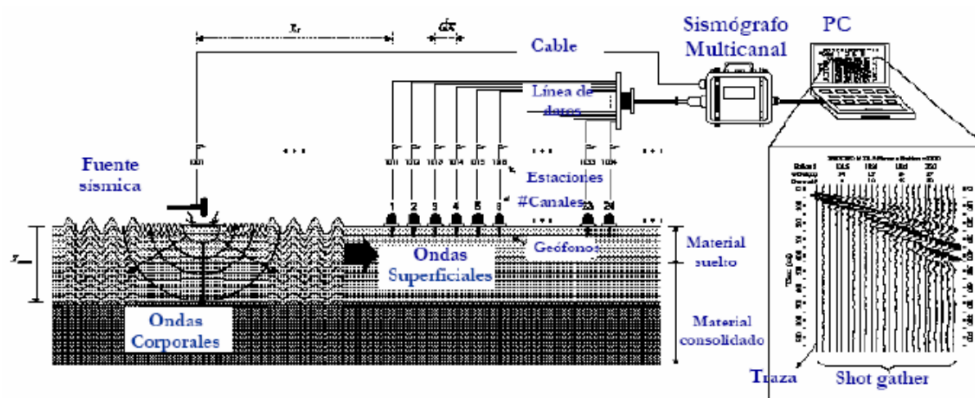


Figura 6.11: Esquema MASW.

Fuente: Montenegro (2005).

Una variación del método anterior donde se usa solo el ruido ambiental, es el método ReMi (Refraction Microtremor en ingles). Esta técnica nace de las conclusiones de Omori (1908) sobre la existencia de vibraciones ambientales con origen distinto a la tectónica de placas, las que cuentan con amplitudes de 0.1 a 1 micrómetros con periodos entre 0.05 y 2 segundos, siendo relevantes para la caracterización de las primeras capas del suelo. Posteriormente, se clasificaron estas ondas en 3 tipos según su fuente (Lay y Wallace, 1995): 1) debido a fuerzas internas como flujo hidrológico, flujo magmático, etc., 2) debido a fuerzas externas como viento, cambios barométricos, oleaje, mareas, tráfico de vehículos y trenes, 3) fuentes mixtas como deslizamientos de tierra o avalanchas.

6.4.3. Curva dispersiva del suelo

El tratamiento de la data obtenida con el método MASW-ReMi, consiste en generar un mapa de calor llevando los registros desde el dominio tiempo-espacio al dominio frecuencia-número de

onda (o en algunos casos, lentitud). Al analizar el mapa de calor, se define la curva dispersiva al unir los puntos de mayor acumulación energética en términos de amplitud espectral. Como se describió, la combinación de análisis pasivos y activos permite obtener una curva dispersiva más completa, es decir, una curva dispersiva clara para un rango más amplio de frecuencias, y por tanto, un rango más amplio de profundidades como se aprecia en la siguiente figura.

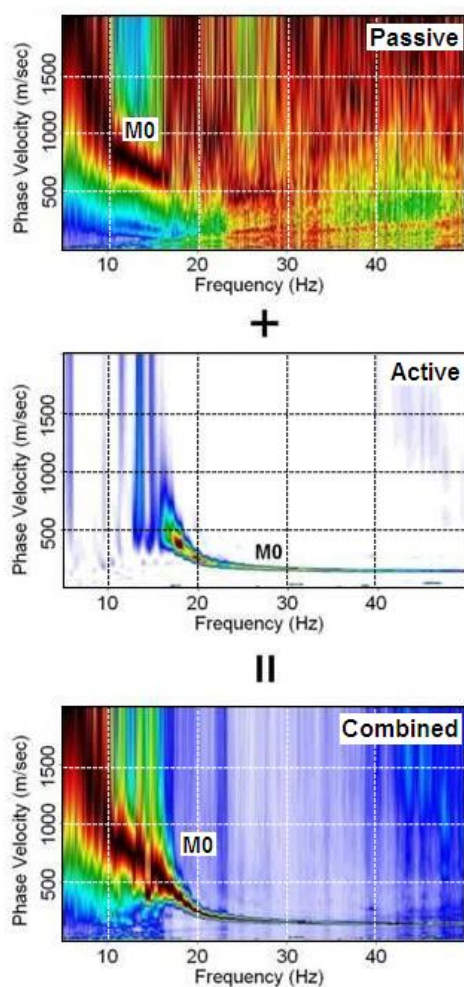


Figura 6.12: Curvas de dispersión obtenidas por métodos pasivos y activos.

Fuente: Adaptado de Cárdenas (2019).

Una vez obtenida la curva de dispersión, se procede a su inversión. El análisis de inversión consiste en generar un modelo estratigráfico del suelo que cumpla con tener una curva dispersiva similar a la curva obtenida del registro medido en terreno.

Las principales propiedades elásticas de las que depende el modelo generado corresponden a



la densidad y el coeficiente de Poisson, siendo las variables de acondicionamiento las velocidades de onda de corte, velocidades de onda de compresión y espesor de las capas. Distintos estudios (Wathelet y cols. (2005), Tokimatsu (1997), Gabriels, Snieder, y Nolet (1987)), establecen que la dispersión es invariante ante perturbaciones de los valores de densidad y velocidad de compresión, por lo que toman especial relevancia los valores de v_s y espesor de las capas.

Dado la cantidad de variables, el proceso de inversión no tiene solución única y encontrar cada una de las soluciones es complejo. Por tanto, se recurre a la obtención de curvas dispersivas asociadas al modelo estratigráfico propuesto, las que mediante algoritmos de búsqueda permiten obtener la solución con mejor ajuste a la curva dispersiva medida en terreno.

Existen algoritmos de búsqueda globales y locales, y su diferencia general es la capacidad que tienen de encontrar la solución global de soluciones locales, es decir, de encontrar la curva con el mejor ajuste entre varias curvas que se ajustan satisfactoriamente. Si bien la elección del algoritmo de búsqueda depende de muchos factores, generalmente se opta por los de búsqueda global ya que generalmente convergen a soluciones pese a lo difícil de su obtención. El software de procesamiento de datos e inversión, será GEOPSY.

Se definen algunas observaciones respecto al ensayo. Rix y Leipski (1991) establecieron que la profundidad máxima de exploración y validez de los datos, corresponde a la mitad del valor de la mayor longitud de onda medida. Por otro lado, Bullen, Bullen, Bullen, y Bolt (1985) establecen que la profundidad mínima de exploración está dada por la frecuencia máxima de la curva de dispersión, debido a que los componentes de altas frecuencias se atenúan rápidamente al alejarse del origen.

$$\begin{aligned} Z_{MAX} &= \frac{L_{MAX}}{2} \\ Z_{MIN} &= \frac{L_{MIN}}{2} \end{aligned} \tag{6.10}$$

6.5. Estimación del periodo fundamental del suelo

El periodo fundamental de un suelo se puede calcular con métodos numéricos o empíricos. Los métodos numéricos se basan en formulaciones matemáticas que describen el comportamiento físico del suelo, en cambio, los métodos empíricos corresponden a cálculos de espectros de frecuencias obtenidos directamente de los registros sísmicos del suelo.

6.5.1. Métodos numéricos

El comportamiento del suelo puede idealizarse mediante un modelo constitutivo viscoelástico, definiéndose los esfuerzos de corte como sigue, donde γ es la deformación angular, $\dot{\gamma}$ es la tasa de cambio temporal de la deformación angular, y c es la constante de amortiguamiento viscoso.

$$\tau = G\gamma + c\dot{\gamma} \quad (6.11)$$

Dado el modelo que se muestra en la figura 6.13 y haciendo equilibrio dinámico para el elemento diferencial, se puede demostrar que la ecuación 6.11 queda como dicta la ecuación 6.12.

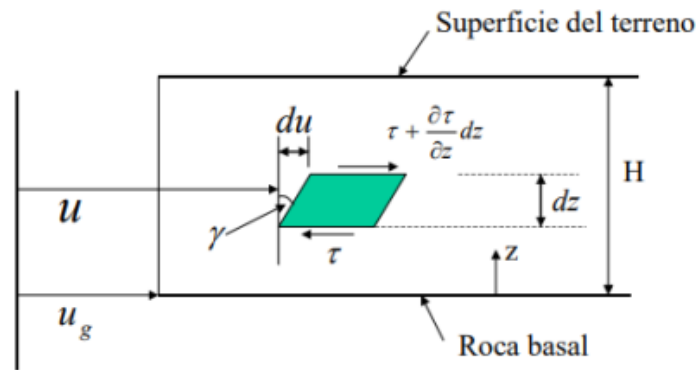


Figura 6.13: Deposito horizontal de suelo sometido a una perturbación de corte basal.

Fuente: Verdugo y cols. (2009).

$$\tau = G \frac{\partial u}{\partial z} + c \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z} \quad (6.12)$$

Si se aplica un esfuerzo al modelo mediante aceleración de la roca basal definido por la función sinusoidal $\ddot{u}_g = a_b e^{i\omega t}$ y se usa el cambio de variable $y = u - u_g$, se obtiene la ecuación 6.13, donde ρ es la densidad del suelo.

$$G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + c \frac{\partial^3 y}{\partial t \partial z^2} - \rho a_b e^{i\omega t} = \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (6.13)$$

La solución a esta ecuación permite determinar la magnitud del movimiento tanto al interior como en la superficie del suelo. Dado que la parte de la solución asociada a vibraciones libres se disipa debido al amortiguamiento, se enfoca el análisis a la respuesta en régimen permanente, que puede expresarse como:



$$y = U(z)e^{iwt} \quad (6.14)$$

Reemplazando la ecuación 6.14 en la ecuación 6.13, se obtiene la solución completa que es de tipo armónica y tiene la siguiente forma, donde $p = \rho w^2 / (G + iwc)$, y C_1 y C_2 son constantes:

$$U(z) = C_1 \cos(pz) + C_2 \operatorname{sen}(pz) + \frac{a_b}{w^2} \quad (6.15)$$

Como condiciones de borde, se tiene que a nivel de basamento rocoso el desplazamiento es u_g , y que en la superficie los esfuerzos cortantes son nulos. Luego, puede demostrarse que:

$$\ddot{u}(z = H) = \ddot{u}_{sup} = \frac{a_b}{\cos(pH)} + e^{iwt} \quad (6.16)$$

El efecto de amplificación del suelo puede establecerse entonces, como el siguiente cociente:

$$F = \frac{1}{\cos(pH)} \quad (6.17)$$

La que si se desarrolla, adopta el nombre de función de transferencia:

$$F(w) = \frac{1}{\cos(\alpha) \cdot \cosh(\beta) - i \operatorname{sen}(\alpha) \cdot \operatorname{senh}(\beta)} \quad (6.18)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \alpha &= wH \sqrt{\frac{\rho}{2G} \frac{\sqrt{\sqrt{1+d^2}+1}}{\sqrt{1+d^2}}} \\ \beta &= wH \sqrt{\frac{\rho}{2G} \frac{\sqrt{\sqrt{1+d^2}-1}}{\sqrt{1+d^2}}} \\ d &= \frac{cw}{G} \end{aligned} \quad (6.19)$$

Luego, y si se analiza el factor de amplificación para un caso sin amortiguamiento ($d = 0$), se obtiene que:

$$\|F(w)\| = \frac{1}{\cos \alpha} = \frac{1}{\cos\left(\frac{wH}{V_s}\right)} \quad (6.20)$$

Se puede apreciar que cuando $\cos(\alpha) = 0$, la ecuación 6.20 tiende al infinito (ver figura 6.14), lo que significa que para ciertas frecuencias w la respuesta del suelo se maximiza. Estos valores son conocidos como frecuencias naturales de vibración.

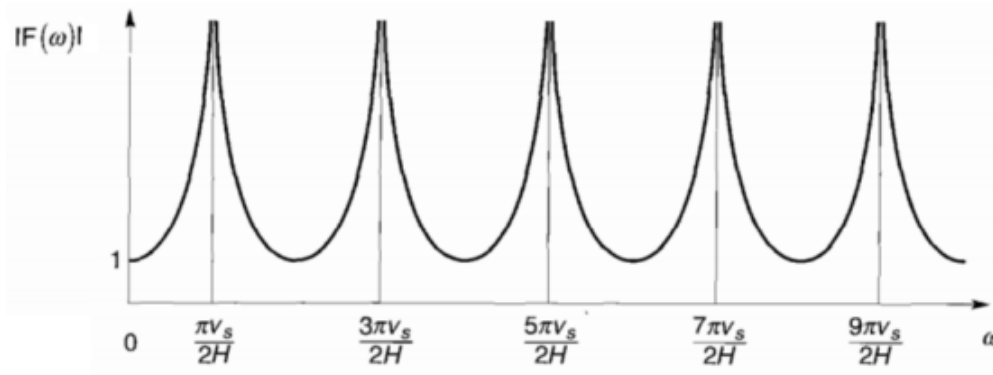


Figura 6.14: Efecto de la frecuencia natural en el factor de amplificación.
Fuente: Kramer (1996).

Si se considera cierto depósito de suelos, se denota que la frecuencia y el nivel de amortiguamiento afectan al factor de amplificación, reduciéndose conforme mayor sea cualquiera de los dos valores como se aprecia en la figura 6.15.

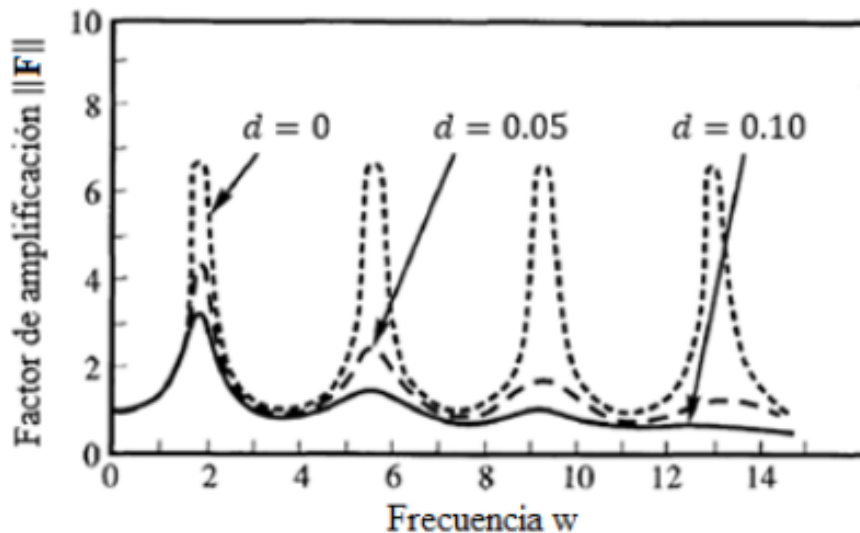


Figura 6.15: Efecto de la frecuencia y amortiguamiento en el factor de amplificación.
Fuente: Cárdenas (2019).

Se tiene entonces que para la primera frecuencia natural, llamada frecuencia fundamental (ecuación 6.21), se obtiene el mayor factor de amplificación, y esta depende del espesor del depósito de suelos y la velocidad de propagación de las ondas de corte en el.



$$w_0 = \frac{\pi V_s}{2H} \leftrightarrow T_0 = \frac{4H}{V_s} \quad (6.21)$$

6.5.2. Razón espectral estándar (SSR)

La técnica SSR por su sigla en inglés (Standard Spectral Ratio) fue descrita por primera vez en el artículo *Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay* (Borcherdt, 1970). Se basa en estimar mediante registros sísmicos de un mismo evento, los efectos de sitio para el punto de interés.

Teniéndose un registro sísmico $u(t)$ conformado por los efectos asociados a la fuente $s(t)$, los efectos asociados al trayecto entre la fuente y el sitio de interés $p(t)$, y los efectos de sitio $h(t)$, y suponiéndose que existe linealidad entre estos factores, entonces el registro sísmico se escribe como la convolución de sus componentes.

$$u(t) = s(t) * p(t) * h(t) \quad (6.22)$$

Si se aplica la transformada de Fourier a la ecuación 6.22, entonces la convolución pasa a ser un producto pero en función de la frecuencia.

$$U(f) = S(f) * P(f) * H(f) \quad (6.23)$$

Luego, habiendo dos registros sísmicos distintos del mismo evento que se encuentran a una distancia similar de la fuente, se puede decir que la fuente y el trayecto son iguales para ambos registros, por lo tanto, en el cociente espectral quedarían solo las componentes de sitio.

$$\frac{U_2(f)}{U_1(f)} = \frac{S(f)P(f)H_2(f)}{S(f)P(f)H_1(f)} = \frac{H_2(f)}{H_1(f)} \quad (6.24)$$

Finalmente, si el registro $u_1(t)$ se mide en un afloramiento rocoso, entonces los efectos de sitio serán despreciables, y por tanto, el cociente espectral será una estimación de la función de transferencia. Nótese que se deben tener las siguientes consideraciones: 1) El sitio de referencia no debe sufrir efectos de sitio (como se supone para el registro u_1), y 2) la distancia entre fuente y receptor es mucho mayor a la distancia entre receptores.

6.5.3. Razón espectral horizontal a vertical (HVSr)

El método *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) (Nakamura, 1989), consiste en estimar el cociente del espectro de amplitudes de Fourier de las componentes horizontales sobre

la componente vertical, de registros de ruido sísmico ambiental. Nakamura propone que las vibraciones ambientales en la superficie del suelo sobre un semi-espacio rígido, se componen de ondas de cuerpo y ondas R (Rayleigh) inducidas por fuentes no naturales, siendo estas últimas perturbaciones que es necesario eliminar.

Para tal objetivo, se propone lo siguiente: 1. Las ondas R son observables principalmente en la componente vertical. 2. Las ondas R afectan a la superficie y no a la base del depósito de suelo. 3. El efecto de las ondas R en superficie, es igual para el movimiento horizontal y vertical.

Para la formulación se usará la figura 6.16, la que representa un depósito sedimentario con afloramiento rocoso, típico en cuencas y esteros. Los valores V_f , V_b , H_f y H_b corresponden a los espectros de amplitud de Fourier en vertical y horizontal, tanto en la roca basal como en la superficie del terreno.

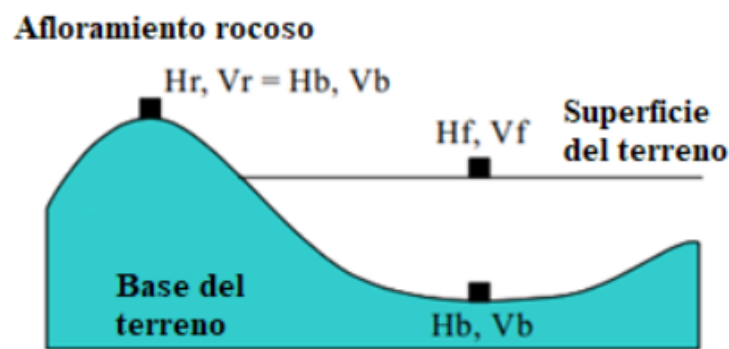


Figura 6.16: Estructura geológica típica de un depósito sedimentario.

Fuente: Adaptado de Nakamura y cols. (2000).

Se definen las funciones de transferencias típicas entre la superficie y la roca basal como dictan las ecuaciones 6.25.

$$T_v = \frac{V_f}{V_b}, T_h = \frac{H_f}{H_b} \quad (6.25)$$

Nakamura postula una función de transferencia modificada llamada Quasi Transfer Spectrum (QTS) (ecuación 6.26), y mediante mediciones experimentales determina que la razón entre H_b y V_b es aproximadamente 1 en el rango entre 0.1 y 20 Hz:

$$QTS = \frac{T_h}{T_v} = \frac{H_f V_b}{H_b V_f} = \frac{H_f}{V_f} \quad (6.26)$$

Distintos estudios, por ejemplo Bonnefoy-Claudet y cols. (2006), han demostrado que QTS presenta un máximo en la frecuencia que coincide con la frecuencia fundamental del depósito



de suelo, pero no se correlaciona con la magnitud de la amplificación de onda de esa frecuencia. Así es entonces, que la función QTS (también llamada razón espectral H/V) se puede obtener realizando mediciones de las vibraciones ambientales en puntos singulares en la superficie del terreno de interés.

6.5.4. Curva elíptica del suelo

La obtención de la curva elíptica del suelo es relativamente simple, pero está afectada a varias consideraciones que permiten mejorar los resultados.

Los pasos a seguir son los siguientes.

- Toma de los registros en componentes verticales, norte-sur y este-oeste.
- Separación de cada componente en intervalos de tiempo como se aprecia en la figura 6.17. Estos intervalos de tiempo son aplicados a cada componente por igual.
- Aplicación de método anti-trigger a cada componente separada, que elimina las partes del registro que representan eventos transitorios.
- Aplicación de Transformada de Fourier a componentes procesadas, y cálculo de amplitudes espectrales.
- Suavizado de amplitudes espectrales, con tal de mejorar legibilidad de señales (figura 6.18).
- Combinación de las amplitudes espectrales filtradas de las componentes horizontales mediante promedio cuadrático.
- Cálculo de curvas H/V, para cada intervalo de tiempo definido.
- Promedio de curvas H/V, donde se define la curva H/V para el suelo de interés (figura 6.19).
- Definición de la frecuencia con mayor amplitud de las curvas promediadas. Este paso requiere de la consideración de varios criterios con tal de evitar definir incorrectamente el periodo fundamental, los que son descritos en *GUIDELINES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE H/V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE ON AMBIENT VIBRATIONS* de SESAME (2004).

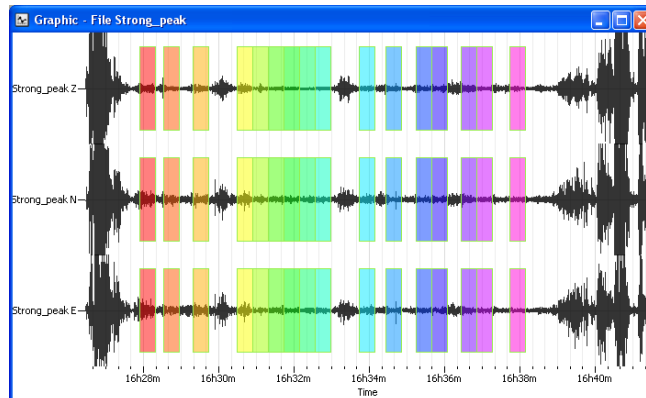


Figura 6.17: Algoritmo para selección de ventanas de tiempo.

Fuente: Wathelet y cols. (2020).

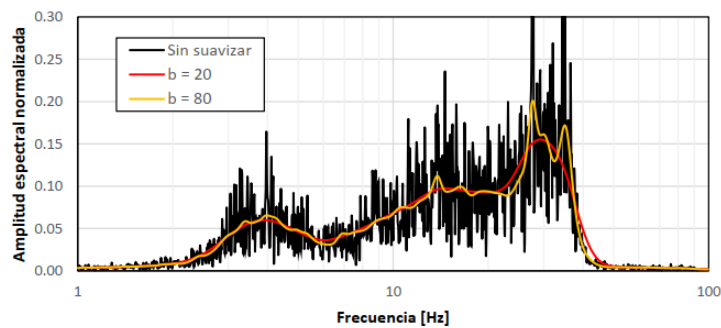


Figura 6.18: Comparación entre espectro de frecuencia en bruto y con distintos grados de suavizado.

Fuente: Álvarez (2020).

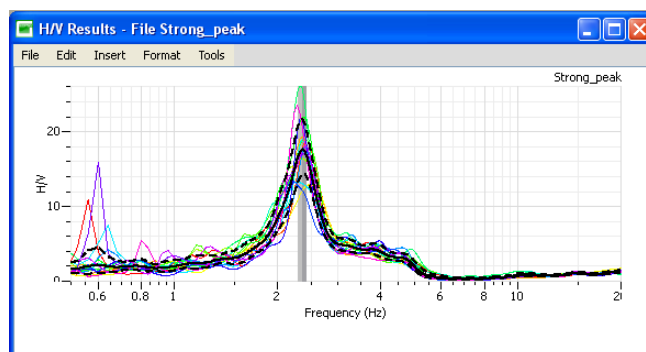


Figura 6.19: Promedio de curvas H/V con peak de frecuencia claro.

Fuente: Wathelet y cols. (2020).

7. Análisis de sensibilidad

Se procede a analizar como distintas distribuciones estratigráficas y propiedades elásticas, influyen en la forma de las curvas dispersivas y elípticas obtenidas mediante los distintos paquetes del software GEOPSY.

El análisis se realiza en la distribución Ubuntu (versión 22.04.1 LTS) del sistema operativo GNU/Linux, mediante el software GEOPSY en su versión 3.4.2. Se especifica el método detallado en su correspondiente título.

7.1. Generación de modelos

Los modelos estratigráficos y sus correspondientes configuraciones de densidad y velocidades de onda S y P, son definidos en GEOPSY mediante el paquete *gplivemodel*. En esta interfaz gráfica (figura 7.1), pueden computarse automáticamente las curvas dispersivas y elípticas asociadas a cada modelo.

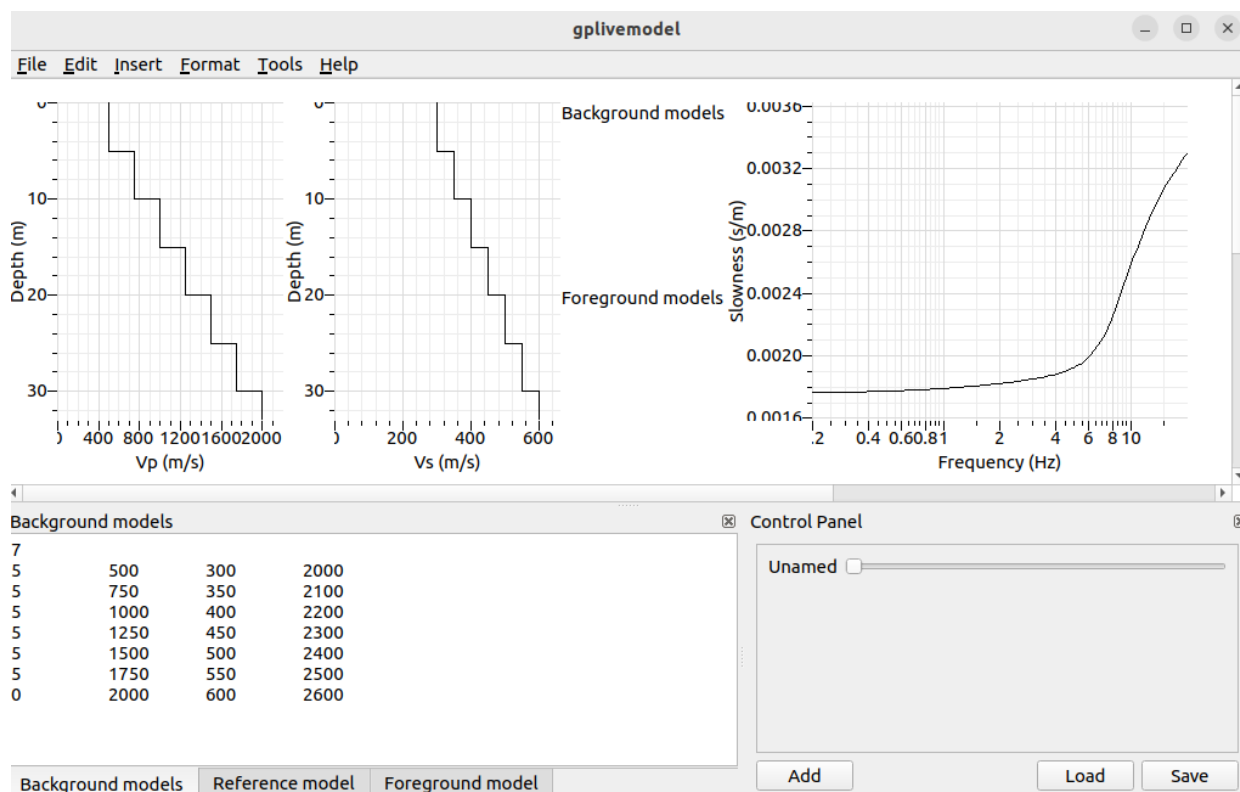


Figura 7.1: Interfaz gráfica del paquete gplivemodel de GEOPSY.

Fuente: Elaboración propia.

Los modelos consisten de archivos de texto ASCII, donde su primera fila corresponde al número de capas incluyendo el último sustrato semi-infinito. Cada capa consta de 4 columnas, siendo la primera su espesor en metros (m), luego sus velocidades de onda de compresión (V_p) y velocidad de onda de corte (V_s) en m/s , y densidad (ρ) en kg/m^3 .

El análisis de sensibilidad se aplicará a 27 perfiles de suelos, agrupados en 9 modelos designados por 3 numerales que comparten características estratigráficas pero varían sus parámetros, siendo designados estos últimos por letras. Todos los perfiles contemplan que el estrato semi-infinito se encuentra a 30 metros de profundidad.

Nótese que no se busca representar algún suelo en particular, sino que analizar el comportamiento de las curvas dispersivas y elípticas ante variación de los parámetros en cada modelo. Todos los modelos son presentados mediante gráficos que tienen los mismos rangos de eje, para poder compararlos fácilmente entre si.

El modelo perteneciente al grupo 000 (figura 7.2), corresponde a un suelo estratificado con capas de 5 metros de espesor, y crecimiento positivo y escalonado de sus parámetros.

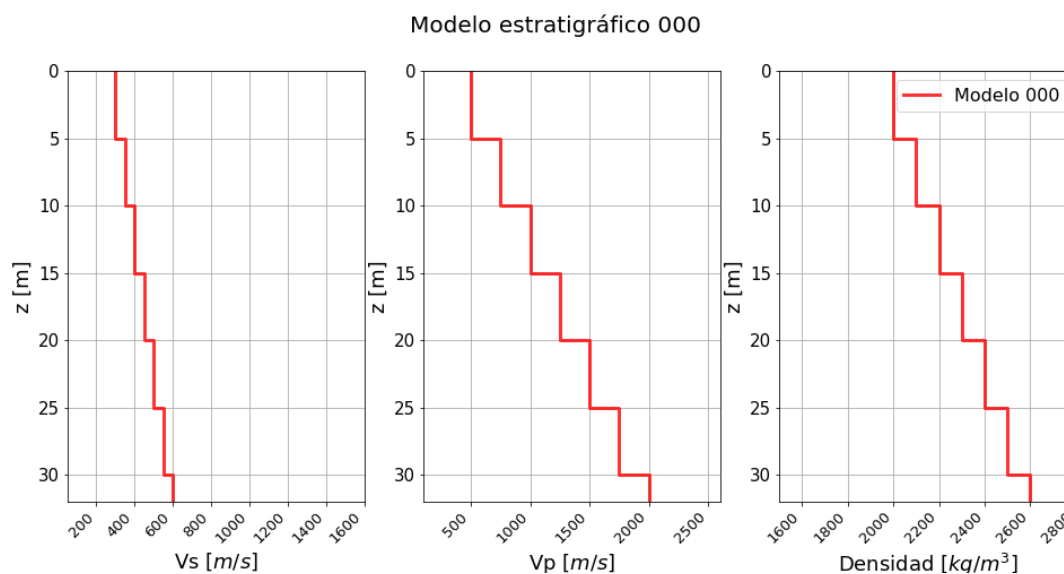


Figura 7.2: Modelo 000.

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente modelo (figura 7.3), consiste de un perfil similar al modelo anterior pero con menos capas. Los perfiles 001B y 001C presentan decrecimiento y aumento constante de todos sus parámetros respectivamente.

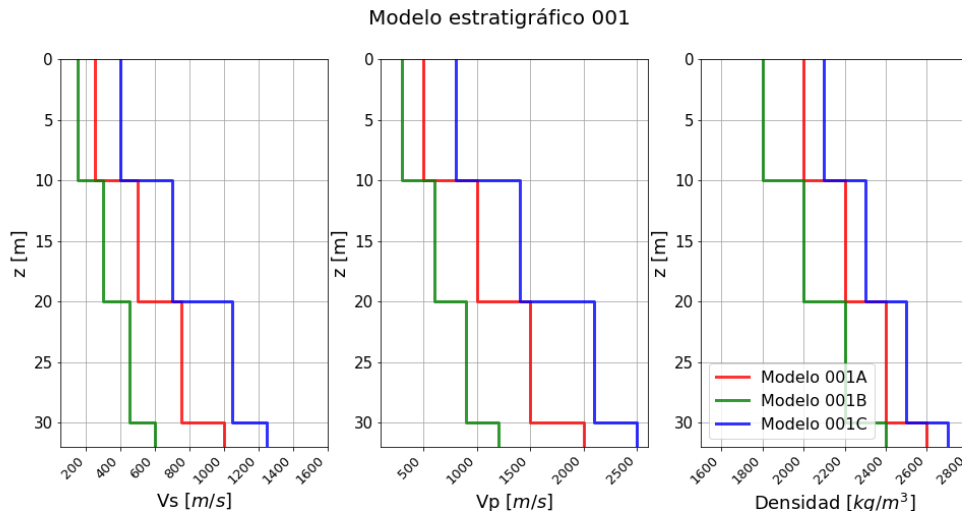


Figura 7.3: Modelo 001A, B y C.

Fuente: Elaboración propia.

Los siguientes perfiles (figura 7.4) pertenecen al grupo 002, y son perfiles que disminuyen (002B) y aumentan (002C) exponencialmente sus parámetros respecto al modelo base 002A.

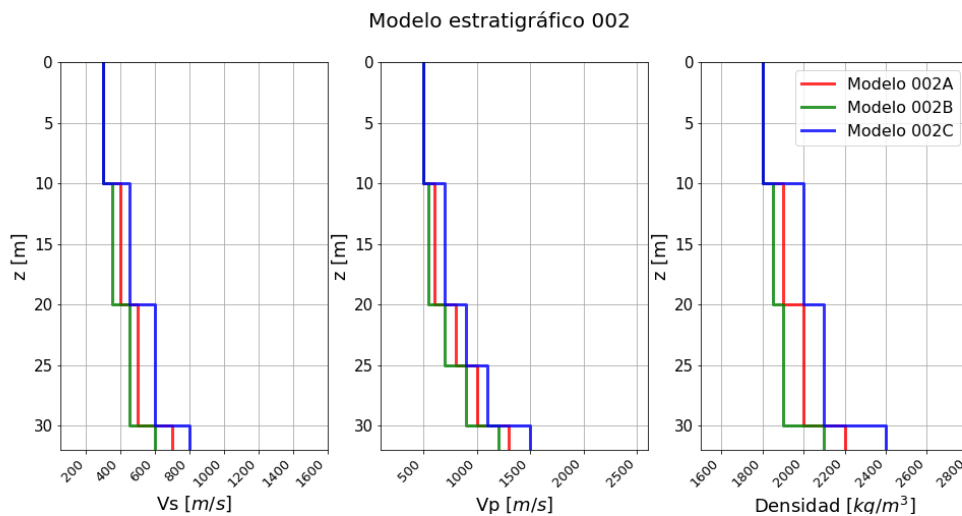


Figura 7.4: Modelo 002A, B y C.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo denominado 003 (figura 7.5) tiene un suelo poco competente con una capa con parámetros mayores (003A), teniendo el perfil 003B esta capa más arriba, y 003C más abajo.

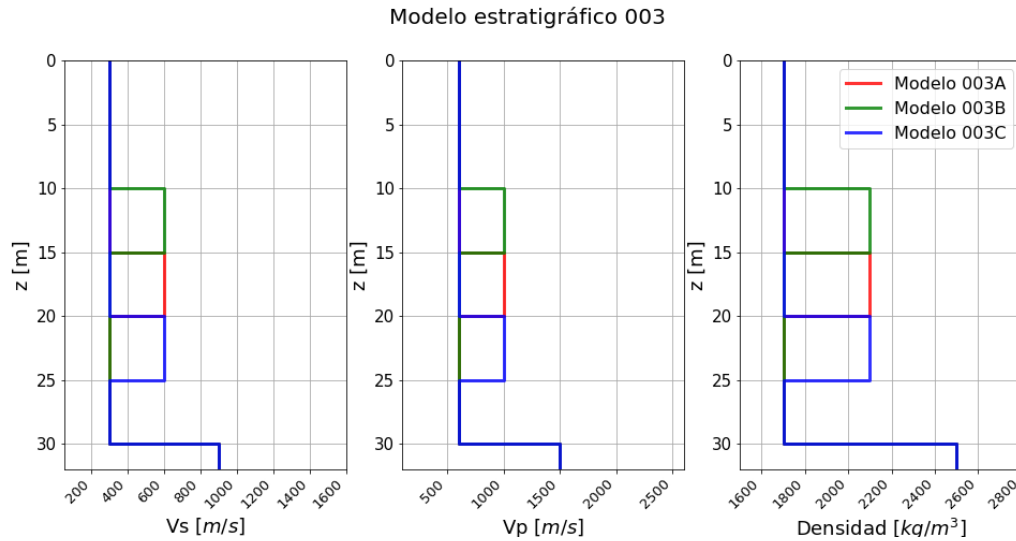


Figura 7.5: Modelo 003A, B y C.

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente modelo (figura 7.6) es un suelo competente con una capa con parámetros menores, teniendo el perfil 004B esta capa más arriba, y el perfil 004C esta capa más abajo.

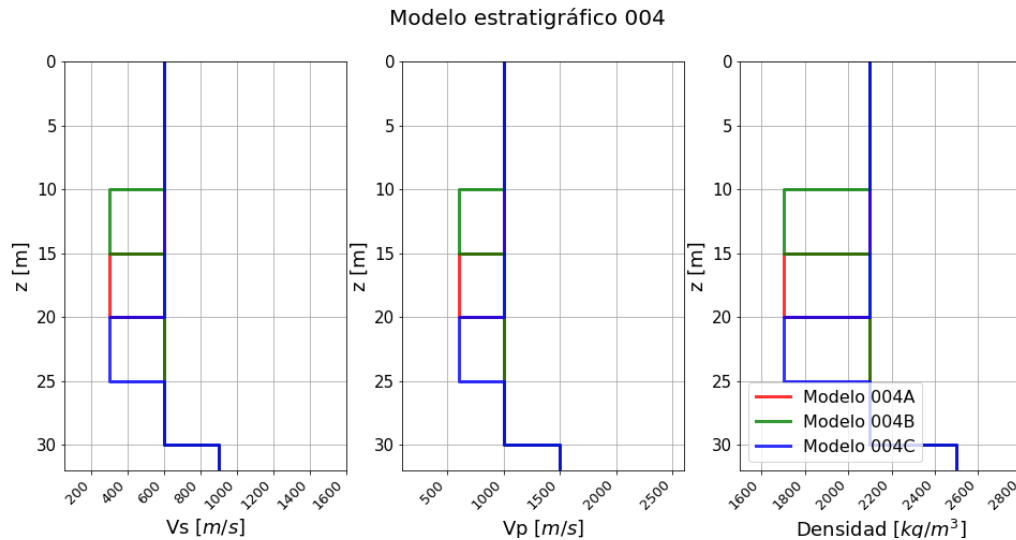


Figura 7.6: Modelo 004A, B y C.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo 005 (figura 7.7) es un estrato con una capa de suelo más competente en el, primero de espesor delgado (005A) y otro grueso (005B).

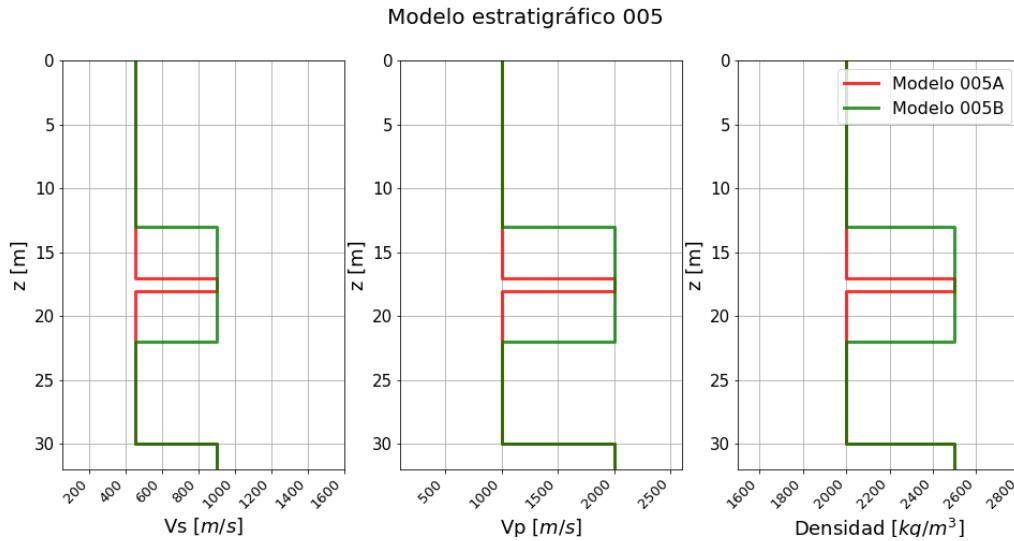


Figura 7.7: Modelo 005A y B.
Fuente: Elaboración propia.

El modelo 006 (figura 7.8) es similar al 005, pero con un estrato entrometido de menor calidad. Se hace variar su espesor.

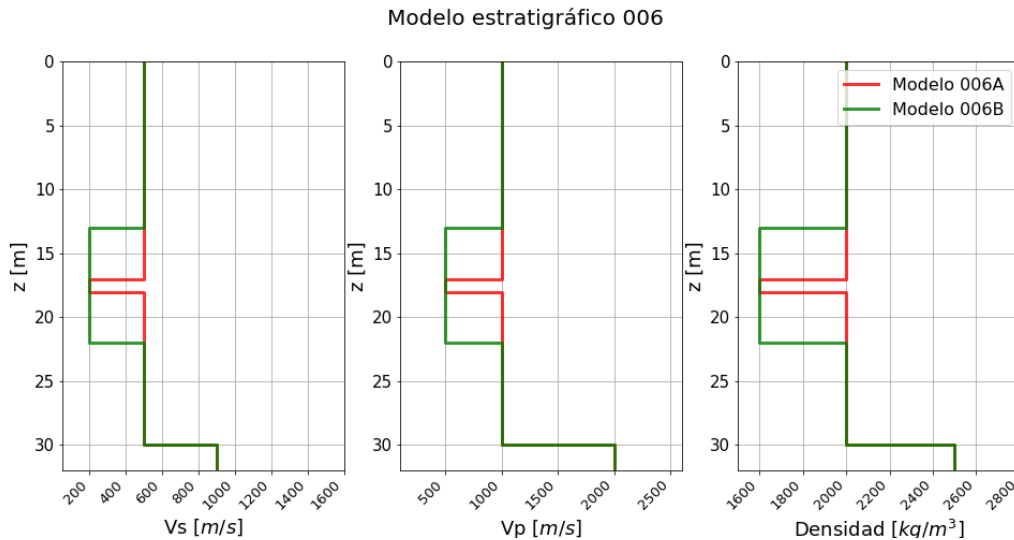


Figura 7.8: Modelo 006A y B.
Fuente: Elaboración propia.

El modelo 007 (figura 7.9) contempla estratos de 2.5 metros de espesor, donde sus parámetros crecen lineal y escalonadamente. El perfil 007B tiene 3 capas de parámetros mayores al perfil 007A, mientras que el 007C tiene 3 capas de parámetros menores.

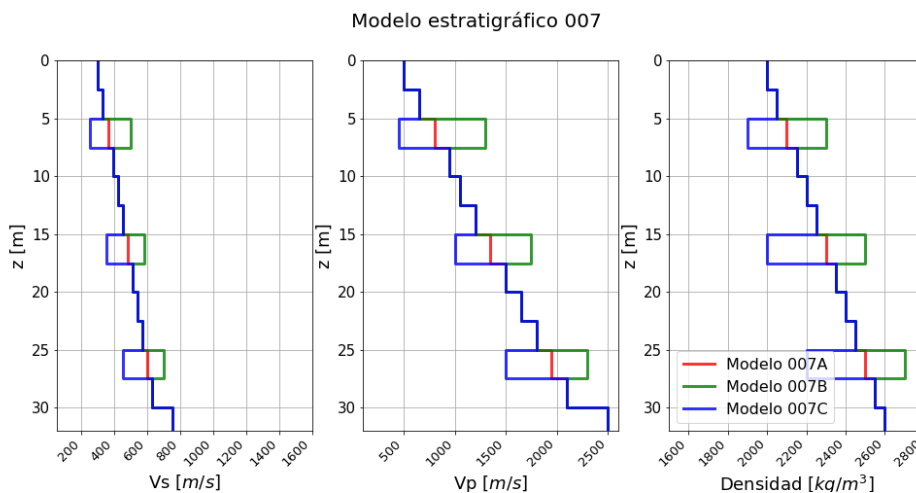


Figura 7.9: Modelo 007A, B y C.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo 008 (figura 7.10) consta de un suelo con 3 estratos gruesos antes del medio semi-infinito, donde el perfil 008B disminuye el espesor de la primera capa más débil, y el perfil 008C aumenta el espesor del primer estrato.

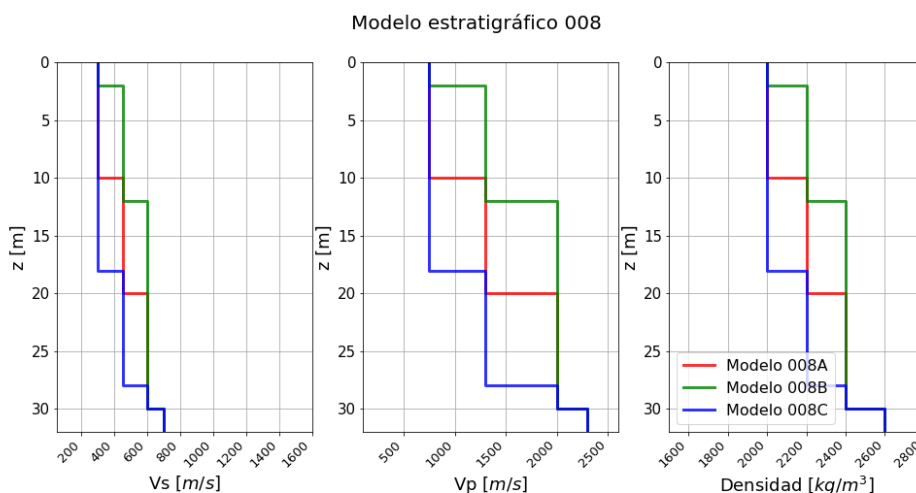


Figura 7.10: Modelo 008A, B y C.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el modelo 009 (figura 7.11) presenta un suelo con solo dos estratos incluyendo el medio semi-infinito más profundo. El perfil 009A tiene una primera capa más débil de solo 2.5 metros de espesor, el perfil 009B aumenta este espesor a 10 metros, el 009C presenta un espesor de primera capa de 20 metros, y el 009D presenta una capa inicial de 30 metros de espesor.

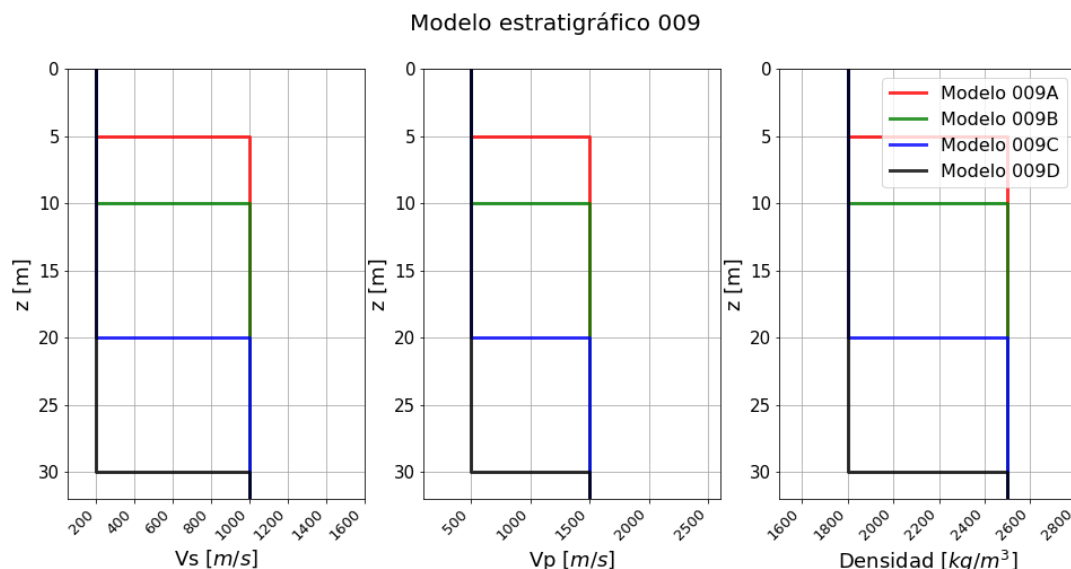


Figura 7.11: Modelo 009A, B, C y D.

Fuente: Elaboración propia.

7.2. Cálculo de curvas de dispersión mediante GEOPSY

Las curvas dispersivas son calculadas mediante el paquete *gpdc* de GEOPSY. Se calcula solo la curva asociada al primer modo de vibración de onda tipo Rayleigh, y hasta los 40 Hz.

Las curvas dispersivas constan de archivos de texto ASCII, donde las primeras filas son usadas por el software para informar los parámetros del proceso, y los datos son entregados en pares de datos: la velocidad de fase (V_{fase}) en m/s y su frecuencia correspondiente en Hz . Se grafican los mismos rangos de cada eje en todos los modelos, con tal de facilitar la comparación posterior.

El análisis de sensibilidad se aplicará a los mismos 27 perfiles y 9 grupos ya definidos en la sección anterior. Nótese que no se busca representar algún suelo en particular, sino que analizar el comportamiento de las curvas dispersivas y elípticas ante variación de los parámetros en cada modelo.

La primera curva dispersiva (figura 7.12) proviene del modelo 000, que es un perfil estratigráfico escalonado, de parámetros crecientes linealmente respecto a la profundidad. Esta

curva permite tener una idea general de como se comporta dispersivamente un suelo de configuración típica.

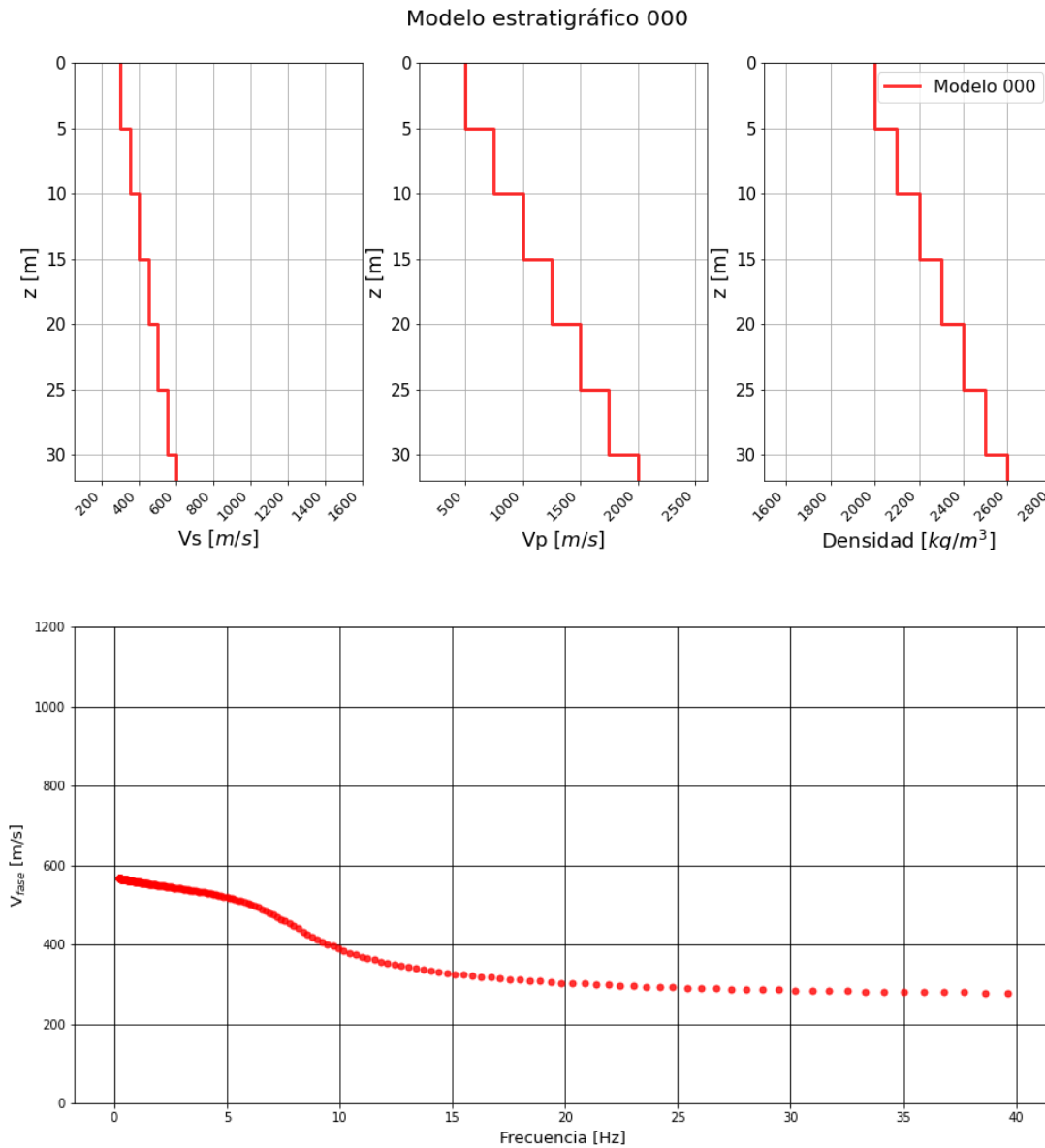


Figura 7.12: Curva dispersiva modelo 000.

Fuente: Elaboración propia.

Las siguientes curvas corresponden al modelo 001 (figura 7.13), y provienen de perfiles con pocos escalones de parámetros crecientes respecto a la profundidad. Se puede denotar que las curvas se mueven diagonalmente respecto al valor de los parámetros del suelo: a mayor rigidez

del suelo, la curva se aleja del origen (modelo 001C), y a menor rigidez, la curva se acerca al origen (modelo 001B).

Además, los valores asintóticos de velocidad de fase aumentan si aumenta la rigidez del suelo.

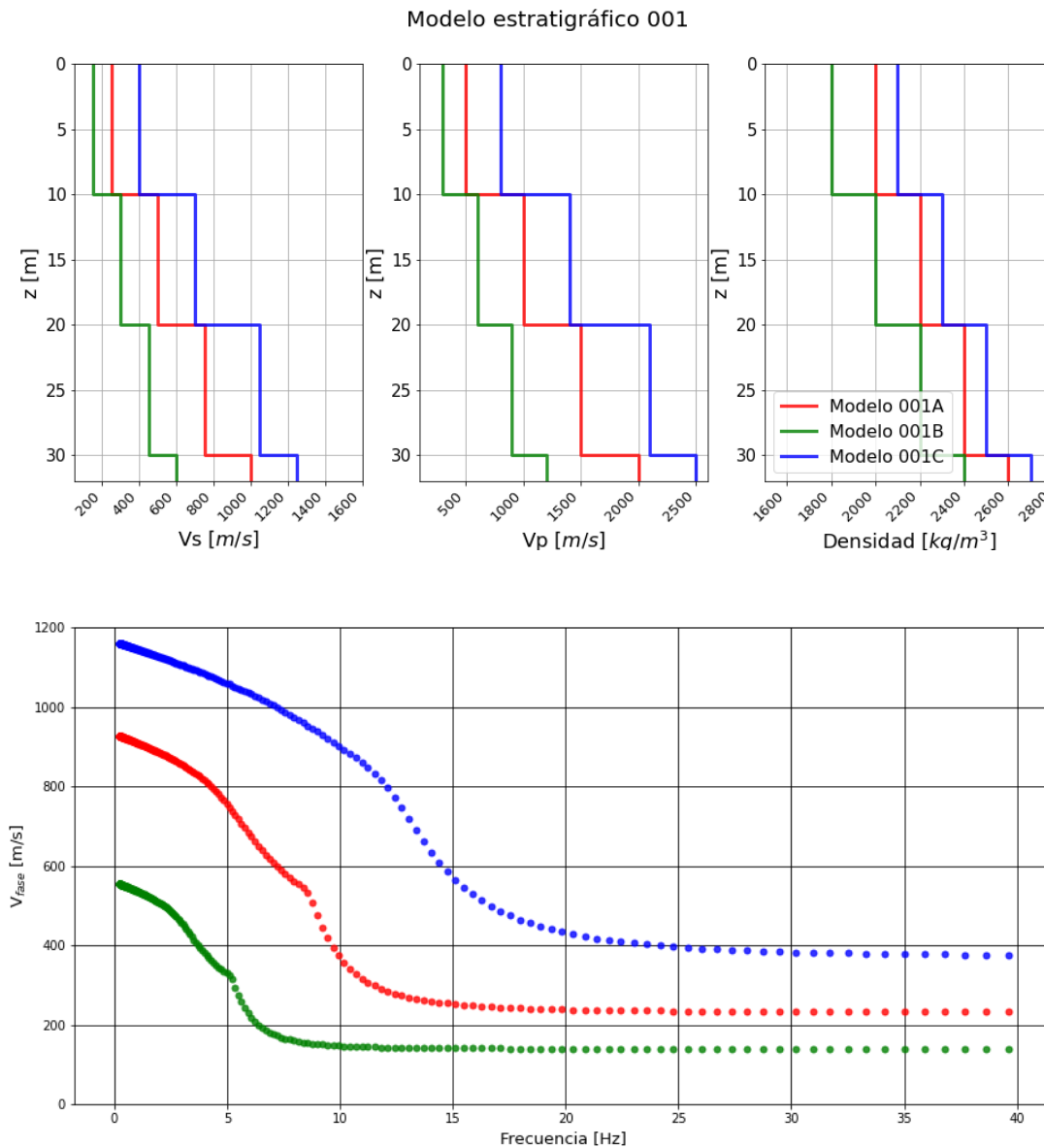


Figura 7.13: Curva dispersiva modelo 001.

Fuente: Elaboración propia.

Las curvas dispersivas asociadas al modelo 002, se presentan en la figura 7.14, y provienen de perfiles escalonados que comparten un perfil superficial igual pero aumentan sus parámetros

a distintas velocidades respecto la profundidad.

Nuevamente se observa que las curvas se alejan del origen si la rigidez del suelo aumenta, pero a diferencia del modelo anterior, todas las curvas convergen a la misma asíntota para la velocidad de fase, la que coincide con la velocidad de onda de corte de la primera capa del modelo ($V_{fase}(f > 20 \text{ Hz}) = V_{S1} = 300 \text{ m/s}$).

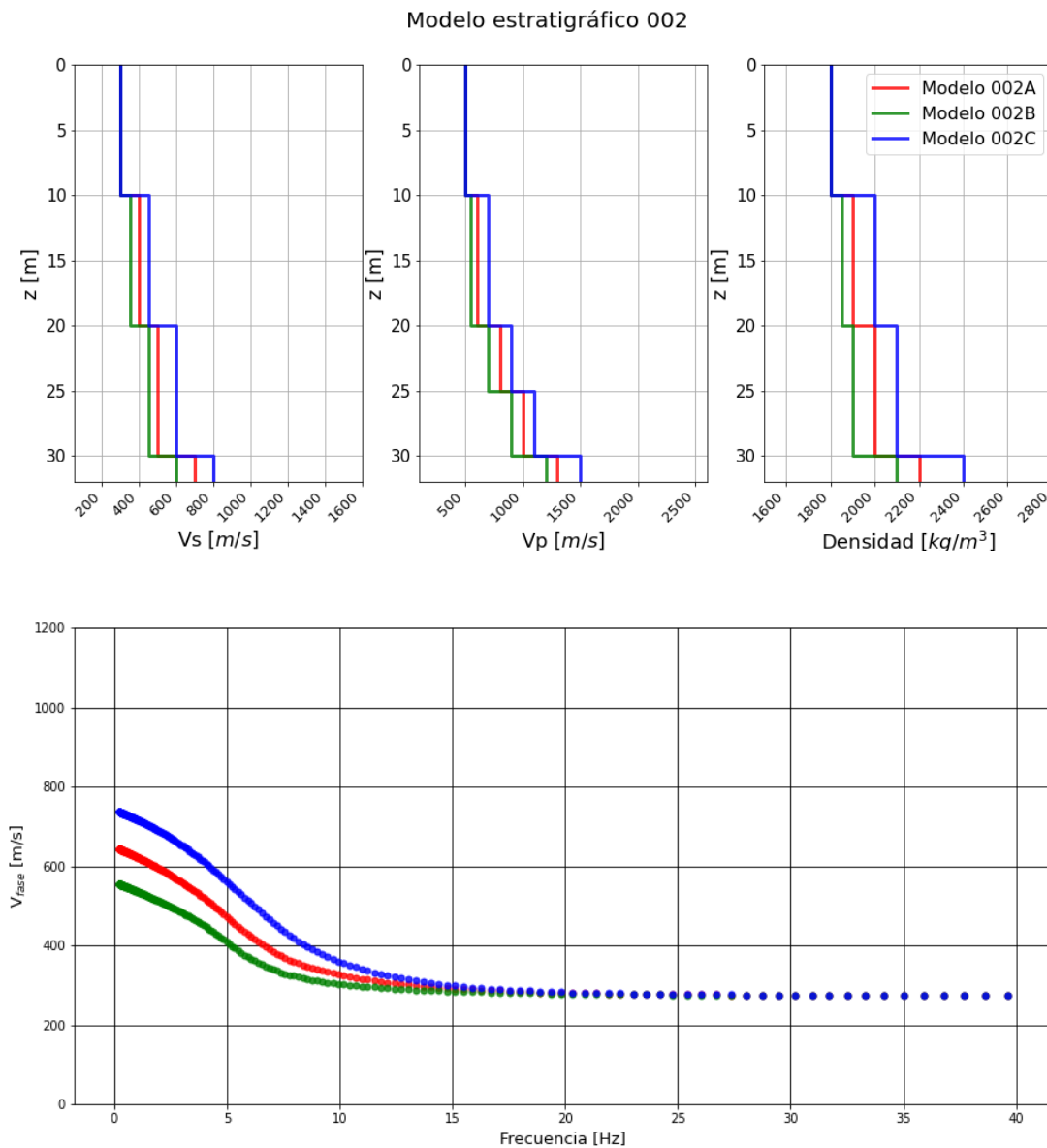


Figura 7.14: Curva dispersiva modelo 002.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo 003 resulta en las curvas de la figura 7.15. Se aprecia que las curvas son similares, teniendo los mismos valores de V_{fase} iniciales y finales.

Se denotan pequeñas variaciones en los cambios de pendiente en las inflexiones de las curvas (estos puntos son similares entre curvas).

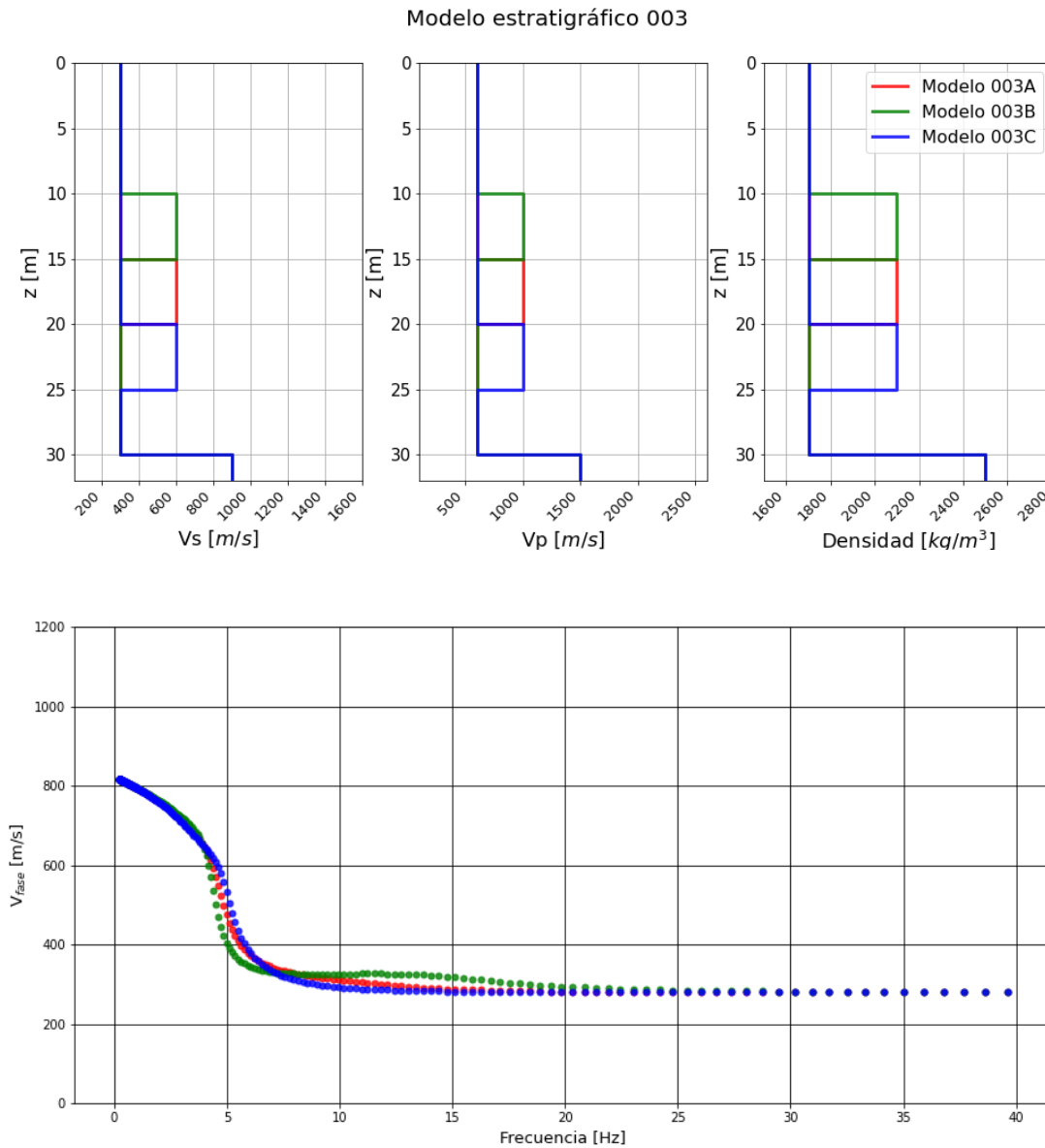


Figura 7.15: Curva dispersiva modelo 003.

Fuente: Elaboración propia.

Las curvas dispersivas calculadas desde el modelo 004, se aprecian en la figura 7.16. De forma similar al modelo anterior, los perfiles son similares pero cuentan con capas menos rígidas a distintas profundidades. Se observa que las curvas inician y terminan en velocidades de fase iguales, independiente de la altura de la debilidad.

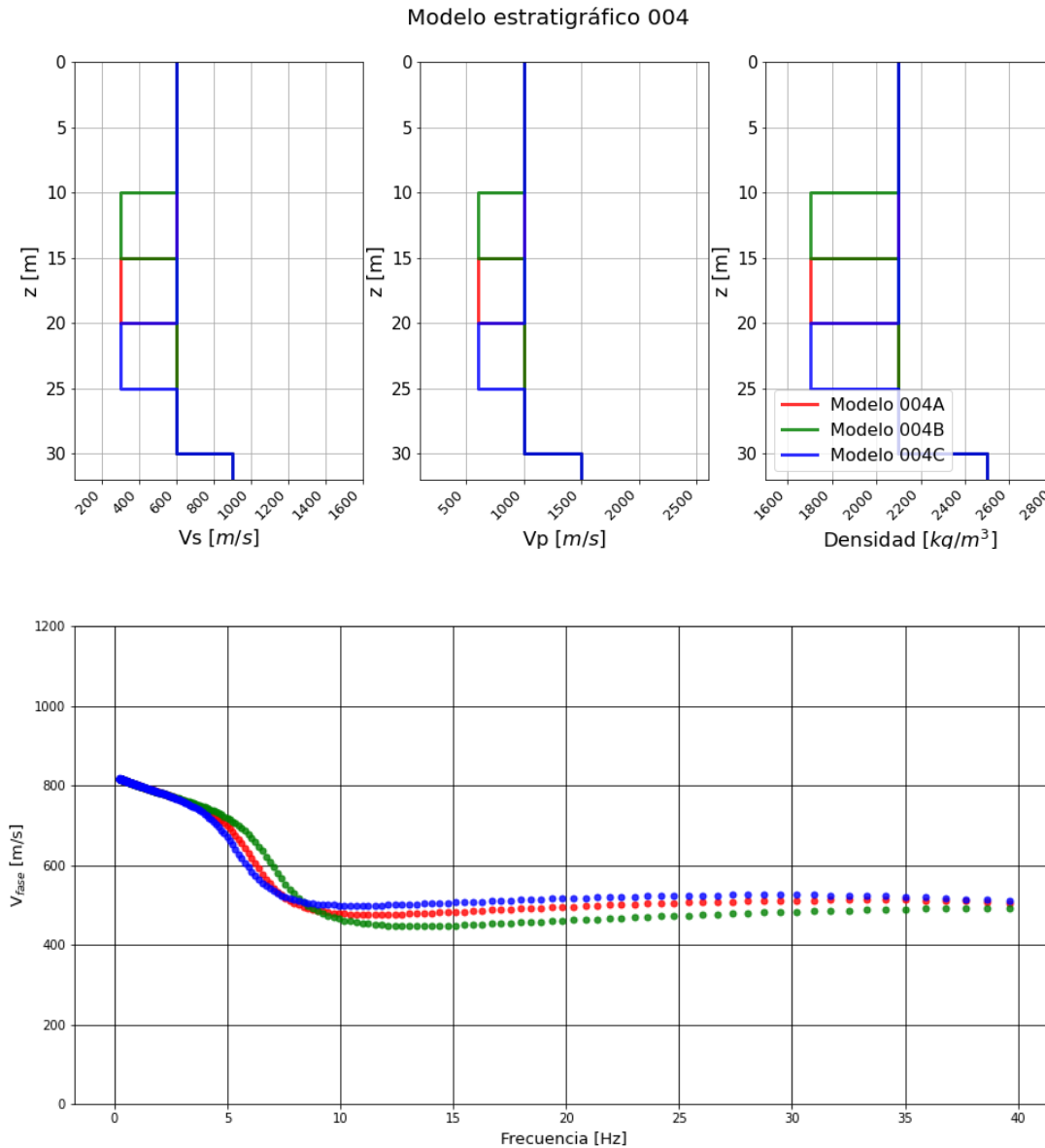


Figura 7.16: Curva dispersiva modelo 004.

Fuente: Elaboración propia.

Las curvas asociadas al modelo 005 (figura 7.17) entregan dispersiones con velocidades de fase iniciales y finales similares, pero el suelo con el estrato más rígido y de mayor espesor, tiene una curva más alejada del origen respecto al suelo con un estrato igual de rígido pero de menor espesor.

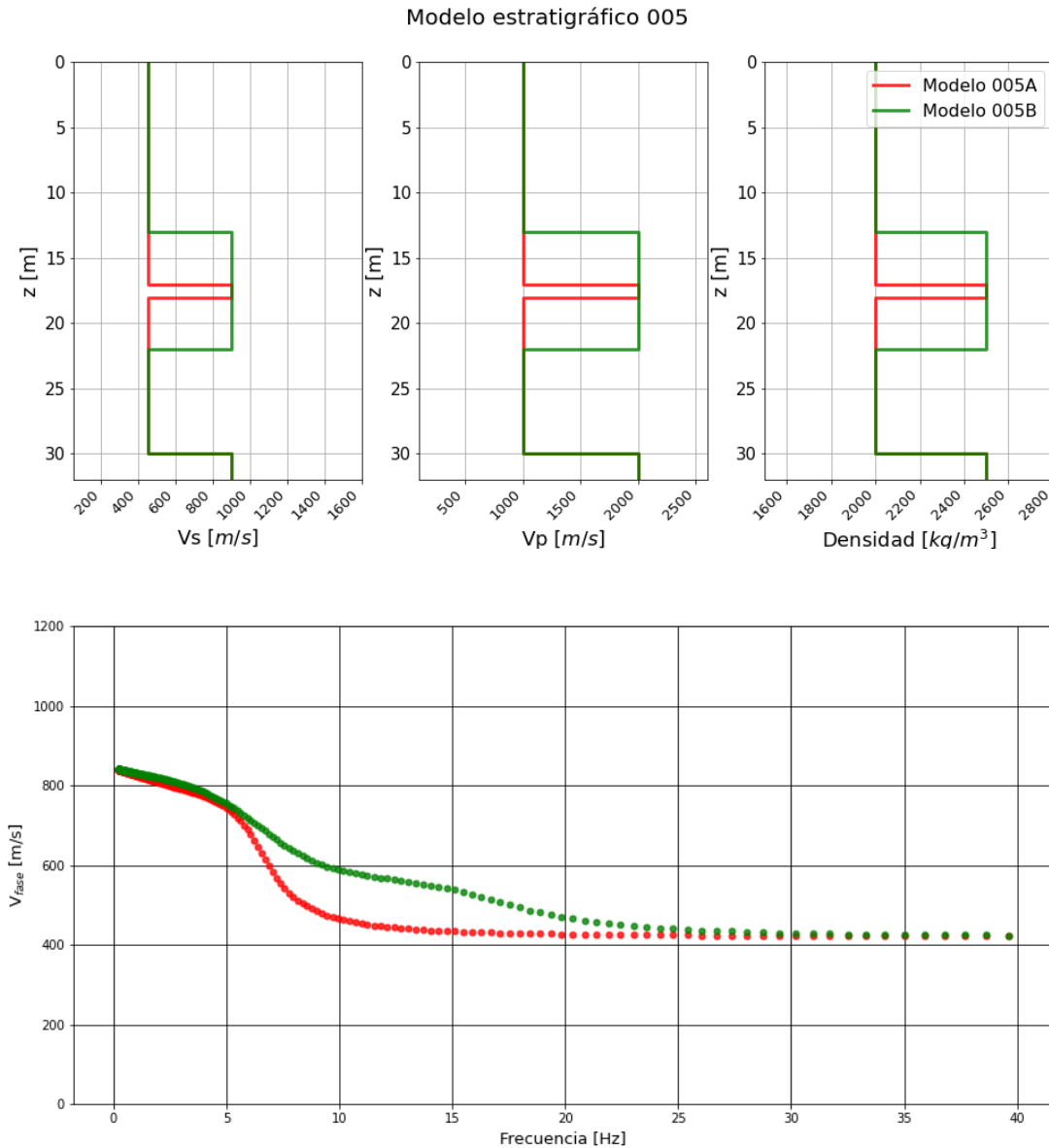


Figura 7.17: Curva dispersiva modelo 005.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo 006 arroja las curvas graficadas en la figura 7.18. Se aprecia que si bien las curvas inician en los mismos valores de velocidad de fase, el espesor mayor de la capa débil en el perfil 006B afecta su dispersión de manera notoria. Se puede observar que mientras que en el modelo 006A la velocidad de fase final tiende a la V_S del medio predominante (450 m/s), en el modelo 006B tiende al valor de V_S de la capa más débil (200 m/s).

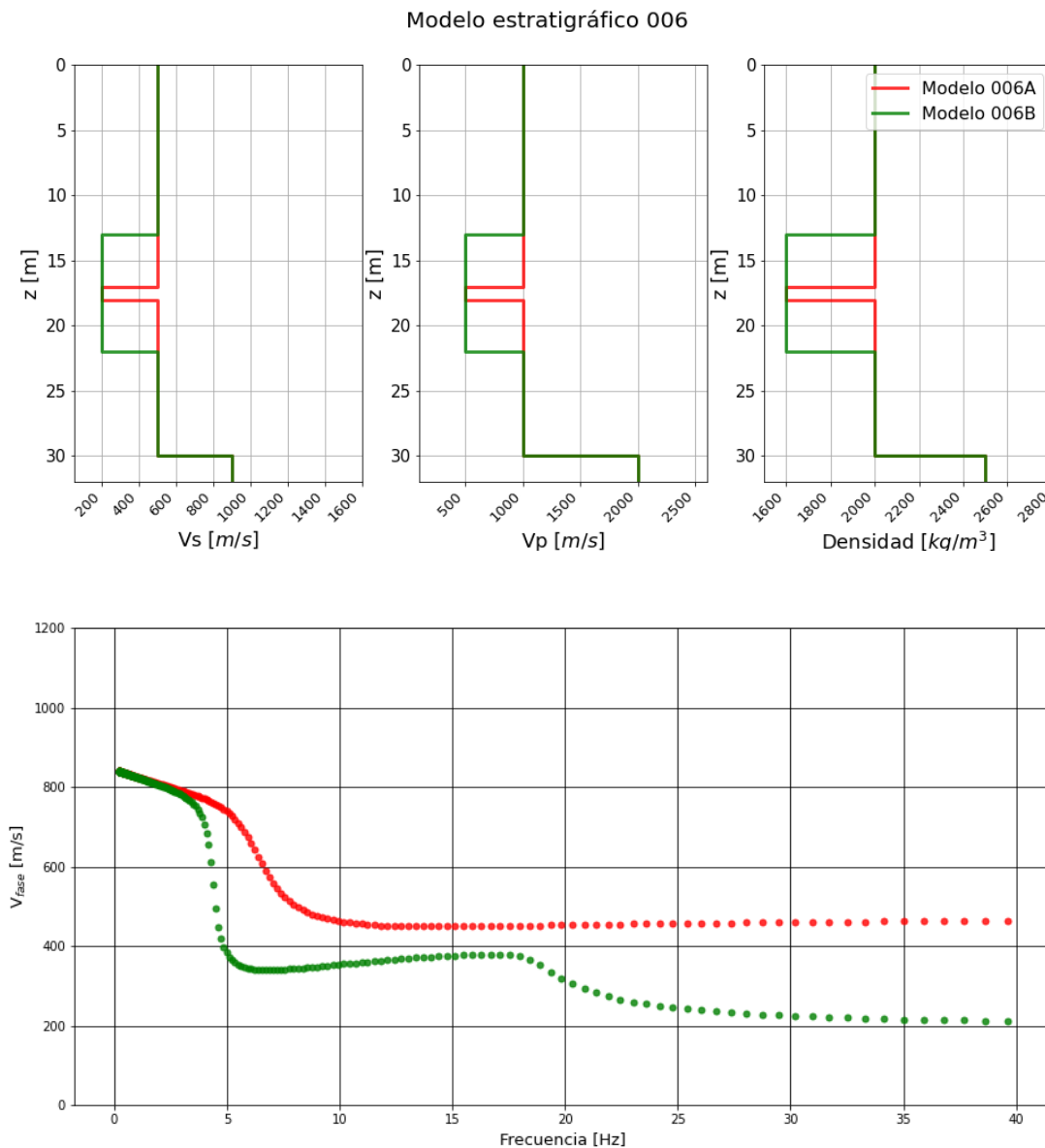


Figura 7.18: Curva dispersiva modelo 006.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7.19, se tienen las curvas dispersivas del modelo 007. Se aprecia como los valores iniciales de V_{fase} coinciden para todas las curvas y tienden a la V_s del medio semi-infinito ($V_s(z > 30 m) = 750 m/s$), mientras que la V_{fase} final de las curvas tienden al mismo valor y equivale al valor de V_s de la capa inicial ($V_{fase}(f > 40 Hz) = V_{S1} = 300 m/s$).

Además, el perfil 007B que tiene capas más rígidas respecto al 007C, se aleja más del origen que este último.

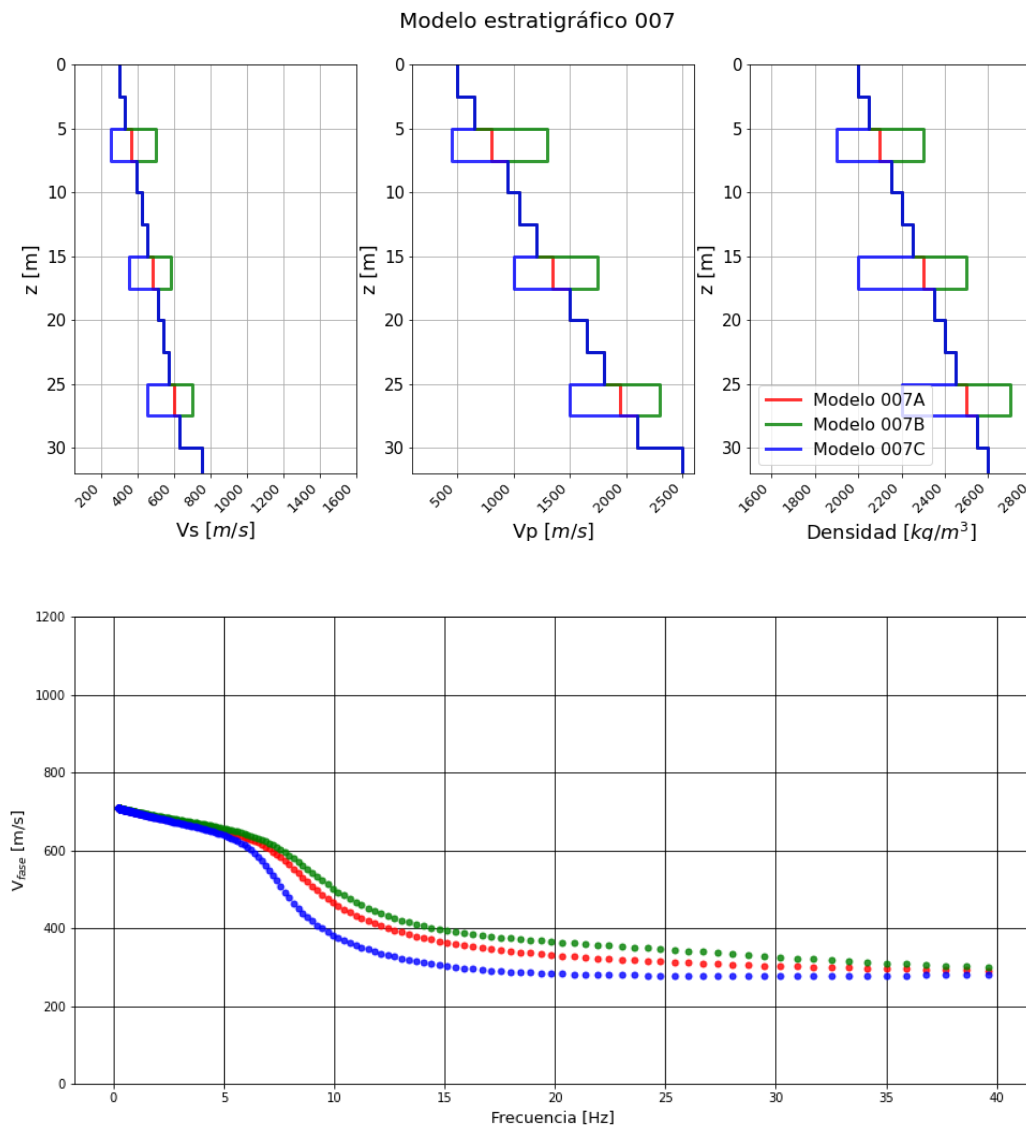


Figura 7.19: Curva dispersiva modelo 007.

Fuente: Elaboración propia.

Las curvas dispersivas del modelo 008 (figura 7.20), si bien tienen velocidades de fase iniciales iguales y que tienden a la V_S del medio semi-infinito (700 m/s), las V_{fase} finales son distintas para cada modelo y tienden a valores similares a la V_S de su capa superior, salvo en el caso del perfil 008B que pareciera converger a V_{S1} para valores mayores de frecuencia.

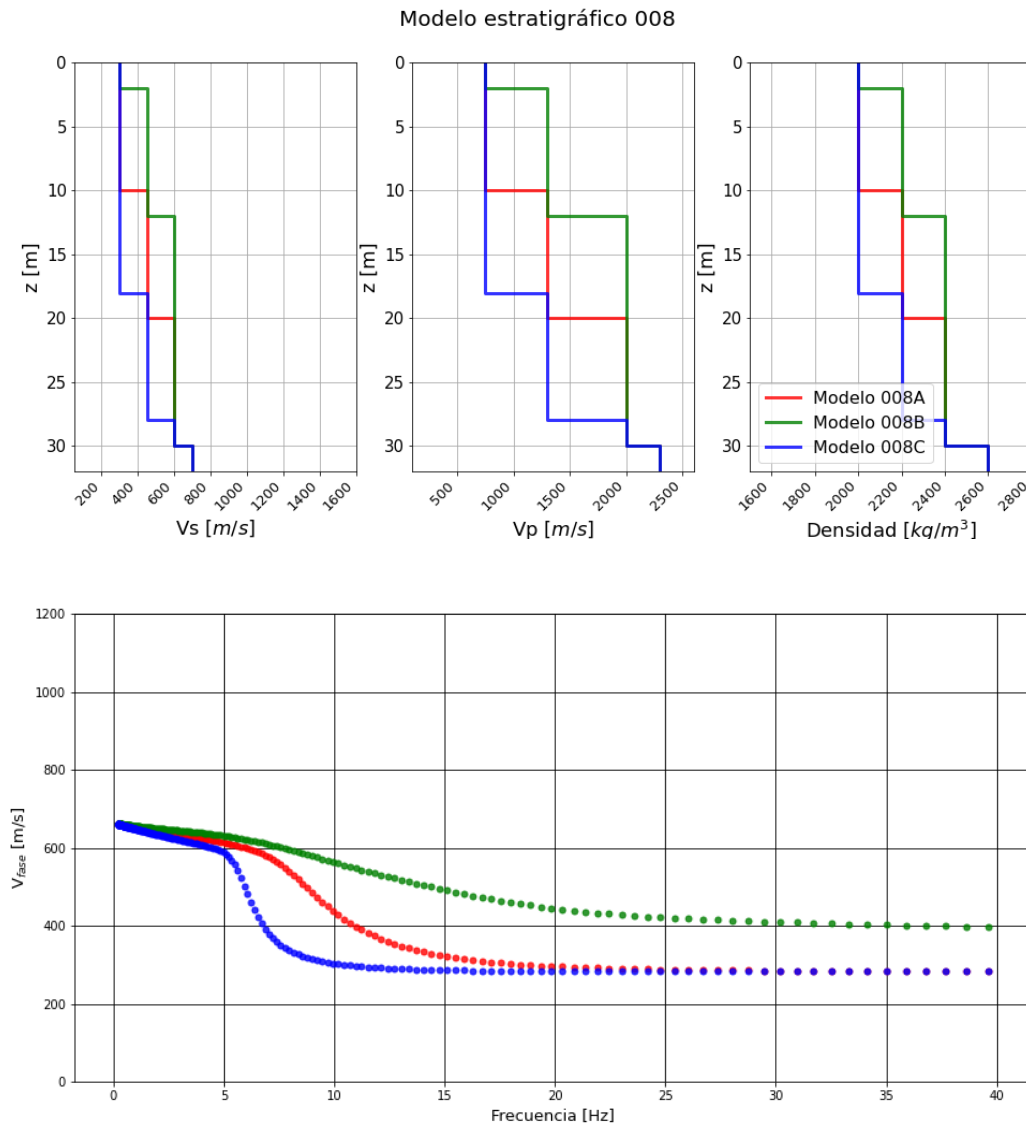


Figura 7.20: Curva dispersiva modelo 008.

Fuente: Elaboración propia.

También puede observarse, que la profundidad a la que ocurren los cambios de propiedades, afectan la brusquedad en los cambios de pendiente de la velocidad de fase: el modelo 008A que

tiene cambios de parámetros a la mitad de profundidad aproximadamente tiene una pendiente suave entre la velocidad de fase inicial y final, el perfil 008C cambia sus parámetros a mayor profundidad y su curva tiene una pendiente fuerte entre los valores extremos de V_{fase} , y finalmente, el perfil 008B, que presenta el caso contrario al anteriormente descrito.

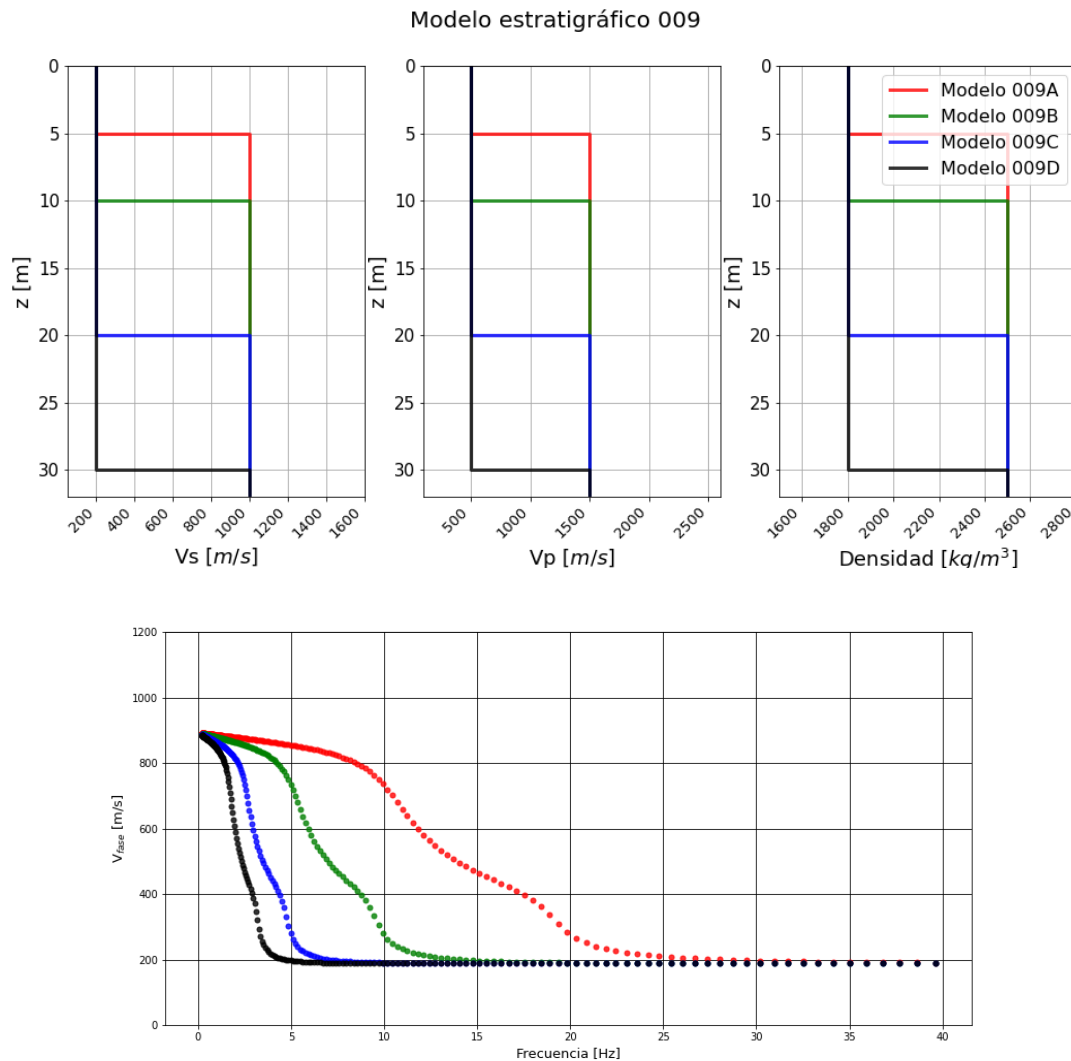


Figura 7.21: Curva dispersiva modelo 009.

Fuente: Elaboración propia.

El último modelo, presenta las curvas dispersivas como se ven en la figura 7.21. Todas las curvas inician con la misma velocidad de fase que se acerca a la velocidad de la onda de corte de la última capa, pero dista más que en los modelos anteriores. Terminan en valores similares que coinciden con la velocidad de onda de corte del estrato superficial (200 m/s), y las pendientes de

V_{fase} son más bruscas si la profundidad donde ocurre el aumento de los valores de los parámetros es mayor.

7.3. Cálculo de curvas elípticas mediante GEOPSY

Las curvas elípticas son obtenidas mediante el paquete *gpell* de GEOPSY, considerando solo el primer modo de Rayleigh y hasta los 40 Hz. Los archivos resultantes constan de archivos de texto ASCII, donde las primeras filas son usadas por el software para informar los parámetros del proceso, y los datos son entregados en pares de datos: amplitud espectral y su frecuencia correspondiente en hercios. Se grafican los mismos rangos de cada eje en todos los modelos, con tal de facilitar la comparación posterior. El análisis de sensibilidad se aplicará a los mismos 27 perfiles y 9 grupos ya definidos en la sección 7.1.

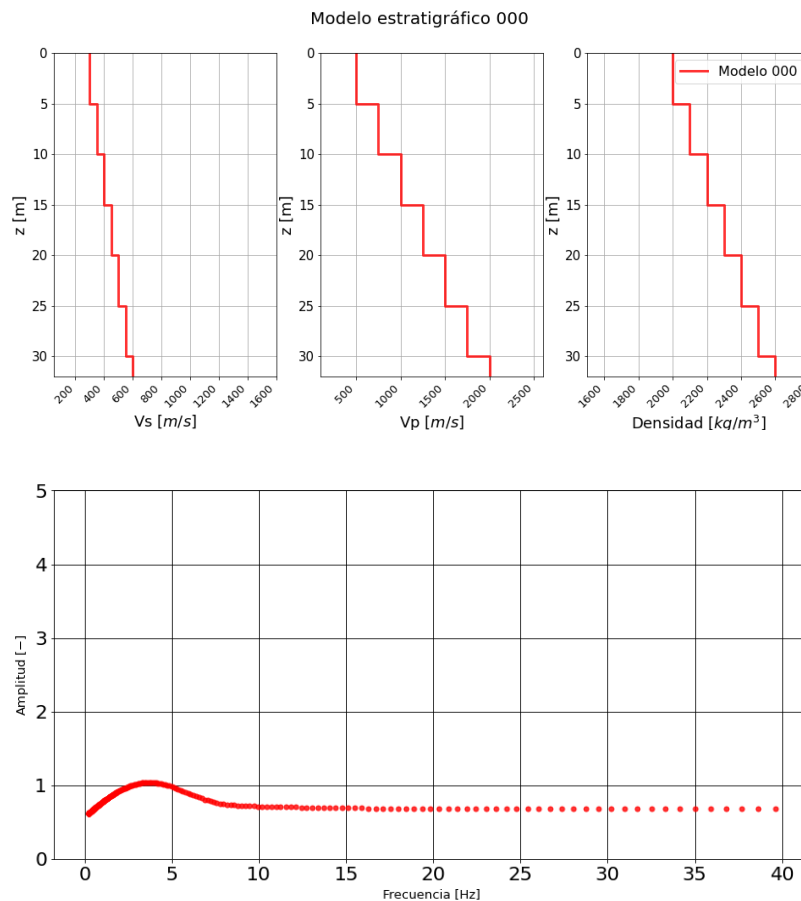


Figura 7.22: Curva elíptica modelo 000.

Fuente: Elaboración propia.

La primera curva elíptica (figura 7.22) proviene del modelo 000, el que es un perfil estratigráfico escalonado, de parámetros crecientes linealmente respecto a la profundidad. Esta curva permite tener una idea general de como se comporta elípticamente un suelo de configuración típica. Se aprecia que la curva tiende a una asíntota horizontal para los valores de frecuencia mayor a 20 Hz, y tiene un máximo global cerca de los 4 Hz.

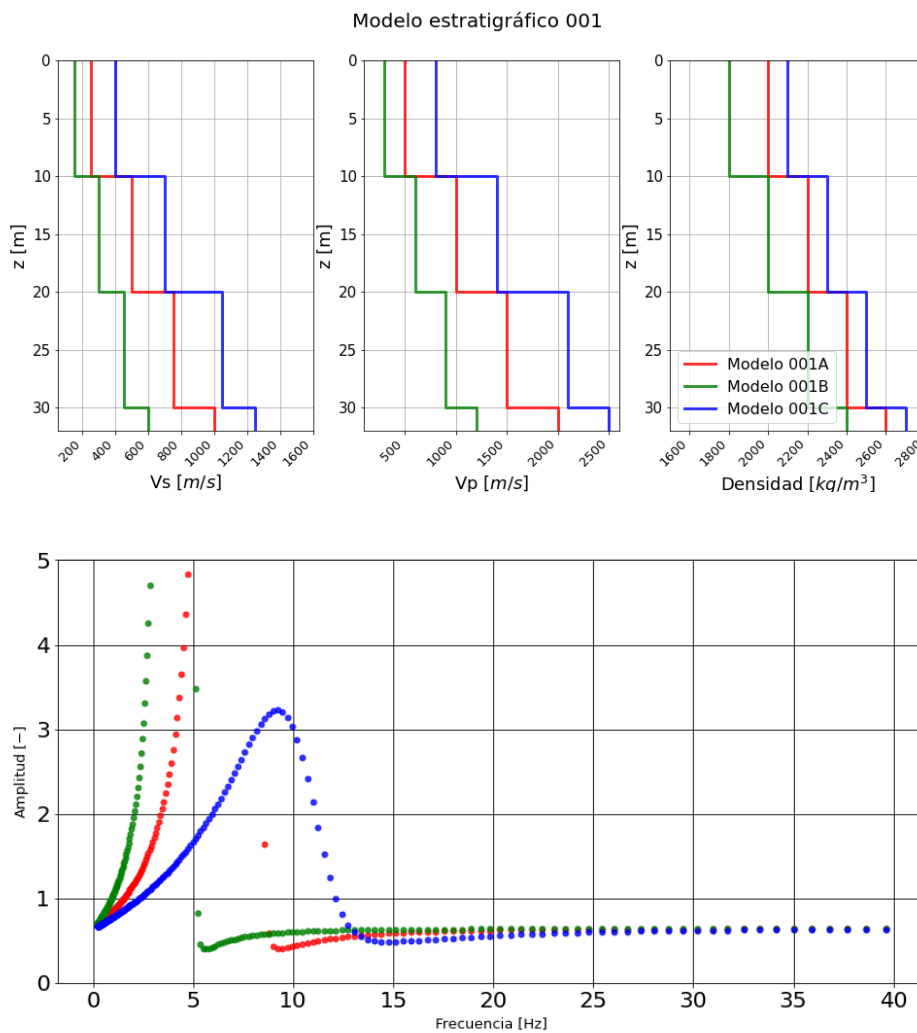


Figura 7.23: Curva elíptica modelo 001.

Fuente: Elaboración propia.

El segundo set de curvas son calculadas a partir del modelo 001 (figura 7.23). Se aprecia que la curva alcanza su máximo valor (valor absoluto) a mayores frecuencias, al aumentar los parámetros del suelo (aumento de la rigidez). Los máximos son únicos y evidentes en cada curva.

Las curvas asociadas al modelo 002 se muestran en la figura 7.24. Se observa tendencia a la asíntota horizontal de todas las curvas para altas frecuencias, pero se alcanza este valor después si la rigidez del suelo es mayor. Los máximos son evidentes como en el caso anterior, y se aprecia que su valor aumenta si es que el suelo aumenta su rigidez.

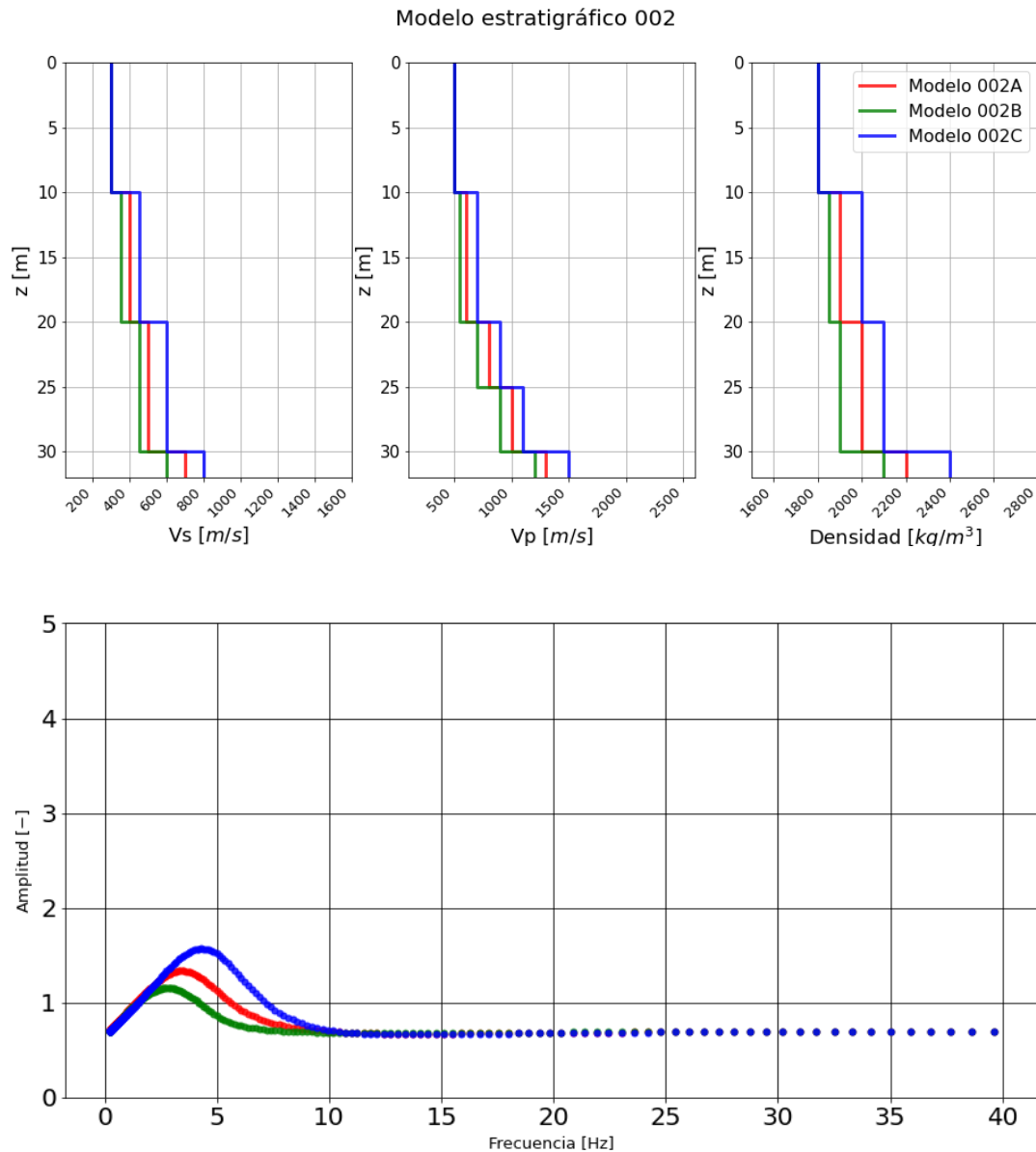


Figura 7.24: Curva elíptica modelo 002.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo 003 arroja las curvas de la figura 7.25. Se aprecia tendencia clara hacia la constante

para frecuencias mayores a 15 Hz. Se denota como los peaks se alejan del origen y aumentan su valor, si es que el estrato duro se profundiza.

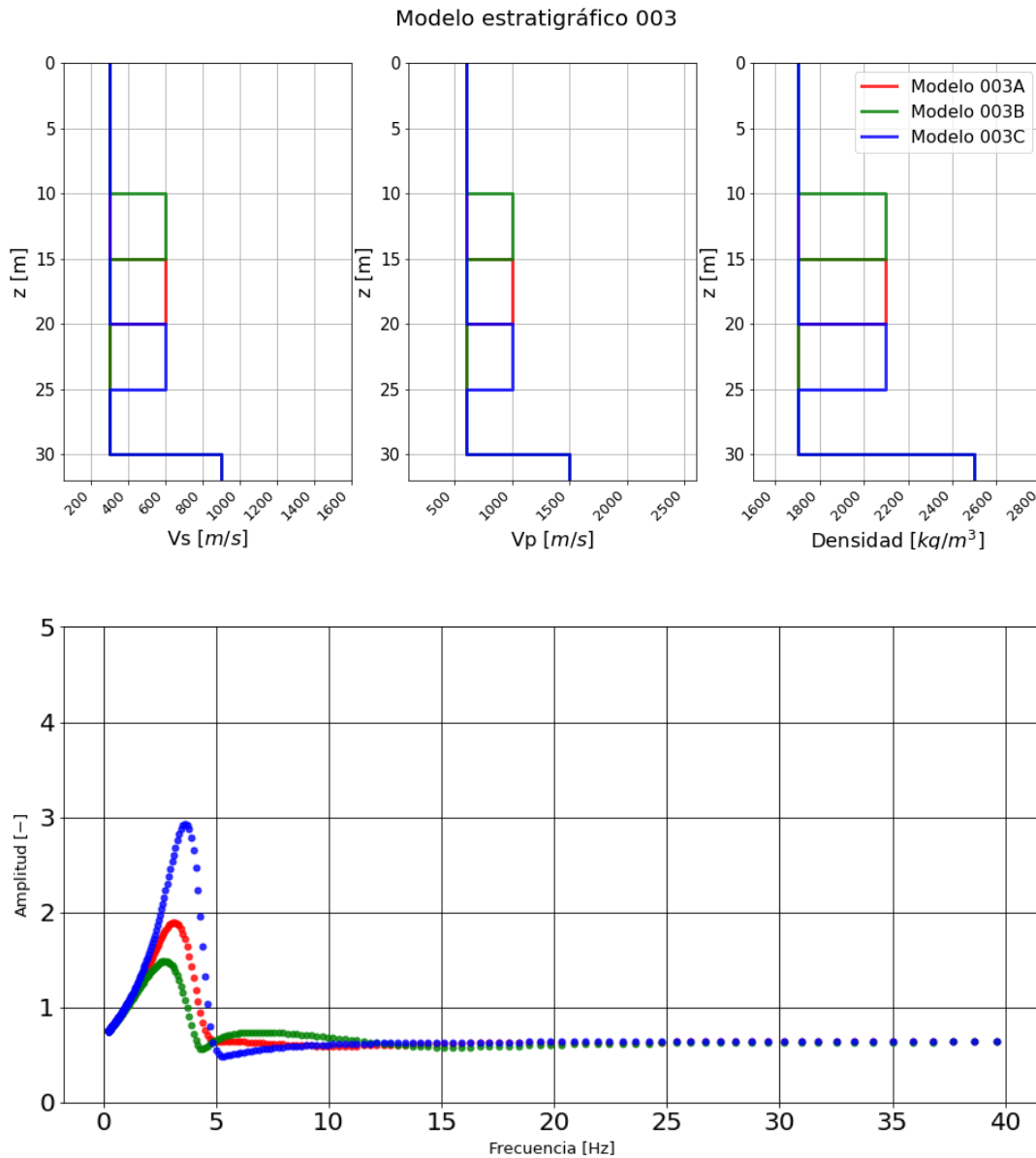


Figura 7.25: Curva elíptica modelo 003.

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura (7.26) presenta las curvas asociadas al modelo 004. Todas las curvas tienden a la constancia a altas frecuencias, y los peaks son menos acentuados. Existen leves cambios en las curvas, alejándose del origen si el perfil débil disminuye su profundidad.

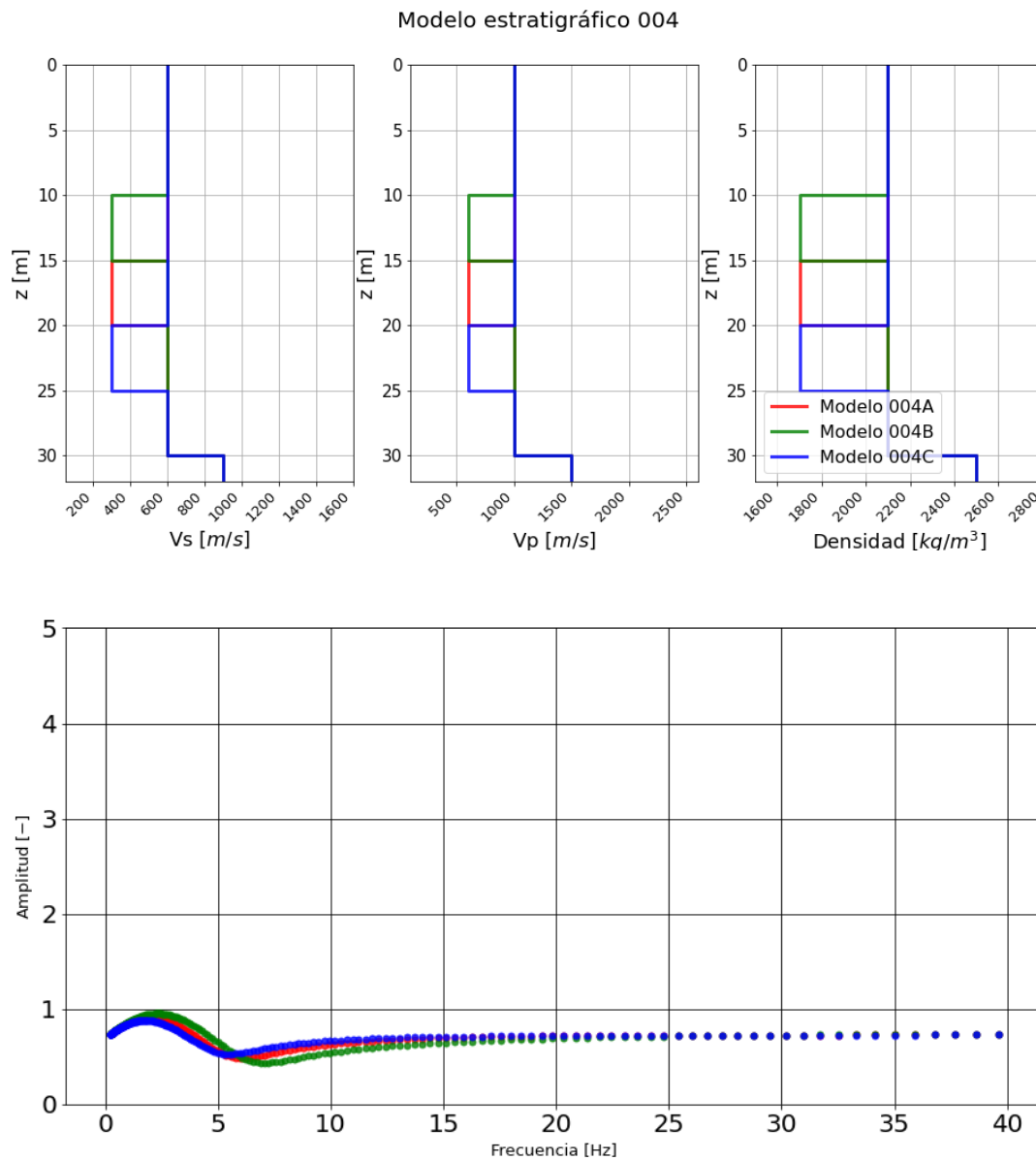


Figura 7.26: Curva elíptica modelo 004.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 7.27 muestra las curvas del modelo 005. El peak es claro cuando el estrato fuerte es de bajo espesor, pero caso contrario, la curva presenta una larga meseta con peak no evidente. El modelo 006 (figura 7.28) si presenta máximos claros en ambos casos, los que se presentan a mayor frecuencia si el espesor del estrato débil es menor.

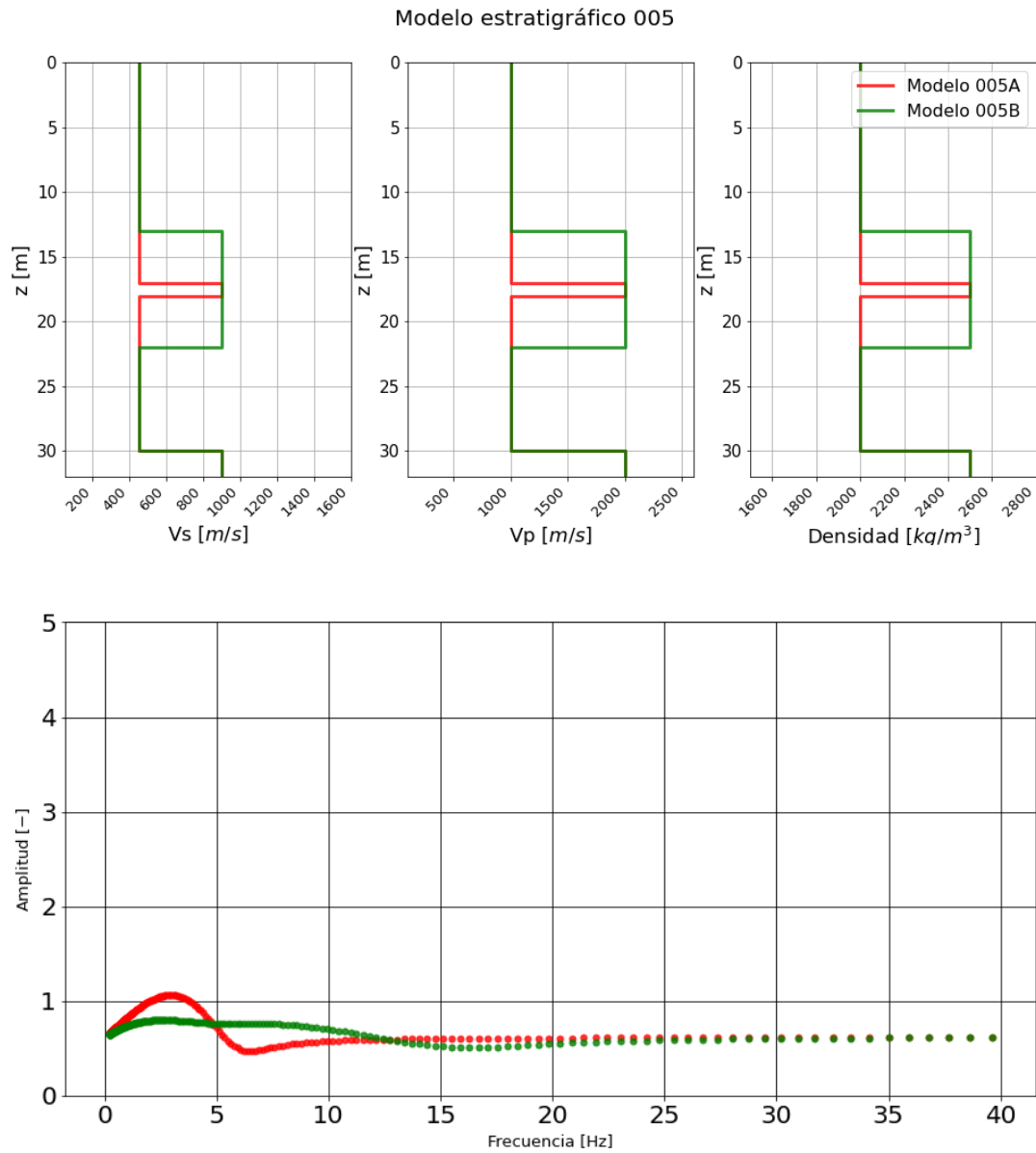


Figura 7.27: Curva elíptica modelo 005.
Fuente: Elaboración propia.

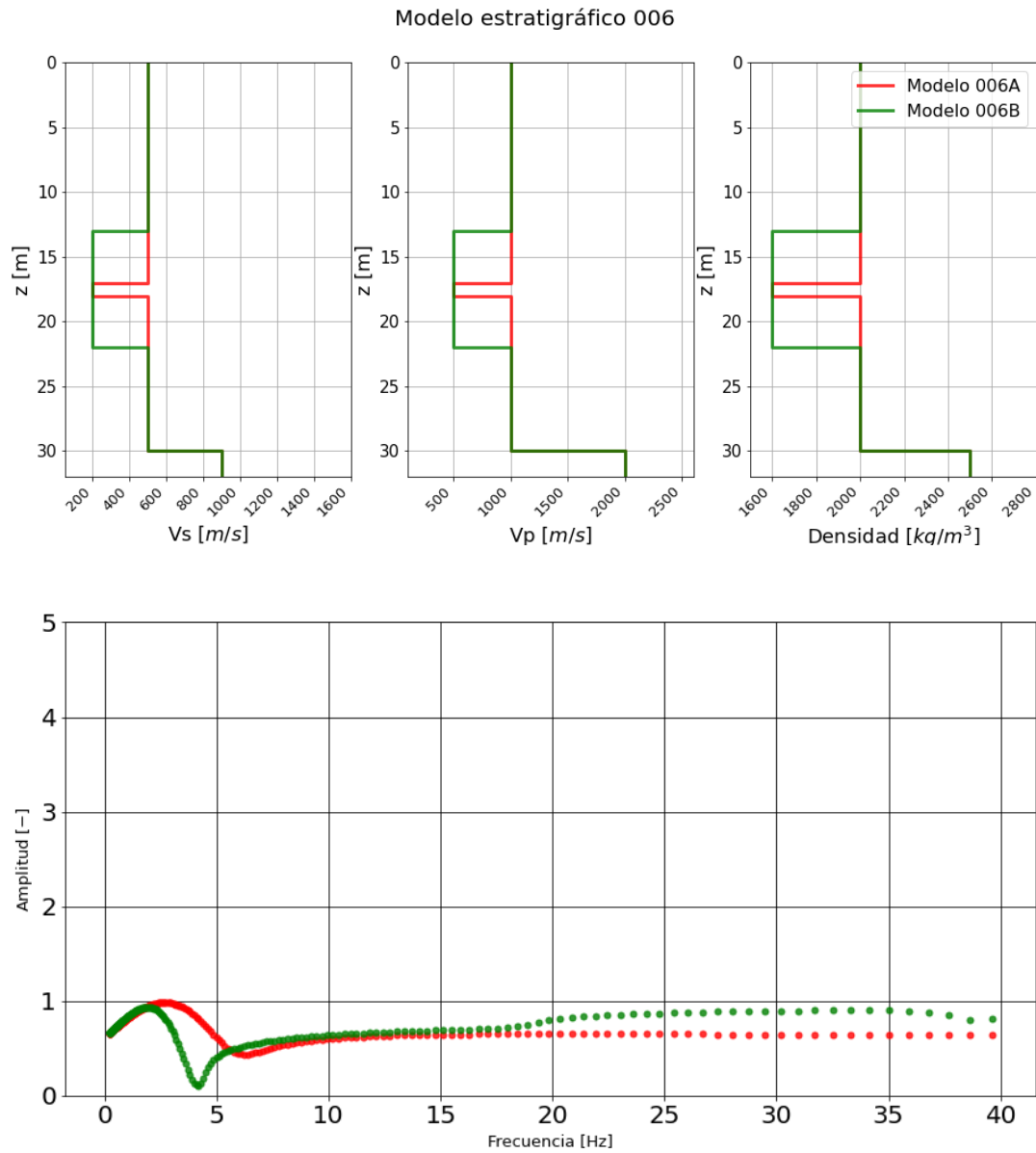


Figura 7.28: Curva elíptica modelo 006.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo 007 y 008 (figura 7.29 y 7.30 respectivamente) permiten decir que ante debilidades relativas entre modelos, el peak aumentan su valor.

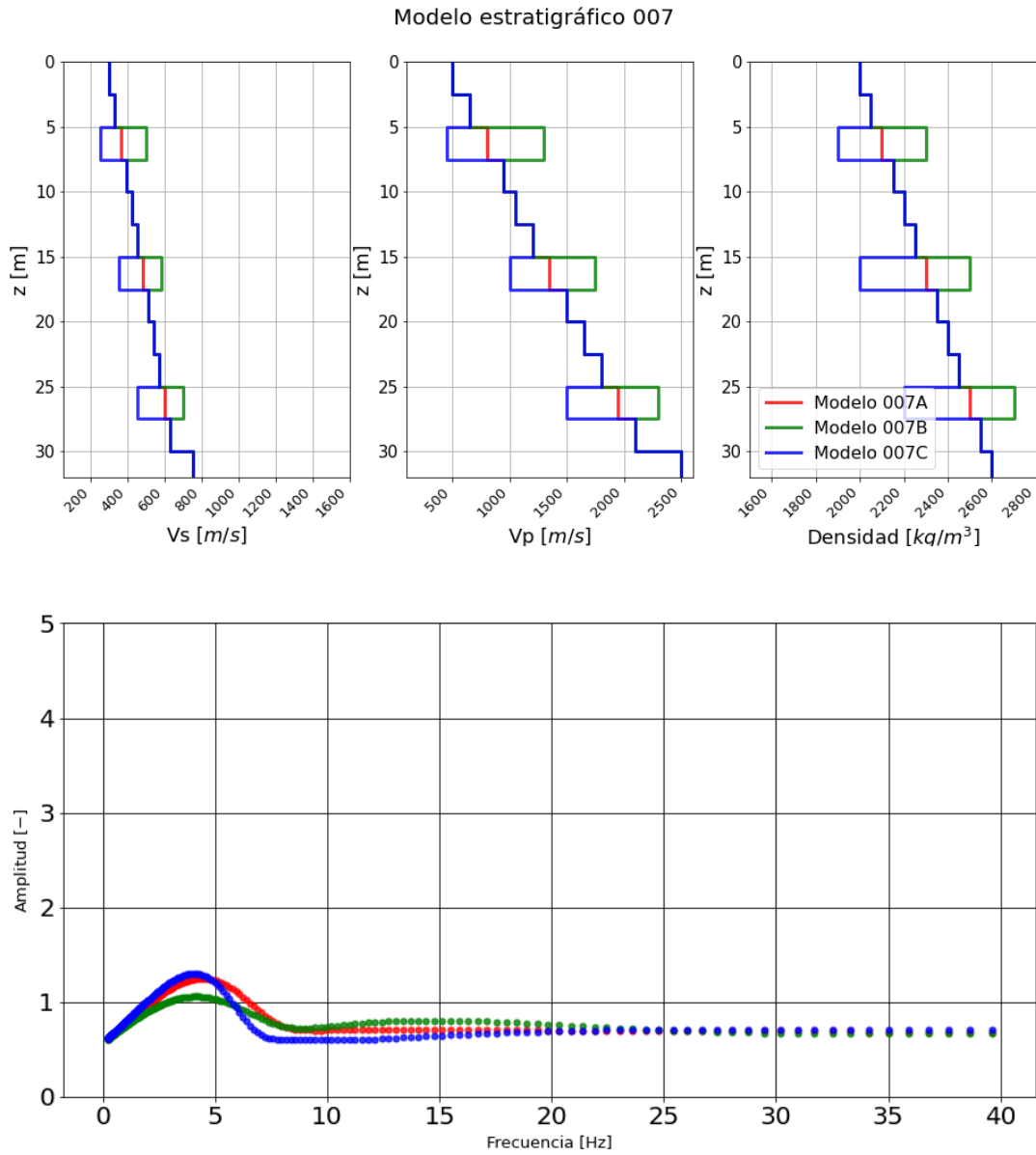


Figura 7.29: Curva elíptica modelo 007.

Fuente: Elaboración propia.

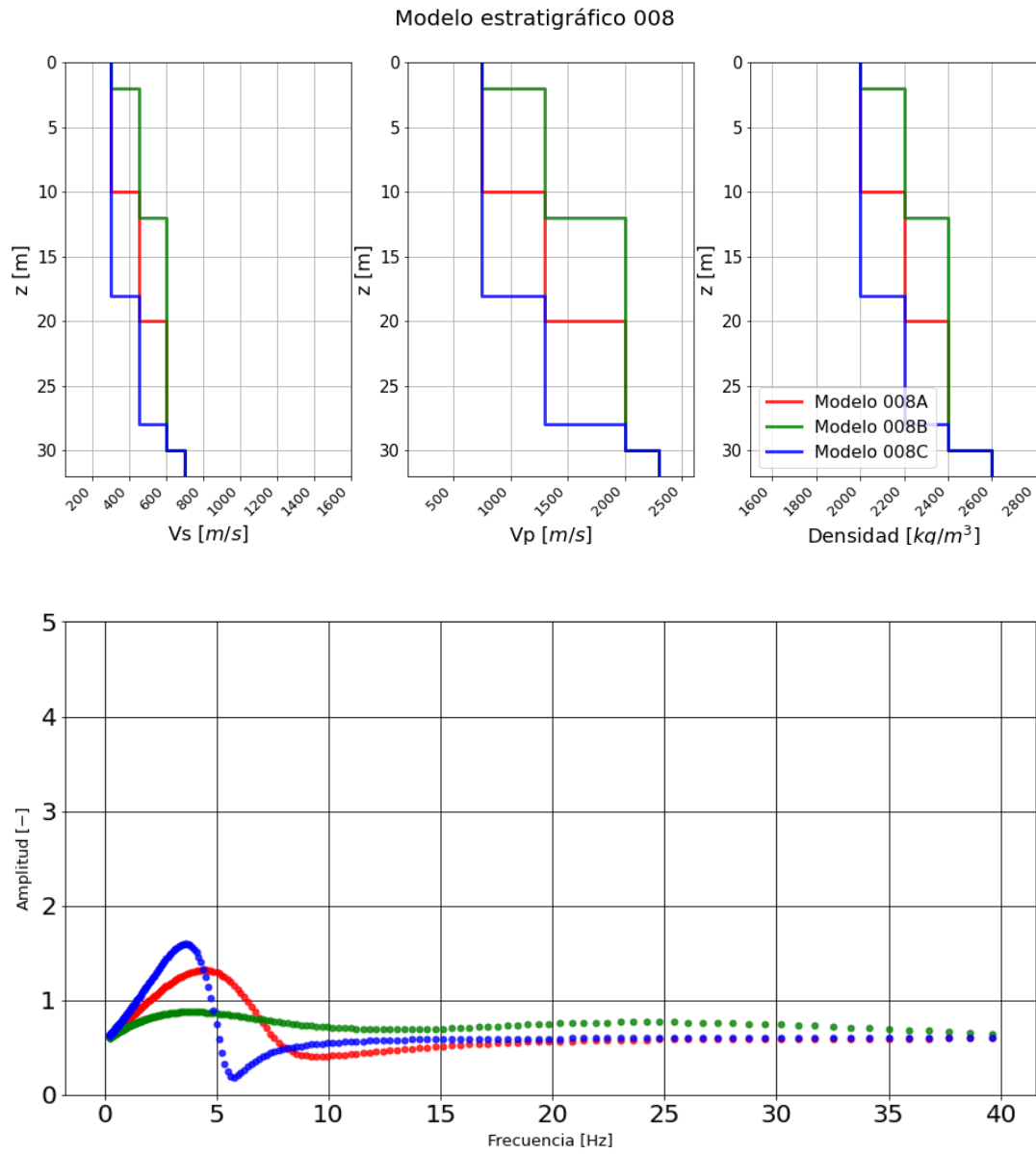


Figura 7.30: Curva elíptica modelo 008.
Fuente: Elaboración propia.

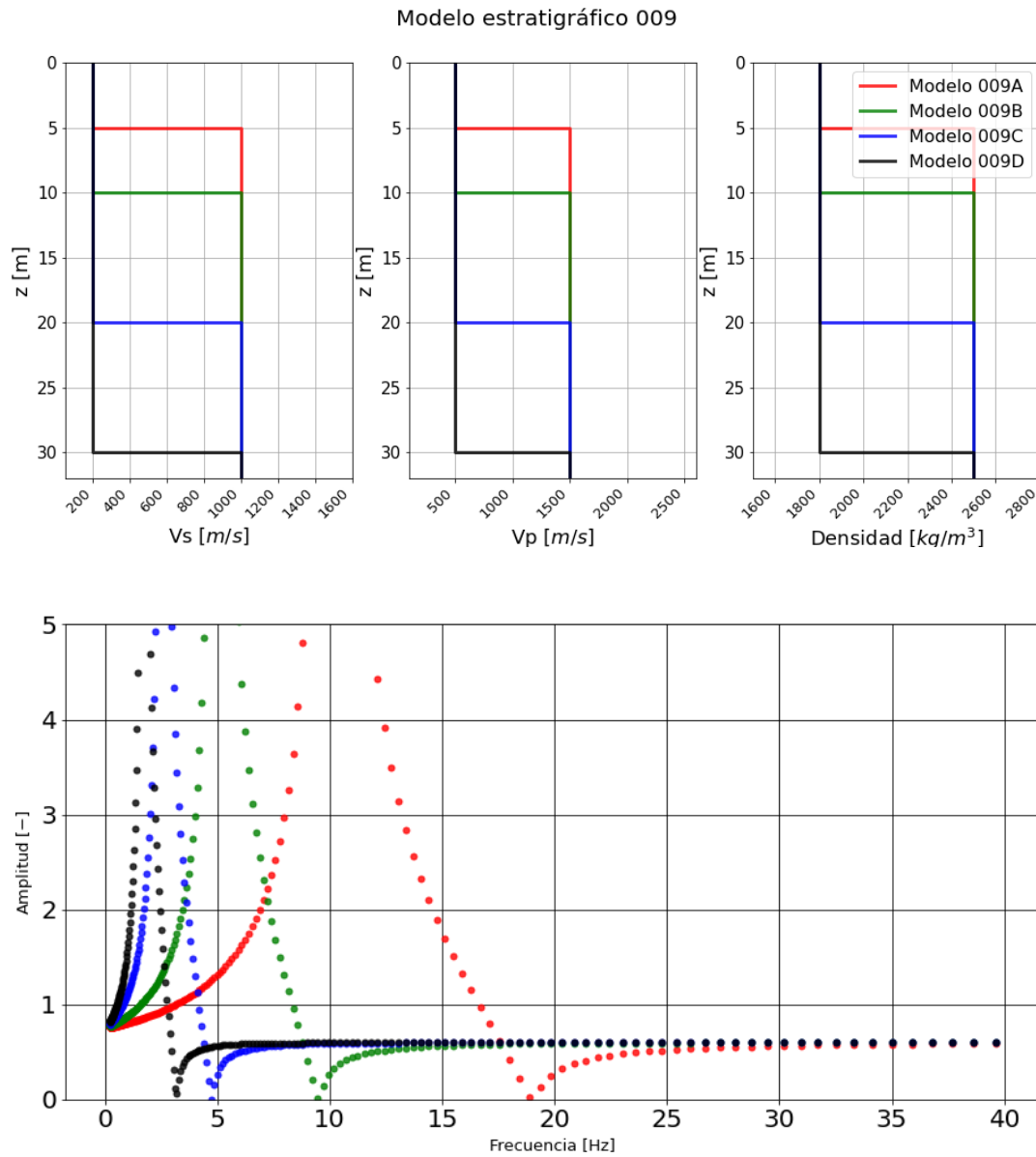
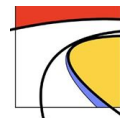


Figura 7.31: Curva elíptica modelo 009.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el modelo 009 (figura 7.31) presenta peaks claros, que se alejan del origen ante al aumento de rigidez del suelo.



8. Casos de estudio

A continuación, se procede a revisar algunos casos de estudios en terreno. Estos casos tienen la particularidad de contar con ensayos ReMi-MASW y de Nakamura ejecutados de forma simultánea, por lo que son de interés para esta informe.

Los estudios de terreno son realizados con los equipos desarrollados por el Área de Geotecnia del Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María y serán descritos en las siguientes secciones, siendo este documento una continuación de la implementación de los equipos y las respectivas memorias asociadas al proceso.

8.1. Caso 1: Limache

El primer caso de estudio consiste de la solicitud realizada por cierta empresa del rubro inmobiliario nacional al Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO) de la Universidad Técnica Federico Santa María, la que requiere la realización de ensayo ReMi-MASW y ensayo de Razón Espectral H/V, con tal de determinar los valores de V_S y Periodo Natural para el suelo en cuestión.

- Ubicación de proyecto: Eastman #22-26, Comuna de Limache, Región de Valparaíso, Chile
- Fecha de ejecución: 30 de julio de 2019
- Ejecutante: LEMCO UTFSM, lemco.laboratorio@usm.cl, Placeres #401, Comuna de Valparaíso, Región de Valparaíso, Chile

8.1.1. Ensayo ReMi-MASW

El ensayo realizado y el proceso posterior de análisis de los datos recogidos, entrega información geofísica que permite definir el valor V_{S30} según lo define la NCh 433 (INN, 2009). Esto ayudará al profesional competente, junto a la información recabada de otros ensayos (como por ejemplo, calicatas o ensayo SPT), clasificar sísmicamente el terreno en estudio según dicta la normativa vigente actual (NCh 433 Mod. 2012).

- Normativa aplicable: NCh 433 Of. 1996 Mod. 2012, ASTM D5777-00(2011)
- Equipo:

Adquisidor y almacenamiento de datos sismográficos potenciado por ordenador Raspberry Pi 3, desarrollado por Geotecnia UTFSM (Cárdenas, 2019)

2 carretes de extensión *trigger* de 200 metros

Jumper para batería DC

Plancha de acero de 20x20 cm

GPS

2 cables *spreader* con 12 muelles y conectores clips, con terminales de 50 pines

24 geófonos verticales de 4.5 Hz, desarrollados por Geotecnia UTFSM.

El ensayo ReMi-MASW consta de dos tendidos lineales de 24 geófonos cada uno, los que se ubican casi ortogonalmente, y en las coordenadas geográficas que se muestran en la figura 8.1 y tabla 8.1. El tendido 1 tiene un largo de 80.5 metros (geófonos separados cada 3.5 metros), mientras que el tendido 2 mide 92 metros (geófonos separados cada 4 metros). Mediante el sismógrafo se realizan varias mediciones del ruido ambiental (método ReMi), mientras que para el método MASW se hacen mediciones del ruido en el suelo producido por el golpe con un mazo contra una placa de acero.



Figura 8.1: Ubicación de los perfiles sísmicos de tendidos 1 y 2.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.1: Coordenadas de los perfiles sísmicos de tendidos 1 y 2.

	Tendido 1: Inicio	Tendido 1: Final	Tendido 2: Inicio	Tendido 2: Final
Latitud	-32.9894619°	-32.9900848°	-32.9897586°	-32.9893807°
Longitud	-71.2585614°	-71.2590579°	-71.2586207°	-71.259464°

Los geófonos desarrollados corresponden a elementos electromagnéticos, es decir, que el transductor corresponde a una bobina suspendida que al alterarse su equilibrio, genera un diferencia de potencial eléctrico proporcional al fenómeno perturbador, al moverse por el campo magnético generado por un imán. En este caso, los geófonos desarrollados tienen una frecuencia natural de 4.5 Hz, y su sensibilidad puede verse en la figura 8.2

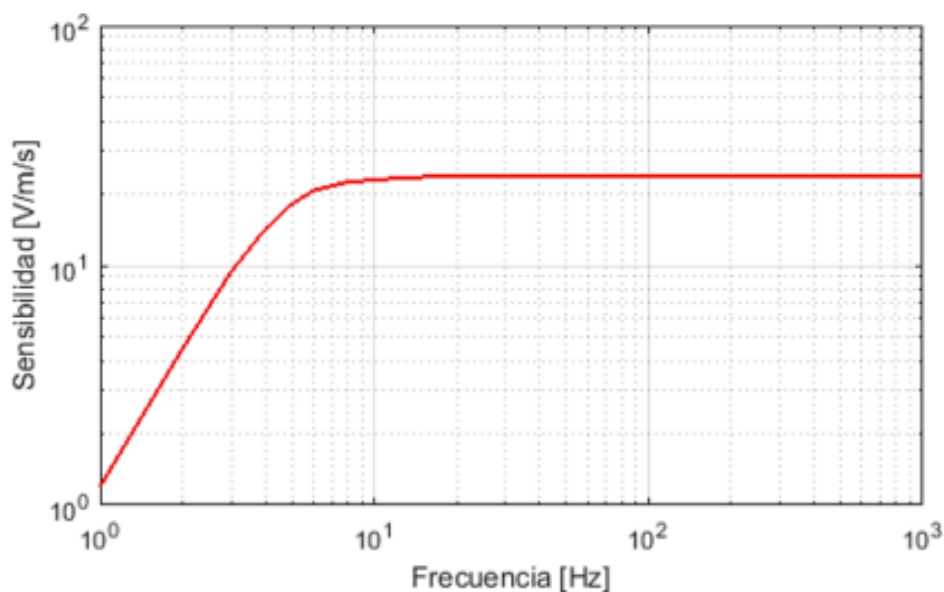


Figura 8.2: Sensibilidad de geófono utilizado.

Fuente: Adaptado de las especificaciones técnicas provistas por el fabricante R. T. Clark Geophysical Equipment (www.rtclark.com).

La señal es transducida por un convertidor análogo digital (ADC), para luego ser almacenada y enviada al sismógrafo por un ordenador Raspberry Pi Zero. Este ordenador es de pequeñas dimensiones y permite la transferencia de datos de manera remota y local. Por otro lado, un ordenador central tipo Raspberry Pi 3 se encarga de controlar cada geófono (mediante los ordenadores Pi Zero), y de recibir las señales de cada transductor.

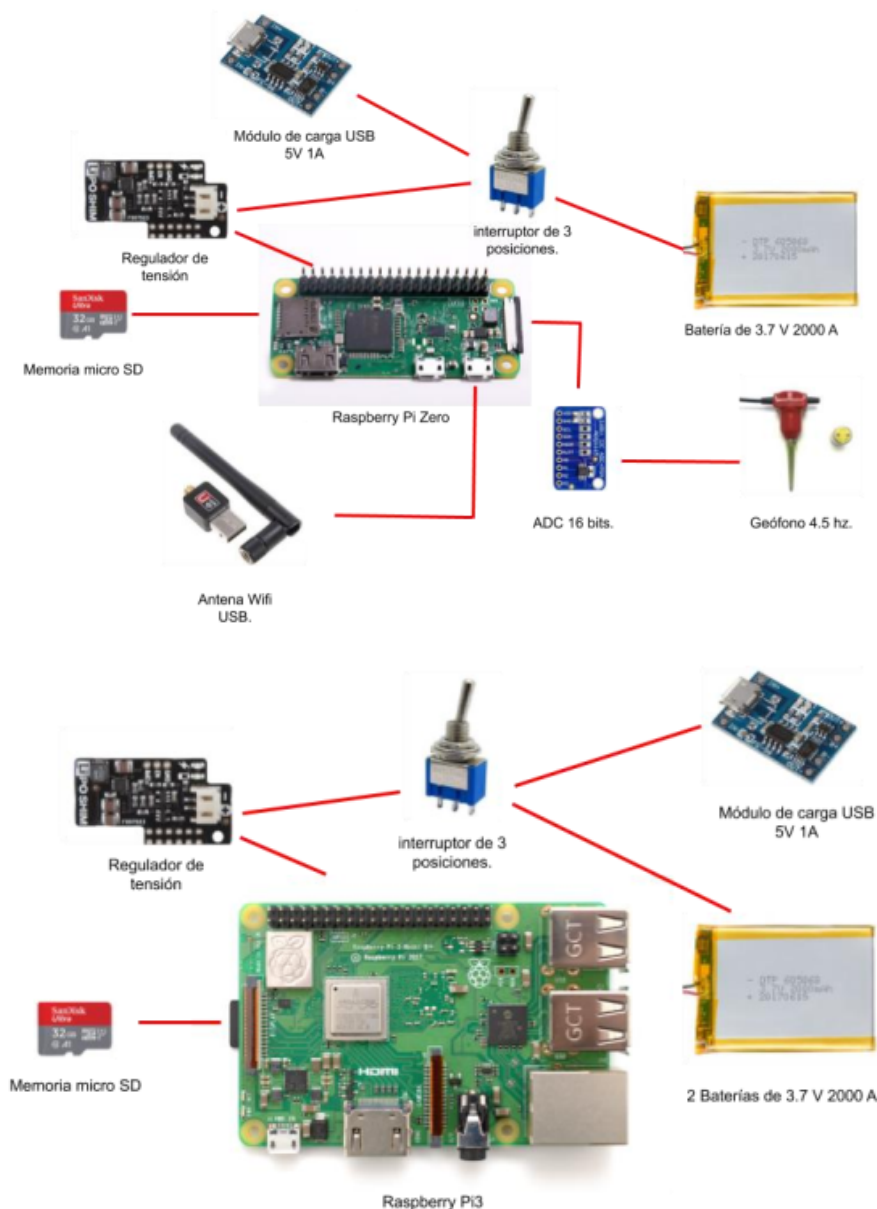


Figura 8.3: Equipos de medición ReMi-MASW desarrollados por Geotecnia UTFSM.
Fuente: Adaptado de Cárdenas (2019).

8.1.2. Curva dispersiva e inversión de datos

Obtención de curva dispersiva

Los datos registrados en terreno son procesados con el paquete principal homónimo del entorno GEOPSY. Las señales generalmente deben ser transformadas desde archivos binarios a

archivos de texto ASCII antes de ser procesadas, pero el sistema usado entrega inmediatamente los datos en archivos de texto los que son cargados en la interfaz gráfica de **GEOPSY**, como se aprecia en la figura 8.4.

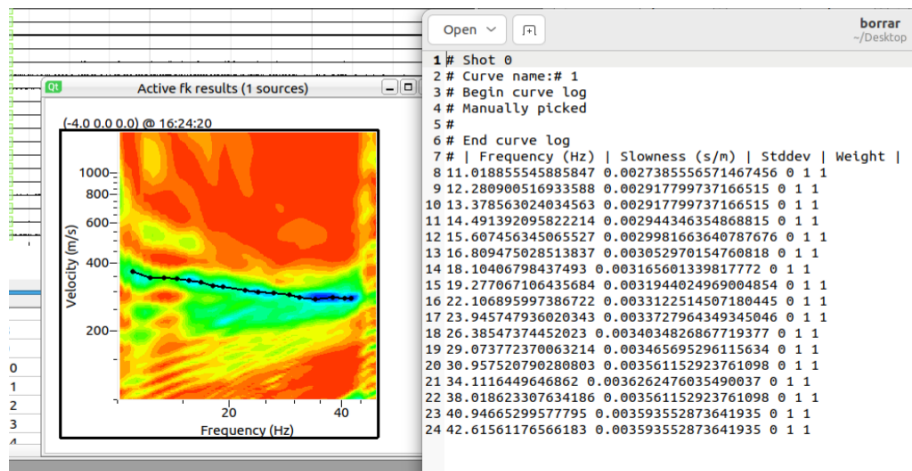
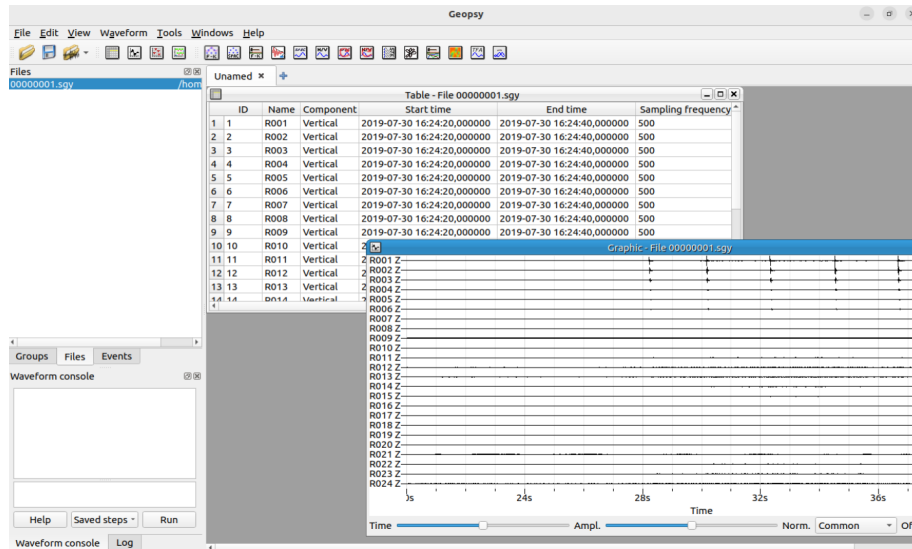


Figura 8.4: Interfaz de GEOPSY para procesamiento de señales.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez establecida la geometría del arreglo de geófonos en el software, se comienza el análisis de los datos. Para tales efectos, se debe establecer la ventana temporal dentro del registro para poder generar la curva dispersiva, además de otros parámetros como intervalo de frecuencias a analizar, rango posible para velocidades de fase, propiedades del gráfico como tipo de normalización y rango de ejes.

El gráfico entregado por el software permite escoger la curva de máxima amplitud espectral de manera automática (auto-picking) o de forma manual (manual-picking), la que posteriormente es almacenada como un archivo ASCII con los pares de datos de velocidad de onda y frecuencia (imagen inferior de la figura 8.4). Este proceso se realiza para cada registro obtenido en terreno, tanto como para el Método ReMi como para MASW (señales pasivas y activas respectivamente).

Inversión de curva dispersiva

El proceso de inversión de la curva dispersiva obtenida se realiza con el paquete DINVER de GEOPSY. El primer paso es establecer un set de parámetros que define las condiciones del suelo a obtener de la inversión, mediante la interfaz gráfica del paquete de análisis (figura 8.5). Se deben establecer los rangos de valores para que el software realice el ajuste necesario, siendo los parámetros: V_P , V_S , modulo de Poisson (ν), altura de cada capa de suelo y su densidad, existiendo opciones para establecer relaciones entre los parámetros y su comportamiento.

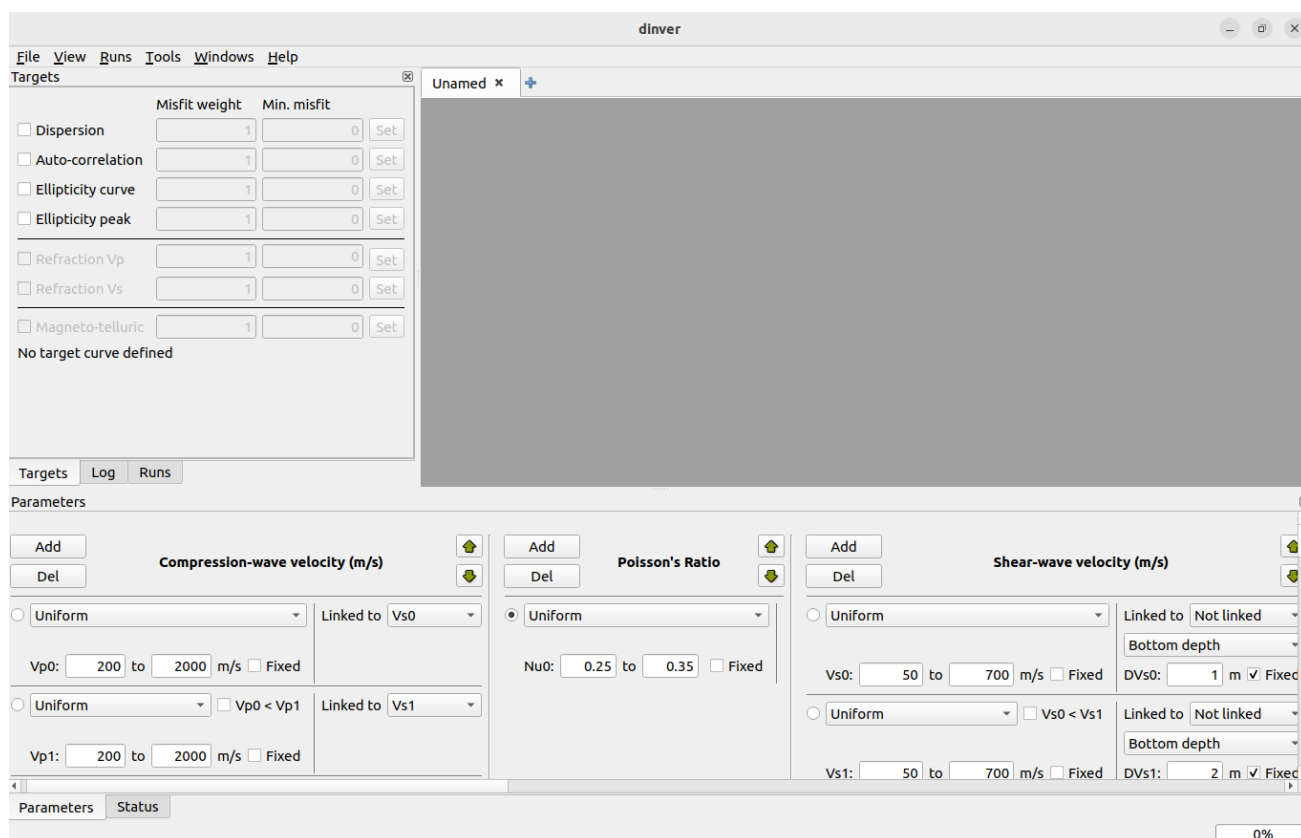


Figura 8.5: Interfaz gráfica de DINVER para definir parámetros de suelo.

Fuente: Elaboración propia.

Para este estudio, se usarán dos sets de parámetros: uno establece que cada parámetro

aumenta con la profundidad (se llamará a este set *parámetros crecientes*) y el otro otorga libertad a los valores (*parámetros libres*) para que cambien indistintamente de las capas adyacentes. Los rangos de parámetros son comunes en ambos casos y se presentan en la tabla 8.2.

Tabla 8.2: Set de parámetros de suelo a obtener.

	h [m]	V_S [m/s]	V_P [m/s]	ρ [kg/m ³]
Capa 0	1	50 - 700	200 - 2000	1000 - 2000
Capa 1	1	50 - 700	200 - 2000	1500 - 2100
Capa 2	2	200 - 1000	200 - 5000	1800 - 2100
Capa 3	2	200 - 1000	200 - 5000	1800 - 2100
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Capa 8	2	200 - 1000	200 - 5000	1800 - 2100
Capa 9	2	200 - 1000	200 - 5000	1800 - 2200
Capa 10	2	200 - 1000	200 - 5000	1800 - 2200
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Capa 14	2	200 - 1000	200 - 5000	1800 - 2200
Capa 15	∞	1000 - 2500	200 - 5000	2000 - 2600

$\nu \in [0.25, 0.35]$

En el caso del set de datos creciente, los valores de velocidad de onda P y densidad de cada capa deben ser mayores que los valores de la capa inmediatamente superior.

$$V_{S n} < V_{S n+1}, \quad \rho_n < \rho_{n+1}$$

Dados los dos sets de parámetros, se puede observar la forma de la curva dispersiva obtenida y compararla con los datos obtenidos en la sección de Análisis de Sensibilidad, lo que puede permitir inferir la distribución de variables del suelo analizado a ajustar, y seleccionar el set de parámetros acorde.

Por ejemplo, en la figura 8.6 asociada al tendido 1 (T1) del Caso de Estudio 1, se aprecia una curva similar a la curvas asociadas a modelos con parámetros crecientes en profundidad. Por lo tanto, es intuitivo usar el set de parámetros crecientes en la inversión.

Con tal de comprobar lo anterior, se invierten las curvas de los Tendidos 1 y 2 del Caso 1, y los resultados se muestran en las figuras 8.7 y 8.8. Se aprecia como para el modelo estratigráfico invertido con el set de parámetros crecientes, los valores de desajuste son menores que para el

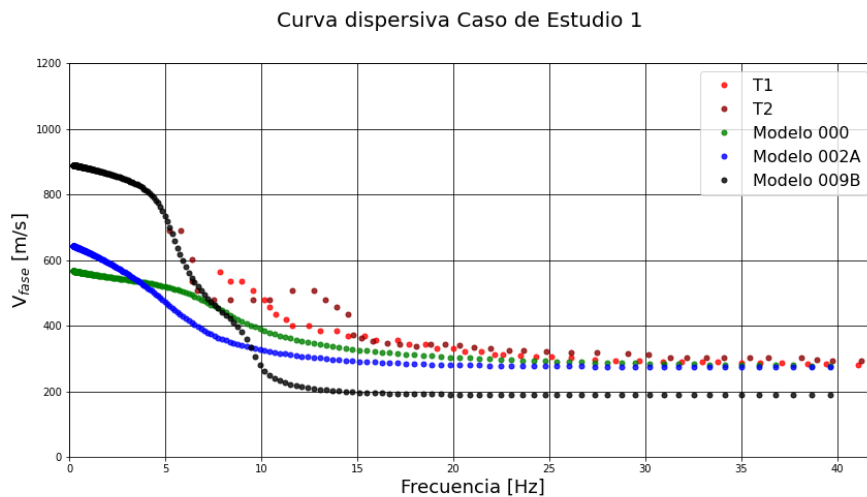


Figura 8.6: Curva dispersiva para ambos tendidos del primer caso de estudio, y comparación con modelos previamente analizados.

Fuente: Elaboración propia.

mismo modelo invertido con el set de parámetros libres. Además, las curvas de velocidad de onda S son mucho más estables y aumentan gradualmente con la profundidad, donde las curvas de V_S para el modelo de parámetros libres es relativamente más errática.

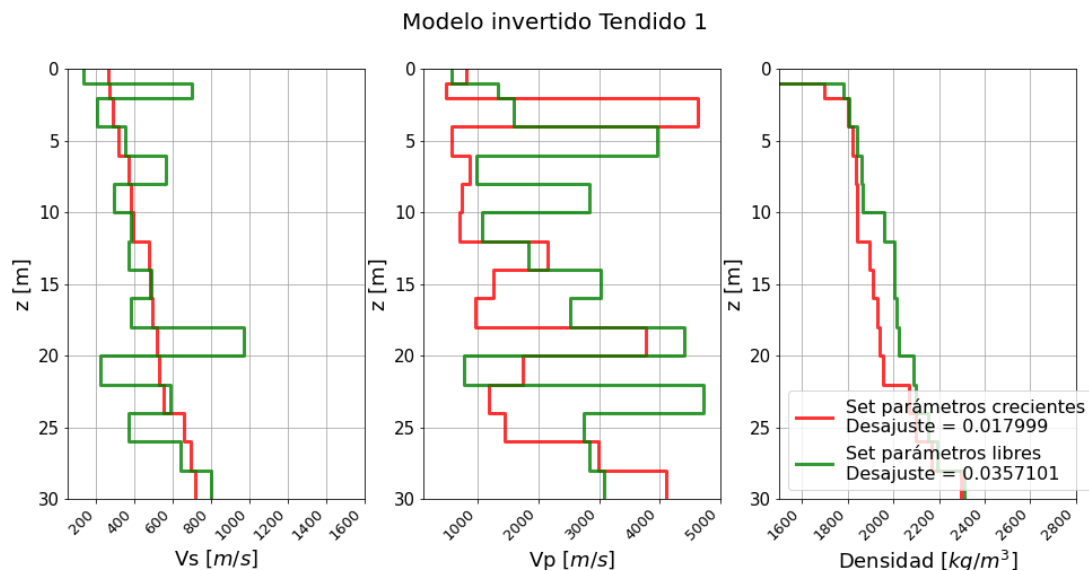


Figura 8.7: Modelos invertidos a partir de la curva dispersiva registrada en el tendido 1.

Fuente: Elaboración propia.

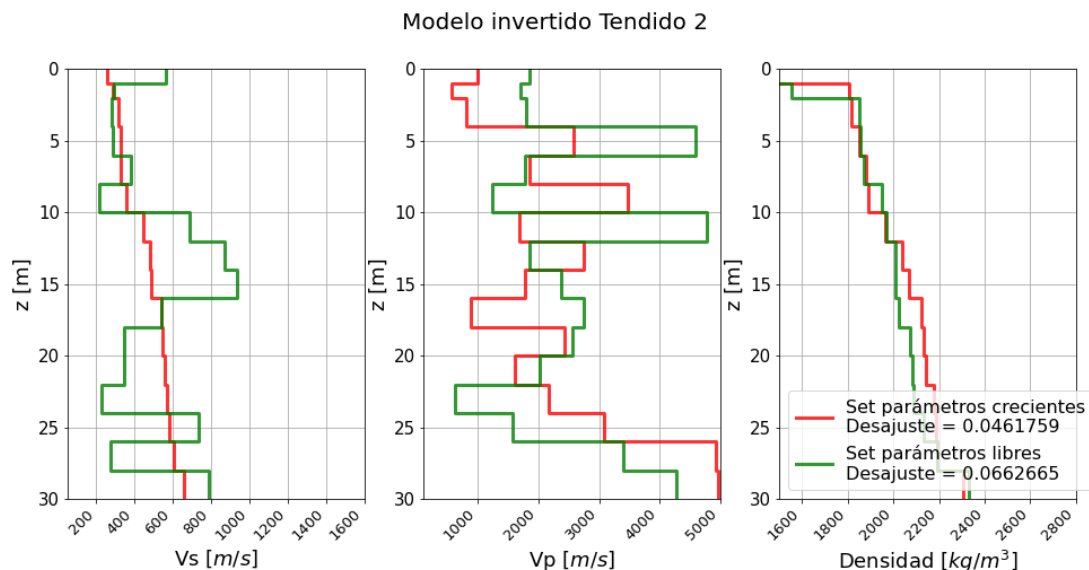


Figura 8.8: Modelos invertidos a partir de la curva dispersiva registrada en el tendido 2.

Fuente: Elaboración propia.

8.1.3. Ensayo HVSR

El ensayo realizado y el proceso posterior de análisis de los datos recogidos en terreno, permite definir el periodo predominante del suelo mediante la razón espectral H/V. Este valor ayudará al profesional competente, diseñar la obra civil de tal forma que su periodo principal de vibración no coincida con el periodo natural del suelo y así evitar resonancia estructural.

- Normativa aplicable: No existe normativa local aplicable, pero se usa el manual SESAME (2004) que establece criterios para el ensayo en terreno y validación de los resultados

- Equipo

Adquisidor y almacenamiento de datos sismográficos potenciado por ordenador Raspberry Pi 3, desarrollado por Geotecnia UTFSM (Álvarez, 2020)

Geófono triaxial de 4.5 Hz cada uno, desarrollados por Geotecnia UTFSM (Álvarez (2020)).

El ensayo HVSR consta de 3 sitios de medición en el mismo sitio donde se desarrolla el ensayo ReMi-MASW, en las coordenadas que se muestran en la figura 8.9 y tabla 8.3. En cada ubicación se realizan varias mediciones con tal de que al filtrar las señales, quede una cantidad aceptable de datos.



Figura 8.9: Ubicación de los lugares registrados con ensayo de Nakamura.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.3: Coordenadas de los perfiles sísmicos de tendidos 1 y 2.

	NK1	NK2	NK3
Latitud	-32.9896478°	-32.9897426°	-32.9899583°
Longitud	-71.2585252°	-71.2588786°	-71.2587542°

Los tres geófonos dispuestos perpendicularmente entre si, tienen una frecuencia natural de 4.5 Hz y son del tipo electromagnéticos. Las señales transducidas por el ADC (resolución de 16 bits y muestro de hasta 860 Hz) incorporado al sistema desarrollado (ver figura 8.10), son recogidas por un ordenador Raspberry Pi 3 que puede ser controlado mediante sistema red inalámbrica.

8.1.4. Curva elíptica e inversión de datos

Obtención de curva elíptica

Los registros deben someterse a ciertas directrices con tal de minimizar la cantidad de ruido transitorio, como por ejemplo aquel de origen antropogénico como vehículos transitando o industrias funcionando.

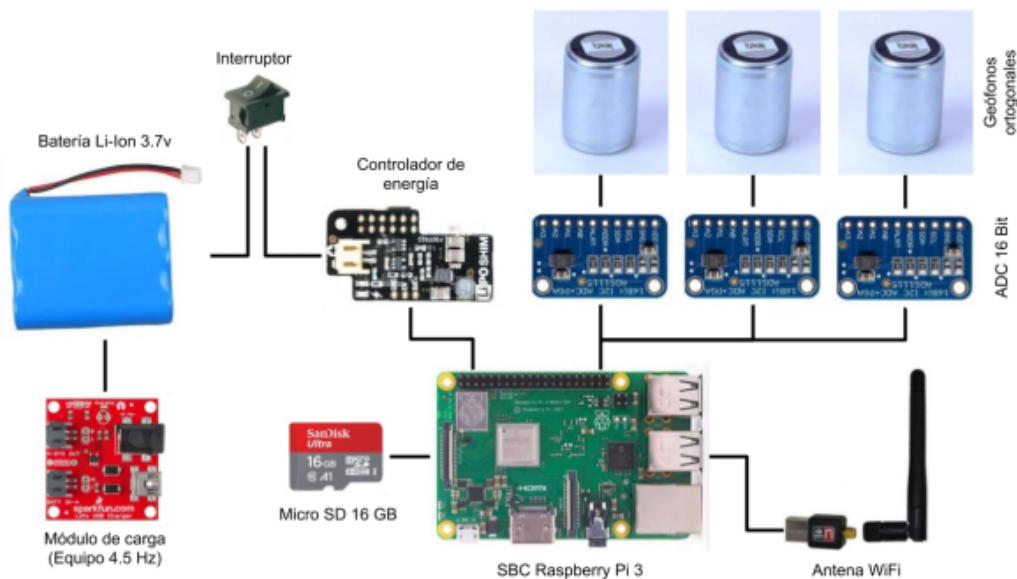


Figura 8.10: Disposición general de los componentes del geófono triaxial desarrollado por Geotecnia UTFSM.

Fuente: Álvarez (2020).

Se recomienda que los registros tengan una duración mínima con tal de que al seleccionar las ventanas de tiempo dentro de ellos, estos espacios temporales contengan una cantidad de información aceptable. SESAME (2004) recomienda los valores de la tabla 8.4.

Tabla 8.4: Duración recomendada de registros.

Fuente: Álvarez (2020).

f_0 [Hz]	Largo mínimo de ventana [s]	Duración mínima de señal útil [s]	Duración mínima recomendada de registro [min]
0.2	50	1000	30
0.5	20	400	20
1	10	200	10
2	5	100	5
5	5	40	3
10	5	20	2

Posteriormente, y en la interfaz gráfica del paquete homónimo del entorno GEOPSY, se procede a aplicar los filtros necesarios para evitar ruido transitorio (algoritmo *Anti-trigger*). El

método se denomina STA/LTA por su denominación en inglés Short Time Average over Long Time Average, y consiste en comparar el promedio de amplitud de cortos periodos de tiempos con amplitudes promedio de largos periodos de tiempo, lo que permite comparar señales constantes de aquellas momentáneas. El manual de SESAME entrega distintas recomendaciones, con las que el grupo de Geotécnica UTFSM ha podido definir los siguientes valores como aquellos que dan resultados aceptables.

- STA = 1 segundo
- LTA = 30 segundos
- Umbral mínimo STA/LTA = 0.2
- Umbral máximo STA/LTA = 2

Posteriormente, a las amplitudes espectrales se les debe aplicar un suavizado con tal de evitar efectos que degraden los resultados al aplicar la Transformada de Fourier. El método recomendado es el de Konno y Ohmachi (1998), ya que utiliza un ancho de banda constante independiente del valor de frecuencia y su potencia se regula mediante el parámetro b , el que se define como 40 % generalmente (el efecto de distintos valores de b se aprecia en la figura 8.11).

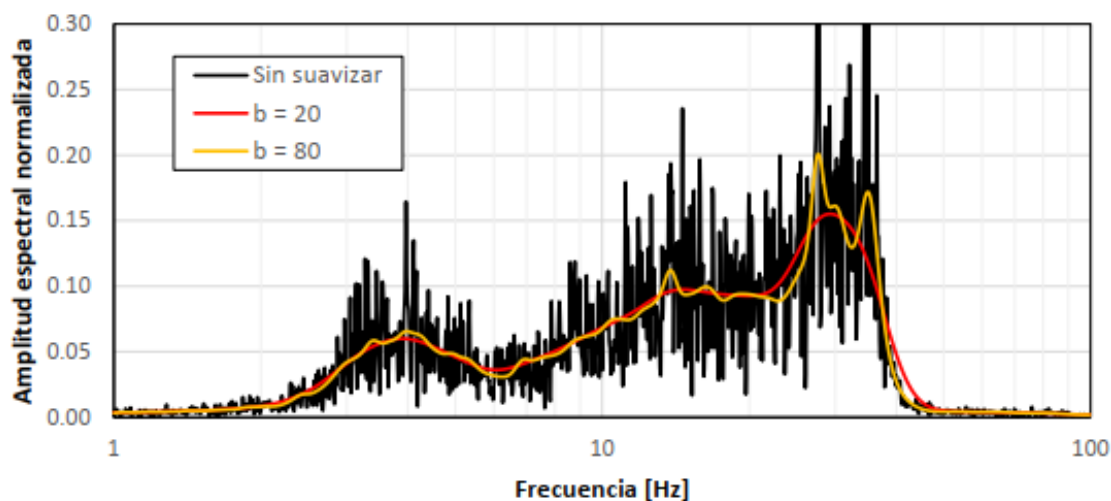


Figura 8.11: Comparación entre espectro de frecuencia bruto y suavizado con distintas potencias.
Fuente: Álvarez (2020).

Una vez aplicados estos filtros y criterios, se procede a promediar cuadráticamente las componentes horizontales y se obtiene la razón espectral H/V para cada medición, como se aprecia en la figura 8.12.

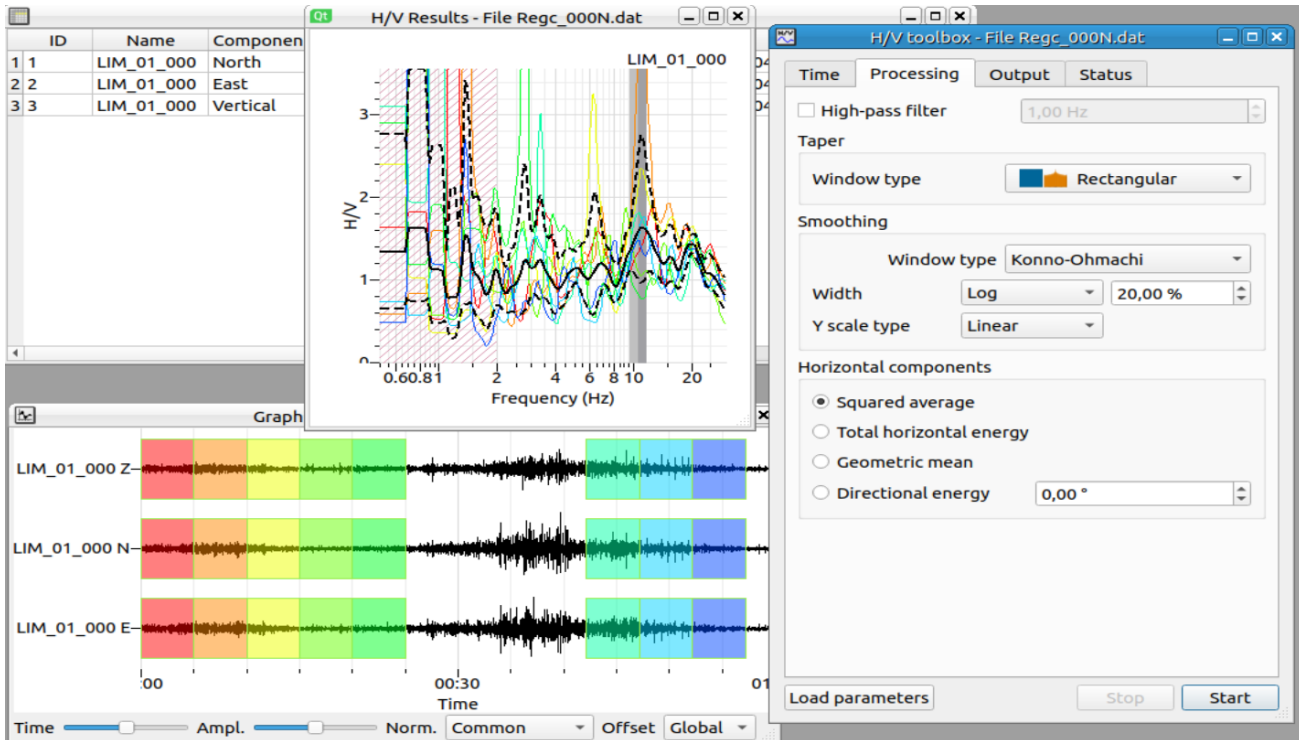


Figura 8.12: Obtención de razón H/V mediante GEOPSY.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de curva elíptica

Procesados los registros de los tres sitios de medición del Caso de Estudio 1, se muestran los resultados en la figura 8.13.

Se denota que las tres curvas son similares pero cambian su amplitud, lo que en base al Análisis de Sensibilidad realizado, permite decir que la razón probable es el cambio de profundidad de una capa débil en el terreno. En los tres casos, el peak se alcanza a frecuencias similares, entre 2.9 y 3.3 Hz.

Las curvas de los modelos presentados muestran comportamientos similares a los datos de terreno (estratigrafía de capas más rígidas conforme aumenta la profundidad), presentando un peak máximo de amplitud espectral claro para, posteriormente, disminuir hacia una asíntota horizontal sin presentar puntos relevantes bajo el valor asíntótico.

Nótese, que pese a que existan peaks evidentes en las curvas, los resultados deben ser sometidos a una batería de criterios con tal de definir la validez del peak. Este análisis es definido por SESAME (2004) y es llevado a cabo por Geotecnia UTFSM en cada ensayo de terreno ejecutado, pero queda fuera de este informe por escapar a su objetivo.

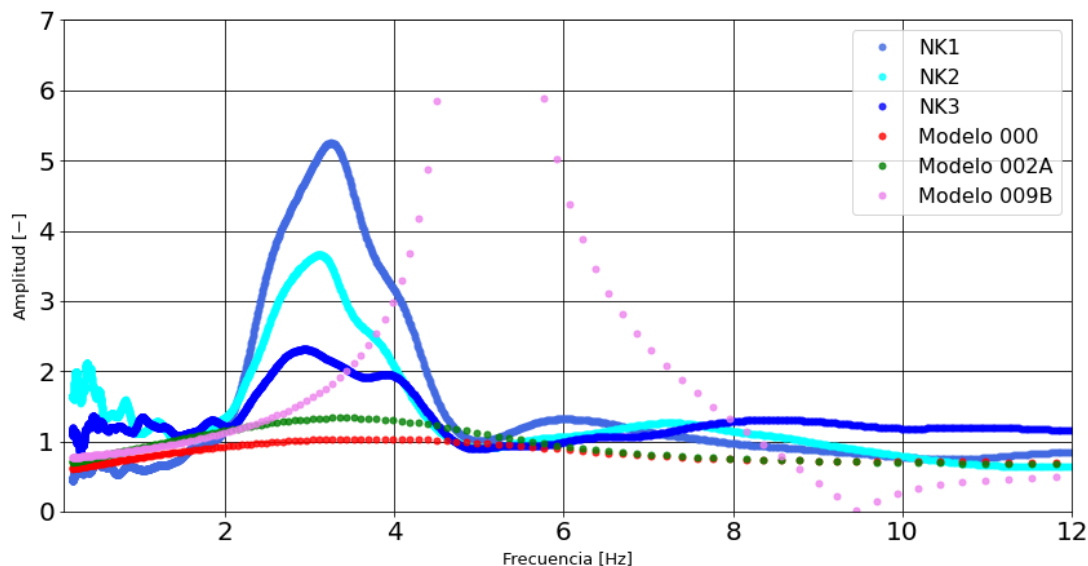


Figura 8.13: Curva elíptica de las tres mediciones HVSR del Caso de Estudio 1, y comparación con otros casos analizados previamente.

Fuente: Elaboración propia.

8.1.5. Inversión conjunta

Obtenido el perfil estratigráfico del caso de estudio en base a mediciones ReMi-MASW, y definido su periodo fundamental mediante el método de Nakamura, es que se procede a analizar conjuntamente los datos. En la siguiente figura se muestra la ubicación simultánea de las mediciones de terreno.



Figura 8.14: Ubicación de mediciones ReMi-MASW y HVSR.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis consiste en la comparación del periodo natural del perfil estratigráfico obtenido a partir de las mediciones ReMi-MASW y del periodo natural obtenido a partir de los ensayos HVSR, para luego ajustar los parámetros del perfil y así poder ajustar ambos valores. La condición es no modificar drásticamente la curva dispersiva del modelo, teniendo en cuenta la información obtenida del Análisis de Sensibilidad. La idea anterior se presenta en la figura 8.15.

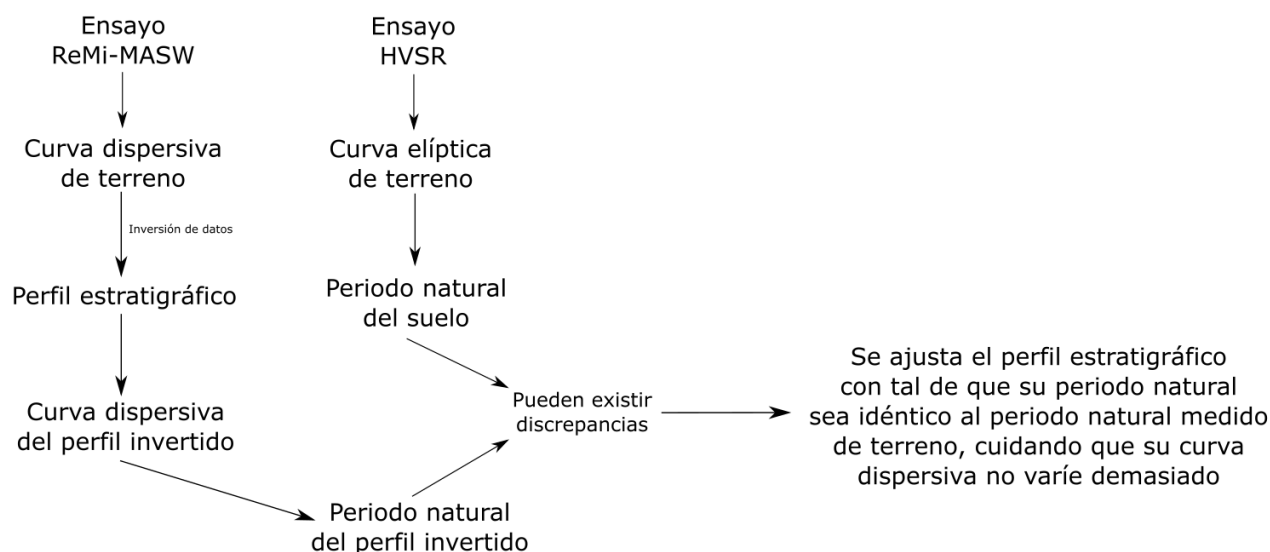


Figura 8.15: Idea general del proceso asociado a la inversión conjunta de datos.

Fuente: Elaboración propia.

Se procede a calcular la curva elíptica del perfil estratigráfico obtenido desde el ensayo ReMi-MASW mediante el paquete **gpell** de GEOPSY, y se presenta en la figura 8.16 junto a las curvas H/V de los ensayos HVSR. Nótese que las curvas del gráfico inferior están normalizadas por su amplitud máxima con tal de mejorar la visualización de los datos.

Se aprecia como el perfil invertido con el set de parámetros crecientes (y que tiene menor desajuste en la inversión) presenta frecuencias naturales similares (5 Hz aproximadamente), pero son superiores a las registradas mediante método HVSR (3.1 Hz). Por otro lado, las curvas asociadas a la inversión con parámetros libres (desajuste mayor), presentan frecuencias dispares entre 1.8 y 2.7 Hz, ambas menores a las del método de Nakamura. En cualquier caso, las curvas tiene formas similares pero presentan amplitudes y desfases particulares.

Con la información recabada del Análisis de Sensibilidad, se sabe que si se disminuye la rigidez del suelo, como por ejemplo disminuyendo sus valores de V_S , es posible mover la curva elíptica hacia el origen. Es así, que para el caso del perfil estratigráfico invertido mediante el set

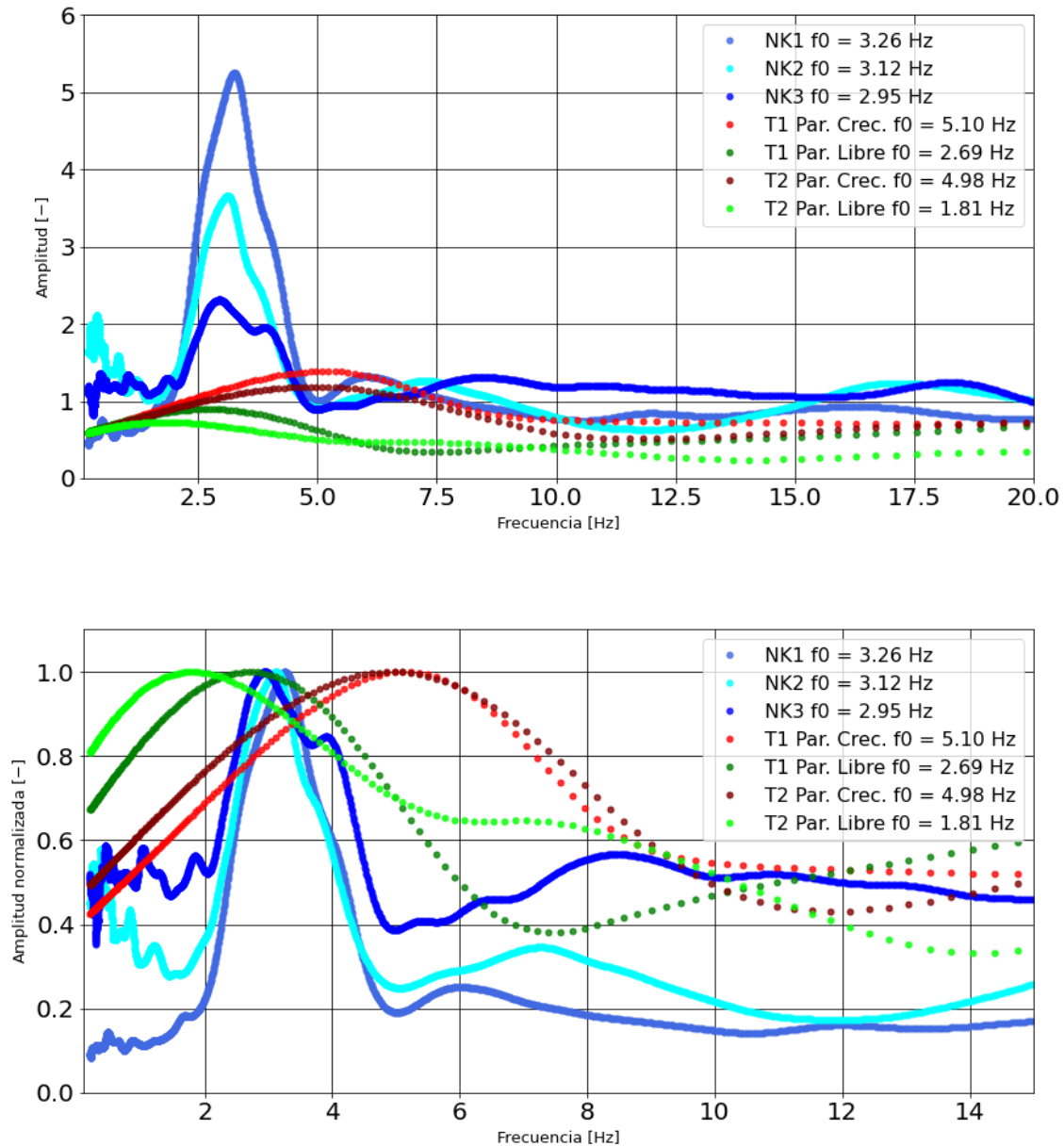


Figura 8.16: Curvas elípticas de método HVSR, y curvas obtenidas de modelo invertido desde medición ReMi-MASW para cada tendido y set de parámetros.

Fuente: Elaboración propia.

de parámetros estrictamente crecientes se procede a modificar sus valores, presentando los datos en la figura 8.17.

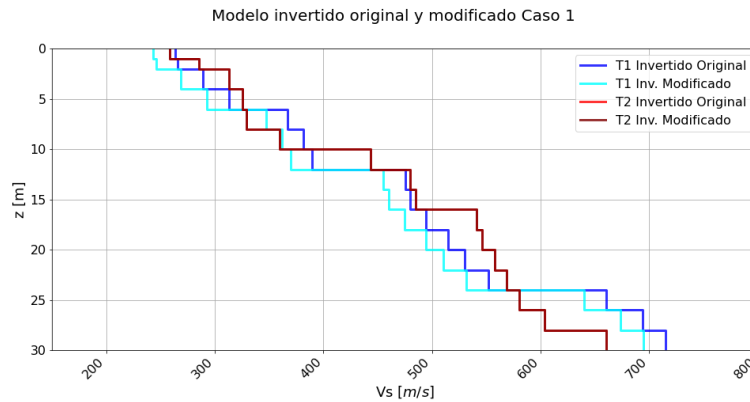


Figura 8.17: Perfil invertido original y modificado del suelo, con criterios de inversión conjunta.
Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia, los valores de V_S han sido disminuidos levemente manteniendo densidades y V_P constantes para todos los estratos.

Estos cambios han generado peaks en la curva elíptica de los modelos modificados similares a los peaks de terreno, como se aprecia en la figura 8.18. Además, la forma de la curva dispersiva en los casos originales y modificados varía levemente, lo que da indicios de la delicadeza del cambio.

Así, el proceso podría repetirse para el perfil estratigráfico invertido con parámetros de crecimiento libre emulando los resultados. Nótese que la inversión conjunta realizada no permite realizar un ajuste preciso de las curvas elípticas, ya que una modificación profunda de los parámetros generaría cambios también en la curva dispersiva, pero si permite adaptar los valores de manera que el perfil estratigráfico invertido se vea influenciado por la información de terreno del ensayo HVSR.

Además, al no coincidir exactamente la ubicación de los puntos de medición HVSR con los tendidos ReMi-MASW, se asume un error inherente a las variaciones que el suelo pueda presentar en cada sitio específico.

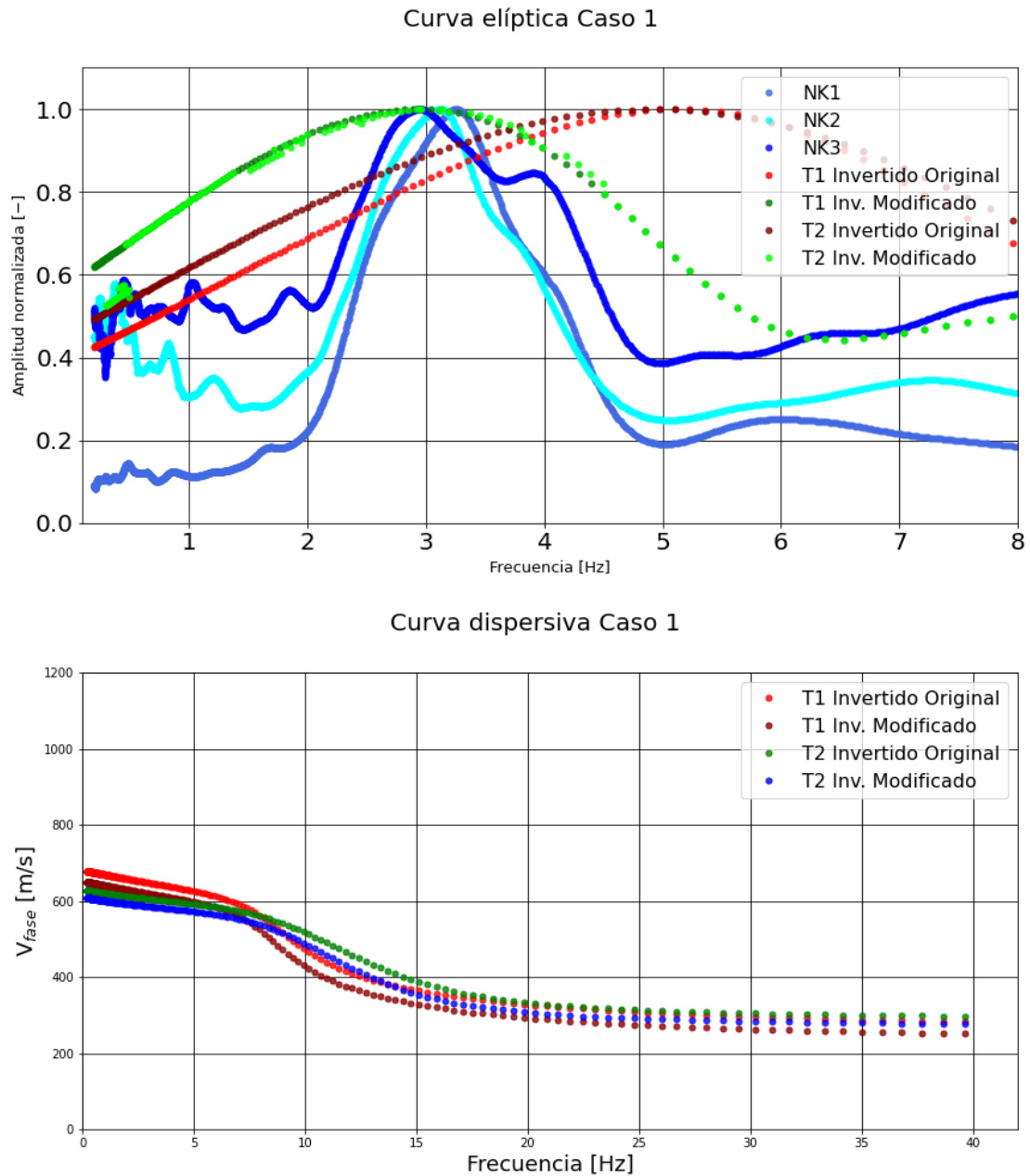


Figura 8.18: Curvas dispersivas y elípticas del perfil estratigráfico invertido, tanto original como modificado con criterios de inversión conjunta.

Fuente: Elaboración propia.



8.2. Caso 2: San Esteban

El segundo caso de estudio nace del requerimiento hecho por una consultora de ingeniería al LEMCO, para conocer el perfil de velocidades de onda del terreno que se describe a continuación.

- Ubicación de proyecto: Lo Calvo Guanaqueros S/N, Ruta E653, San Esteban, Comuna de Los Andes, Región de Valparaíso, Chile
- Fecha de ejecución: 29 de abril de 2019
- Ejecutante: LEMCO UTFSM, lemco.laboratorio@usm.cl, Placeres #401, Comuna de Valparaíso, Región de Valparaíso, Chile

8.2.1. Ensayo ReMi-MASW

La medición en terreno sigue el mismo procedimiento y normativa del caso anterior, y los equipos usados son los mismos. Para mayor referencia, véase la sección 8.1.1.

El ensayo ReMi-MASW consta de dos tendidos lineales de 24 geófonos cada uno los que se disponen de manera que maximizan el terreno abarcado, como se aprecia en la figura 8.19 y tabla 8.5. Ambos tendidos presentan espaciamientos entre geófonos de 4 metros sumando 92 metros en total cada uno. Se realizan mediciones ReMi y MASW para lograr analizar frecuencias altas y bajas respectivamente.

Tabla 8.5: Coordenadas de los perfiles sísmicos de tendidos 1 y 2 del Caso de Estudio 2.

	Tendido 1: Inicio	Tendido 1: Final	Tendido 2: Inicio	Tendido 2: Final
Latitud	-32.745831°	-32.745049°	-32.745645°	-32.745117°
Longitud	-70.591640°	-70.591295°	-70.592048°	-70.591295°

8.2.2. Curva dispersiva

Obtenidas las curvas de dispersión asociadas a cada tendido del Caso 2, se comparan con los modelos 001A, 008A y 009B, revisados en la sección de Análisis de Sensibilidad, y se presentan en la siguiente figura.

Los tendidos presentan curvas con descenso lento hacia las asíntotas presentes en todos los modelos revisados en la sección de Análisis de sensibilidad, por lo que comparte características



Figura 8.19: Ubicación de los perfiles sísmicos de tendidos 1 y 2 del Caso de Estudio 2.
Fuente: Elaboración propia.

Curva dispersiva Caso de Estudio 2

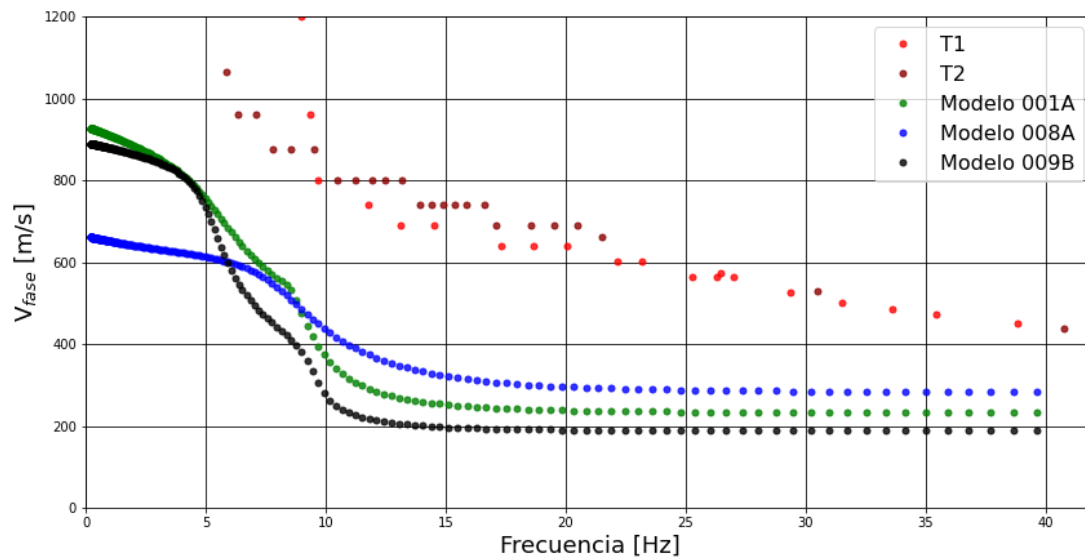


Figura 8.20: Curva dispersiva para ambos tendidos del segundo caso de estudio, y comparación con modelos previamente analizados.

Fuente: Elaboración propia.

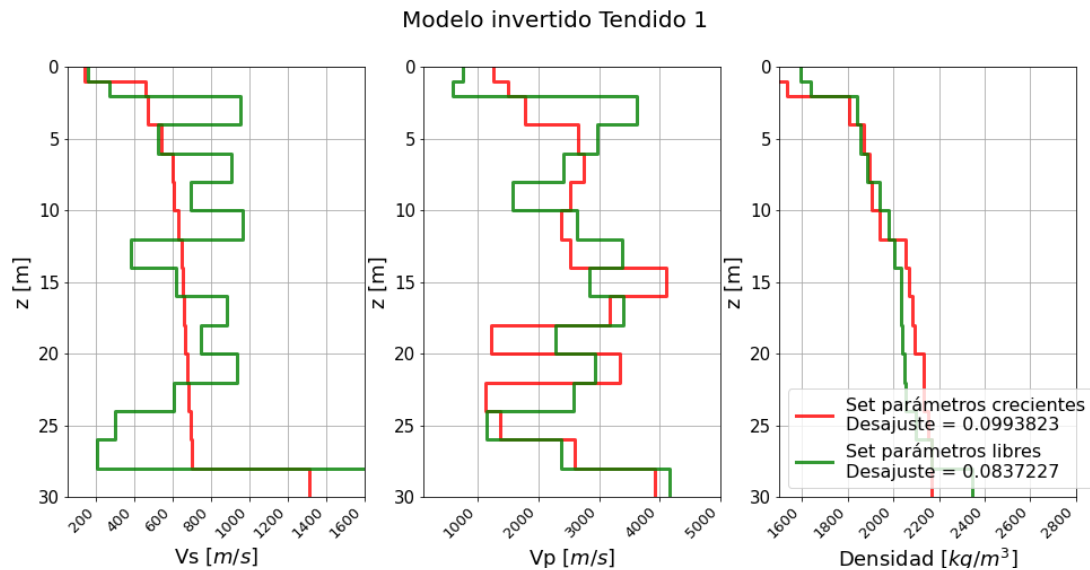


Figura 8.21: Modelos invertidos a partir de la curva dispersiva registrada en el tendido 1.

Fuente: Elaboración propia.

con el modelo 009B. En cualquier caso, y con fines comparativos, se invierten ambas curvas dispersivas con el set de parámetros crecientes y el set de parámetros libres.

En las figuras 8.21 y 8.22, se aprecia como existen menores desajustes para el set de parámetros libres. Se aprecia que en general, el suelo presenta rigideces mas o menos constantes salvo la superficie (lo que es esperable) y en las capas cercanas al medio semi-infinito (para el caso del set de parámetros libres).

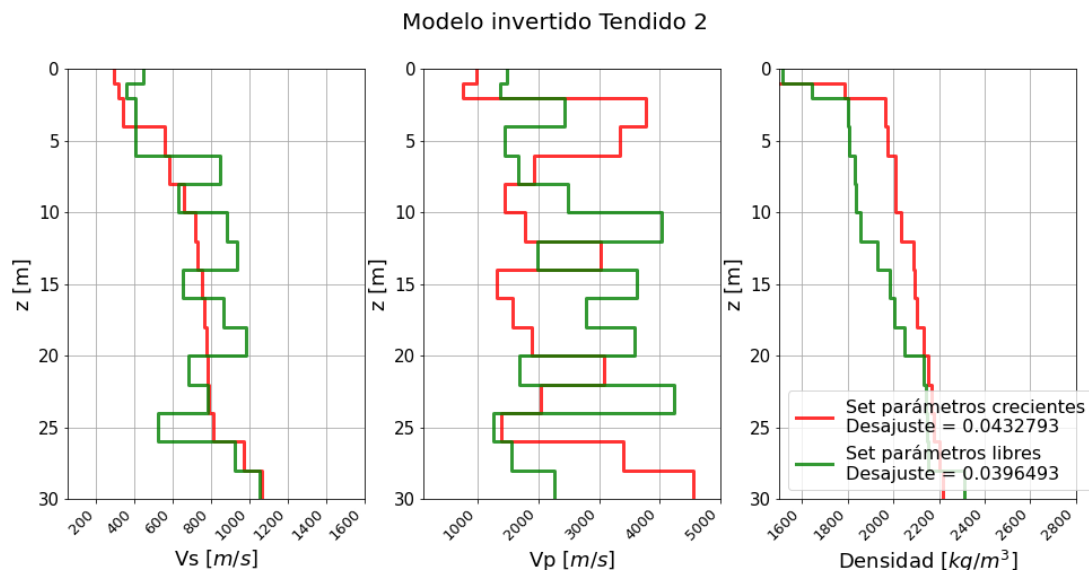


Figura 8.22: Modelos invertidos a partir de la curva dispersiva registrada en el tendido 2.

Fuente: Elaboración propia.

8.2.3. Ensayo HVSR

El ensayo de Nakamura se realiza en tres posiciones en el terreno en cuestión, y pueden revisarse en la figura 8.23 y tabla 8.6. Todos los equipos y parámetros usados para el ensayo, son idénticos al Caso de Estudio anterior (ver sección 8.1.3).

Tabla 8.6: Coordenadas de los perfiles sísmicos de tendidos 1 y 2.

	NK1	NK2	NK3
Latitud	-32.887022°	-32.886744°	-32.886868°
Longitud	-71.506188°	-71.506142°	-71.505943°

8.2.4. Curva elíptica e inversión de datos

Procesados los registros de las tres ubicaciones definidas para el Caso de Estudio 2, se proceden a obtener las curvas elípticas asociadas y se muestran en la figura 8.24.

Se denota similitud entre las curvas, presentando peaks claros en dos de los sitios analizados, pero un par de peaks de distinta amplitud en el sitio NK2. Nótese que con tal de definir validez de los resultados se deben aplicar los criterios de SESAME, lo que queda fuera del alcance de este informe.



Figura 8.23: Ubicación de los lugares registrados con ensayo de Nakamura.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de frecuencia natural son 6.96, 7.00 y 7.48 Hz para NK1, NK2 y NK3 respectivamente. Se observa que existe similitud entre las curvas de terreno y el modelo 009B, en tanto tienen un máximo muy alto respecto a los valores típicos de la curva.

Revisados los casos de estudio, se aprecia como es posible predecir el perfil estratigráfico de suelos ensayados con métodos no invasivos, de manera previa a la inversión de datos. Esto permite validar de cierta forma los resultados y disminuir un poco la incertidumbre asociadas a la no unicidad de la solución del proceso de inversión.

8.2.5. Inversión conjunta

Se procede a aplicar el algoritmo de inversión conjunta ya descrito en el caso anterior (ver sección 8.1.5), con los datos del caso de estudio 2. En la figura 8.25 se muestra la ubicación simultánea de las mediciones de terreno.

En la figura 8.26 se aprecian las curvas elípticas de los ensayos de Nakamura en terreno, y las curvas elípticas de los perfiles estratigráficos obtenidos a través de la inversión de datos de ensayo ReMi-MASW.

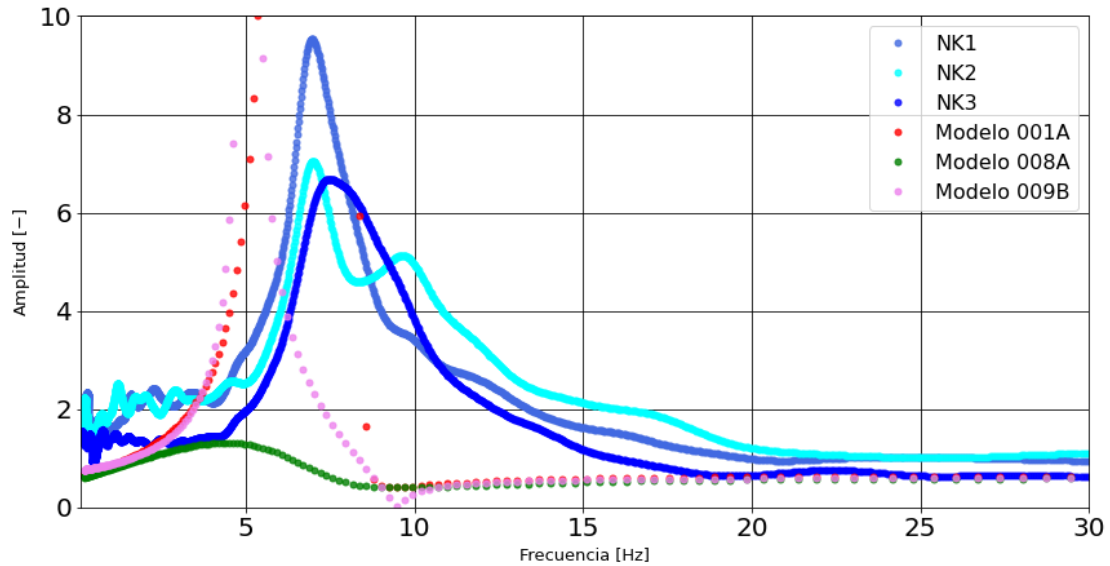


Figura 8.24: Curva elíptica de las tres mediciones HVSR del Caso de Estudio 2, y comparación con otros casos analizados previamente.

Fuente: Elaboración propia.

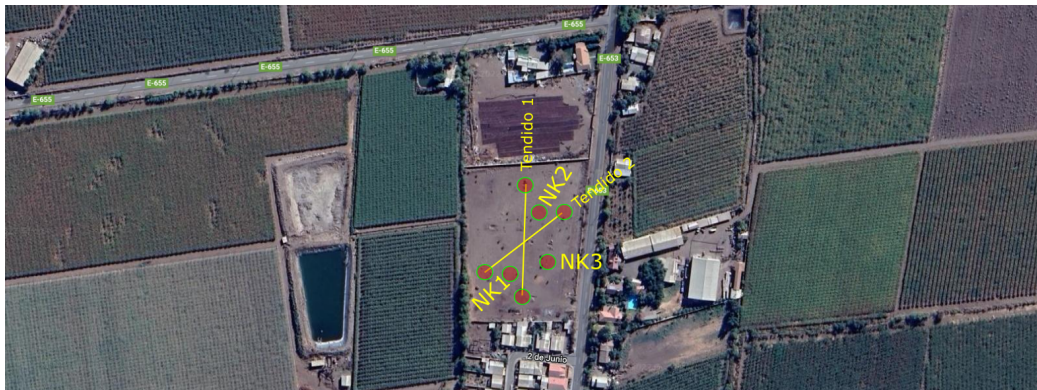


Figura 8.25: Ubicación de mediciones ReMi-MASW y HVSR.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar como las curvas asociadas a la inversión con los parámetros estrictamente crecientes consiguen acercarse satisfactoriamente al periodo natural medido del suelo, contrarias a las curvas invertidas con parámetros de comportamiento libre, las que se alejan casi 1 Hz de la frecuencia natural.

Por tanto, se ajustarán las curvas asociadas a parámetros libres mediante los criterios de

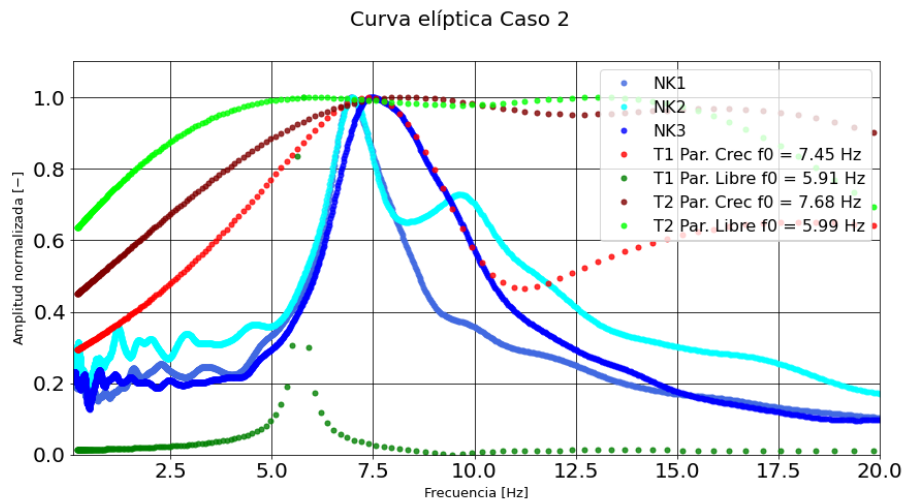


Figura 8.26: Curvas elípticas de método HVSR, y curvas obtenidas de modelo invertido desde medición ReMi-MASW para cada tendido y set de parámetros

Fuente: Elaboración propia.

inversión definidos en la sección de Análisis de Sensibilidad. De lo anterior, se aplicará un aumento en las velocidades de onda S de los distintos estratos (ver figura 8.27), con tal de alcanzar el periodo natural objetivo, y luego se analizará el cambio de las curvas dispersivas con tal de asegurar que no se haya intervenido excesivamente el perfil invertido.

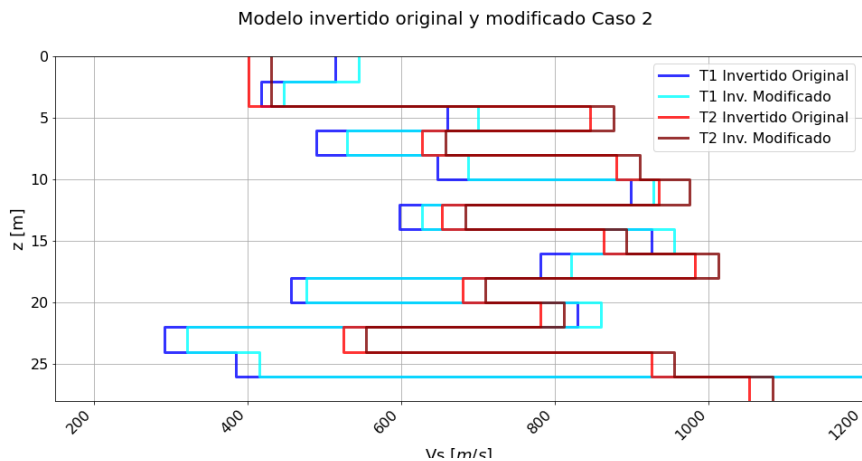


Figura 8.27: Perfil invertido original y modificado del suelo, con criterios de inversión conjunta.

Fuente: Elaboración propia.

Aumentada la rigidez del suelo, se proceden a calcular sus curvas elípticas y dispersivas

respectivamente, las que se presentan en la figura 8.28.

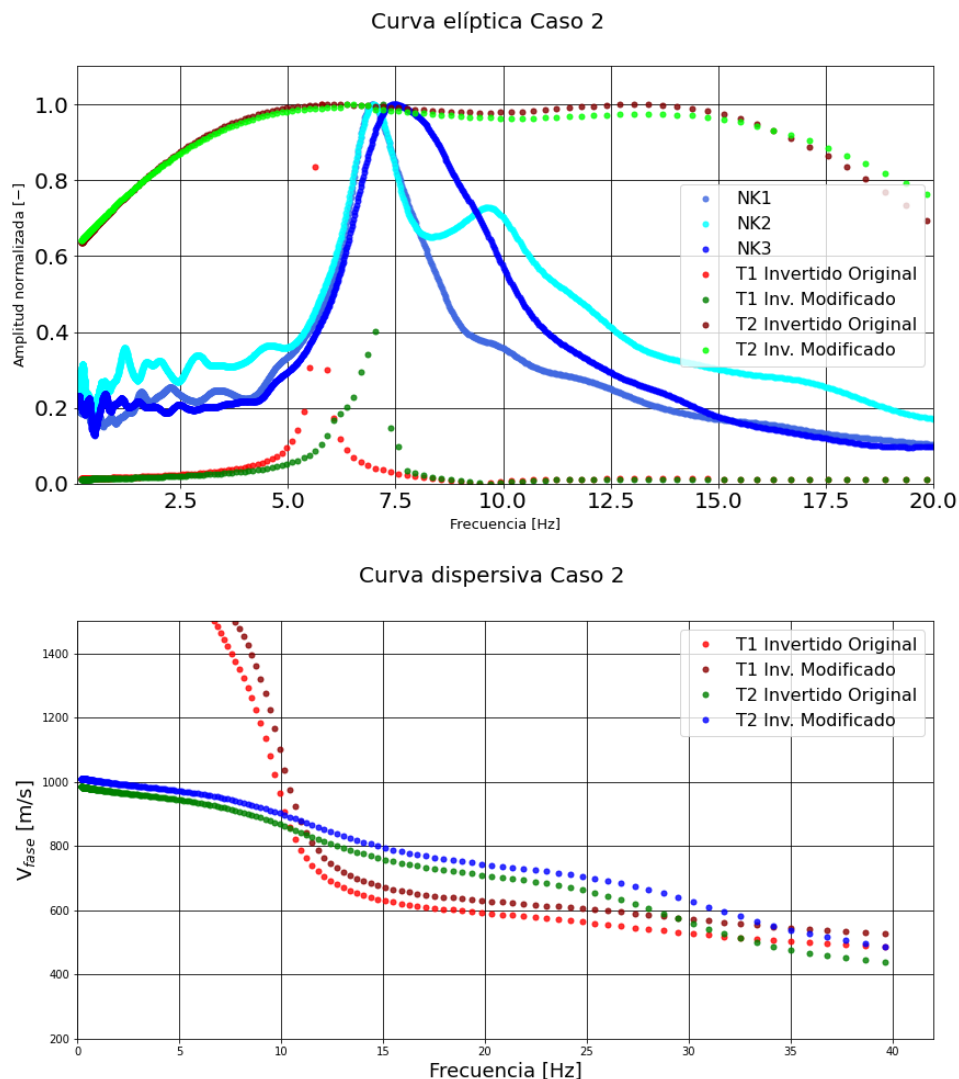
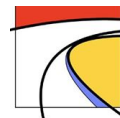


Figura 8.28: Curvas dispersivas y elípticas del perfil estratigráfico invertido, tanto original como modificado con criterios de inversión conjunta.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa como fue posible reajustar los periodos naturales de los modelos invertidos modificando sus parámetros sutilmente, sin hacer variar sus curvas dispersivas de manera relevante. Nótese que, al no coincidir exactamente la ubicación de los puntos de medición HVSR con los tendidos ReMi-MASW, se asume un error inherente a las variaciones estratigráficas que el suelo pueda presentar en cada sitio específico.



9. Criterios de inversión conjunta

9.1. Compendio de resultados

El análisis de las curvas dispersivas y elípticas de los modelos propuestos y la aplicación de la información recabada en los casos de estudio, ha permitido definir ciertos criterios generales sobre la inversión de datos de terreno usando los datos simultáneamente de ensayos ReMi-MASW y HVSR (Nakamura).

Curvas dispersivas

Del análisis de sensibilidad, se obtienen los siguientes lineamientos.

- Las curvas dispersivas tienden a alejarse del origen, entre mayor sea la rigidez del suelo. Entiéndase rigidez en este caso, como un concepto relativo al valor de las velocidades de onda y densidad, donde mayores valores significa rigidez mayor.
- En general, las curvas dispersivas tienden asintóticamente a la velocidad de onda S de las capas superficiales del suelo para grandes frecuencias (ver figura 7.13 o 7.21). En el caso de suelos de rigidez creciente con la profundidad, donde la primera capa tiene un espesor no despreciable respecto a las capas que la suceden, las curvas dispersivas tienden al valor de V_{S1} con precisión (ver figura 7.14 o 7.19). En el caso donde el suelo presenta grandes capas débiles, o donde la primera capa tiene un espesor bajo, la curva dispersiva tiende a un valor ponderado de los valores de V_S de las primeras capas (ver figura 7.20).
- La posición de capas más rígidas o débiles en el suelo, afecta la forma de las curvas dispersivas modificando puntos de inflexión o puntos donde cambia la pendiente, sin modificar su velocidad de fase inicial o final, salvo que esta capa de rigidez distinta se encuentre muy cerca a la superficie.
- La presencia de capas más rígidas o débiles en el suelo que cambian su espesor pero no posición, genera que las curvas se alejen del origen, sin modificar sus velocidades de onda iniciales o finales, lo que de manera práctica puede entenderse como un aumento del área bajo la curva dispersiva (ver figura 7.17 y 7.18).
- La poca cantidad de capas en el suelo registrado, hace que la pendiente de la curva dispersiva entre la velocidad de fase inicial y la velocidad de fase que tiende a la asíntota horizontal final, aumente (ver figura 7.21).



En el Caso de Estudio 1, y habiendo aplicado la información del Análisis de Sensibilidad, se pudo observar que la curva definida de terreno podía ser producida por un suelo de parámetros crecientes con la profundidad y de muchas capas (similar al modelo 000 de la figura 7.12 del Análisis de Sensibilidad). Es así, que una vez invertida con dos sets de parámetros, donde en uno se obligaba el aumento de V_S y densidad con la profundidad, y en el otro se dejaba libre el comportamiento de los parámetros, se obtuvieron resultados que concordaban con lo esperado. En el caso de parámetros crecientes, el perfil de V_S aumenta constantemente, y en el caso de los parámetros libres, si bien existen capas con valores que se alejan del perfil anterior, su promedio es similar al del primer caso. La inversión indica que se halla mejor ajuste en el caso del perfil con parámetros crecientes frente al de parámetros libres.

En el segundo caso de estudio, la curva dispersiva sugería menor cantidad de capas o bien muchas capas con valores de V_S similares (similar al modelo 008 de la figura 7.20). En efecto, los perfiles estratigráficos obtenidos de la inversión muestran, en el caso de los parámetros con crecimiento obligado, un cambio casi nulo desde pocos metros bajo la superficie, mientras que en el otro caso (de parámetros libres), se obtienen varias capas con distinto V_S pero que oscilan en torno al primer perfil. En el Caso de Estudio 2, el análisis indica que el perfil obtenido en base a parámetros libres, obtiene mejor ajuste frente al perfil de parámetros estrictamente crecientes.

Curvas elípticas

Del análisis de sensibilidad, se obtienen los siguientes lineamientos.

- Las curvas elípticas empiezan con amplitudes mayores a cero y pendientes positivas, presentan una zona de máximos valores y finalmente tienden a una asíntota horizontal para grandes frecuencias.
- El peak de amplitud se aleja del origen conforme aumenta la rigidez del suelo, y aumenta su valor si el cambio entre los valores de V_S de las distintas capas de suelo, ocurre a mayor profundidad.
- El cambio suave de velocidad de onda S entre las capas, genera curvas elípticas con peaks bajos respecto a perfiles con cambios de impedancia fuertes, donde los peaks son claros y se alejan bastante de la asíntota horizontal de altas frecuencias.
- Generalmente, cambios bruscos de valores de V_S generan curvas con valores bajo la asíntota horizontal posterior al peak.

En el primer caso de estudio, las curvas H/V presentan pocos valores bajo la asíntota horizontal, por tanto es esperable cambios suaves de V_S (ver figura 7.22). Además, al cambiar



la amplitud espectral entre las curvas pero manteniendo la frecuencia fundamental, se espera que haya una capa que cambie de profundidad respecto al punto medido (ver figura 7.25). Efectivamente, el perfil obtenido de la inversión presenta cambios leves de V_S y se denota al comparar los perfiles provenientes del tendido 1 y tendido 2, que existen una capa más rígida que cambia su posición entre los perfiles (figuras 8.7 y 8.8).

En el Caso de Estudio 2, existen peaks de gran amplitud y no hay valores bajo la asíntota, por tanto se espera un cambio de impedancia brusco y pocas capas de suelo (ver figura 7.31). Esto se comprueba con los perfiles invertidos, donde en líneas generales existe un cambio brusco entre los valores superficiales de velocidad de onda S, respecto de los mismos valores pero de mediana profundidad (ver figura 8.21 y 8.22).

9.2. Recomendaciones generales

Se recomienda no promediar los resultados de cada medición con los mismos datos de mediciones adyacentes, con tal de no perder información respecto a cambios del perfil del suelo a priori. Además, se deben invertir las curvas con al menos un par de sets de parámetros para verificar que los supuestos son validos. Como se observó en secciones anteriores, un solo set de parámetros no genera los mejores valores de ajuste en todos los casos.

Una vez aplicados los criterios de inversión conjunta al modelo estratigráfico invertido, se debe procurar analizar el efecto en las curvas dispersivas y elípticas, comparando el antes y después con tal de asegurar que su forma general no ha variado drásticamente. Así, no se rompe la relación entre los datos de terreno y el resultado final.

Uno de los pasos más críticos tanto en ensayos ReMi-MASW como ensayos HVSR, es la selección correcta de las ventanas temporales de los registros a usar para la obtención de datos, ya que una selección deficiente puede incluir efectos impropios del suelo en cuestión. Para esto, existen manuales y guías de apoyo que han estudiado como mejorar el proceso de selección y procesamiento, como lo es la guía SESAME (2004) y el Manual de Aplicación de Técnicas Geofísicas Basadas en Ondas de Superficie para la Determinación del Parámetro V_{S30} (Humire, Sáez, y Leyton, 2015), entre otros.



10. Conclusiones

La incorporación del conocimiento generado a partir del terremoto del 27 de Febrero de 2010, mediante la modificación de 2012 a la norma técnica chilena NCh433Of.1996 de diseño sísmico de edificios, establece la necesidad de definir el parámetro geofísico V_{S30} con tal de evidenciar la relación suelo-estructura. No obstante, varios estudios teóricos y experimentales posteriores, dan cuenta de la necesidad de incorporar otros valores que permitan robustecer la interpretación de la relación mencionada, y al mismo tiempo suplir deficiencias en los requerimientos normativos establecidos. Es así, que el periodo fundamental del suelo cobra relevancia y se espera sea requerido legalmente por las próximas versiones de la normativa de diseño sísmico.

Dado que se tendrán dos datos de distinta índole, es que la lógica motiva el uso de la información simultáneamente, lo que permitiría predecir los resultados esperables y reduciría la incertidumbre en un proceso que no tiene solución única, como lo es la inversión de curvas dispersivas provenientes de ensayos de terreno.

En esta memoria, se han generado modelos que representen varias situaciones típicas de perfiles estratigráficos, y mediante un análisis de sensibilidad se han obtenido sus distintas curvas dispersivas y elípticas.

El análisis de sensibilidad ha permitido entender como se comportan las curvas de interés al variar sus parámetros, lo que ha conllevado a la generación de los criterios de inversión. Así, es que en base a estos criterios, es que se puede modificar manualmente el perfil estratigráfico invertido haciendo que sea más representativo y válido de los datos recogidos en terreno, tanto de mediciones ReMi-MASW como de mediciones HVSR, lo que se conoce como inversión conjunta. Los criterios generales de inversión conjunta, algoritmos de procesamiento y códigos de ejecución computacionales, abren paso eventualmente a la inversión conjunta de datos como modelo matemático sistemático pero con los conocimientos físicos necesarios para sustentarlo.

Líneas de investigación futuras apuntan a ampliar lo propuesto en este documento, como lo son las siguientes:

- Análisis de sensibilidad detallado para distintos modelos estratigráficos, donde sea posible comparar las variaciones del perfil real del suelo en distintos puntos del área de interés, y así validar los criterios definidos.
- Determinación del efecto de distintos modelos de inversión conjunta, en tanto como es definida su función objetivo y método de optimización para desajuste.



- Geometría de geófonos para toma de datos en terreno mediante ensayo ReMi-MASW, y su efecto en la calidad de las curvas dispersivas obtenidas.

Estos temas son focos actual de investigación.



11. Referencias

- Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P.-Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J., y Fäh, D. (2006). H/V ratio: A tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations. *Geophysical Journal International*, 167(2), 827–837.
- Borcherdt, R. D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60(1), 29–61.
- Braile, L. W., y Smith, R. B. (1975). Guide to the interpretation of crustal refraction profiles. *Geophysical Journal International*, 40(2), 145–176.
- Bullen, K. E., Bullen, K. E., Bullen, K. A., y Bolt, B. A. (1985). *An introduction to the theory of seismology*. Cambridge university press.
- Carcione, J. M. (1992). Modeling anelastic singular surface waves in the earth. *Geophysics*, 57(6), 781–792.
- Cárdenas, D. (2019). Desarrollo e implementación de equipos inalámbricos de bajo costo para medición de vibraciones superficiales y determinación de velocidad de onda de corte en tranques de relaves. *Memoria de Título, UTFSM*.
- Dal Moro, G., y Ferigo, F. (2011). Joint analysis of Rayleigh-and Love-wave dispersion: Issues, criteria and improvements. *Journal of Applied Geophysics*, 75(3), 573–589.
- Gabriels, P., Snieder, R., y Nolet, G. (1987). In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves. *Geophysical prospecting*, 35(2), 187–196.
- Gallardo, L. A., y Meju, M. A. (2003). Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2D inversion of dc resistivity and seismic data. *Geophysical Research Letters*, 30(13).
- Haber, E., y Oldenburg, D. (1997). Joint inversion: a structural approach. *Inverse problems*, 13(1), 63.
- Humire, F., Sáez, E., y Leyton, F. (2015). Manual de aplicación de técnicas geofísicas basadas en ondas de superficie para la determinación del parámetro vs30. *Santiago de Chile: Instituto de la construcción*.
- INN. (2009). NCh433 - Diseño sísmico de edificios (Segunda ed.) [Manual de software informático].
- Ishihara, R., Kenji y Verdugo. (1996). The Steady State of Sandy Soils. *Soils and Foundations*.
- Joh, S.-H. (1996). *Advances in the data interpretation technique for spectral-analysis-of-surface-waves (SASW) measurements*. The University of Texas at Austin.



- Konno, K., y Ohmachi, T. (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1), 228–241.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall. Descargado de <https://books.google.cl/books?id=sC22QgAACAAJ>
- Lachetl, C., y Bard, P.-Y. (1994). Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. *Journal of Physics of the Earth*, 42(5), 377–397.
- Lay, T., y Wallace, T. C. (1995). *Modern global seismology*. Elsevier.
- Linde, N., Tryggvason, A., Peterson, J. E., y Hubbard, S. S. (2008). Joint inversion of crosshole radar and seismic traveltimes acquired at the South Oyster Bacterial Transport Site. *Geophysics*, 73(4), G29–G37.
- Lines, L. R., Schultz, A. K., y Treitel, S. (1988). Cooperative inversion of geophysical data. *Geophysics*, 53(1), 8–20.
- Luke, B. A., Calderón-Macías, C., Stone, R. C., y Huynh, M. (2003). Non-uniqueness in inversion of seismic surface-wave data. En *16th eegs symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems* (pp. cp–190).
- MINVU. (2011). Decreto Supremo 61 (Primera ed.) [Manual de software informático].
- Molnar, S., Ventura, C. E., Boroschek, R., y Archila, M. (2015). Site characterization at Chilean strong-motion stations: Comparison of downhole and microtremor shear-wave velocity methods. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79, 22–35.
- Montenegro, G. (2005). *Introducción y aplicación del Método de Sísmica de Microtremores en Áreas urbanas*. Sartenejas: Universidad Simón Bolívar.
- Moorkamp, M., Jones, A., y Fishwick, S. (2010). Joint inversion of receiver functions, surface wave dispersion, and magnetotelluric data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B4).
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1).
- Nakamura, Y., y cols. (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. En *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering* (Vol. 2656, pp. 1–8).
- Omori, F. (1908). Note on the Annual Variation of Seismic Frequency in Tokyo and Kyoto. *Bull. Imp. Earthquake Inves. Commit.*, 2(1), 17–20.
- Ortigao, J. A. R. (2007). Wave Propagation and Microstrain Behaviour of Soils. *Geotechnical*



and Geoenvironmental Engineering.

- O'Neill, A., y Matsuoka, T. (2005). Dominant higher surface-wave modes and possible inversion pitfalls. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 10(2), 185–201.
- Park, C. B., Miller, R. D., y Xia, J. (1996). Multi-channel analysis of surface waves using Vibroseis (MASWV). En *Seg technical program expanded abstracts 1996* (pp. 68–71). Society of Exploration Geophysicists.
- Park, C. B., Miller, R. D., y Xia, J. (1998). Ground roll as a tool to image near-surface anomaly. En *Seg technical program expanded abstracts 1998* (pp. 874–877). Society of Exploration Geophysicists.
- Park, C. B., Miller, R. D., y Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800–808.
- Raddatz, D., Aguirre, G., y Taiba, O. (2021, 11). Clasificación sísmica con nueva propuesta de norma y comparación con método de clasificación actual para sitios localizados en Reñaca y Concón..
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.
- Richart, F. E., Hall, J. R., y Woods, R. D. (1970). Vibrations of soils and foundations.
- Rix, G., y Leipski, A. (1991). Accuracy and resolution of surface-wave inversion: in: Bhatia, SK, and Blaney, GW Eds, Recent advances in instrumentation, data acquisition, and testing in soil dynamics: Am. Soc. *Civil Eng. Geotechnical Special Publication*, 28, 17–23.
- Robles, A., y Jimenez, J. (2017). Metodología para realizar estudios de microzonificación sísmica. *Distrito Federal, México: secretaria de gobernación Recuperado el, 5*.
- Santos, F. A. M., Afonso, A. R. A., y Victor, L. A. M. (1997). Study of the Chaves geothermal field using 3D resistivity modeling. *Journal of Applied Geophysics*, 37(2), 85–102.
- Sanz, Á. G., y Granda, T. (2005). El método de la sísmica pasiva: una herramienta fiable para la caracterización geotécnica del terreno en zonas urbanas.
- Saunders, J., Herwanger, J., Pain, C., Worthington, M., y De Oliveira, C. (2005). Constrained resistivity inversion using seismic data. *Geophysical Journal International*, 160(3), 785–796.
- SESAME, T. (2004). *Sesame project - Deliverable D23.12 - WP12 - GUIDELINES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE H/V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE ON AMBIENT VIBRATIONS MEASUREMENTS, PROCESSING AND INTERPRETATION*.
Descargado de <http://hdl.handle.net/2122/8423>
- Strobbia, C. (2003). *Surface wave methods: acquisition, processing and inversion*.



- Tokimatsu, K. (1997). *Geotechnical site characterization using surface waves*.
- Verdugo, R. (2019). Seismic site classification. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 124, 317–329.
- Verdugo, R., Baize, S., Bonilla, L. F., Berge-Thierry, C., Pasten, C., Campos, J., ... Bonnefoy-Claudet, S. (2009). Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements. *Geophysical Journal International*, 176(3), 925–937.
- Wathelet, M., Chatelain, J., Cornou, C., Giulio, G. D., Guillier, B., Ohrnberger, M., y Savvaidis, A. (2020, 04). Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1878-1889. Descargado de <https://doi.org/10.1785/0220190360> doi: 10.1785/0220190360
- Wathelet, M., Jongmans, D., y Ohrnberger, M. (2005). Direct inversion of spatial autocorrelation curves with the neighborhood algorithm. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(5), 1787–1800.
- Álvarez, R. (2020). Desarrollo de instrumentación inalámbrica costo-eficiente para estimar periodo predominante del suelo mediante método de Nakamura. *Memoria de Título, UTFSM*.