

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL



Profesor Patrocinante: Oscar Gutiérrez A.
Profesores Comisión: Gilda Espinoza V.
Franco Benedetti L.

**“ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DE
DIFERENTES CONFIGURACIONES DE
GEÓFONOS PARA LA UTILIZACIÓN DEL
MÉTODO ESAC”**

**Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
Título de Ingeniero Civil**

Cristina San Martín Rosales

Concepción, Mayo 2015

Dedicatoria

*Dedicada a mis hermanas Sophía y
Camila, porque quiero regalarles lo
mejor de mí, mi testimonio de vida de que
se puede llegar lejos con voluntad.*

*Busquen siempre la felicidad en su vida,
como yo lo hice con la mía.*

Agradecimientos

A Dios por darme salud, alegría y vida.

A mi Bubu, a mi mam Isabel por creer en mí y a mi padre Cristian, a mis hermanas, a los padres de ellas y a E.A.S.F. por acompañarme en este difícil camino.

A Leonardo, mi amor, por ser la persona perfecta para estar aquí a mi lado, a su madre Lilian y a toda su familia, por ayudarme a concluir esta etapa con éxito.

A mis amigos Danitza y Álvaro, por ser la familia que me puso la vida en el camino.

A Don Miguel y a todos los funcionarios del departamento de Ingeniería Civil, por su buena voluntad y buen trato en todos los años que estuve acá.

A todos quienes estuvieron en el momento que flaqueé y que quise tirar la toalla.

¡Infinitas gracias!

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| NOMENCLATURA..... | 6 |
| RESUMEN | 7 |
| ABSTRACT | 8 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 9 |
| 1.2. Objetivos de la investigación..... | 10 |
| 1.2.1. <i>Objetivo general</i> | 10 |
| 1.2.2. <i>Objetivos específicos</i> | 10 |
| 1.3. Justificación del tema | 10 |
| 1.4. Metodología de trabajo | 13 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 14 |
| 2.1. Velocidad de ondas de corte (Vs) | 14 |
| 2.1.1. <i>Generalidades</i> | 14 |
| 2.1.2. <i>Obtención del Vs</i> | 14 |
| 2.2. Medición de ondas superficiales (MOS) | 15 |
| 2.2.1. <i>Fundamento de los métodos MOS</i> | 15 |
| 2.2.2. <i>Métodos de medición de ondas superficiales</i> | 16 |
| 2.2.2.1. Método ReMi | 16 |
| 2.2.2.2. Método MASW | 17 |
| 2.2.2.3. Método SPAC | 17 |
| 2.2.2.4. Método ESAC | 19 |
| 2.3. Diseños de matrices para ESAC | 20 |
| 3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS | 20 |
| 3.1. Equipo utilizado | 21 |
| 3.2. Medición en terreno | 22 |
| 3.2.1. Configuraciones en planta | 22 |
| 3.2.1.1. Configuración MASW..... | 22 |
| 3.2.1.2. Configuración ESAC..... | 22 |
| 3.2.2. <i>Características de las mediciones</i> | 24 |
| 3.3. Sitios de estudio | 25 |
| 3.4. Procesamiento de datos..... | 26 |
| 3.4.1. <i>ANÁLISIS MASW</i> | 26 |
| 3.4.2. <i>Análisis ESAC</i> | 28 |
| 3.4.3. <i>Inversión de la curva</i> | 28 |

| | |
|---|----|
| 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 29 |
| 4.1. Tiempos de proyección de matrices | 29 |
| 4.2. Resultados MASW | 30 |
| 4.2.1. <i>Curvas de dispersión MASW</i> | 30 |
| 4.2.2. <i>Perfiles estratigráficos MASW</i> | 32 |
| 4.3. PERFIL ESTRATIGRÁFICO | 32 |
| 4.3. Resultados ESAC | 33 |
| 4.3.1. <i>Curvas de dispersión ESAC</i> | 33 |
| 4.3.2. <i>Perfiles estratigráficos ESAC</i> | 35 |
| 4.4. Estimación del Vs30 | 37 |
| | |
| 5. CONCLUSIONES | 39 |
| | |
| 6. REFERENCIAS | 41 |

NOMENCLATURA

MASW: Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (Multichannel Analysis of Surface Waves).

ReMi: Refracción de ruido ambiental (Refraction Microtremor).

SPAC: Método de autocorrelación espacial (Spatial autocorrelation method).

ESAC: Método de autocorrelación espacial extendida (Spatial extended autocorrelation method).

Vs: Velocidad de propagación de ondas de corte.

Vs30: Velocidad de onda de corte equivalente de los 30 m superiores del terreno.

ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DE DIFERENTES CONFIGURACIONES DE GEÓFONOS PARA LA UTILIZACIÓN DEL MÉTODO ESAC

Autor: Cristina San Martín Rosales

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo Electrónico: c.sanmartin.rosales@gmail.com

Profesor Patrocinante: Oscar Gutiérrez Astete

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo Electrónico: solving.cl@gmail.cl

RESUMEN

La velocidad de ondas de corte del suelo se puede obtener con técnicas no invasivas y de fácil aplicación, como son los métodos de onda superficiales. Dentro de los métodos más populares utilizados en la actualidad y, que son propuestos por el DS N°61, están el método MASW y el método ReMi. El método MASW es un método activo que es capaz de captar frecuencias altas (desde los 12 [Hz]) y traducirlas principalmente a los estratos más superficiales del suelo. El método ReMi, al ser un método pasivo, utiliza como recurso frecuencias más bajas y, por tanto, identifica los estratos más profundos del suelo (aproximadamente desde los 30 a 40 [m]). En base a esto, se logra deducir con facilidad, que el utilizar ambos métodos para obtener un perfil de velocidades completo de ondas de corte en el suelo en los primeros 30 de profundidad (V_{s30}) puede no ser factible y, dependerá exclusivamente de la calidad del suelo en estudio. Para suplir esta falta de información estratigráfica en el suelo es que se propone la utilización el método ESAC, un método de medición de ondas superficiales que utiliza como recurso el ruido ambiental y se caracteriza, principalmente, en su configuración bidimensional, siendo la configuración base una matriz de geófonos circular (método SPAC). Dado esta última característica es que es poco utilizado, puesto que se necesita una gran cantidad de tiempo y energía para llevarlo a cabo. En el presente estudio se estudiaron los perfiles estratigráficos de los métodos MASW y diferentes configuraciones de geófonos para el método ESAC con los cuales se buscaba encontrar una matriz de geófonos eficiente que lograra optimizar el tiempo transcurrido en la colocación de los geófonos desde la linealidad hasta la matriz bidimensional y, que a su vez, esta matriz entregara resultados lo más cercanos a su configuración original de base

circular. Como resultado del estudio se llegó a la conclusión que la matriz eficiente es la que tiene una configuración de esquema de geófonos C en que en una configuración de 18 canales configurados linealmente se desplazan los primeros y últimos 5 geófonos.

Palabras clave: ESAC, Geófonos

ABSTRACT

The shear wave velocity of soil can be obtained with non-invasive and easy to apply as are methods of surface wave techniques. Among the most popular methods used today and which are proposed by the DS N ° 61, are the MASW method and ReMi method. The MASW method is an active method that is capable of capturing high frequencies (from 12 [Hz]) and translate them, mainly the surface layers of the soil. The ReMi method, being a passive method, used as lower frequencies resource and therefore identifies the deeper soil layers (from approximately 30-40 [m]). Based on this, is achieved easily deduce that by using both methods to obtain a profile full speed shear on the floor in the first 30 deep (V_{s30}) may not be feasible and will depend exclusively on the quality study soil. To compensate for this lack of stratigraphic information on the ground is that the ESAC method, a measurement method that uses surface waves ambient noise as a resource and is characterized mainly in its proposed bidimensional configuration, the configuration being based matrix Circular geophones (SPAC method). Since this last feature is that it is rarely used, since a lot of time and energy to carry it out. In the present study the stratigraphic profiles MASW methods and different configurations of geophones for ESAC method with which it sought to find an array of efficient geophones he managed to optimize the time spent in the placement of geophones from linearity to be studied dimensional matrix, which in turn, this matrix deliver as close to its original circular base configuration results. As a result of the study it was concluded that the efficient matrix is having a configuration schema C geophones that in a configuration of 18 channels configured linearly the first and last 5 geophones move.

Keywords: ESAC, Geophones

Número de palabras: $6254 + 10 \cdot 250 + 1 \cdot 500 = 9254$ Palabras Totales

1. INTRODUCCIÓN

Conocer las propiedades dinámicas de los suelos sirve para realizar un análisis dinámico de fundaciones, para la ingeniería geotécnica de terremotos y para realizar análisis estructurales dinámicos, representando así la base en la realización de cualquier obra civil de magnitud considerable.

La velocidad de ondas de corte es una de las propiedades dinámicas que más participación tiene en el comportamiento del suelo y, poder determinarlo en terreno es provechoso, tanto en cuestión de tiempo como costo, precisión de variables y de comodidad.

Según el DS N° 61, “La velocidad de propagación de las ondas de corte puede ser medida por ensayos down-hole, cross-hole o sonda de suspensión o a partir de mediciones de ondas superficiales (Rayleigh), por métodos como SASW, MASW o ReMi”. De lo que se infiere que es posible la utilización de métodos alternativos de ondas superficiales que generen mayor confiabilidad a la hora de dar resultados precisos.

Uno de estos métodos alternativos es el método ESAC (método de autocorrelación espacial extendido) que, durante los últimos años, ha sido estudiado al detalle en países como Japón, Italia y Estados Unidos.

Buscar un punto de equilibrio entre costos y precisión de resultados es tarea de la ingeniería; tarea que presenta problemas debido a la variabilidad de resultados de la curva de dispersión que dependen de variables como la tipología del suelo, la cantidad de sensores, la distancia entre ellos, el tiempo de medición y la frecuencia. Una técnica para definir un punto de equilibrio óptimo entre costo y confiabilidad es la utilización combinada de resultados de curvas de dispersión de las ondas superficiales de diferentes MOS.

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

- Analizar diferentes curvas de dispersión que se generan como respuesta de diferentes matrices de diseño en la utilización del método ESAC para la medición de ondas superficiales del suelo, que se trasladaran desde la linealidad hacia la formación de una formación bidimensional en el menor tiempo posible.

1.2.2. Objetivos específicos

- Elegir, primeramente desde el punto de vista práctico, las matrices de diseño que generen una comodidad de tiempo y espacio en la colocación de los geófonos desde los tendidos lineales a la configuración final.
- Determinar la variabilidad del Vs30 entregado en mediciones utilizando del método ESAC.
- Definir una configuración de geófonos bidimensional eficaz para la utilización del método ESAC que se equilibre tanto en la colocación de los sensores desde una configuración lineal como en la precisión de la curva de dispersión entregada.

1.3. Justificación del tema

Como consecuencia de los efectos que trajo consigo el terremoto del 27F, que afectó a gran parte de Chile el año 2010, se introdujo a la NCh 433 de Diseño sísmico de edificios, el DS N°61, en el que se modifica la clasificación de los suelos. Esta nueva clasificación tiene como parámetro base la velocidad de ondas de corte del suelo (Vs) dentro de los primeros 30 metros de profundidad, denominada Vs30 (Anexo E).

La obtención del Vs30 es de carácter obligatorio en Chile según el DS N°61 (Noviembre de 2011) para conjuntos de viviendas en terrenos de más de 8000 metros cuadrados o estructuras

de 5 o más pisos sobre la superficie del terreno natural o edificios de categoría III y IV (DS N°61 modificación de la NCh 433). Con el inicio de la necesidad y aumento de demanda de realizar estos estudios sísmicos se introdujeron al mercado de la Ingeniería de Suelos a nivel nacional, una serie de métodos de medición de ondas de corte en que se vuelven importantes la precisión y las características económicas de cada una de ellos.

Uno de los métodos presentados por la norma es el método MASW que genera respuestas correctas, en la mayoría de los casos, en las capas más superficiales del suelo o frecuencias más altas (ver Gráfico 1), pudiendo extenderse de acuerdo a la tipología de materiales con el que está compuesto el subsuelo y el método ReMi que, en general, solo aplicable a estratos más profundos o frecuencias más bajas (ver Gráfico 1). Como ambos métodos actúan a distintas profundidades en su génesis, debido a la frecuencia a la trabajan, la combinación de ambos, en teoría, generaría una curva de dispersión adecuada que respondería a la curva de dispersión de las ondas Rayleigh del subsuelo.

Pero, en la práctica, esto no sucede tan concretamente, ya que existe un rango de frecuencias que muchas veces no es abarcado, provocando con ello una nube de puntos en un sector que no responde a entregar una curva de dispersión definida (bajo los 12[Hz]).

La aplicación del método ESAC, en la medición de ondas superficiales, soluciona dicho problema, generando una adquisición de datos que soporta una curva definida en el gráfico Velocidad/frecuencia, tal como lo muestra el Figura 1.

Al realizar la búsqueda del Vs30 no será necesaria la utilización del método ReMi, ya que se pretende explorar solo hasta los 30 [m] de profundidad y los métodos MASW y ESAC en su conjunto cumplirán con dicho propósito.

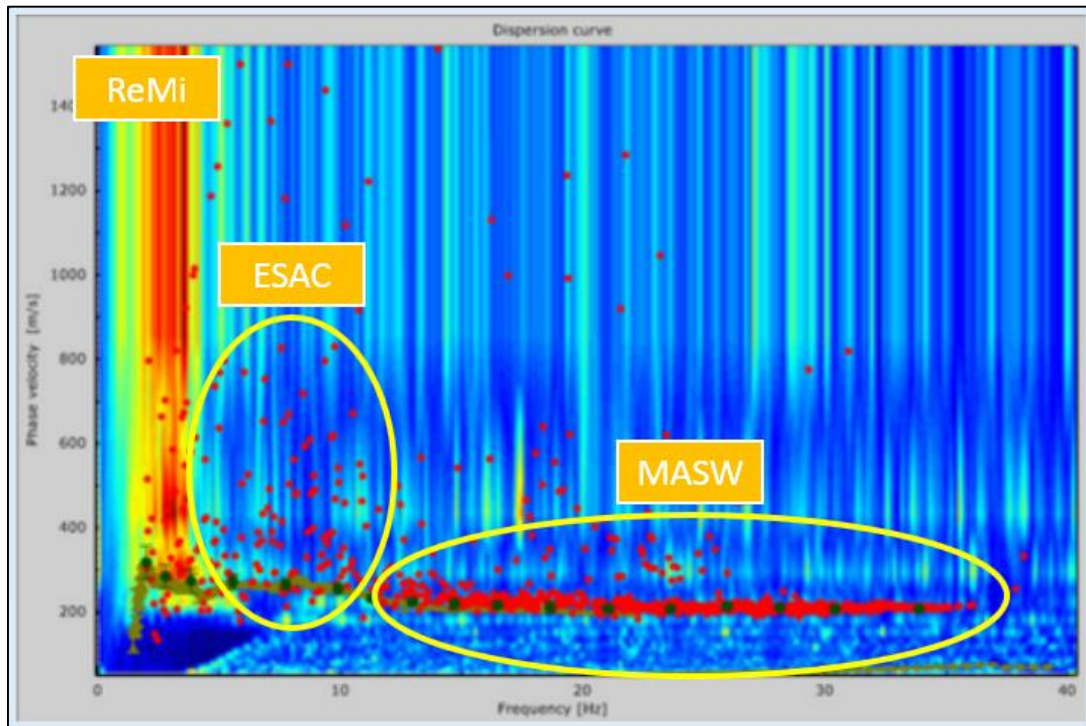


Figura 1. Espectro de velocidad de fase de ondas Rayleigh.

La precisión de la curva de dispersión aparente obtenida mediante la aplicación de esta combinación de métodos y el tiempo, son dos factores fundamentales para la obtención de resultados confiables y que son valorados por el ingeniero civil a la hora de realizar las mediciones en terreno. Por lo tanto, el balance de ambos factores para obtener eficiencia en la medición de ondas de corte del suelo, tiempo y confiabilidad, es un problema ingenieril que debe ser resuelto para que el sistema de medición se le facilite al profesional, tanto para la medición misma como para la entrega de resultados rápidos y confiables.

1.4. Metodología de trabajo

El plan de trabajo para llevar a cabo el objetivo general de esta investigación plantea la siguiente correlación de pasos:

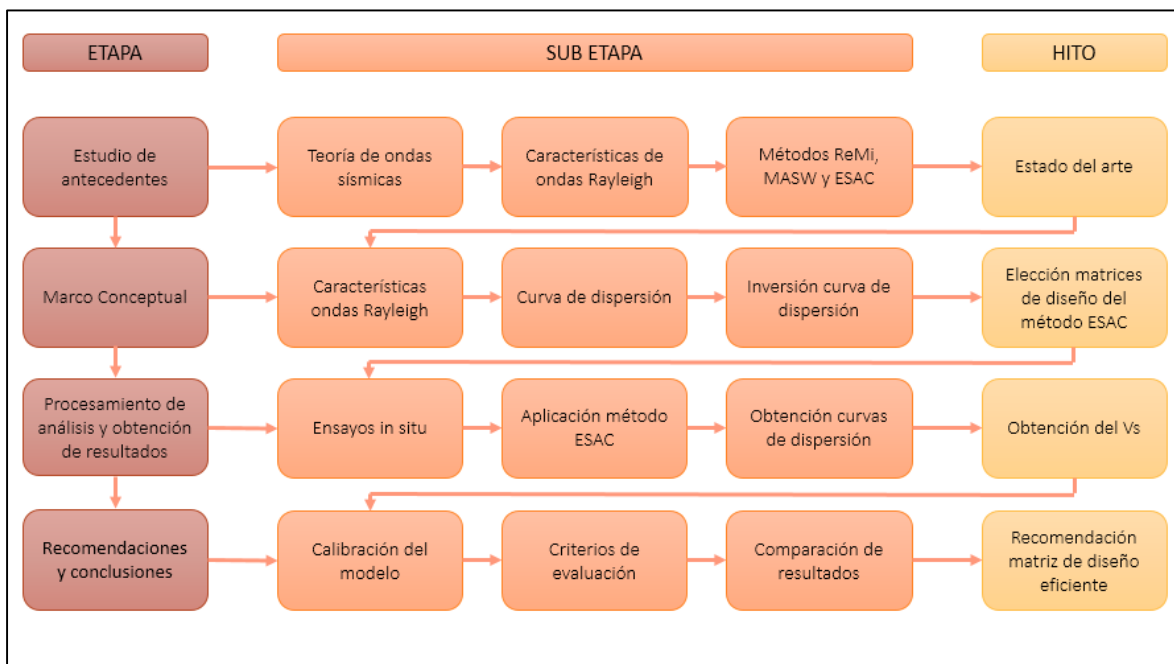


Figura 2. Esquema de trabajo para el “Estudio de la eficiencia de diferentes configuraciones de geófonos para la utilización del método ESAC”.

1. Estudio de antecedentes: Se realiza una revisión bibliográfica para la comprensión de conceptos generales y que anteceden a los métodos MASW, ReMi y ESAC, principalmente de este último (origen, procedimiento analítico, procedimiento experimental, experiencias, ventajas, desventajas y diferencias y similitudes con el método ReMi y el método MASW)
2. Marco conceptual: Se procede a estudiar la concepción de las curvas de dispersión, proceso de obtención de curva de dispersión aparente e inversión. Profundizándose en los conceptos bases del estudio, principalmente en el fenómeno de dispersión de las ondas Rayleigh.
3. Procesamiento de análisis y obtención de resultados: Se procederá a la obtención de la curva de dispersión de la matriz base del método ESAC (forma circular). Luego, se realizarán mediciones en terreno con matrices de diseño bidimensionales definidas

de geófonos determinados. Se procederá a analizar la curva de dispersión que genera cada configuración en planta ejecutada mediante el software GEOPSY y una posterior obtención del Vs30.

4. Conclusiones y recomendaciones: Se determina la efectividad que tienen las distintas configuraciones, eligiendo la matriz que menor tiempo y gasto energético requiera en la modificación de geófonos y entregue resultados eficaces utilizando la metodología ESAC.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Velocidad de ondas de corte (Vs)

Primeramente, es necesario explicar la importancia de las velocidades de las ondas de corte y su forma de medición.

2.1.1. Generalidades

La velocidad de ondas de corte es el parámetro más utilizado en la geofísica debido a que a través de él es posible determinar las demás propiedades dinámicas del suelo en el rango elástico (módulo cortante, coeficiente de amortiguamiento, módulo de Poisson). Su utilidad se debe a que las partículas del movimiento se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda, lo cual permite medir las propiedades de corte del esqueleto del suelo y no de los líquidos, ya que estos últimos no resisten esfuerzos cortantes (Anexo A).

2.1.2. Obtención del Vs

La obtención del perfil de velocidades de corte del suelo (Vs) se realiza mediante tres pasos básicos:

1. Obtención de la curva de dispersión experimental de ondas Rayleigh mediante los diferentes métodos existentes de medición de ondas superficiales, tales como SASW, MASW, ReMi, SPAC, ESAC, Nakamura, etc. (Anexo A.3.1.1).
2. Obtención de la curva de dispersión aparente elegida bajo criterio del profesional a cargo y determinado principalmente por la experiencia. (Anexo A.3.2).
3. Inversión de la curva mediante procesos iterativos realizados para obtener los perfiles de profundidades v/s velocidades de cada curva (Anexo A.3.3).

Cabe destacar que aun cuando todos los métodos para obtener la curva de dispersión son diferentes (primer paso). Los pasos posteriores hasta llegar a la inversión de la curva y la posterior obtención del V_s se realizan de igual forma para todos los métodos.

2.2. Medición de ondas superficiales (MOS)

De la medición de las ondas superficiales es posible obtener el V_s , es por eso que se explica su importancia y las formas de obtención utilizadas.

2.2.1. Fundamento de los métodos MOS

Las ondas Rayleigh poseen la propiedad de transmitirse en medios estratificados con una velocidad de fase que es dependiente de la frecuencia o longitud de onda denominada dispersión (Anexo A.2.1.2). Los métodos geofísicos basados en el análisis de esta propiedad para caracterizar el suelo se denominan métodos de medición de ondas superficiales (Tokimatsu, 1997).

Es posible identificar la velocidad de fase con la curva de dispersión definiéndose mediante una herramienta gráfica que muestra la variación de la velocidad de fase de las ondas Rayleigh con la frecuencia y que es obtenida mediante los métodos MOS, denominada *curva de dispersión aparente* (Anexo A.2.2).

Las principales características que utilizan las metodologías sustentadas en la dispersión de las ondas Rayleigh son:

- Por ser técnicas superficiales, se consideran no invasivas, puesto que no se necesita realizar movimientos de tierra (sondajes) para su ejecución.
- El equipo que utilizan para realizar los ensayos es liviano, por lo que su transporte es fácil y cómodo.
- Por las dos razones anteriores se tiene que los costos en relación a la calidad son bajos, por lo que se identifican como técnicas económicas.
- Son métodos rápidos y fáciles de ejecutar por realizarse en la superficie del terreno en estudio.
- La elaboración de los perfiles de velocidades buscados se obtienen rápidamente utilizando los softwars adecuados.

Los métodos para realizar la medición de ondas superficiales son variados y, difieren en los procesos de medición y en la obtención de la curva de dispersión. Estos, se puede clasificar dependiendo del recurso que utilizan para realizar la toma de muestra. Pueden ser activos si la medición necesita una perturbación artificial para ser medido (golpe martillo, explosión, etc.); pasivo si el recurso que se utiliza es solo el ruido ambiental o híbrido, si la curva de dispersión de las ondas Rayleigh se obtiene mediante la combinación de ambos métodos (Anexo A.2.1.2).

2.2.2. Métodos de medición de ondas superficiales

Se explican los principales métodos de medición de ondas superficiales utilizados en la obtención del Vs30 en el presente estudio.

2.2.2.1. Método ReMi

El método ReMi es un método pasivo desarrollado el 2001 por el geofísico John N. Louie y representa hoy una de las formas más populares y contemporáneas a nivel mundial de caracterizar el suelo y evaluar los terrenos.

Bajo el concepto que utiliza como recurso el ruido ambiental (capta frecuencias de en un rango de 2 a 10[Hz]) la factibilidad de los datos obtenidos fluctúan entre los 30 – 40 metros dependiendo los materiales del subsuelo. Este último antecedente da cuenta que muchas veces no es posible utilizarlo de forma independiente para obtener resultados veraces en las capas más superficiales del terreno.

La medición de los datos en terreno se realiza mediante una configuración lineal de geófonos ubicados a una misma distancia conocida ubicando un sismógrafo en algún lugar del arreglo para captar las señales.

2.2.2.2. Método MASW

El método MASW o análisis multicanal de ondas superficiales es un método activo, es decir, utiliza como recurso fundamental ondas artificiales provocadas por una fuente de impacto vertical, generando ondas que viajan a frecuencias altas (4 – 100 [Hz]) por lo que no pueden penetrar grandes profundidades. Si bien puede lograr alcanzar los 30 metros para obtener valores de V_{s30} correctos la profundidad está ligada a la calidad del suelo y puede entregar valores de V_s muy inferiores a los 30 metros.

La matriz de diseño que utiliza en terreno es lineal, simétrica, con múltiples sensores equidistantes y con espaciamientos reducidos. Roma (2006) afirma que se necesitan al menos 12 geófonos para lograr una obtención de datos confiable.

2.2.2.3. Método SPAC

El método SPAC (Aki, 1957) es un método de medición pasivo, que se basa principalmente en la característica de uniformidad del ruido ambiental, tanto en el tiempo como en el espacio.

Este método contiene dos consideraciones básicas para que sus resultados sean efectivos:

1. Las velocidades verticales registradas en un determinado tiempo por los instrumentos son consideradas como ondas superficiales que satisfacen una ecuación determinada y que tiene la velocidad de la onda en función de la frecuencia.
2. Es un fenómeno estocástico estacionario en el tiempo y espacio. Esto quiere decir, que la función de autocorrelación de la señal registrada no presenta correlaciones ni en tiempo ni en espacio.

Para que la adquisición de datos sea sostenible con el método SPAC, o sea que se mantenga la autocorrelación espacial de las señales registradas, se considera una matriz de diseño circular en planta (un sensor central acompañado de sensores perimetrales ubicados a una distancia r del sensor central) y una frecuencia dada (anexo).

Así se es posible calcular el promedio azimutal $\rho(\omega_0, r)$ (herramienta matemática que se utiliza para la calibración de este método) que satisface la ecuación fundamental del método propuesto por Aki:

$$\rho(\omega_0, r) = J_0 \frac{\omega_0 r}{c(\omega_0)}$$

Ecuación 1. Ecuación fundamental del método SPAC.

Donde:

J_0 : función de Bessel de orden 0

r : radio de la configuración

ω_0 : frecuencia angular

$c(\omega_0)$: velocidad de propagación de la onda

Teniendo como dato el promedio azimutal ($\rho(\omega_0, r)$), el radio (r), la frecuencia angular (ω_0) y la función de Bessel (J_0), se es posible obtener la velocidad de fase $c(\omega_0)$ por ser la única incógnita de la ecuación.

Se debe tener en consideración que para obtener la curva de dispersión es necesario respetar uno de los siguientes postulados:

1. Radio constante variando las frecuencias
2. O, frecuencia constante variando los radios de la configuración de los geófonos.

2.2.2.4. Método ESAC

El método ESAC o método de autocorrelación espacial extendido (Okada, 2003) deriva del método SPAC asumiendo todas las consideraciones del mismo. Tiene como principal característica solucionar el cuestionamiento de la geometría circular, que en la práctica provoca problemas de ejecución para la medición de datos en el terreno, debido a la falta de espacio que caracterizan los espacios urbanos confeccionando las matrices de diseños de forma circular, hexagonal de 7 estaciones, semicircular, forma de cruz, forma de L, forma de T o geometría irregular.

Analíticamente, se tiene que el método ESAC mantiene la frecuencia constante pudiendo variar el valor de la abertura (radio). Con esta restricción la velocidad de fase puede obtenerse a partir de la inversión de la función de Bessel obteniendo mejores resultados que al definir un radio constante, ya que la velocidad es una función de la frecuencia (Ohori et al., 2002; Okada, 2003; Parolai et al, 2005). Así, la razón de autocorrelación espacial, caracterizada por el SPAC, es reemplazada por la expresión $S(\omega_0, r)$ calculada mediante la transformada de Fourier de las señales adquiridas.

$$S(\omega_0, r_{0n}) = J_0 \frac{\omega_0 * r_{0n}}{c(\omega_0)} \text{ con } n = 1, 2, 3 \dots N$$

Ecuación 2. Ecuación fundamental del método ESAC.

Donde:

$N+1$: número de sensores

Tal como en el método SPAC es necesario tener en consideración el azimutal, en el método ESAC se deben conocer todas las coordenadas de los geófonos en la matriz, ya que es un factor de relevancia para el cálculo analítico del método.

Por otra parte, el método de ESAC permite investigar las longitudes de onda de hasta 10 a 20 veces la máxima distancia entre sensores del arreglo (Okada, 2003; Parolai et al, 2005), siendo por lo tanto más fiable en las frecuencias bajas que otros métodos que utilizan la misma configuración de la matriz. Este dato implica que el espacio entre los sensores debe ser adecuado para alcanzar esa longitud característica de la matriz de sensores.

2.3. Diseños de matrices para ESAC

Los factores a tener en consideración para la elección de matrices eficientes en la medición de datos mediante el método ESAC son:

- La profundidad a la que es factible realizar la medición correcta. Esto depende de la máxima longitud de la configuración.
- Simetría de la configuración, puesto que las figuras simétricas con al menos un eje en plata dan mejores resultados.
- Optimización de tiempo y trabajo en terreno que requiere el traslado de geófonos desde la matriz que utiliza MASW a la matriz a elección.

Como matriz base, se utilizará la matriz circular característica del método SPAC.

3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS

Se procede a explicar la forma en que se llevó a cabo el presente estudio y como se llegó a los resultados.

3.1. Equipo utilizado

Para la recolección de datos se utilizó un sismógrafo DoReMi de SARA Electronic Instruments que posee las siguientes características:

- Memoria: 64 kBytes
- Rango de Frecuencias: 200 a 20000 Hz. (5 a 0.05 ms)
- Resolución: 24 Bytes
- Sistema Dinámico: Hasta 155 dB.
 - Geófonos de 4.5 Hz.
 - Cables de transmisión de datos.
 - Martillo (Peso =18 [lb]).
 - Placa para el golpe.
 - Soportes de PVC para geófonos.
 - Software DoReMi para digitalización del registro.
 - Software Geopsy para análisis del registro.



Figura 3. Equipo de medición que se utilizó para obtener los registros en terreno.

3.2. Medición en terreno

En el terreno se llevó a cabo el estudio bajo las siguientes consideraciones.

3.2.1. Configuraciones en planta

Las configuraciones en planta de los geófonos para realizar las mediciones se presentaron de la siguiente forma:

3.2.1.1. Configuración MASW

La configuración MASW se realizó mediante la colocación de 18 geófonos consecutivos espaciados a una distancia de 3 [m], generando con ello un tendido lineal de 51 [m] de longitud. Si bien, los exponentes de este método sugieren que la cantidad ideal de canales debiera ser 24, Roma afirma que 12 geófonos son suficientes para realizar una medición confiable.

3.2.1.2. Configuración ESAC

La elección de las matrices se llevó a cabo teniendo en consideración los factores ya mencionados en el punto 2.3.2 y cuya geometría se encuentra resumido en la Tabla 1 y mostrada en la Figura.

a. Matriz circular (Matriz base)

Como ya se mencionó, el análisis ESAC basa su procedimiento principal en el estudio de medición de ondas superficiales según SPAC, por lo que su configuración básica, configuración circular, es la que se definirá como patrón en este estudio (Figura 4 (a)).

b. Configuración L

En la práctica, la medición pasiva ESAC, se realiza luego de la medición MASW, por lo que el traslado de los geófonos se realiza desde una linealidad hasta llegar la configuración bidimensional con forma de L.

La realización de esta matriz consta de inmovilizar los primeros 13 geófonos y, trasladar de formar perpendicular desde el geófono número 13, los siguientes 5 receptores de forma que formen un ángulo recto entre ellos. (Figura 4 (b))

c. Configuración C

La realización de la configuración bidimensional en forma de C consta del traslado de los primeros y últimos 5 geófonos desde los receptores números 6 y 13 respectivamente manteniendo el paralelismo entre los canales de los tendidos trasladados. Se realiza también el traslado de la estación desde el geófono número 1. Se mantienen inmóviles desde la linealidad los geófonos ubicados desde la posición 6 a la 13 (Figura 4 (c)).

Esta matriz se escoge principalmente bajo el criterio de tener un eje simétrico y de tender a cerrar más aun su configuración.

d. Configuración Corchete

De forma similar a la configuración C se trasladan los primeros y últimos 5 geófonos del tendido lineal, pero en este caso dos receptores del final y dos del inicio se inclinan hacia el centro en dirección a encontrarse con sus pares del frente (Figura 1 (d)).

Esta configuración busca la simetría y la tendencia a la matriz base circular.

Tabla 1. Distancias de configuración de cada tendido.

| Configuración | Cant. de canales | D_{MÁX}[m] | Espaciamiento entre geof. d_{MIN} [m] |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|--|
| MASW | 18 | 51 | 3 |
| Matriz circular (R=10,5[m]) | 16 | 21 | 4.1 |
| Configuración L | 18 | 36 | 3 |
| Configuración C | 18 | 21 | 3 |
| Configuración corchete | 18 | 21 | 3 |

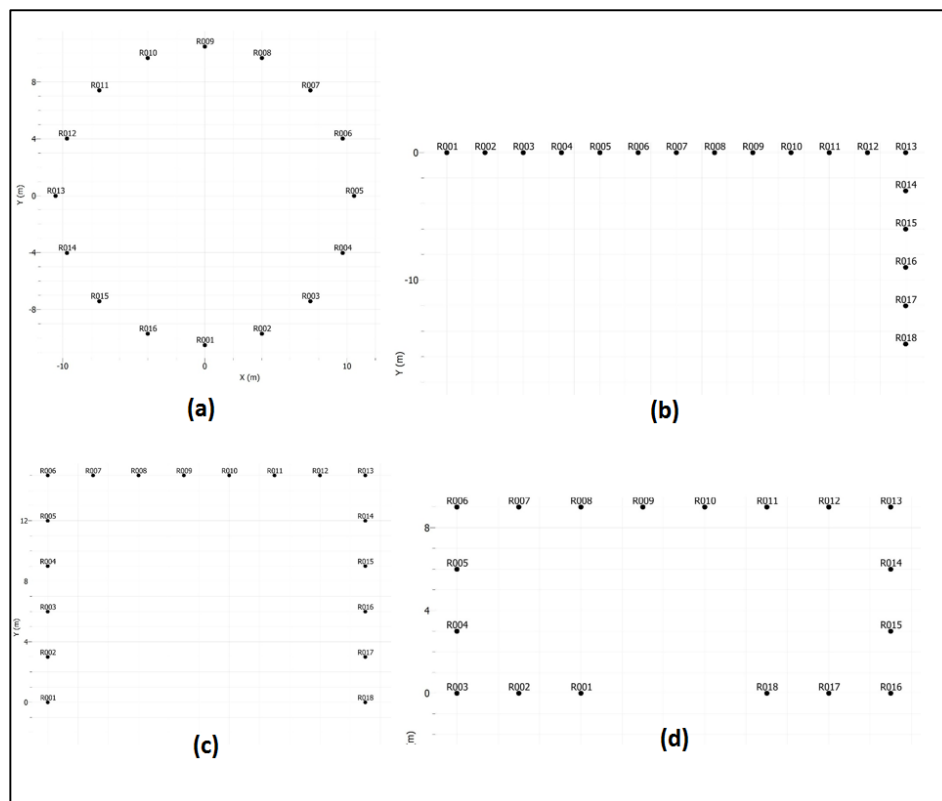


Figura 4. Esquemas de las configuraciones bidimensionales elegidas para el estudio.
(a) Configuración circular; (b) Configuración L; (c) Configuración C; y (d)
Configuración corchete.

En el Anexo C se muestran con más detalle las configuraciones elegidas.

3.2.2. Características de las mediciones

Se realizó un promedio de 3 registros por configuración en cada sitio en estudio cuyas características fueron:

Método MASW

- Tiempo de adquisición de datos: 2 [seg]
- Intervalo de muestreo: 1 [ms]
- Frecuencia: 1000 [Hz]
- Gain: 45 [dB]

Método ESAC

- Tiempo de adquisición de datos: 60 [seg]
- Intervalo de muestreo: 2 [ms]
- Frecuencia: 500 [Hz]
- Gain: 70-75[dB]

Para cada análisis se seleccionó el registro que presentara una curva de dispersión más clara y que sus resultados fueran más concluyente a la hora de lograr resultados coherentes y confiables.

3.3. Sitios de estudio

El estudio se llevó a cabo en los siguientes tres sitios de la octava región y su elección se basó, principalmente, en la disponibilidad de la utilización del equipo para realizar los ensayos en terreno.

- *Sitio 1: Stadio Italiano*

El estudio se llevó a cabo en recinto de Stadio Italiano que se ubica entrando por Av. Verdi hacia el interior por la ruta 160 de camino a Coronel, en el sector posterior al salón de cumpleaños que se ubica en dicho recinto (Figura 5).

Para tener información adicional del sector de donde fue estudiado se tomó en consideración el informe de mecánica de suelos ejecutado el año 2009 por el Laboratorio IDIEM (Informe ZC-USU N°130.316) para la construcción del pabellón de cumpleaños del sitio en estudio.

- *Sitio 2: Universidad del Bío Bío*

El sector en estudio se ubicó en la cancha de la Universidad del Bío Bío ubicada en el trayecto de Concepción a Nonguén (Figura 5).

Existen numerosas exploraciones de suelo realizadas dentro del recinto de la casa de estudios, sin embargo se logró tener acceso a un informe de mecánica de suelos (“Proyecto: Estudio de suelos, Ampliación aulas 3era etapa, Universidad del Bío Bío, campus Concepción”, N° de folio: 294, Aragón Ingeniería de Suelos Ltda.) realizado en el sector de las aulas AC y que sirvió como informe guía para la realización del análisis de medición de onda superficiales.

- *Sitio 3: Tirúa*

El tercer sitio en estudio se ubica en la cancha de la localidad de Tirúa, cercana a al liceo y la escuela del sector (Figura 5).

3.4. Procesamiento de datos

Para el procesamiento de las grabaciones obtenidas se utilizó el software de acceso libre, gratuito y de consistencia de resultados, GEOPSY.

3.4.1. Análisis MASW

Se procedió a realizar el análisis MASW en Geopsy (Anexo B.1) para cada sitio de forma independiente.



Figura 5. Ubicación zona de los sitios de estudio (Fuente mapa local: Google Earth).

Este se realizó utilizando la aplicación F-K para experimentos activos disponible en Geopsy y entregó como resultado el gráfico f/V (también llamada curva de dispersión) en donde se procedió a realizar el *picking*, acción en que manualmente se ubican los puntos de mayor intensidad en la gráfica formando una curva y en que su precisión, depende principalmente de la experiencia del ejecutor.

Se tiene que, para todos los gráficos entregados del análisis MASW, existe una concordancia de *picking* hasta una frecuencia aproximada de 12 [Hz]. Considerando los límites de las ediciones (anexo C.4) y la frecuencia hasta la que son iguales las curvas en todos los gráficos (confiables) se definió la curva de dispersión MASW.

3.4.2. Análisis ESAC

Se procedió a realizar el análisis ESAC de cada configuración en Geopsy (anexo B.2) en los sitios de estudio de forma independiente.

Este se realiza obteniendo la curva de dispersión bajo el análisis SPAC disponible en Geopsy, pero siendo solo visible y ejecutable en el programa auxiliar de Geopsy, *spac2disp*.

Ejecutando este último fue posible realizar la identificación de la zona de mayor intensidad que representa la frecuencia natural del suelo, realizar el *picking* tanto para el límite superior como para el límite inferior y con ellos seleccionar las curvas de dispersión según el análisis ESAC.

3.4.3. Inversión de la curva

La modelación de las curvas de velocidades ondas de corte se llevó a cabo en el programa auxiliar de Geopsy, *dinver*, en donde se analizaron las tres curvas de dispersión aparentes obtenidas (Anexo B4)

Se realizó un promedio de 10 iteraciones por configuración en cada sitio, independientemente, y se obtuvo un perfil estratigráfico representativo para cada configuración analizada en el sitio en estudio, considerando los siguientes criterios:

- Mejor ajuste a la curva de dispersión de ondas Rayleigh
- Repetición de patrones en perfiles estratigráficos entregados por las iteraciones.
- Experiencia del seleccionador de la curva.
- Información geológica precedente del sitio en estudio.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados de los parámetros a estudiarse subdividen de acuerdo a los tiempos de traslado de geófonos y las curvas de dispersión obtenidas a partir de los análisis.

4.1. Tiempos de proyección de matrices

Se midieron los tiempos de traslados de geófonos hacia las configuraciones elegidas (Anexo D.1) en todos los sitios en estudio y se obtuvo un promedio (Tabla 2).

Tabla 2. Estimación de tiempos en el traslado de geófonos desde la linealidad hasta su configuración bidimensional.

| Estimación de tiempo teóricos | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| Desde | Hacia | Medición 1 [min] | Medición 2 [min] | Medición 3 [min] | Tiempo [min] |
| MASW | L | 0:04 | 0:08 | 0:04 | 0:05 |
| MASW | C | 0:17 | 0:21 | 0:10 | 0:16 |
| MASW | Corchete | 0:20 | 0:33 | 0:17 | 0:23 |
| MASW | O | 0:34 | 0:32 | 0:15 | 0:27 |

Para la matrices regulares (L, C y corchete) se sumaron los tiempos de traslados, mientras que para la matriz circular se deduce que independiente de donde se ubiquen los geófonos se tendrán que transportar hacia un punto determinado del círculo, es por eso que también se

afirma que el tiempo medido, corresponde desde la linealidad hacia su configuración geométrica final.

Como es de esperar a mayor complejidad de la matriz, mayor es el tiempo que se necesita para la colocación de los geófonos.

También, es posible aseverar, que mientras más veces se lleve a cabo el traslado de los geófonos hacia una geometría en particular, menor será el tiempo requerido para dicho trabajo. Esta situación se irá repitiendo hasta que se llegue a un tiempo óptimo que será el menor tiempo que se utilizará para realizar la acción.

En la práctica, demorarse 5 o 27 [min] genera una diferencia significativa en el recurso del tiempo teniendo en cuenta el factor técnico y humano y, que las condiciones climáticas pueden afectar tanto al ejecutor como al equipo de trabajo, por realizarse al aire libre.

4.2. Resultados MASW

Se presentan los resultados obtenidos a partir de Geopsy en el análisis MASW.

4.2.1. Curvas de dispersión MASW

Como antecedente previo a la entrega de resultados, se tiene que se realizó un promedio de 3 mediciones por cada configuración en cada sitio en estudio y se eligió, para el análisis del presente estudio, el registro que entregó el mejor espectro, en cuanto a claridad y tendencia del modo fundamental.

Las curvas obtenidas en el análisis MASW eran consistentes y el picking realizado en todas concluyó que hasta aproximadamente una frecuencia de 12 [Hz] la medición MASW es confiable. Se presentan en más detalle en el Anexo D, ubicadas en cada estudio independientemente.

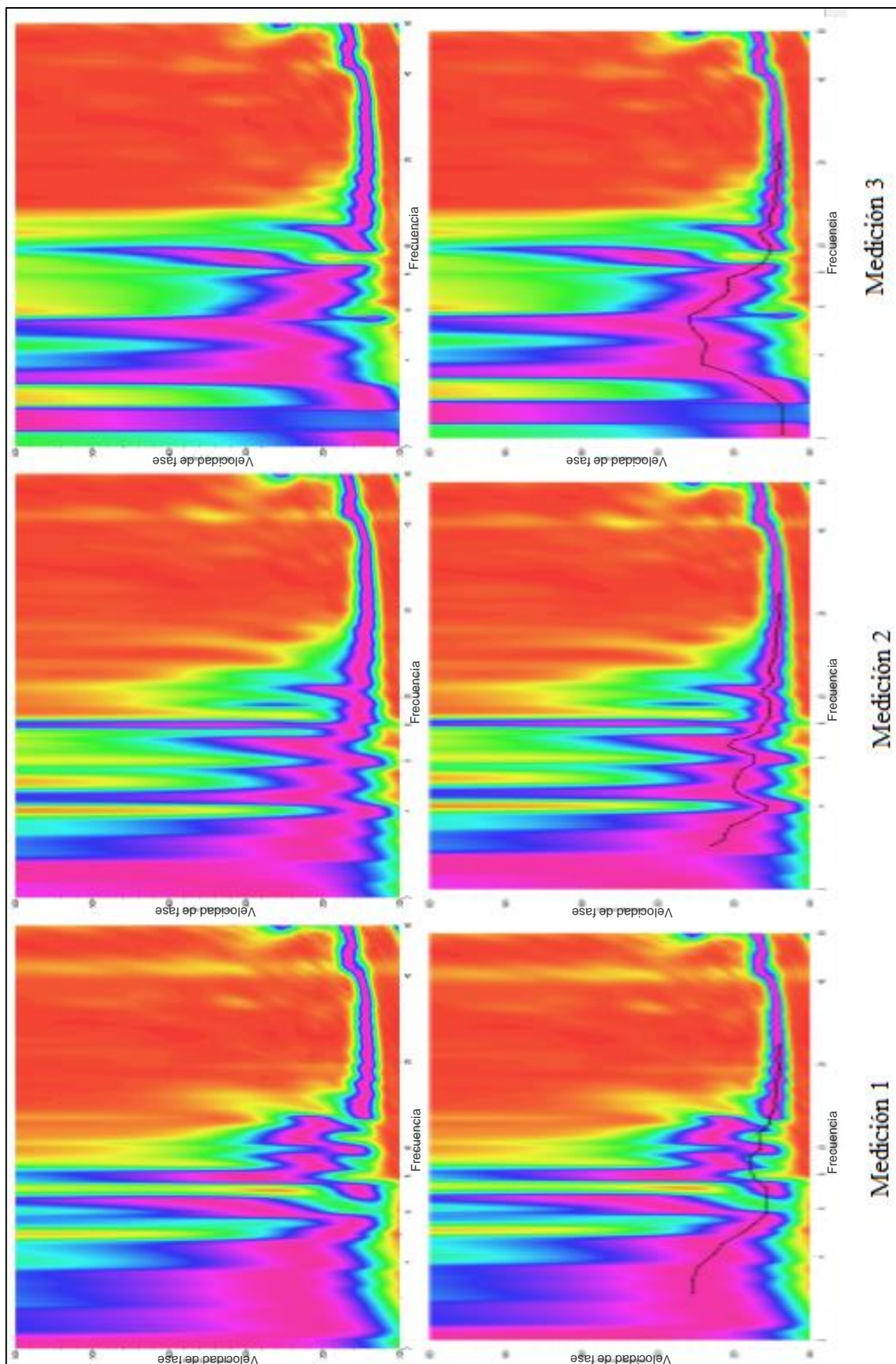


Figura 6. Curvas de dispersión de las mediciones de Universidad del Bío Bío.

Para demostrar dicha situación se muestra un análisis de sitio en estudio en el que se realizó la selección de puntos en el espectro de V/f obtenido de los resultados.

Se observa en los espectros (Figura 6) que las zonas de mayor intensidad en las mediciones difieren en gran magnitud en el rango de frecuencias inferior a los 12 [Hz] y, por ende, también difiere la selección de puntos escogidos.

4.2.2. Perfiles estratigráficos MASW

En los perfiles estratigráficos de las curvas de dispersión aparente obtenidas (Figura 7) de las tres mediciones realizadas es posible observar que hasta una profundidad aproximada de 6 [m] todas las mediciones se comportan de forma muy similar y el valor del Vs difiere con un porcentaje de error casi despreciable.

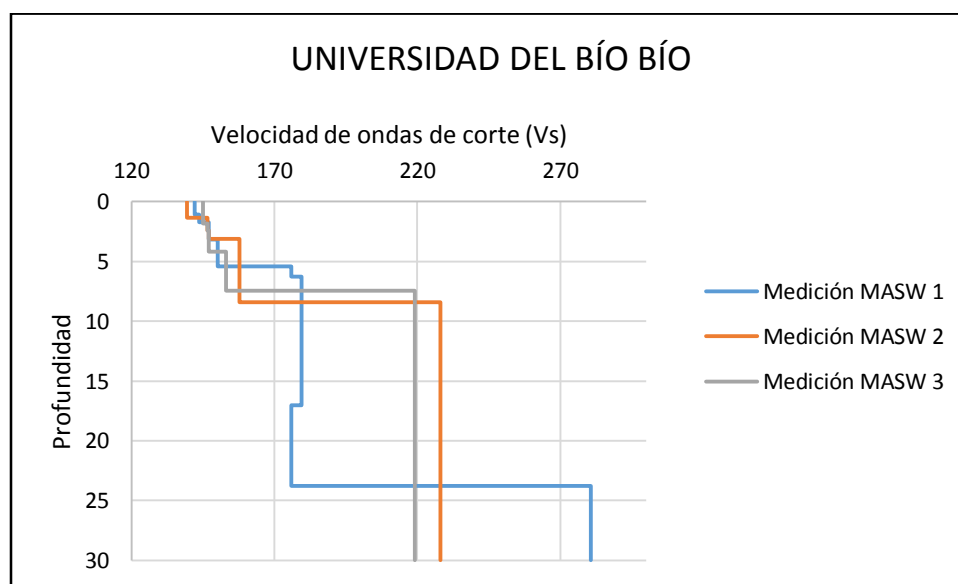


Figura 7. Perfiles estratigráficos entregados por las mediciones solo en análisis MASW en Universidad del Bío Bío.

4.3. Resultados ESAC

Se presentan los resultados obtenidos a partir de Geopsy en el análisis ESAC.

4.3.1. Curvas de dispersión ESAC

.Las curvas de dispersión obtenidas por el método ESAC para cada estrato según su configuración es posible apreciarla en el Esquema 3 y con mayor detalle en el Anexo D.

El espectro construido a partir de las mediciones circulares (ver Figura 8) es, claramente, el que presenta mayor intensidad de señal y es posible distinguir de mejor forma el sector en donde se sitúa el modo fundamental de la curva.

Se aprecia que a mayor tendencia de cerrar la configuración, mejor es la resolución del espectro entregado; la configuración corchete es la que presenta un gráfico V/f que más se asimila al entregado por la matriz base, mientras que la configuración L entrega el espectro menos intenso y definido.

También se acota que la elección del registro a evaluar presentó una mayor variación en las señales emitidas por la configuración L y se fueron viendo más estables en medida que la configuración tendía a cerrarse.

La definición de las curvas de dispersión aparente fue sencillo realizarlo en las matrices circular y corchete, en la matriz C presentó un poco más de complejidad y la matriz L generó los mayores problemas, ya que sin tener antecedentes previos (la realización de los otros picking) era fácil incorporar conglomeraciones de puntos que no pertenecían al modo fundamental. Los picking realizados en todos los espectros se encuentran expuestos en el Anexo D.

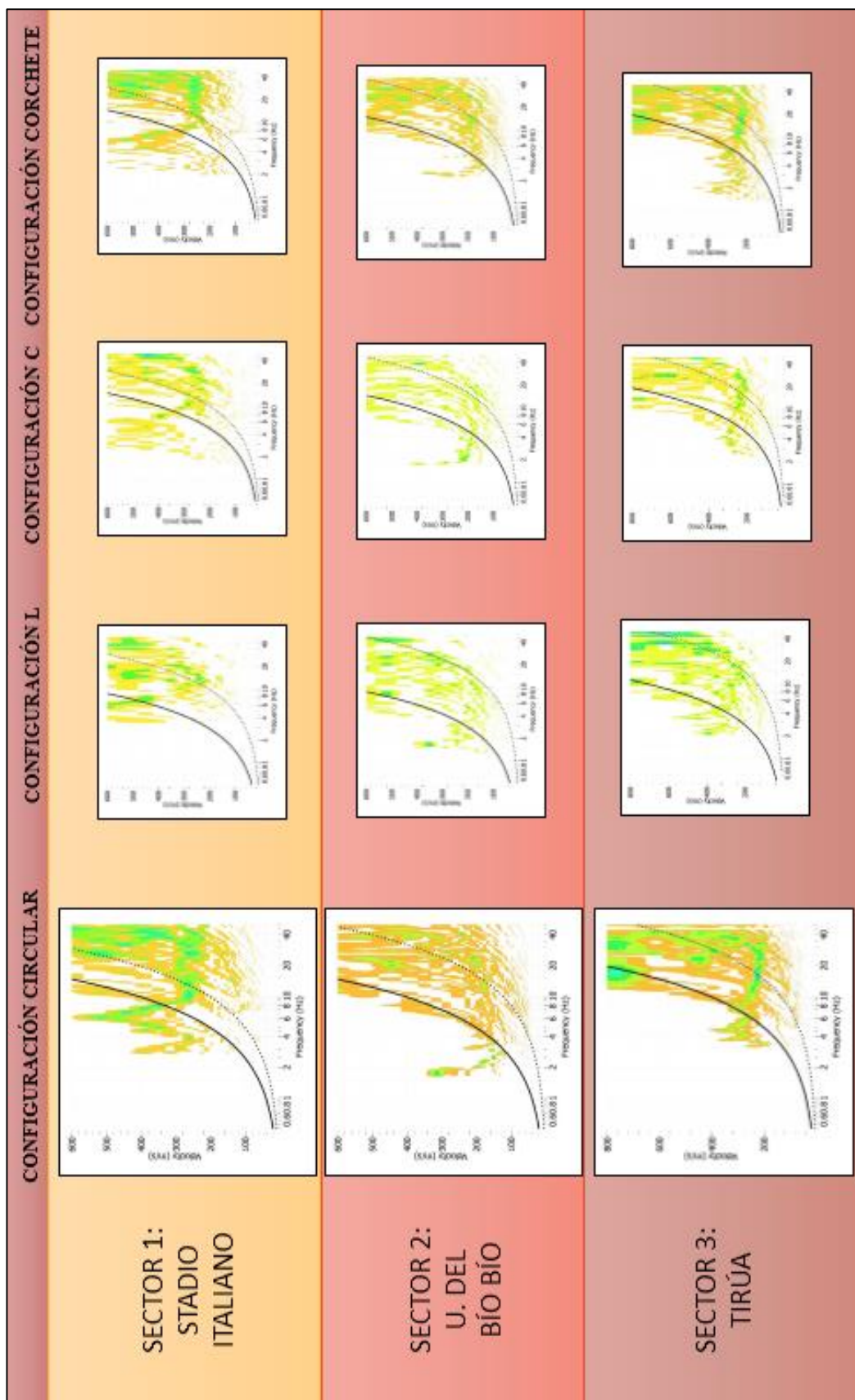


Figura 8. Curvas de dispersión entregadas por el análisis ESAC en las diferentes configuraciones y sitios en estudio.

Es visible en el Esquema 4 que la medición L posee un límite superior mayor que las configuraciones de las otras mediciones, esto se debe a que la $D_{MÁX}$ de 36 [m] difiere de los 21 [m] que poseen las configuraciones circulares, C y corchete. Al realizar el análisis de profundidad se verifica que tal longitud es innecesaria para la medición del V_{s30} , puesto que los 21 [m] que se presenta como la menor $D_{MÁX}$, es suficientes para llegar a la profundidad buscada de 30 [m].

4.3.2. Perfiles estratigráficos ESAC

Se obtuvieron los perfiles estratigráficos presentados en los Gráficos 3, 4 y 5. Se pueden observar de forma independiente en el Anexo D, clasificados según sitio en estudio.

.El perfil estratigráfico del sitio 1 (Figura 9) es monótonamente creciente y presenta esta característica en todas mediciones de las distintas configuraciones en planta.

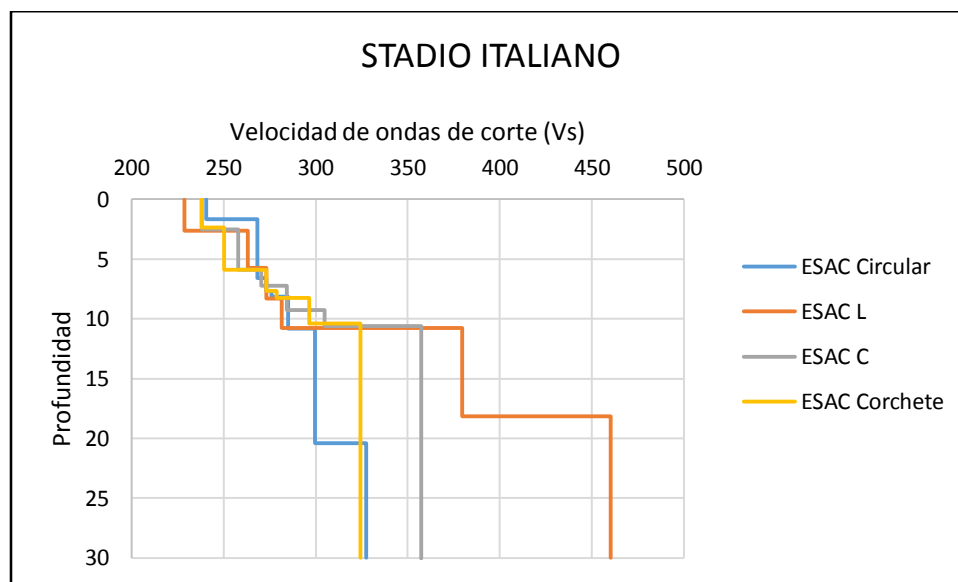


Figura 9. Perfiles estratigráficos entregados por el análisis ESAC en las diferentes configuraciones en Stadio Italiano.

El perfil estratigráfico del sitio 2 (Figura 10) presenta un estrato de mayor densidad alrededor de los 20 [m], estrato que se ve modificado según tipo de medición; en la configuración C

está presente cerca de los 10[m], mientras que en la configuración corchete se identifica por sobre los 20[m].

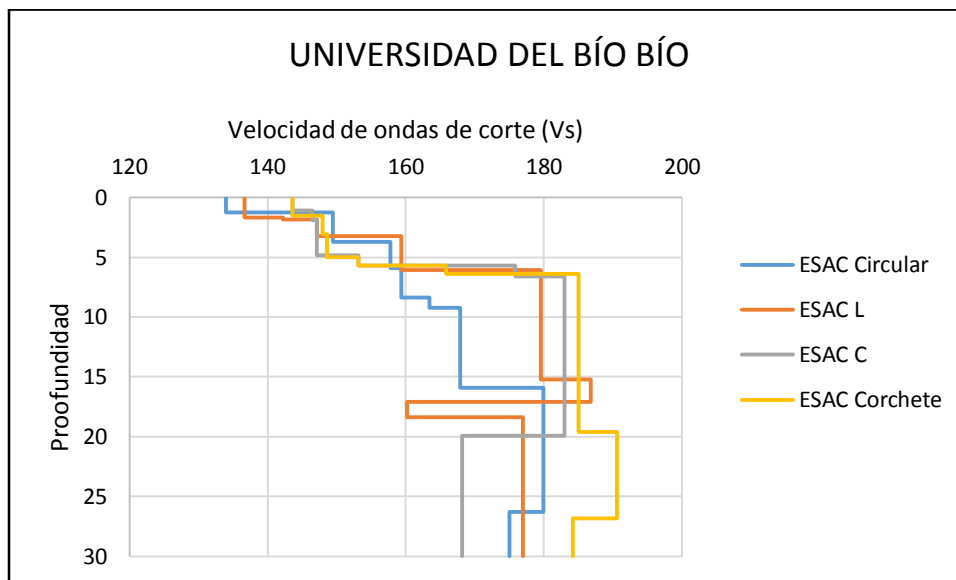


Figura 10. Perfiles estratigráficos entregados por el análisis ESAC en las diferentes configuraciones en Universidad del Bío Bío.

El perfil estratigráfico del sitio 3 (Figura 11) presenta un aumento creciente de Vs que aumenta con la profundidad, exceptuando un pequeño tramo que arroja MASW en la superficie del suelo.

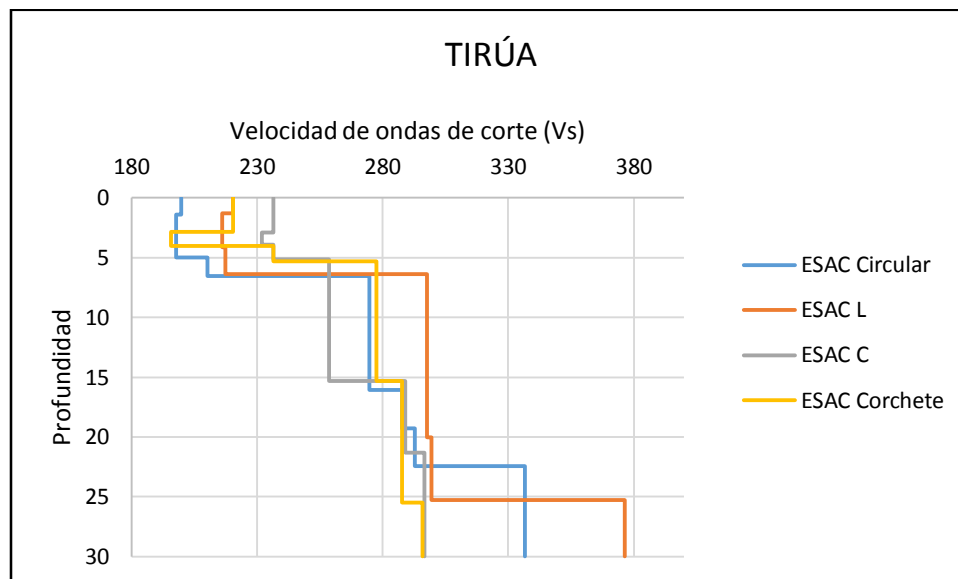


Figura 11. Perfiles estratigráficos entregados por el análisis ESAC en las diferentes configuraciones en Tirúa.

Se puede observar que todas las mediciones sobreestiman el valor del Vs, una característica de gran importancia en la obtención del Vs30 y, posterior, clasificación del suelo según el DS N°61.

4.4. Estimación del Vs30

Se realizó el cálculo del Vs30 (según Anexo A.3) para todos los sitios de estudios considerando todas las configuraciones estudiadas de forma independiente según muestra el resumen de la Tabla 3.

Tabla 3. Vs30 obtenido en los sitios en estudios según la configuración ESAC evaluada.

| Sitio de estudio | Vs30 [m/s] | | | | Tipo de suelo |
|----------------------------|--------------|-------|-------|----------|---------------|
| | Circular | L | C | Corchete | |
| 1. Estadio Italiano | 295,2 | 346,1 | 317,6 | 299,1 | Suelo D |
| 2. Universidad del Bío Bío | 167,5 | 171,1 | 169,9 | 177,7 | Suelo E |
| 3. Tirúa | 268,8 | 285,2 | 269,8 | 270,1 | Suelo D |

Tabla 4. Porcentajes de error de los Vs30 de la Tabla 3.

| Sitio de estudio | Errores | | |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | L | C | Corchete |
| 1. Estadio Italiano | 17.2% | 8.2% | 5.8% |
| 2. Universidad del Bío Bío | 0.9% | 0.7% | 4.6% |
| 3. Tirúa | 6.1% | 5.4% | 0.1% |
| Promedio | 8.1% | 4.8% | 3.5% |

El sitio 1 presenta en su configuración básica un Vs30 de 295 [m/s]. Esta velocidad es superada crecientemente en medida que se abre la configuración con la que se realizó la medición ESAC, es decir, le sigue la medición corchete (299 [m/s]), luego la medición C (318 [m/s]) y, por último, la medición L (346,1 [m/s]). Por lo tanto, el suelo es clasificado como suelo **tipo D**, medianamente denso o firme.

El sitio 2 es la localidad estudiada que presenta el menor Vs30 y coincide con la información de apoyo del sitio que se contó para realizar el presente estudio clasificando al suelo como **tipo E**, suelo de compacidad o consistencia mediana.

Las mediciones realizadas con la configuración L no es una medición confiable, puesto que tal como evidenció su perfil estratigráfico no se logró una selección eficiente. Esto se puede explicar, porque, evidentemente, el suelo 2 es de mala calidad, y la medición ESAC no respondió correctamente a este tipo de suelos.

En el sitio 3 se presenta una consistencia en los resultados de las mediciones de la configuración base, C y corchete, mientras que la medición L presentó la mayor diferencia con la configuración circular. Este suelo puede ser clasificado como **tipo D**, suelo medianamente denso o firme.

Se puede observar una clara sobreestimación en los valores del Vs30, una característica preocupante teniendo en consideración que la mayor diferencia se presenta en el sitio 1 con la matriz L de casi 50 [m/s] por sobre la matriz circular y que puede influir en la clasificación del suelo y, posterior, tratamiento del mismo.

Se presume que a mejores condiciones del suelo (como tipo C, B y A), de mejor calidad será el registro obtenido y, por ende, mejores y más claros resultados entregados.

5. CONCLUSIONES

El método de autocorrelación extendido ESAC es una metodología de ondas superficiales novicia en los MOS que proviene del método SPAC y utiliza como materia prima la vibración ambiental producida por las actividades diarias que realizamos. La principal característica diferenciadora de este método, en relación a los otros métodos existentes, es la configuración bidimensional de los geófonos (aleatoria, regular, simétrica, etc.) en su ubicación en el terreno a estudiar.

Existen numerosas configuraciones de matrices bidimensionales para realizar las mediciones ESAC, pero, en la práctica, su aplicación genera una gran demanda de tiempo y energía (configuración base circular), que solo es posible realizarla para estudios específicos de la utilización del método y no como medición habitual del ingeniero.

Es por esta última razón que se eligieron las configuraciones en planta con forma de L, C y corchete para realizar estudios ESAC, ya que derivan simple y rápidamente de la configuración lineal MASW (popularmente utilizada en la obtención de velocidades en estratos superficiales o de frecuencias altas), su aplicación será cómoda y funcional para el ingeniero en las mediciones en terreno.

La matriz que menos demoró en su formación fue la matriz L con un promedio de ejecución de 5 [min], la que más demoró fue la matriz corchete con 23 [min]. Se demostró en terreno que la matriz base circular fue la que generó más desgaste energético y de tiempo (27 [min]) dos factores cruciales y, que el ingeniero busca disminuir.

Los espectros entregados por el análisis de los registros capturados en las mediciones de las diferentes configuraciones elegidas presentaron patrones claros y coincidentes en las mediciones de todos los sitios

- La medición de configuración L es la que presenta el espectro de velocidades menos claro y resulta de gran complejidad definir la curva de dispersión aparente con exactitud.

- Las curvas de dispersión obtenidas por la configuración C presentan intensidades suficientes para realizar una selección de puntos confiable, puesto que se logra identificar una consecutividad de nubes.
- Los registros estudiados con la configuración corchete son, sin lugar a dudas, los más cercanos a la configuración circular y, por ende, los gráficos en los que se logró identificar las curvas con mayor facilidad.

Al analizar las curvas de dispersión aparente del método MASW y el método ESAC es posible verificar que el método MASW genera curvas de dispersión confiable hasta aproximadamente los 12 [Hz], mientras que el método ESAC comienza alrededor desde frecuencia mencionada (con una desviación superior) y, hasta aproximadamente los 8 [Hz], frecuencia suficiente para la obtención del Vs30.

El Vs30 obtenido en las mediciones es posible visualizarlo en la Tabla 3 del cual es posible desprender que las matrices en estudio presentaron, en general, sobreestimaciones del valor del Vs30 y que la matriz corchete fue la configuración que menos se alejó de presentada por la matriz circular.

En base a todo lo anterior, se concluye que la matriz más eficiente para ser utilizada en terreno por el ingeniero es la **matriz C**, dado las siguientes justificaciones:

- El tiempo de formación de la configuración de geófonos promedió 16 [min] y se afirma, que mientras más práctica se tenga en la formación de la configuración en planta, el tiempo irá disminuyendo paulatinamente hasta llegar a un óptimo aproximado de 10 [min] (tiempo de la última medición realizada bajo esta configuración).
- Los espectros entregados como curvas de dispersión son suficiente para lograr identificar el modo fundamental de la curva (Anexo D, Gráficos 13, 35 y 57). Si bien la configuración G representa de mejor forma este ítem, el tiempo de que demora realizar la formación corchete es superado en promedio 7 [min] por la matriz corchete.
- La realización de los picks para la formación de las curvas de dispersión aparente en método ESAC se realizó de forma sencilla y clara (Anexo D, Gráficos 14, 36 y 58).

- La similitud entre perfiles estratigráficos entre la matriz no es tan cercana como la obtenida a partir de la configuración corchete, pero no es tan alejada como la de la configuración L.
- El Vs30 obtenido por la configuración C presenta el porcentaje de error medio de 4,8% (Tabla 4). Aproximadamente la mitad del 8,1% que entrego la matriz L menos de 1% diferente de los entregados por la matriz corchete (3,5%).

6. REFERENCIAS

1. Akki, K (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. Earthquake Reserash Intitute. Mayo 28 - Junio 30, 1957).
2. Equipo Geopsy. Distribución y mantenimiento de software Geopsy de código abierto para la investigación y las aplicaciones geofísicas. <http://www.geopsy.org>
3. Errazuriz, J. T. (2012). Microzonificaciones sísmicas en ciudades del mundo y discusión sobre la aplicabilidad en la ciudad de Santiago. Tesis, Depto. Ing. Civil, Universidad de Chile, Santiago.
4. Manual de Aplicación de Tecnicas Goeíficas basadas en ondas de Superficie para la Determinacion del Parámetro Vs30. Humire, F., Leyton, F., Saéz, E.
5. Ohori, M., Nobata, A. e Wakamatsu, K. (2002). A comparison of ESAC and FK methods of estimating phase velocity using arbitrarily shaped microtremor arrays. Bulletin of the Seismological Society of America,
6. Okada, H. (2003). The Microtremor Survey Method. Geophysical Monograph Series, v. 12, Society of Exploration Geophysicists,
7. Parolai, S., Richwalski, S.M., Milkereit, C. (2005). S-wave Velocity Profiles for Earthquake Engineering Purposes for the Cologne Area (Germany). Bulletin of Earthquake Engineering (2006) 4:65–94.
8. Roma, V. MASW-REMI-ESAC-HVSR for the Geotechnical Seismic Characterization of the Ground. www.masw.it
9. Roma, V. (2006). Caratterizzazione sismica dei suoli con il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves). Universidad de Pisa, Pisa, Italia.



ANEXOS:

“ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DE DIFERENTES CONFIGURACIONES DE GEÓFONOS PARA LA UTILIZACIÓN DEL MÉTODO ESAC”

ÍNDICE ANEXOS

ANEXO A

| | |
|---|----|
| A.1. ONDAS SÍSMICAS | 45 |
| A.1.1. Ondas sísmicas corporales | 45 |
| A.1.2. Ondas sísmicas superficiales | 46 |
| A.2. OBTENCIÓN DEL VS | 47 |
| A.2.1. Obtención de la curva de dispersión de ondas Rayleigh | 47 |
| <i>A.2.1.1. Velocidad de grupo y Fase</i> | 47 |
| <i>A.2.1.2. Fenómeno de dispersión</i> | 48 |
| <i>A.2.1.3. Métodos de medición y obtención de la curva de dispersión de ondas Rayleigh</i> | 50 |
| A.2.1.3.1. Métodos Activos..... | 50 |
| A.2.1.3.2. Métodos Pasivos | 51 |
| A.2.1.3.3. Métodos Híbridos | 51 |
| A.2.2. Obtención de la curva de dispersión aparente | 52 |
| A.2.3. Inversión de la Curva | 54 |
| A.3. OBTENCIÓN DEL VS30 | 55 |

ANEXO B

| | |
|--|----|
| B.1. ANÁLISIS DE MEDICIÓN MASW | 56 |
| B.1.1. Cargar la señal obtenida en terreno en la medición ESAC. | 60 |
| B.1.1. Cargar la señal obtenida en terreno en la medición MASW. | 56 |
| B.1.2. Edición ubicación de geófonos | 61 |
| B.1.2. Edición ubicación de geófonos y de fuente de ruido artificial. | 57 |
| B.1.3. Procesamiento de F-K activo y definición de parámetros. | 58 |
| B.1.3. Procesamiento de SPAC y definición de parámetros | 62 |
| B.1.4. Procesamiento en spac2disp | 64 |
| B.1.4. Resultados | 59 |
| B.1.5. Picking | 60 |
| B.2. ANÁLISIS DE MEDICIÓN ESAC | 60 |
| B.4. INVERSIÓN | 66 |
| B.4.1. Cargar las curvas definidas | 66 |
| B.4.2. Definición de parámetros | 68 |
| B.4.3. Obtención de Vs30 y elección de estratigrafía representativa. | 69 |

ANEXO C

| | |
|---|----|
| C.1. MATRIZ BASE | 71 |
| C.2. CONFIGURACIONES BIDIMENSIONALES | 71 |
| C.3. DISTANCIAS MAXIMAS Y MINIMAS | 73 |
| C.4. LÍMITES EN LA CURVA DE DISPERSIÓN | 74 |

ANEXO D

| | |
|--|------------|
| D.1. TIEMPOS DE FORMACIÓN DE CONFIGURACIONES..... | 75 |
| D.2. CURVAS DE DISPERSIÓN Y CALCULO DE VS30..... | 75 |
| D.2.1. Sector 1: Stadio Italiano..... | 75 |
| <i>D.2.1.1. Medición MASW.....</i> | <i>76</i> |
| <i>D.2.1.2. Medición ESAC.....</i> | <i>77</i> |
| D.2.2. Sector 2: Universidad del Bío Bío..... | 85 |
| <i>D.2.2.1. Medición MASW.....</i> | <i>85</i> |
| <i>D.2.2.2. Medición ESAC.....</i> | <i>86</i> |
| D.2.3. Sector 3: Tirúa..... | 94 |
| <i>D.2.3.1. Medición MASW.....</i> | <i>94</i> |
| <i>D.2.3.2. Medición ESAC.....</i> | <i>95</i> |
| D.2.4. Resumen de Vs30..... | 102 |

ANEXO A: TEORÍA SECUNDARIA

A.1. ONDAS SÍSMICAS

Los movimientos o perturbaciones que se localizan en la Tierra son expresados mediante una combinación de ondas sísmicas que se presentan tanto en el interior de la Tierra como en la superficie.

La clasificación de estas ondas radica en el lugar de propagación que tienen, ya que es este mismo el que influye en la trayectoria de cada una de ellas. Es por esto que se pueden clasificar en ondas de cuerpo, si las ondas transmiten el movimiento por el interior de la Tierra; u ondas superficiales si el movimiento es expresado en la corteza superficial de la Tierra.

A.1.1. Ondas sísmicas corporales

Son las ondas que viajan en el interior del planeta Suelen tener trayectorias curvas debido a la variada densidad que se encuentra dentro del interior de la Tierra. Dentro de ellas se logran diferenciar dos tipos de movimientos:

Ondas Primarias (P): Como su nombre lo dice, son las primeras en expresarse luego del movimiento telúrico y su acción es de compresión y dilatación de forma longitudinal a la dirección de la propagación (imagen a1).

Ondas Secundarias (S): Provocan las oscilaciones del movimientos, ya que su camino lo realizan en forma trasversal a la dirección de propagación. En general, son más lentas que las primarias debido a la trayectoria sinusoidal y, por esto mismo, llegan posterior a las ondas primarias (imagen a1).

A.1.2. Ondas sísmicas superficiales

Son las expresiones superficiales de las ondas internas, es decir, son el tipo de onda que se genera en la superficie debido a la acción de las ondas que viajan al interior de la Tierra. Se propagan en la interface en dirección paralela, con amplitud que decrece con la distancia y profundidad. Es posible distinguir dos tipos de ondas que causan distinto tipo de movimiento en la superficie:

Ondas Love: Son las ondas que se traducen en movimientos horizontales de corte en la superficie (imagen a1).

Ondas Rayleigh: Su movimiento genera en las partículas una combinación vertical (de corte y horizontal (compresión), o sea generan un movimiento elíptico retrogrado en la superficie del suelo. (Imagen a1).

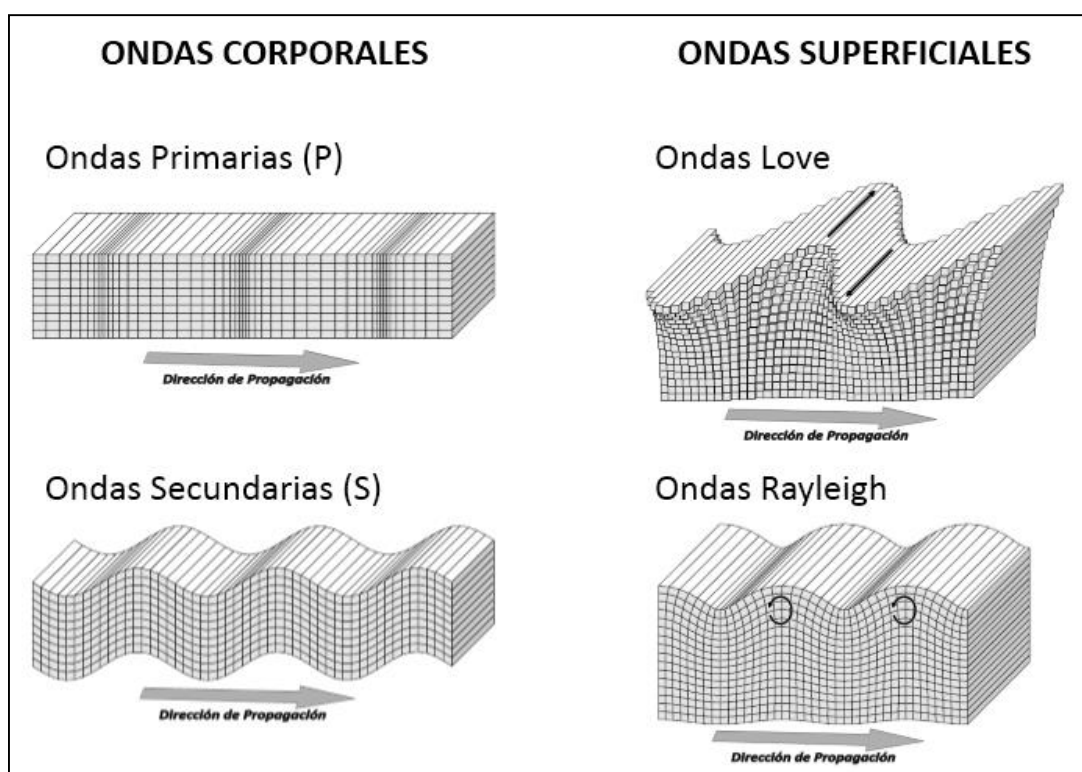


Figura A1: Comportamiento esquemático de las ondas corporales y superficiales.

A.2. OBTENCIÓN DEL VS

A.2.1. Obtención de la curva de dispersión de ondas Rayleigh

A.2.1.1. Velocidad de grupo y Fase

La utilización de los conceptos velocidad de fase y velocidad de grupo es de importancia para para la definición de los fenómenos mediante los cuales se basa la obtención del Vs.

La rapidez que tiene una onda sísmica desde la fuente de perturbación hasta la superficie del suelo se denomina *velocidad de grupo*, y es una velocidad de propagación de la onda real, ya que tiene interpretación física y es posible determinarla mediante la fórmula básica:

$$V = \frac{d}{t}$$

Ecuación A1. Cálculo de velocidad de grupo.

Donde,

V: Velocidad de grupo

d: Distancia radial desde el centro de la perturbación.

t: Tiempo que demora en llegar la onda a la superficie.

En cambio, la *velocidad de fase* es la rapidez representada por una onda plana que viaja en la misma dirección de un medio determinado. En medios estratificados, como el suelo, la velocidad de fase depende de la dispersión de la frecuencia de un determinado estrato, por lo que si cada estrato tiene una frecuencia distinta, la velocidad de fase será diferente a cada profundidad.

La diferencia gráfica se muestra en la Figura A2 en que se aprecia claramente que la velocidad de grupo viaja radialmente, mientras que la velocidad de fase depende del medio en el cual se propague la onda sísmica.

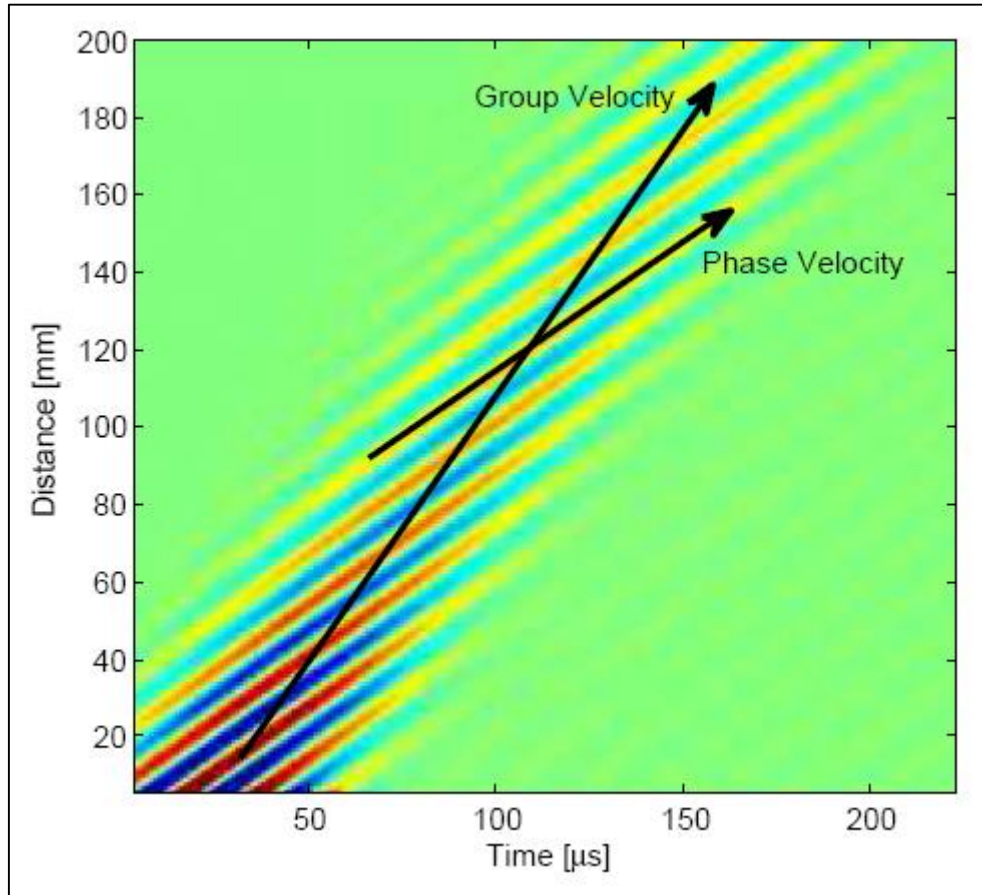


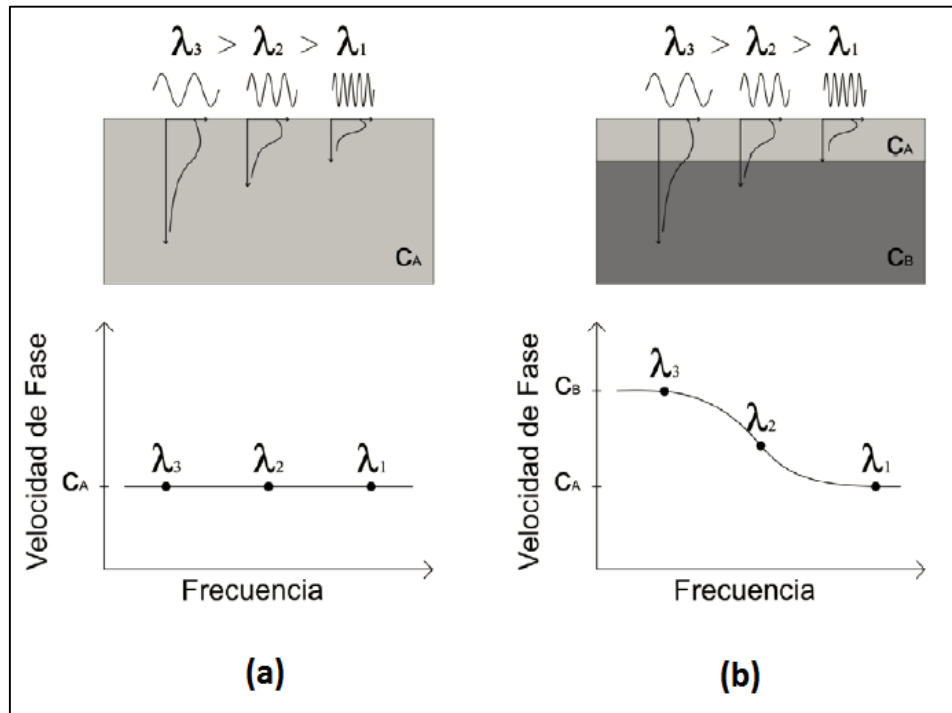
Gráfico A1. Velocidad de fase (rapidez en cada medio representado por colores) y velocidad de grupo (representada con negro, radialmente desde $d=0$).

A.2.1.2. Fenómeno de dispersión

Se conoce como *dispersión* a la característica que posee la velocidad de propagación (velocidad de fase) de las ondas Rayleigh de:

- Ser igual en un estrato homogéneo
- Depender de la frecuencia o longitud de onda en espacios estratificados.

Tal como ejemplifica el Esquema A2



Esquema A2. (a) Ejemplificación de la dispersión en un estrato homogéneo (b) y en espacios heterogéneos.

Una de las ventajas de la utilización de las ondas Rayleigh es que el mayor porcentaje de energía generado por una fuente en la superficie es transmitido en forma de estas ondas (Richart y Woods, 1970).

Los métodos geofísicos que recurren a la medición de ondas superficiales utilizan la propiedad de dispersión que poseen las ondas Rayleigh (Tokimats 1997), puesto que es la mejor forma de obtener el perfil de velocidades del suelo, considerando que el suelo es un medio completamente estratificado de variaciones de rigideces y, por tanto, de velocidades.

El tren de ondas Rayleigh movilizan al suelo con diferentes velocidades de fases, por lo tanto con diferentes frecuencias y cada frecuencia a una profundidad específica (Khaheshi el al 2010). Cuando las frecuencias son grandes la velocidad de fase depende de los estratos más superficiales, mientras que si las frecuencias son bajas, dependerá de estrato más profundos (Strobbia, 2003).

La importancia de este fenómeno radica es que a partir de su cálculo y análisis se es posible obtener información de la distribución de las ondas de corte del suelo en relación a la profundidad, parámetro dinámico fundamental en la caracterización del suelo y construcción de obras civiles.

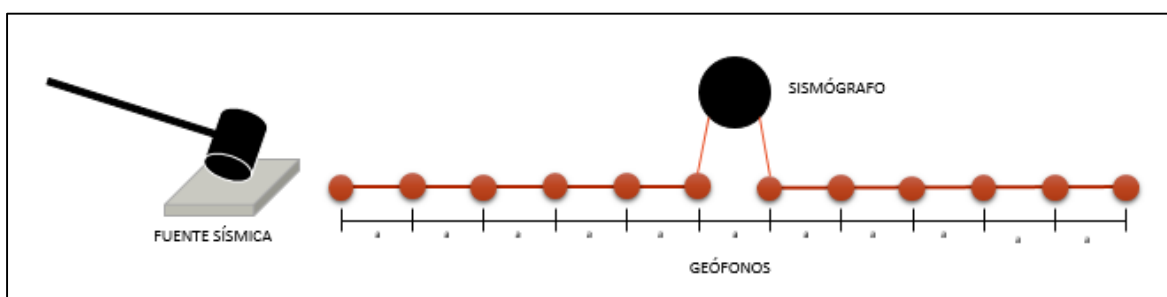
A.2.1.3. Métodos de medición y obtención de la curva de dispersión de ondas Rayleigh

Los métodos de medición de ondas superficiales se clasifican principalmente por el recurso al cual se acogen a la hora de realizar la toma de datos en terreno pudiendo ser activos si la perturbación es artificial; pasivo si utilizan el ruido ambiental; e híbrido si utilizan las dos formas anteriores (Esquema A3).

A.2.1.3.1. Métodos Activos

Los MOS se consideran activos si la fuente que utiliza como recurso para realizar la medición es una fuente vertical artificial provocada generalmente por el golpe de un martillo, una explosión, etc.

Los métodos característicos que utilizan esta metodología son los métodos *SASW*, *MASW* y *F-K*.

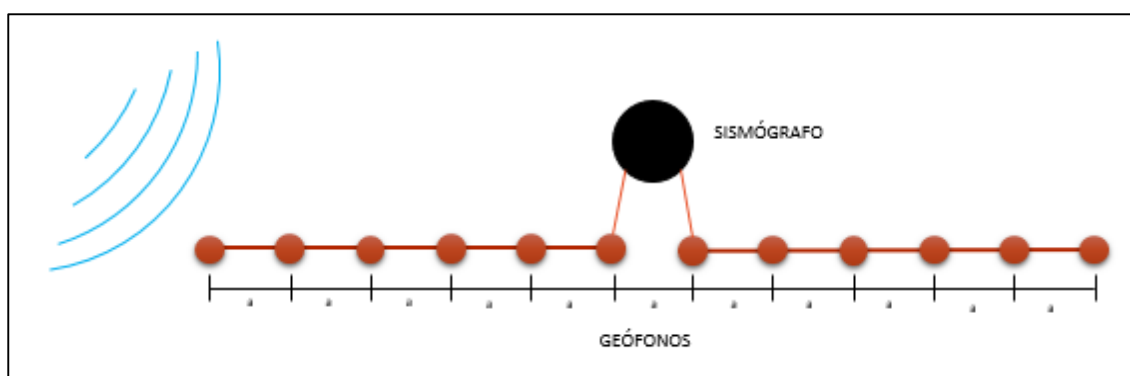


Esquema A1. Esquema de formación de básica de elementos para las mediciones híbridas.

A.2.1.3.2. Métodos Pasivos

Los métodos pasivos utilizan como recurso base el ruido ambiental y lo consideran uniforme en el espacio. Como el ruido ambiental posee bajas frecuencias estos métodos logran alcanzar mayores profundidades de medición. En espacios industriales o donde se generen fuentes de ruido artificial considerables no se recomienda realizar este tipo de técnica puesto que los resultados no serán confiables.

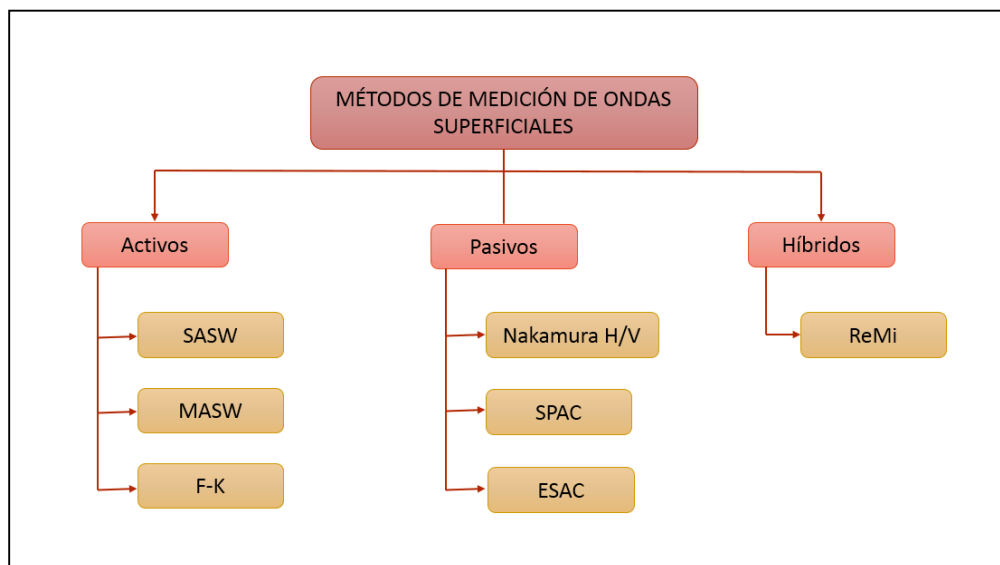
Los métodos más estudiados en esta categoría son los métodos de *Nakamura H/V*, *SPAC* y *ESAC*.



Esquema A2. Esquema de formación de básica de elementos para las mediciones pasivas.

A.2.1.3.3. Métodos Híbridos

Utilizan la combinación de ambas técnicas para la obtención de resultados confiables. El método más popular es el método *ReMi* de microtremores.



Esquema A3. Clasificación de los métodos de medición de ondas superficiales.

A.2.2. Obtención de la curva de dispersión aparente

Como resultado del proceso anterior se genera un espectro de velocidad de fase (o lentitud) v/s frecuencias en el cual se realiza el proceso de “elegir” la curva de dispersión aparente que corresponderá al modo fundamental o frecuencia natural del suelo. La elección de las curvas se realiza considerando que el modo fundamental tiende a verse más claramente en las curvas de dispersión en medida de que el suelo es más homogéneo o sitios normalmente dispersivos, donde la densidad o rigidez del suelo aumenta monótonamente con la profundidad. (Roma, 2002). Este importante proceso de selección es de exclusiva responsabilidad del ejecutor y depende de su criterio y experiencia.

En el método MASW se escogen las zonas correspondientes a los máximos de cada modo (Roma, 2006), los cuales se pueden identificar en el centro de la franja de mayor intensidad del espectro. Es posible analizar tanto el modo fundamental como los superiores.

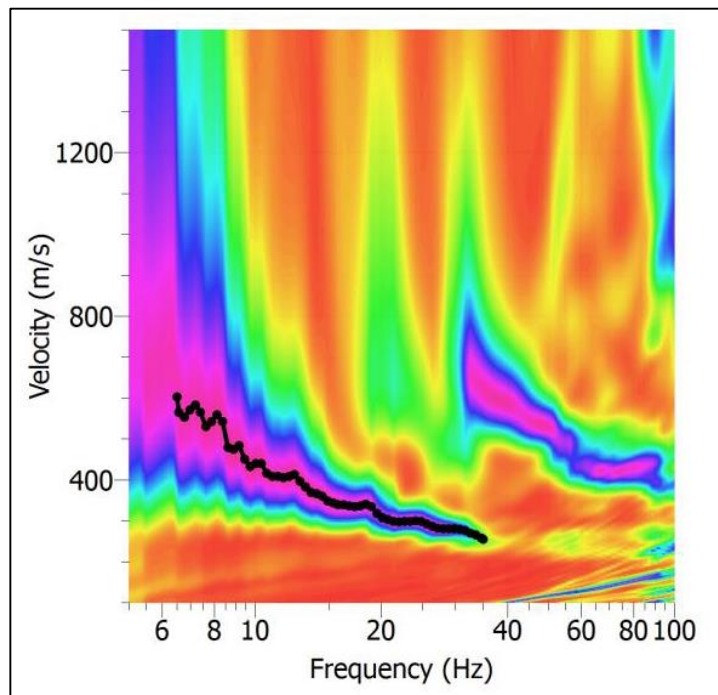


Gráfico A2. Ejemplificación de curva aparente MASW elegida en el modo fundamental.

En el método ESAC se identifica las zonas de mayor intensidad y escogen dos curvas de dispersión aparente, una ubicada en el límite superior del tramo y la otra en el límite inferior, de modo que encierren el tramo elegido como modo natural.

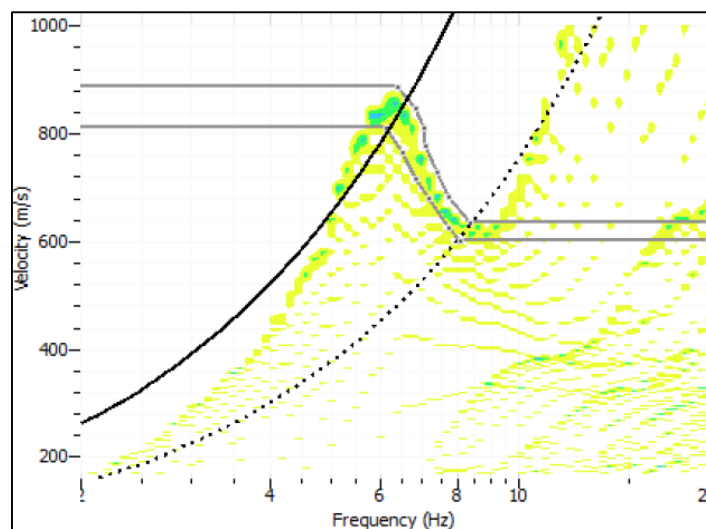


Gráfico A3. Ejemplificación de curvas aparentes ESAC elegidas en el modo fundamental.

A.2.3. Inversión de la Curva

Invertir la curva de dispersión de las ondas Rayleigh tiene como objetivo la modelación de las ondas de corte y para la realización de este proceso se utiliza el método de inversión aleatoria o de Montecarlo, puesto que al ser un proceso reiterativo los softwares disponibles pueden llevar a cabo la actividad sin mayor complejidad.

La inversión de Montecarlo considera inversiones aproximadas e itera siempre considerando el menor error disponible. Además se afirma de que las posibilidades no converger en un resultado óptimo, en el método de Montecarlo, son mínimas (Khareshi et al 2010).

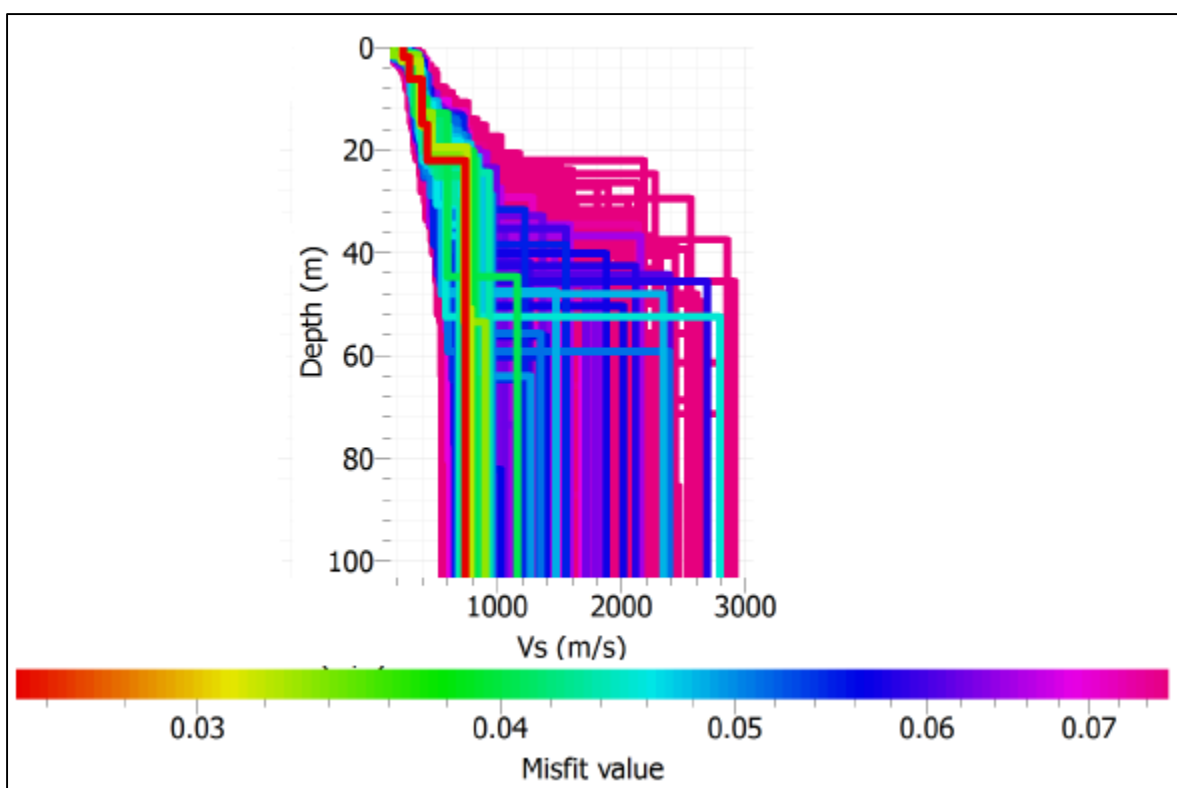


Gráfico A4. Ejemplificación de perfiles estratigráficos obtenidos con método iterativo o de Montecarlo.

A.3. OBTENCIÓN DEL VS30

El decreto N°61 de “Diseño sísmico de edificios” recomienda que el cálculo del Vs30 se realiza según la Ecuación A1 considerando las velocidades de corte Vs, ponderadas hasta los 30 [m] de profundidad.

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

Ecuación A2. Cálculo de Vs30.

Donde,

- V_{s-1} : Velocidad de ondas de corte del estrato i.
- h_i : Espesor del estrato i.
- n: número de estratos presentes hasta los 30[m] de profundidad

De la Ecuación A1 se desprende que el Vs30 corresponde a un promedio ponderado del Vs de los estratos hasta una profundidad de 30 [m]. Un estrato de espesor elevado tiene más influencia en la obtención de este resultado, es por esto que es necesario la disponibilidad del perfil estratigráfico obtenido en el proceso de inversión de las ondas Rayleigh.

ANEXO B: GEOPSY

Todo el procesamiento de análisis de las señales se realizó en el programa de acceso libre y gratuito GEOPSY para entregar resultados sólidos y confiables que sean reconocidos bajo los estándares mundiales de estudios de análisis de ondas superficiales.

B.1. ANÁLISIS DE MEDICIÓN MASW

El análisis de la medición MASW se realizó bajo el siguiente procedimiento, independiente para cada señal en Geopsy.

B.1.1. Cargar la señal obtenida en terreno en la medición MASW

En el programa se carga la señal MASW que luego es posible apreciar en un gráfico tiempo/geófono que se entrega en la pantalla.

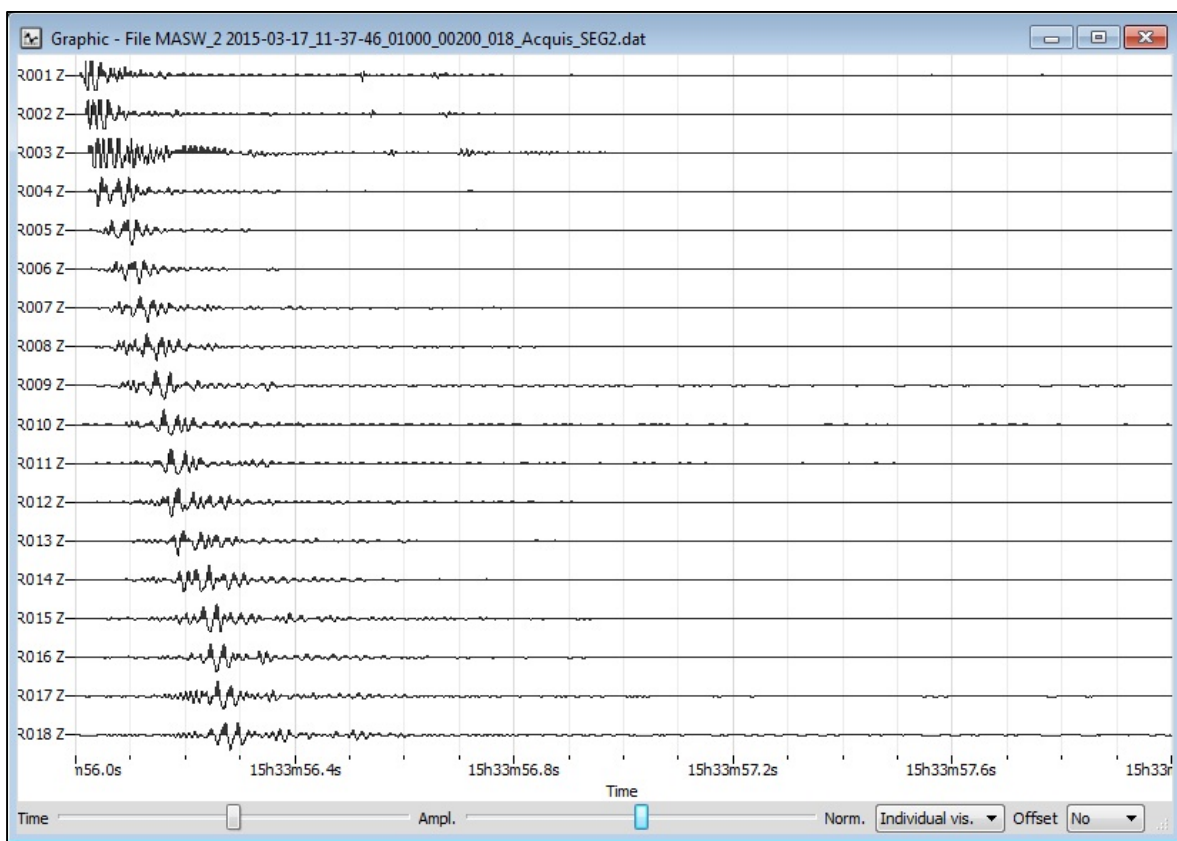


Gráfico B1: Ejemplo señal registrada para el análisis MASW.

Es claramente verificable que la señal corresponde a una medición MASW puesto que se aprecia una interferencia en cada geófono que se va moviendo en relación al tiempo y que corresponde al impacto realizado.

B.1.2. Edición ubicación de geófonos y de fuente de ruido artificial

Se edita las coordenadas de los geófonos tendiendo en consideración que la geometría de los tendidos MASW es lineal, es decir, solo se modifica una variable.

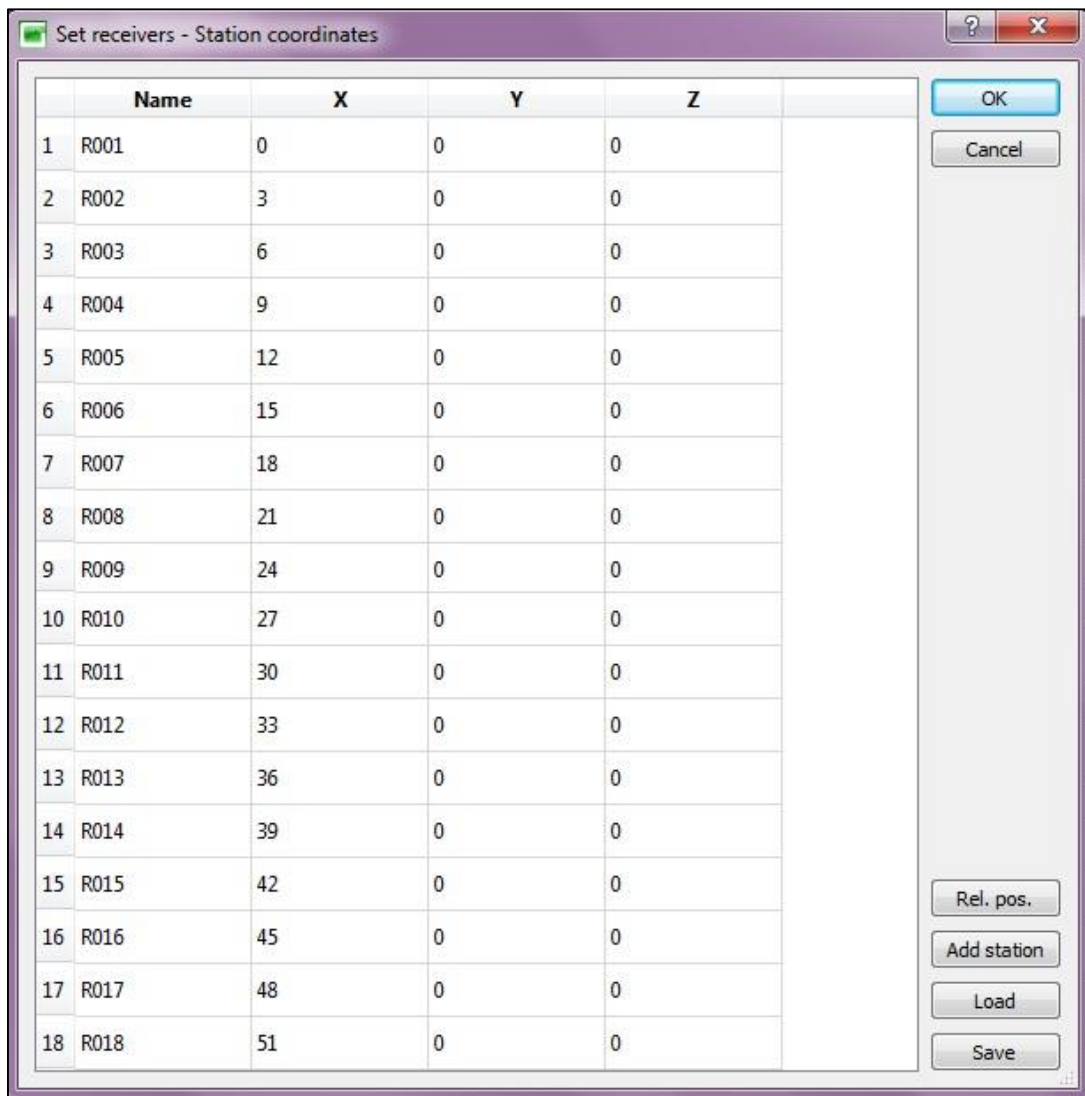


Imagen B1. Ventana de edición de posicionamiento de receptores en Geopsy con ejemplo de coordenadas MASW.

Se edita la ubicación de la fuente, que ubica siguiendo la linealidad desde el primer geófono al mismo espaciamiento de los receptores.

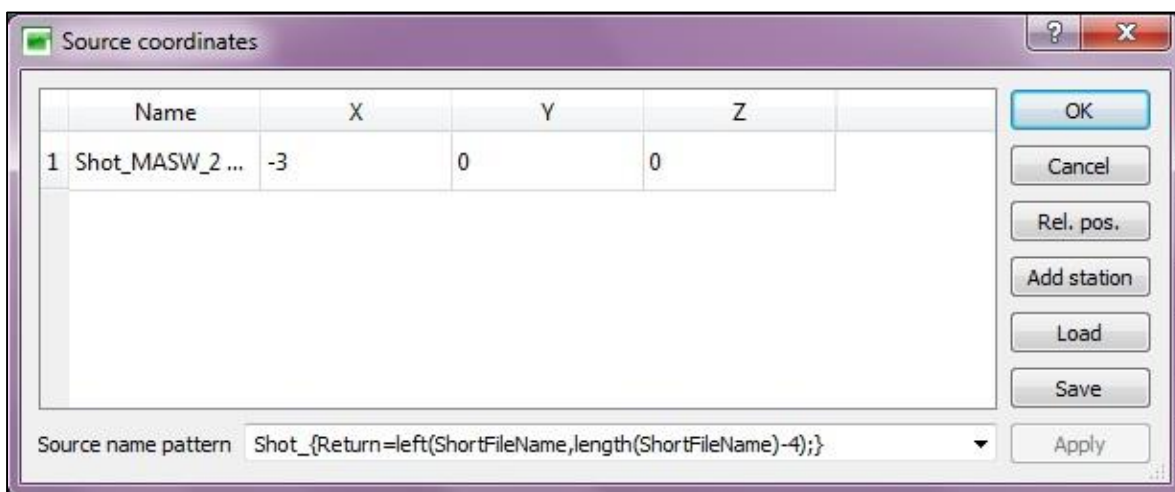


Imagen B2. Ventana de edición de posicionamiento de fuente activa en Geopsy.

B.1.3. Procesamiento de F-K activo y definición de parámetros.

Se selecciona el análisis F-K para experimentos activos y se editaron los parámetros, teniendo principal consideración en:

- Pre-proceso
 - *Distancia receptores-fuente*: debe cubrir todo el largo del tendido incluyendo el tramo de la fuente por lo que este tramo se consideró como de 0 – 55[m]
- Proceso
 - *Tiempo límite*: que es la duración de la señal (2[seg]).
- Salida
 - *Frecuencia de muestreo*: el rango de frecuencia que se consideró es de 2 a 60 [Hz] puesto que MASW está diseñado para frecuencias altas.
 - *Velocidad de muestreo*: se consideró de 100 – 600 [m/s], ya que son valores razonables que el suelo entrega para medición MASW.

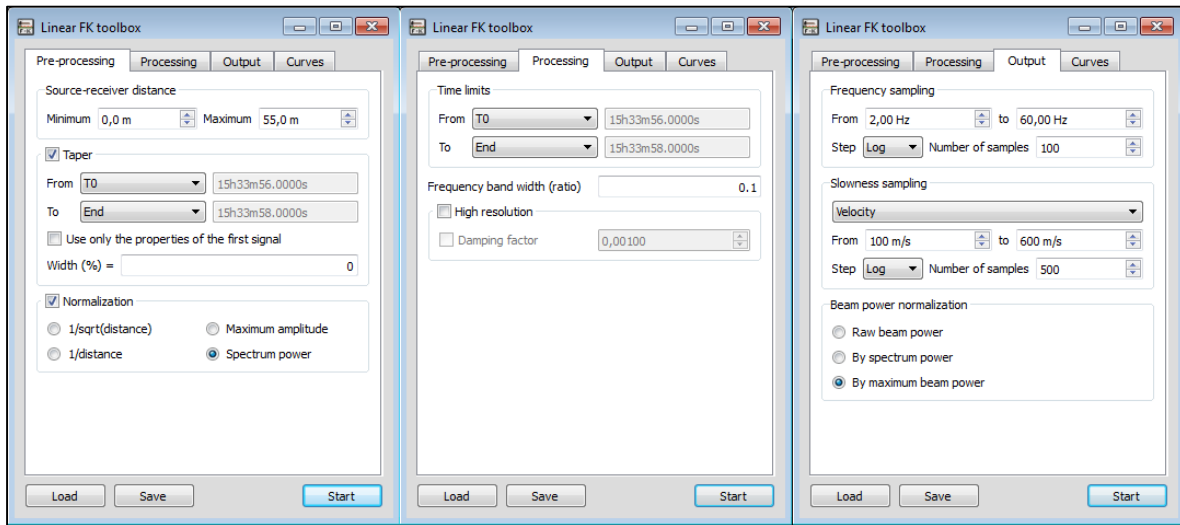


Imagen B3. Ventanas de edición de parámetros de análisis F-K para experimentos activos.

B.1.4. Resultados

Una vez ejecutado el programa entrega las curvas de dispersión MASW.

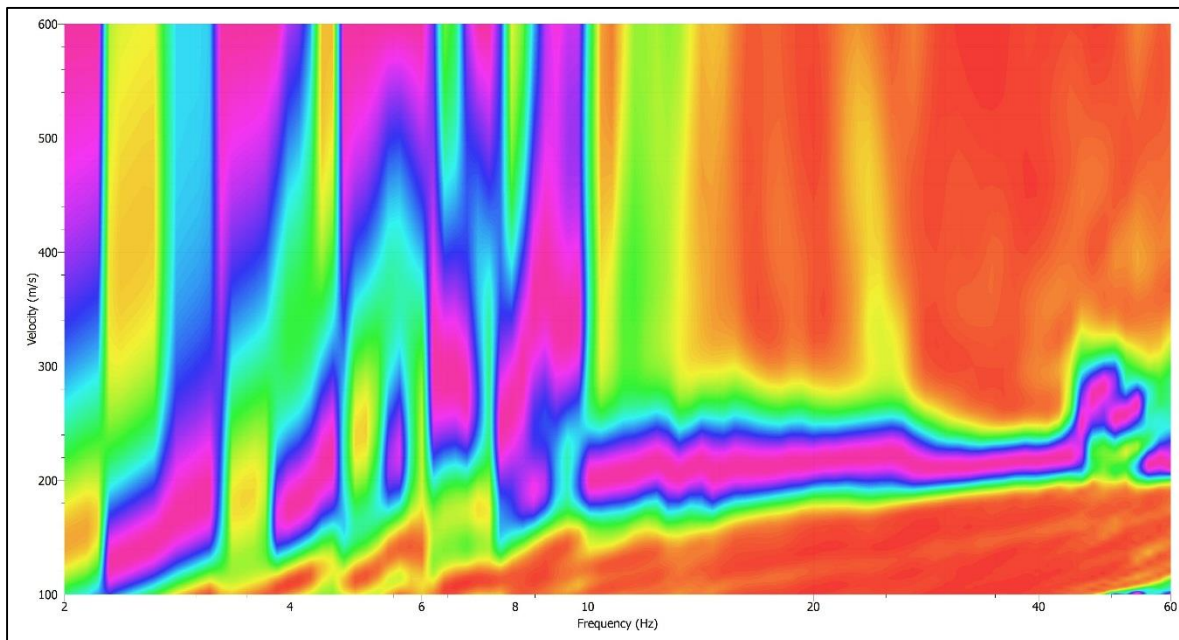


Gráfico B2. Ejemplo de curva de dispersión MASW entregado por el procesamiento en Geopsy.

B.1.5. Picking

Una vez obtenida la curva de dispersión se realiza el picking. El picking es un procedimiento en que se va realizando una curva de punto en punto (pick en pick) por los sectores con mayor frecuencia de colores que muestre el gráfico frecuencia/velocidad.

Se realiza este procedimiento para cada medición del sitio en estudio y se comparan. Se comienza desde una frecuencia que satisfaga con la relación de λ_{MIN} (tabla), hasta una frecuencia en que los resultados de todos los picking son iguales. Para frecuencias inferiores se considera que MASW no entrega resultados confiables, ya que difiere en todas las curvas de dispersión seleccionadas.

Se guarda la curva seleccionada.

B.2. ANÁLISIS DE MEDICIÓN ESAC

El análisis de la medición ESAC se realizó bajo el siguiente procedimiento, independiente para cada señal en Geopsy.

B.1.1. Cargar la señal obtenida en terreno en la medición ESAC.

En el programa se carga la señal ESAC que luego es posible apreciar en un gráfico tiempo/geófono que se entrega en la pantalla.

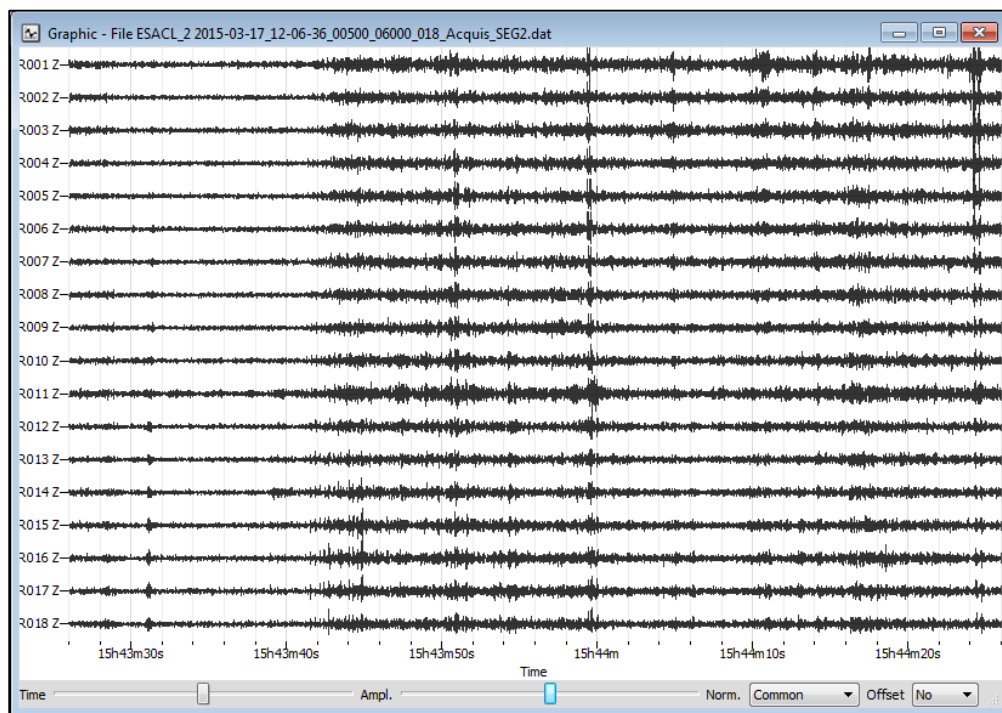


Gráfico B3. Ejemplo de señal registrada para el análisis ESAC.

Las señales de ensayos pasivos son posibles diferenciales puesto que las amplitudes de cada geófono no varían significativamente de otros geófonos y van cambiando paulatinamente de igual forma en todos. Todo esto puesto que capta el ruido ambiental que se presenta en los alrededores.

B.1.2. Edición ubicación de geófonos

Se edita las coordenadas de los geófonos tendiendo en consideración que la geometría de los tendidos considerando que la medición ESAC es bidimensional, por lo que se deberán modificar dos variables en el sistema de coordenadas.

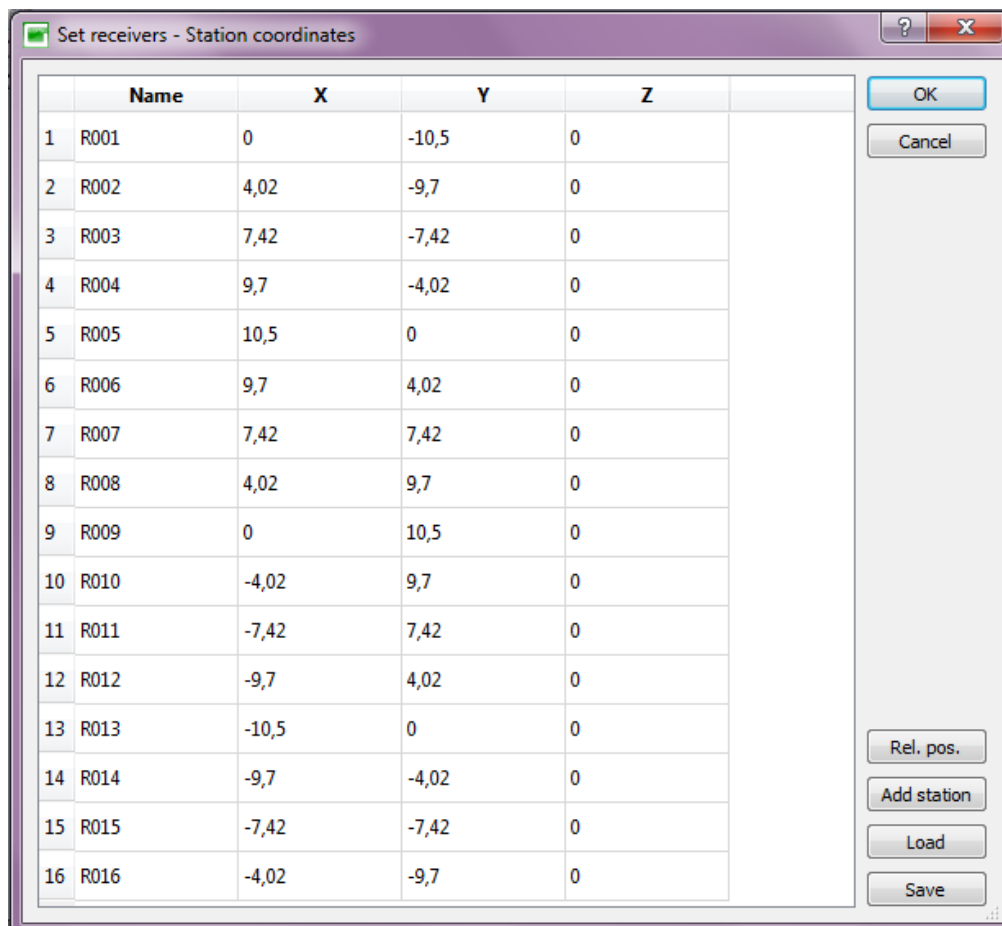
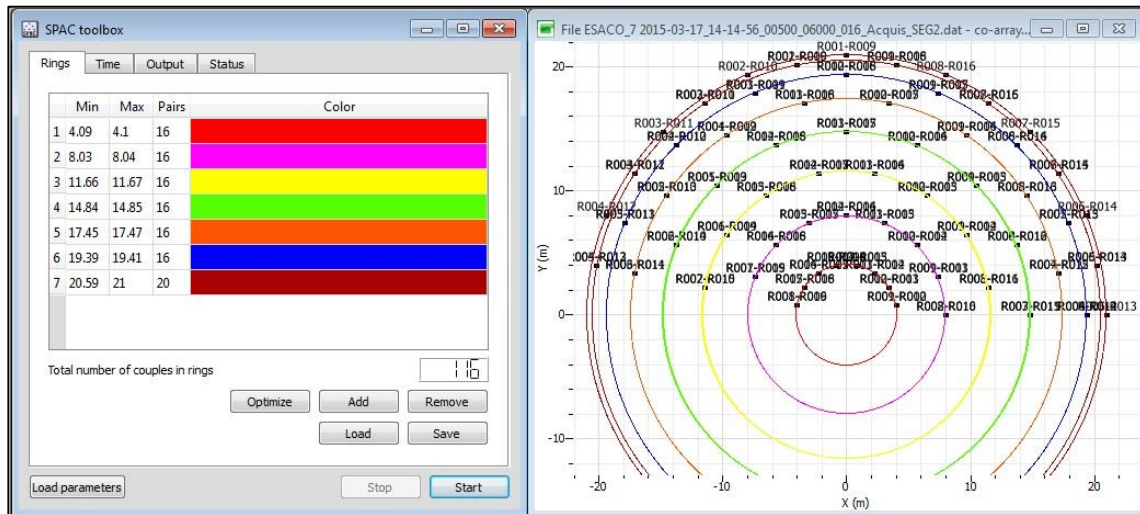


Imagen B4. Ventana de edición de posicionamiento de receptores en Geopsy con ejemplo de coordenadas ESAC para configuración circular.

B.1.3. Procesamiento de SPAC y definición de parámetros.

Se selecciona el análisis SPAC y se editaron los parámetros, teniendo principal consideración en:

- Anillos: Se seleccionan anillos que cubran toda la cantidad de geófonos mostrados en la ventana del archivo a ejecutar.



Imágenes B4 y B5. Ventanas de edición de parámetros de análisis SPAC (izquierda) y ventana de selección de anillos (derecha).

- Tiempo
 - *Tiempo límite:* el análisis ESAC dura 60[seg].
- Salida:
 - *Frecuencia de muestreo:* se selecciona la frecuencia que necesitamos que muestre SPAC. Como ESAC es capaz de frecuencias bajas se le pide que muestre frecuencia de entre los 0,5 – 50[Hz].
 - *Salida:* Se guarda el archivo a ejecutar.

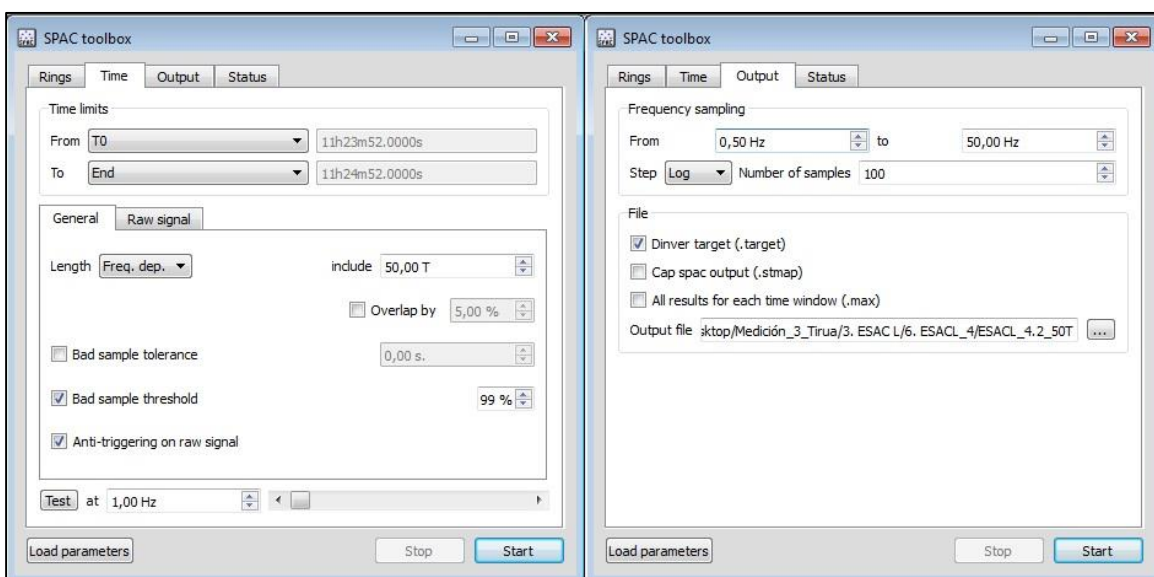


Imagen B6. Ventanas de edición de parámetros de análisis SPAC.

B.1.4. Procesamiento en spac2disp

El programa spac2disp es un programa acoplado a Geopsy en donde se es posible analizar los procesamientos SPAC.

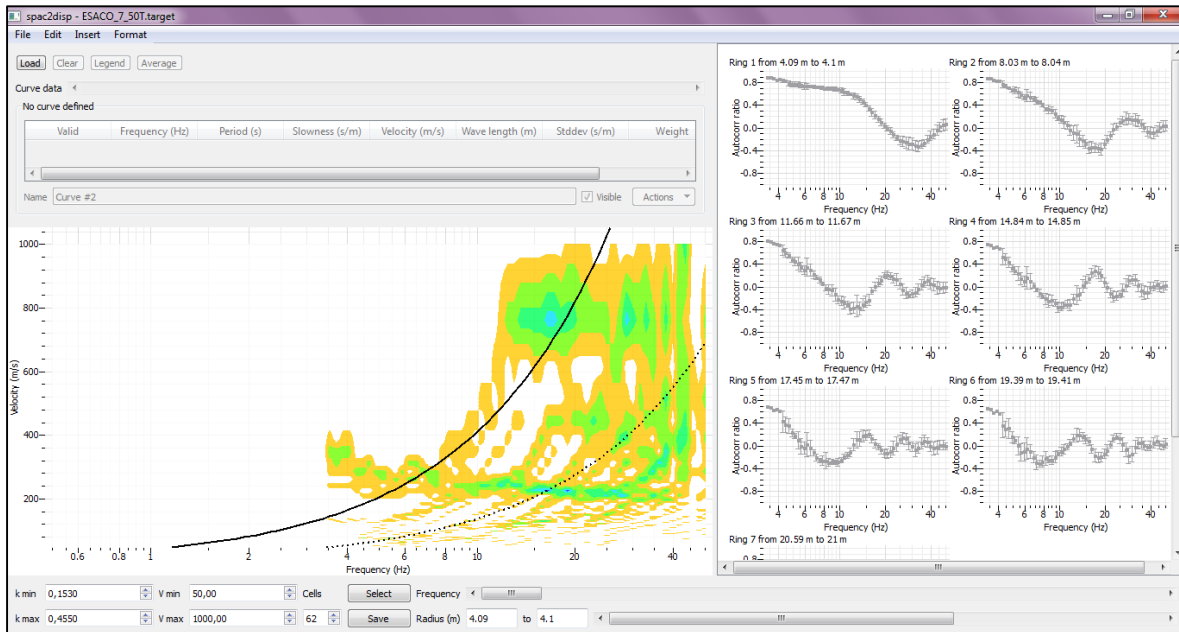


Imagen B7. Captura de spac2disp, programa auxiliar de Geopsy.

a. Definición de límites

- k_{max} : depende $\lambda_{MÁX}$ (tabla) y se calcula mediante

$$\lambda_{MÁX} = \frac{V}{f}$$

- k_{min} : depende del comienzo de la curva de dispersión obtenida mediante el picking guardado en MASW.

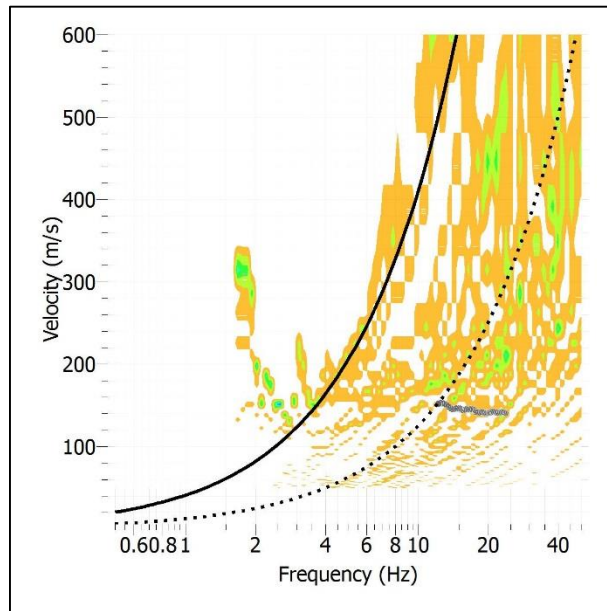
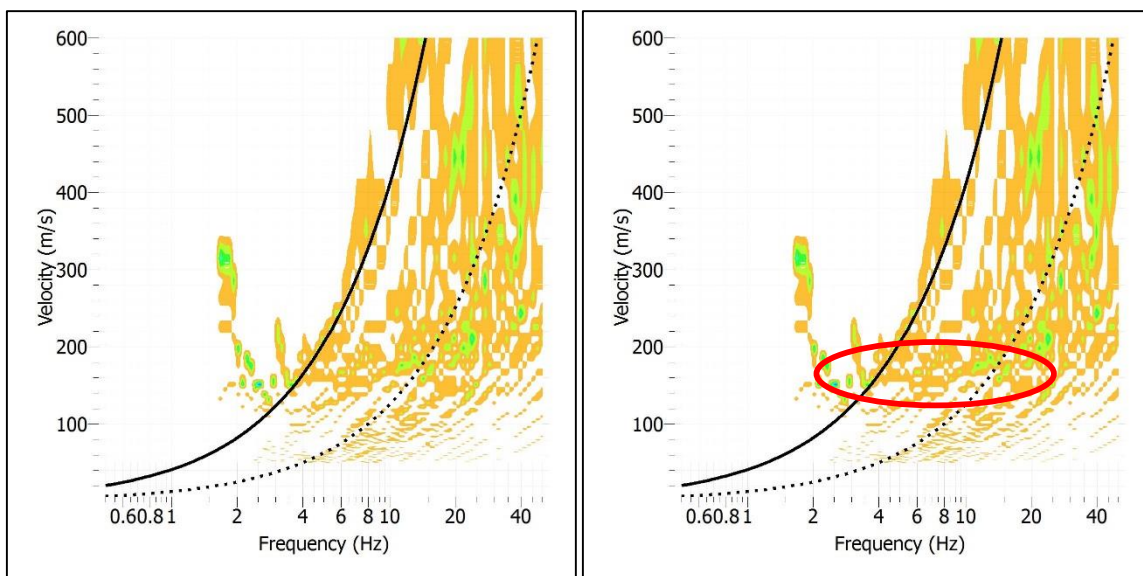


Gráfico B4. Ejemplo de curva MASW cargada desde los límites de la curva de dispersión que entregada por el programa spac2disp.

b. Selección de curvas

En el gráfico de la curva de dispersión de ESAC es posible observar un límite desde donde comienza la primera aglomeración lineal de puntos. Este sector corresponde a la frecuencia natural del suelo.



Gráficos B4 y B5. Ejemplos de curvas de dispersión (izquierda) e identificación del límite (derecha) en el análisis de spac2disp.

Se procede a seleccionar dos curvas que satisfagan con la condición que encierren al límite identificado:

- Una curva limite por la parte superior
- Y la otra curva limita por la parte inferior.

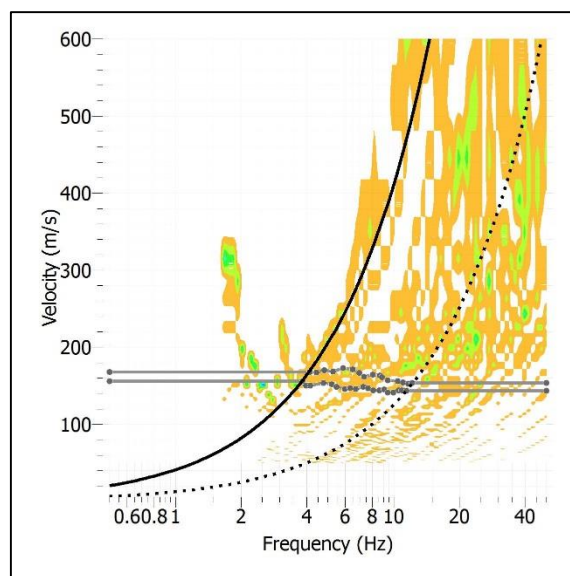


Gráfico B6. Ejemplo de curvas seleccionadas para el análisis SPAC en Geopsy.

Se seleccionan y se guardan ambas curvas.

B.4. INVERSIÓN

Para el proceso de inversión de la curva de dispersión de ondas Rayleigh se utiliza programa de Geopsy, dinver, y consta de los siguientes pasos

B.4.1. Cargar las curvas definidas

Para cargar las curvas y comenzar el proceso de inversión se debe seleccionar el ítem “dispersión”.

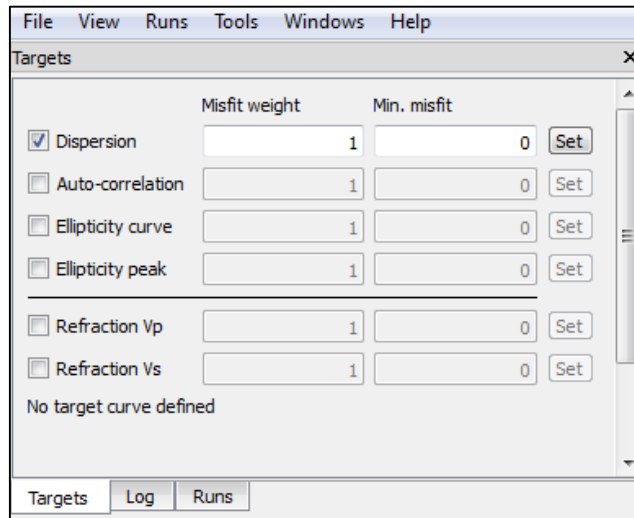


Imagen B8. Ventana targets de selección del análisis de dispersión que se desea evaluar en dinver.

Se cargan las tres curvas que interfieren en el proceso:

1. Curva MASW obtenida para el sitio determinado.
2. Curva del límite superior del análisis ESAC de una configuración en un sitio determinado.
3. Curva del límite inferior del análisis ESAC de una configuración en un sitio determinado.

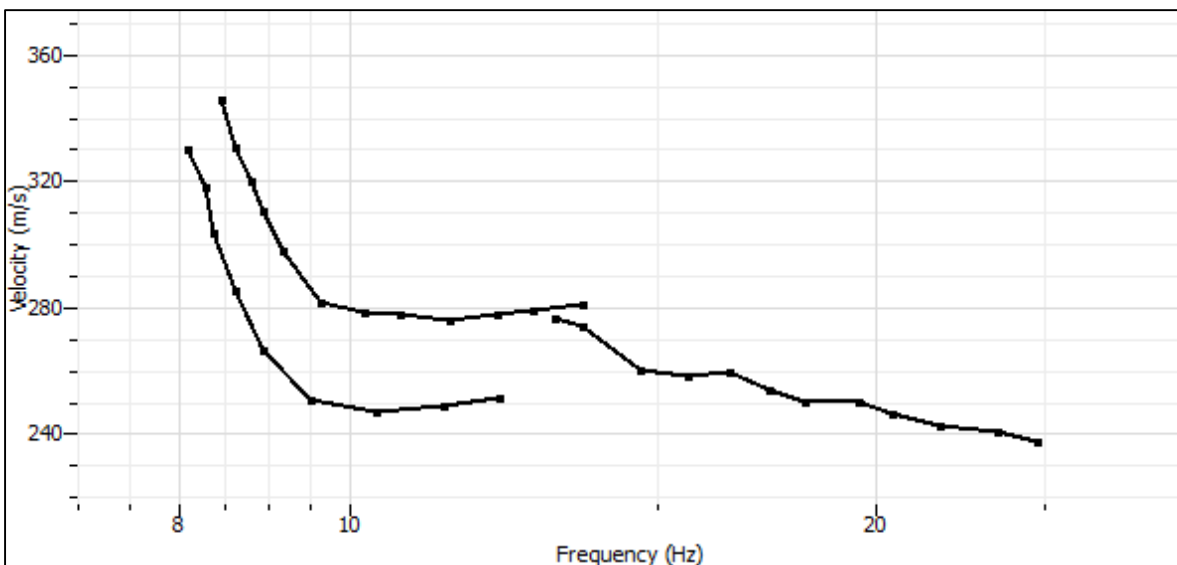


Gráfico B7. Ejemplo de curvas MASW y ESAC cargadas a dinver.

B.4.2. Definición de parámetros

El parámetro a evaluar es la velocidad de ondas de corte V_s , por lo que es este el parámetro que se debe acotar. Evaluando las curvas cargadas (Grafico B7) se determina la cantidad de estratos presentes en el suelo (solo un aproximado a grandes rangos) esto se lleva acabo analizando el cambio de pendientes que exista en las curvas por tramo de frecuencias.

En la ventana de parámetros, para cada estrato definido, se acota la velocidad, considerando que la velocidad V (velocidad de ondas Rayleigh) representa solo un porcentaje del V_s (velocidad de ondas de corte) y se define la profundidad a la que se encuentra los cambios de velocidad, si:

- Para curva MASW
$$h = \frac{1}{2} * \frac{V}{f}$$
- Para curva ESAC
$$h = \frac{V}{f}$$

con, h: profundidad

Imagen B8: Ventana de definición de parámetros en dinver.

B.4.3. Obtención de Vs30 y elección de estratigrafía representativa.

Se realizan varias iteraciones para encontrar el perfil estratigráfico característico del suelo.











| | Pen | Run name | Min misfit | Valid models | Active models | Visited models | Rate | Eff. Nr | Rejected | Give |
|----|---|----------|------------|--------------|---------------|----------------|-------------|---------|----------|------|
| 1 |  | run_01 | 0.14926 | 2550/2550 | 1694 | 2582 | 0 m/s | 50 m | 0 m | 0 m |
| 2 |  | run_02 | 0.144204 | 2550/2550 | 1604 | 2574 | 0 m/s | 50 m | 0 m | 0 m |
| 3 |  | run_03 | 0.138235 | 2550/2550 | 1658 | 2575 | 0 m/s | 50 m | 0 m | 0 m |
| 4 |  | run_04 | 0.14468 | 2550/2550 | 1662 | 2575 | 0 m/s | 50 m | 0 m | 0 m |
| 5 |  | run_05 | 0.141829 | 2550/2550 | 1666 | 2581 | 0 m/s | 50 m | 0 m | 0 m |
| 6 |  | run_06 | 0.142148 | 2550/2550 | 1639 | 2572 | 0 m/s | 50 m | 0 m | 0 m |
| 7 |  | run_07 | 0.138826 | 2550/2550 | 1668 | 2574 | 0 m/s | 50 m | 0 m | 0 m |
| 8 |  | run_08 | 0.140136 | 2550/2550 | 1666 | 2577 | 0 m/s | 50 m | 0 m | 0 m |
| 9 |  | run_09 | 0.140095 | 2550/2550 | 1654 | 2572 | 0 m/s | 50 m | 0 m | 0 m |
| 10 |  | run_10 | 0.143427 | 2550/2550 | 1683 | 2575 | 44.8718 m/s | 50 m | 0 m/m | 0 m |

Imagen B9. Ventana de “runs” o iteraciones que realiza dinver.

En cada iteración es posible ver el perfil estratigráfico en dinver. Como solo se necesita conocer el Vs correspondiendo a los primeros 30[m], se acota hasta esta profundidad el gráfico entregado.

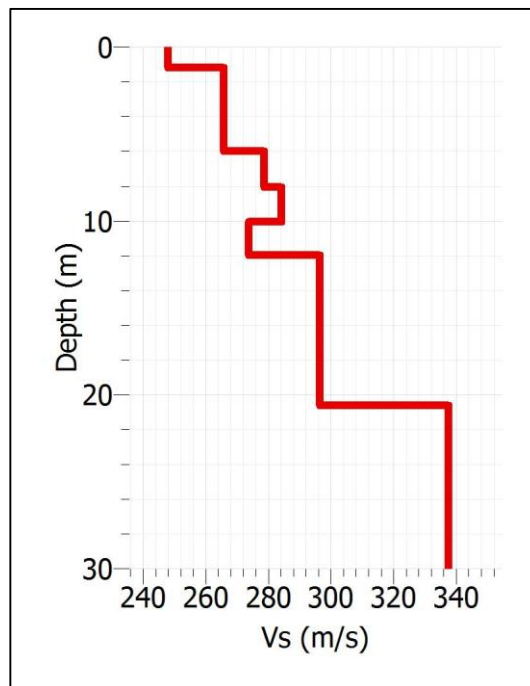


Gráfico B8. Perfil estratigráfico de los primeros 30[m] de una iteración en dinver.

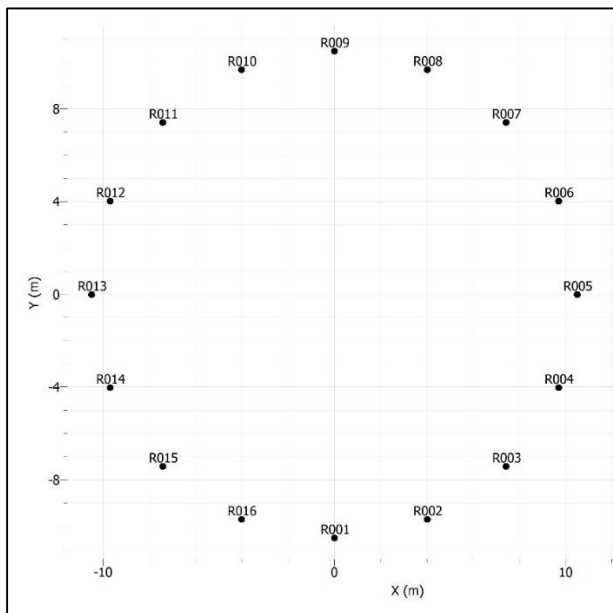
Para seleccionar el perfil estratigráfico del suelo se deben evaluar todos los perfiles entregados en las iteraciones realizadas y, de entre ellos, elegir el óptimo, teniendo en consideración los siguientes criterios:

- Mejor ajuste a la curva de dispersión de ondas Rayleigh
- Repetición de patrones en perfiles estratigráficos entregados por las iteraciones.
- Experiencia del seleccionador de la curva.
- Información geológica precedente del sitio en estudio.

ANEXO C: CONFIGURACION DE MATRICES

C.1. MATRIZ BASE

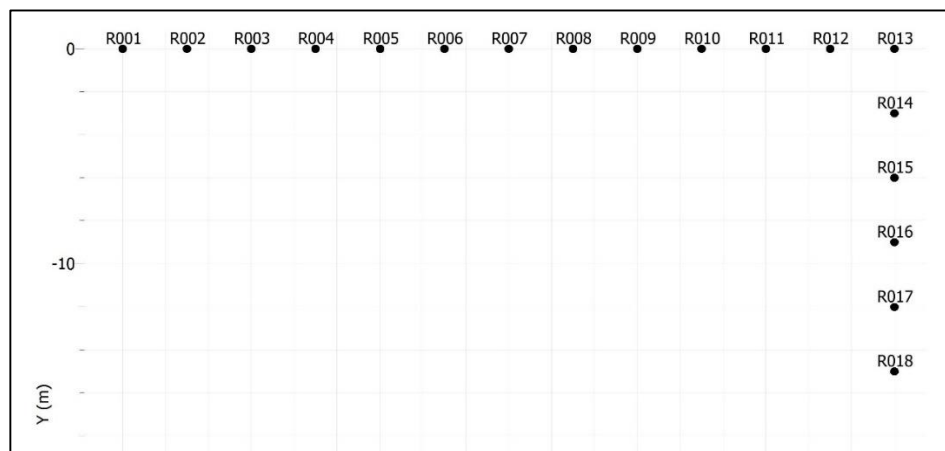
a. Matriz Circular



Esquema C1. Matriz base de configuración circular de radio 10.5 [m] compuesta por 16 geófonos espaciados a igual distancia.

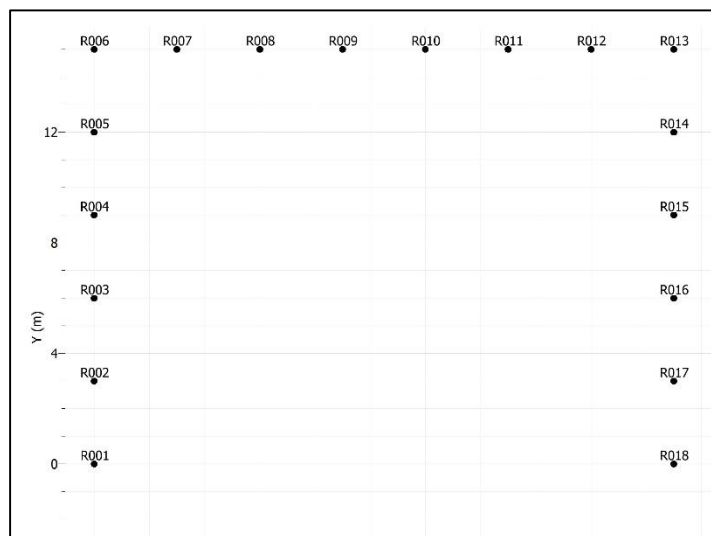
C.2. CONFIGURACIONES BIDIMENSIONALES

b. Configuración L



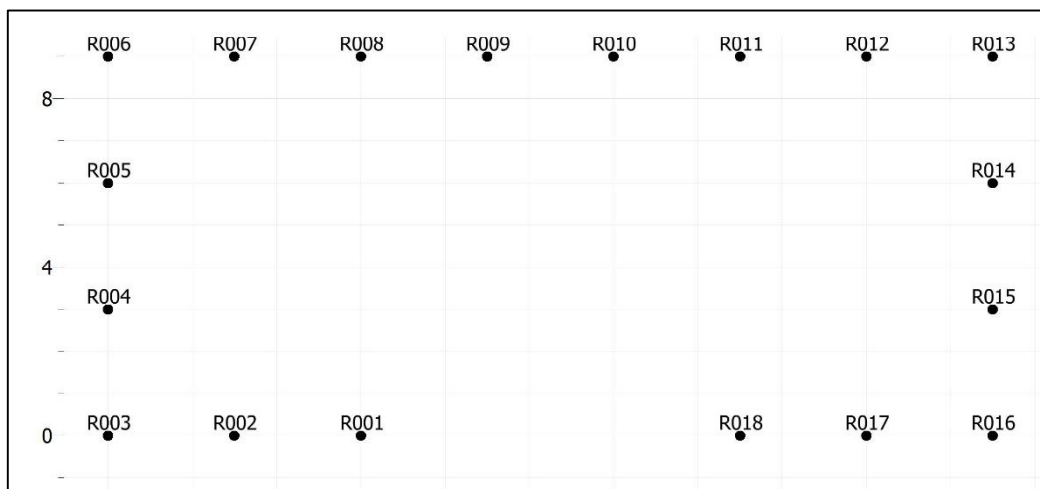
Esquema C2. Configuración L compuesta por 18 geófonos espaciados 3[m] de distancia entre ellos.

c. Configuración C



Esquema C3. Configuración C compuesta por 18 geófonos espaciados 3[m] de distancia entre ellos.

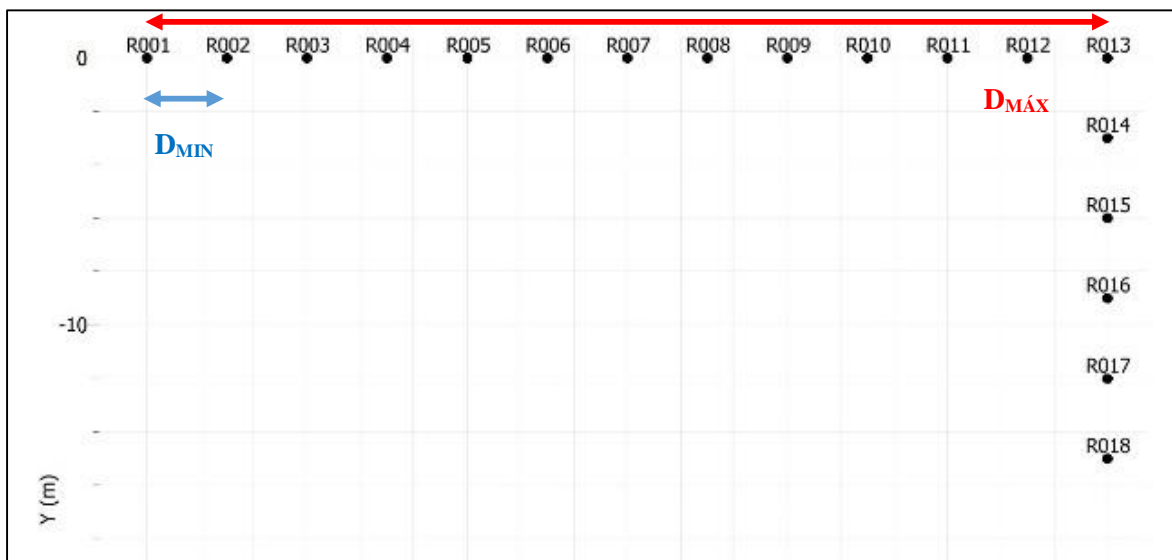
d. Configuración Corchete



Esquema C4. Configuración corchete compuesta por 18 geófonos espaciados 3[m] de distancia entre ellos.

C.3. DISTANCIAS MAXIMAS Y MINIMAS

La distancia máxima ($D_{MÁX}$) corresponde a la máxima longitud del arreglo, mientras que la distancia mínima (D_{MIN}) corresponde a la menor distancia entre geófonos que se presente en el arreglo.



Esquema C5. Ejemplificación de $D_{MÁX}$ y D_{MIN} en matriz de configuración L.

Las distancias máximas y mínimas de todos los arreglos de geófonos están presentadas en la Tabla C1.

Tabla C1. Distancias de configuración de cada tendido y límites de curvas de dispersión.

| Configuración | Cant. de geófonos | $D_{MÁX}$ [m] | d_{MIN} [m] |
|------------------------|-------------------|---------------|---------------|
| MASW | 18 | 51 | 3 |
| Matriz base | 16 | 21 | 4.1 |
| Configuración L | 18 | 36 | 3 |
| Configuración C | 18 | 21 | 3 |
| Configuración corchete | 18 | 21 | 3 |

C.4. LÍMITES EN LA CURVA DE DISPERSIÓN

Los límites de las curvas de dispersión se estiman el cálculo de $\lambda_{MÁX}$ y λ_{MIN} en donde se tiene que

$$\lambda_{MÁX} = 2 D_{MÁX} \quad , \quad \lambda_{MIN} = 2 d_{MIN}$$

Tabla C2. Límites de confiabilidad de resultados en la curva de dispersión.

| Configuración | $\lambda_{MÁX}$ | λ_{MIN} |
|------------------------|-----------------|-----------------|
| MASW | 102 | 6 * |
| Matriz base | 42 * | 8,2 |
| Configuración L | 72 * | 6 |
| Configuración C | 42 * | 6 |
| Configuración corchete | 42 * | 6 |

*Nota: * Datos que se utilizarán en la práctica (MASW para el límite de frecuencias altas y ESAC para el límite de frecuencias bajas).*

ANEXO D: RESULTADOS

D.1. TIEMPOS DE FORMACIÓN DE CONFIGURACIONES

Se tabuló el tiempo de transporte de geófonos desde la linealidad hasta la formación bidimensional.

Tabla D1. Tiempo de formación de matrices desde la linealidad hacia su respectiva configuración bidimensional.

| Estimación de tiempo teóricos | | | | | |
|-------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| Desde | Hacia | Medición 1 [min] | Medición 2 [min] | Medición 3 [min] | Tiempo [min] |
| MAS W | L | 0:04 | 0:08 | 0:04 | 0:05 |
| MAS W | C | 0:17 | 0:21 | 0:10 | 0:16 |
| MAS W | Corchet e | 0:20 | 0:33 | 0:17 | 0:23 |
| MAS W | O | 0:34 | 0:32 | 0:15 | 0:27 |

D.2. CURVAS DE DISPERSIÓN Y CALCULO DE VS30

D.2.1. Sector 1: Stadio Italiano

El estudio se llevó a cabo en recinto de Stadio Italiano que se ubica entrando por Av. Verdi hacia el interior por la ruta 160 de camino a Coronel, en el sector posterior al salón de cumpleaños que se ubica en dicho recinto.



Imagen D1. Ubicación zona de estudio sector Stadio Italiano (Fuente mapa local: Google Earth).

D.2.1.1. Medición MASW

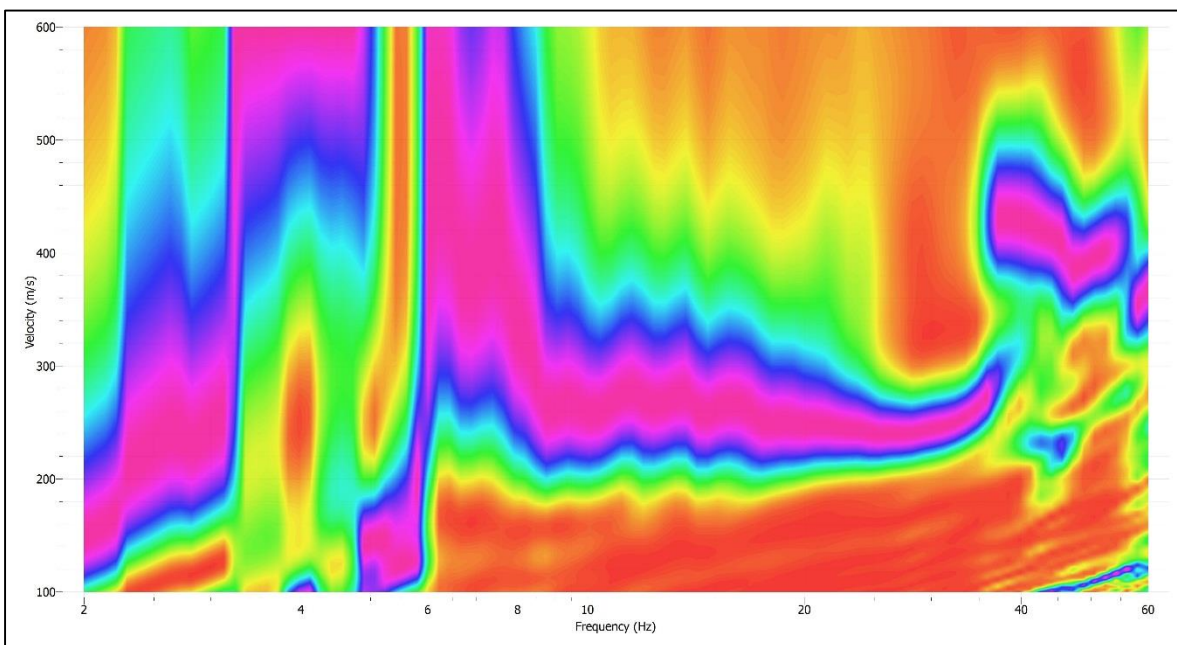


Gráfico D1. Curva de dispersión experimental obtenida de la medición MASW en sector Stadio Italiano.

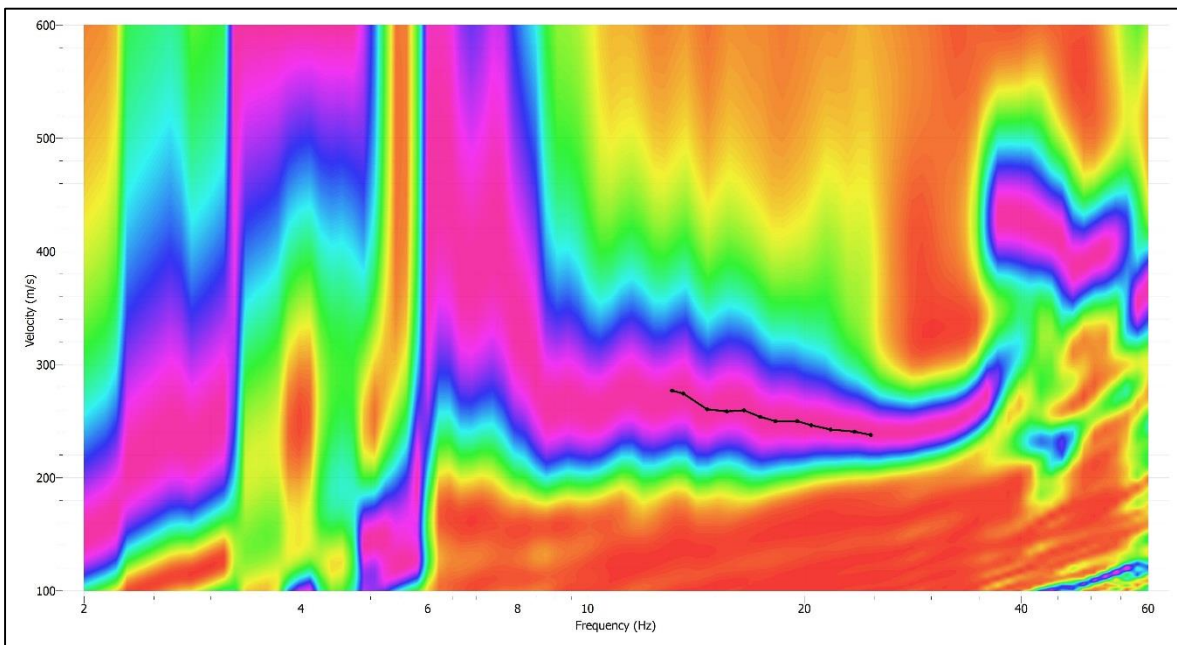
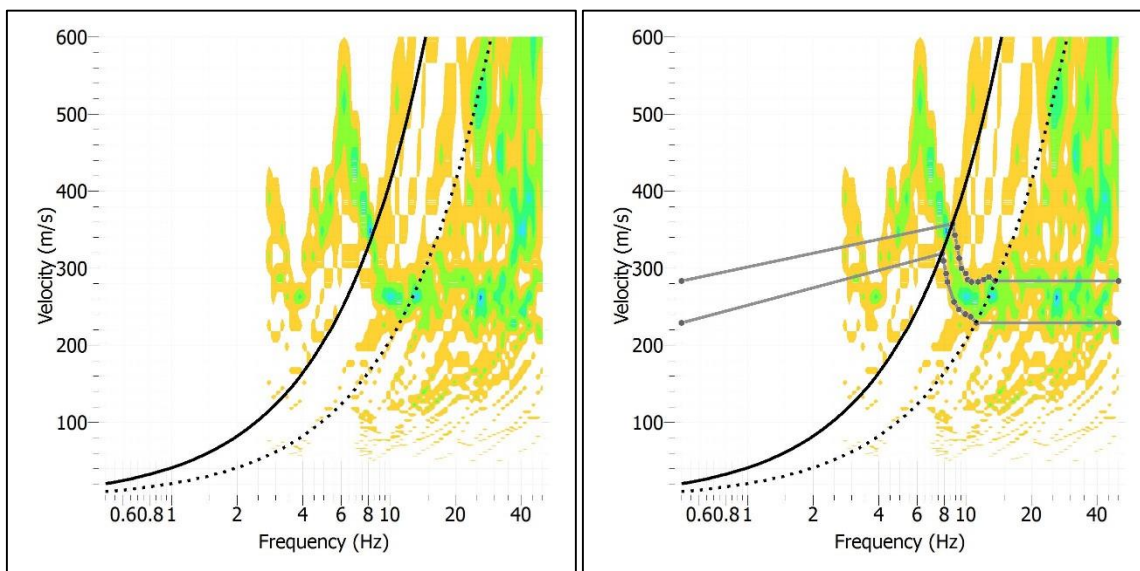


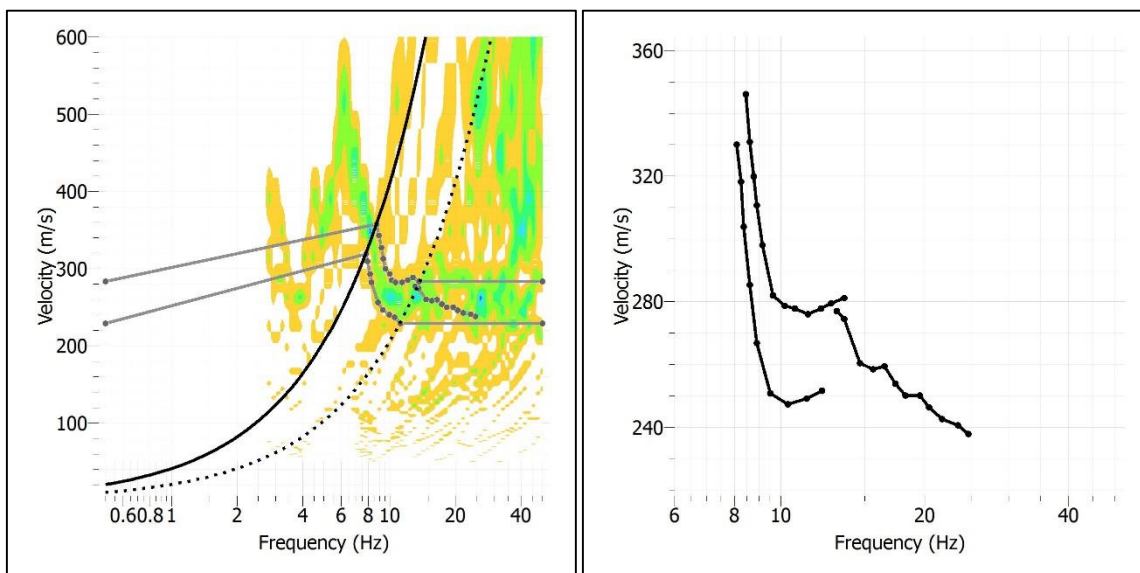
Gráfico D2. Picking elegido para la curva de dispersión experimental.

D.2.1.2. Medición ESAC

a. Configuración Circular



Gráficos D3 y D4. Curva de dispersión ESAC obtenida de medición circular (izquierda) y picking elegido (derecha), ambas en sector Stado Italiano.



Gráficos D5 y D6.: Curvas de dispersión ESAC y MASW de la configuración base circular en Geopsy (izquierda) y en dinver (derecha), ambas en sector Stadio Italiano.

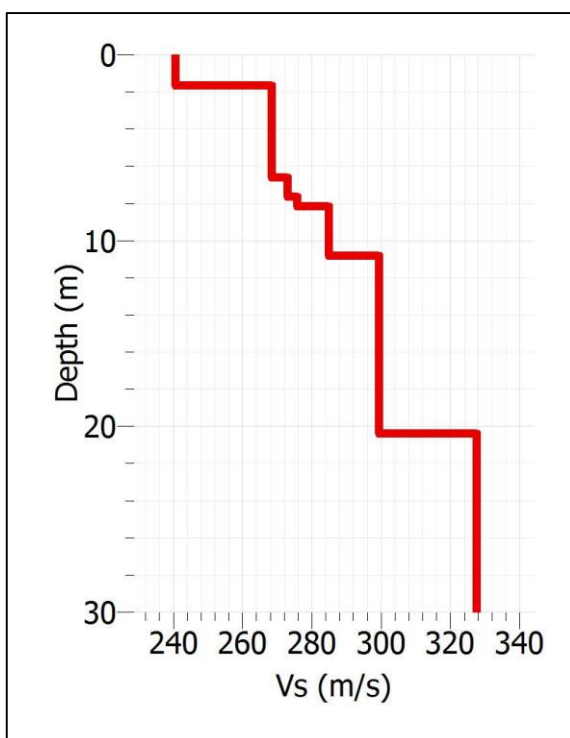
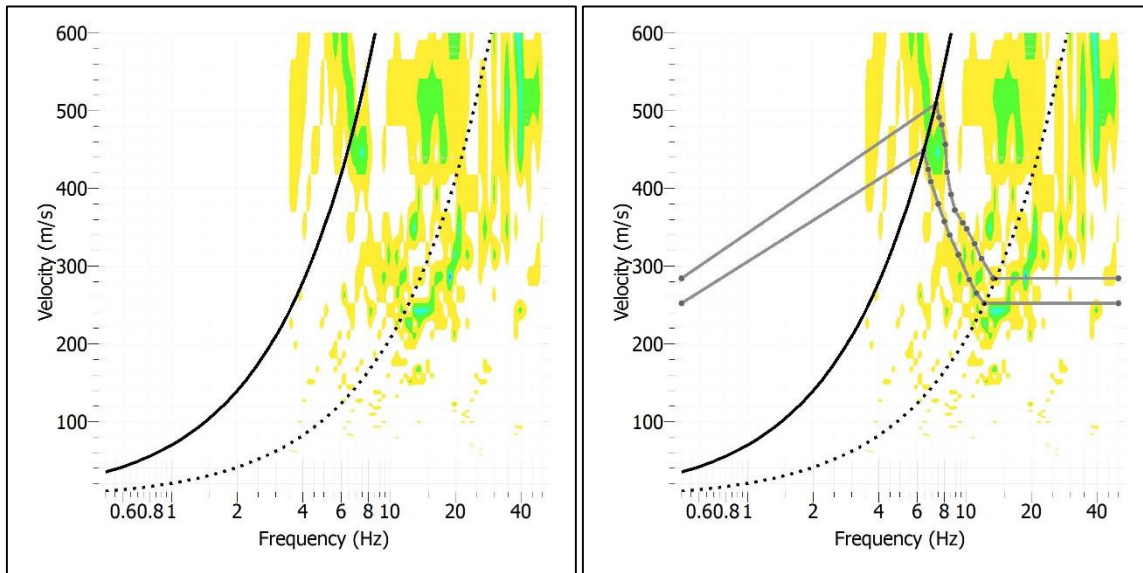


Tabla D2. Perfil de velocidades de ondas de corte obtenidas mediante análisis MASW y ESAC de configuración circular en sector Stadio Italiano.

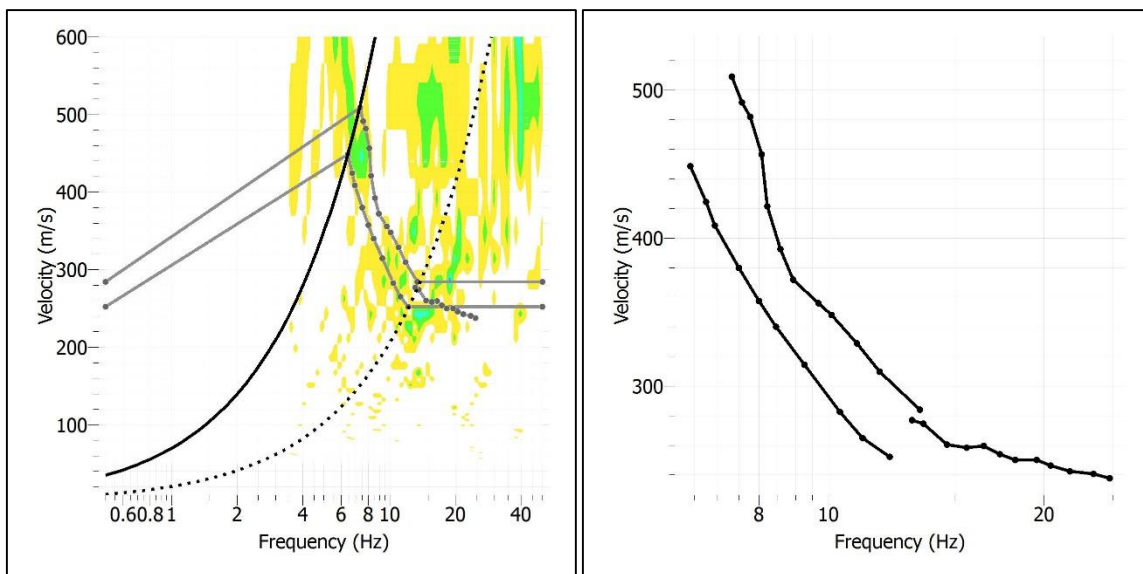
| Capa | Espesor | Profundidad | Vs [m/s] |
|------|---------|-------------|--------------------------|
| 1 | 1.6 | 1.6 | 240.6 |
| 2 | 5.0 | 6.6 | 268.4 |
| 3 | 1.0 | 7.7 | 273.1 |
| 4 | 0.5 | 8.2 | 275.9 |
| 5 | 2.7 | 10.8 | 285.0 |
| 6 | 9.6 | 20.4 | 299.5 |
| 7 | 9.6 | 87.3 | 327.6 |
| | | | Vs30: 295,2 [m/s] |

Gráfico D7: Gráfico Vs/Profundidad obtenido mediante la inversión de la curva de dispersión según análisis MASW y ESAC de configuración circular en sector Stadio Italiano.

b. Configuración L



Gráficos D8 y D9. Curva de dispersión ESAC obtenida de medición de configuración L (izquierda) y picking elegido (derecha), ambas en sector Stadio Italiano.



Gráficos D10 y D11. Curvas de dispersión ESAC y MASW de la configuración L en Geopsy (izquierda) y en dinver (derecha), ambas en sector Stadio Italiano.

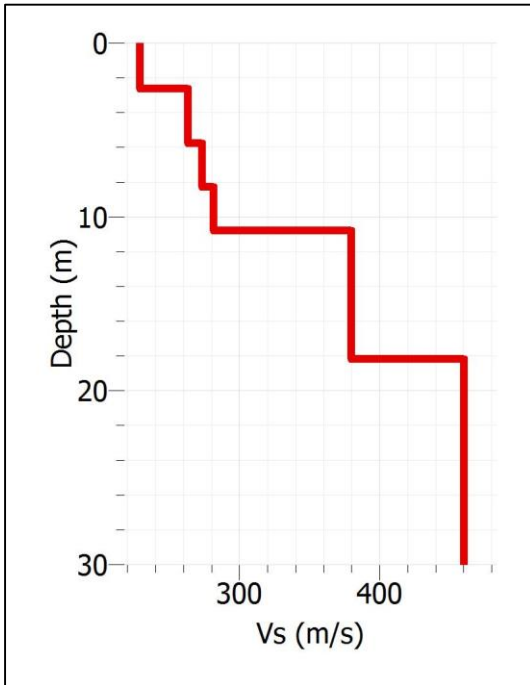
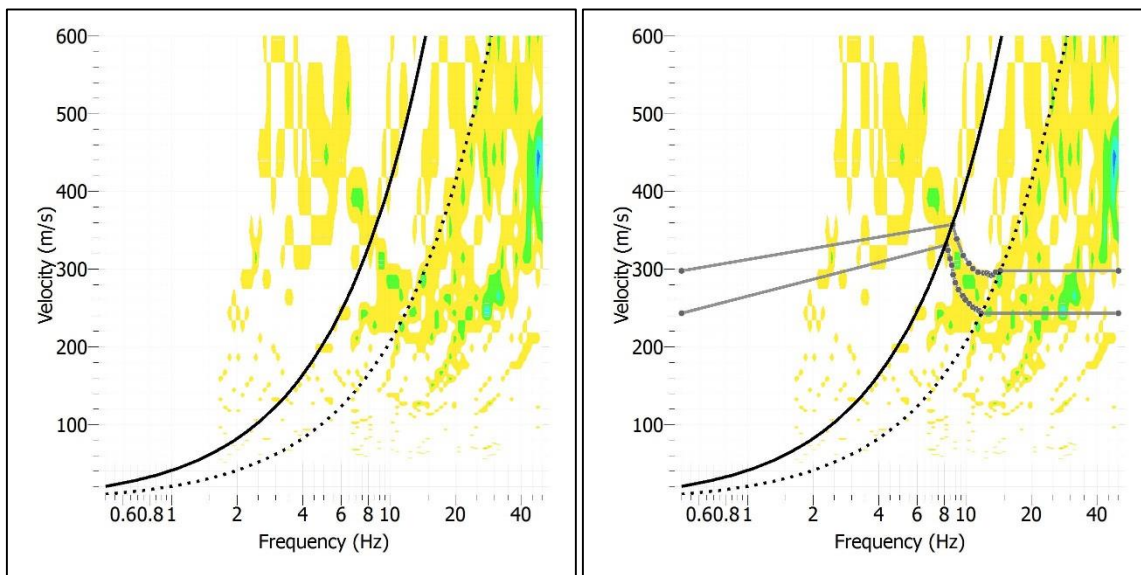


Gráfico D12. Gráfico Vs/Profundidad obtenido mediante la inversión de la curva de dispersión según análisis MASW y ESAC de configuración L en sector Stadio Italiano.

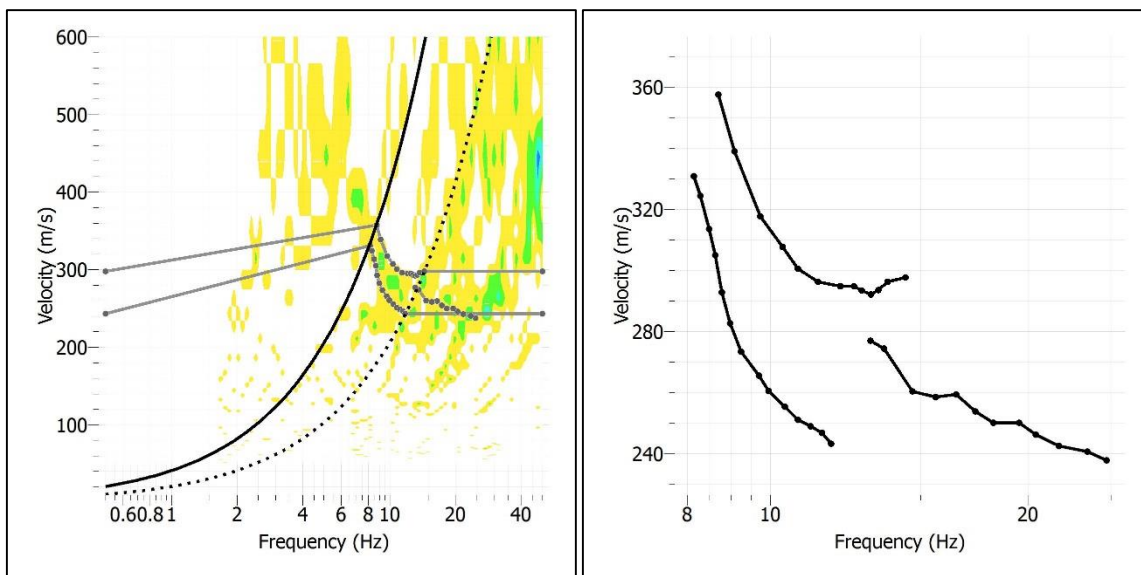
Tabla D3: Perfil de velocidades de ondas de corte obtenidas mediante análisis MASW y ESAC de configuración L en sector Stadio Italiano.

| Capa | Espesor | Profundidad | Vs [m/s] |
|------|---------|-------------|--------------------------|
| 1.0 | 2.6 | 2.6 | 228.9 |
| 2.0 | 3.1 | 5.7 | 263.2 |
| 3.0 | 2.5 | 8.3 | 273.1 |
| 4.0 | 2.5 | 10.8 | 281.4 |
| 5.0 | 7.4 | 18.2 | 379.7 |
| 6.0 | 11.8 | 47.1 | 460.2 |
| | | | Vs30: 346,1 [m/s] |

c. Configuración C



Gráficos D13 y D14. Curva de dispersión ESAC obtenida de medición de configuración C (izquierda) y picking elegido (derecha), ambas en sector Stadio Italiano.



Gráficos D15 y D16. Curvas de dispersión ESAC y MASW de la configuración C en Geopsy (izquierda) y en dinver (derecha), ambas en sector Stadio Italiano.

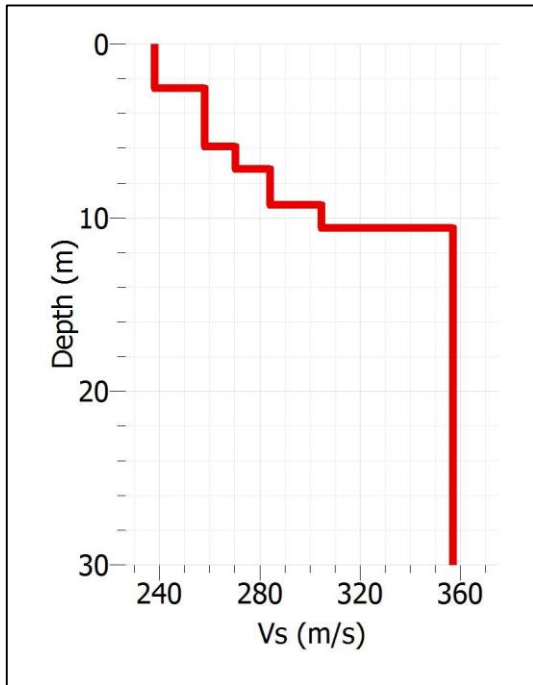
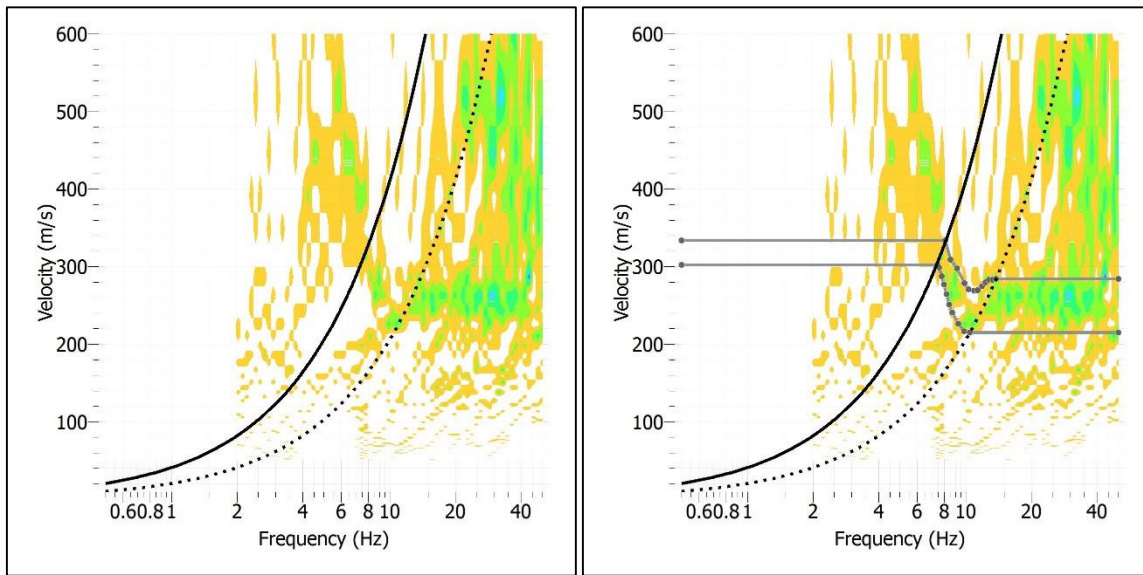


Gráfico D17. Gráfico Vs/Profundidad obtenido mediante la inversión de la curva de dispersión según análisis MASW y ESAC de configuración C en sector Stadio Italiano.

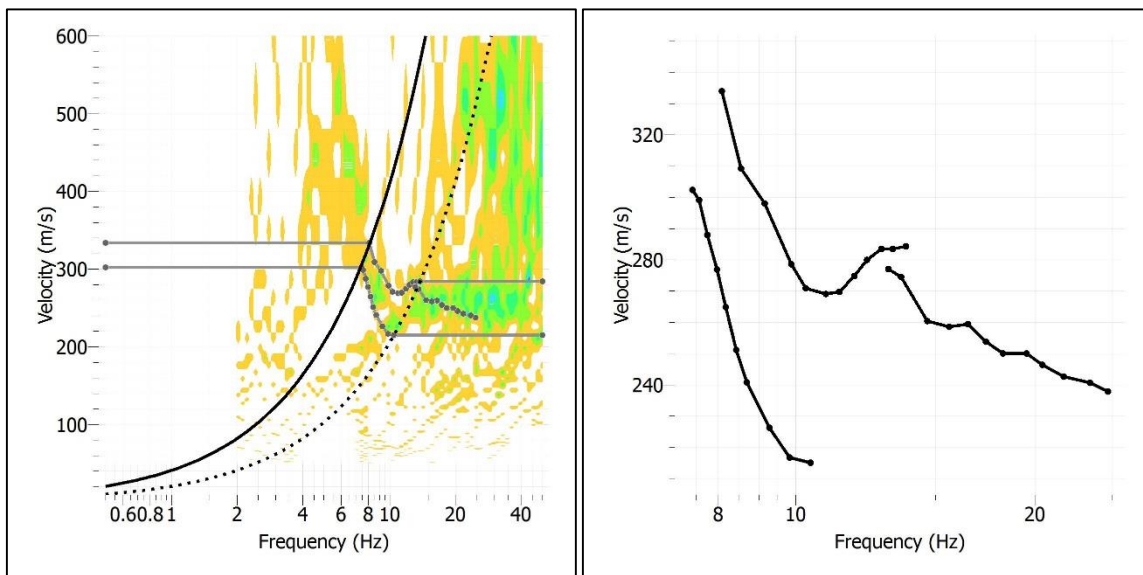
Tabla D4. Perfil de velocidades de ondas de corte obtenidas mediante análisis MASW y ESAC de configuración C en sector Stadio Italiano.

| Capa | Espesor | Profundidad | Vs [m/s] |
|------|---------|-------------|--------------------------|
| 1 | 2.5 | 2.5 | 238.2 |
| 2 | 3.4 | 5.9 | 258.0 |
| 3 | 1.3 | 7.2 | 270.4 |
| 4 | 2.1 | 9.3 | 284.2 |
| 5 | 1.3 | 10.6 | 304.7 |
| 6 | 19.4 | 30.0 | 357.3 |
| | | | Vs30: 317,6 [m/s] |

d. Configuración Corchete



Gráficos D18 y D19. Curva de dispersión ESAC obtenida de medición de configuración corchete (izquierda) y picking elegido (derecha), ambas en sector Stadio Italiano.



Gráficos D20 y D21. Curvas de dispersión ESAC y MASW de la configuración corchete en Geopsy (izquierda) y en dinver (derecha), ambas en sector Stadio Italiano.

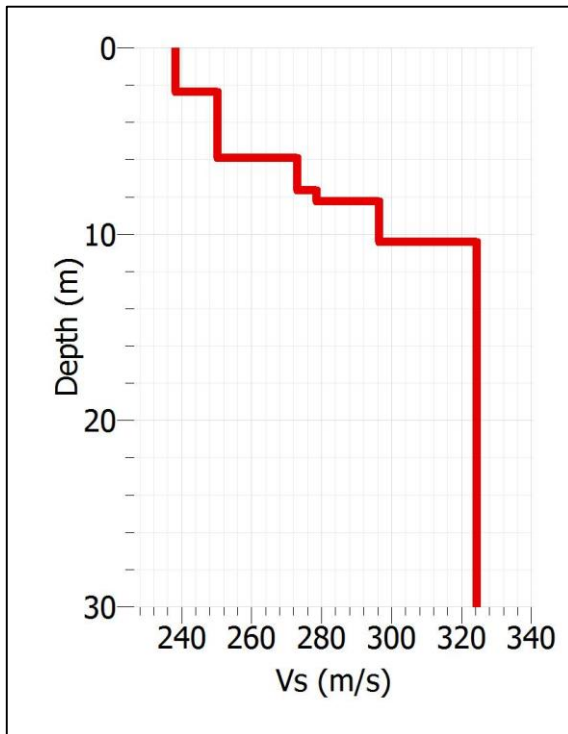


Tabla D5. Perfil de velocidades de ondas de corte obtenidas mediante análisis MASW y ESAC de configuración corchete en sector Stadio Italiano.

| Capa | Espesor | Profundidad | Vs [m/s] |
|------|---------|-------------|--------------------------|
| 1 | 2.4 | 2.4 | 238.2 |
| 2 | 3.5 | 5.9 | 250.4 |
| 3 | 1.7 | 7.7 | 273.1 |
| 4 | 0.6 | 8.2 | 278.6 |
| 5 | 2.2 | 10.4 | 296.5 |
| 6 | 19.6 | 30.0 | 324.3 |
| | | | Vs30: 299.1 [m/s] |

Gráfico D22. Gráfico Vs/Profundidad obtenido mediante la inversión de la curva de dispersión según análisis MASW y ESAC de configuración corchete en sector Stadio Italiano.

D.2.2. Sector 2: Universidad del Bío Bío

El sector en estudio se ubicó en la cancha de la Universidad del Bío Bío ubicada en el trayecto de Concepción a Nonguén.



Imagen D2. Ubicación zona de estudio sector Universidad del Bío Bío (Fuente mapa local: Google Earth).

D.2.2.1. Medición MASW

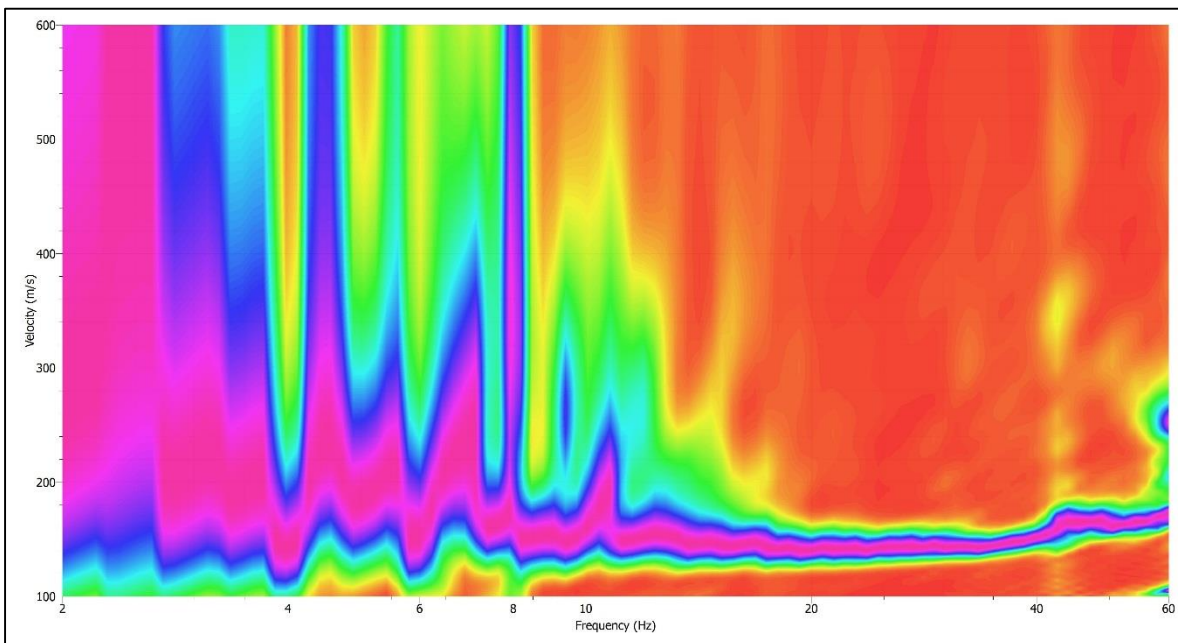


Gráfico 23. Curva de dispersión experimental obtenida de la medición MASW en sector Universidad del Bío Bío.

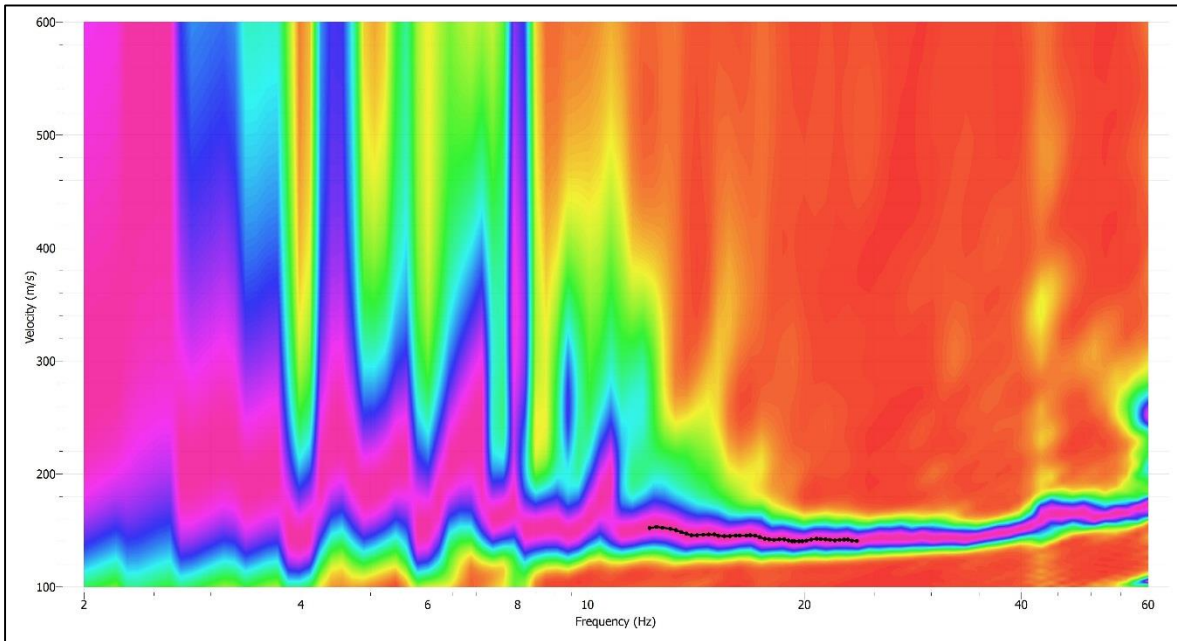
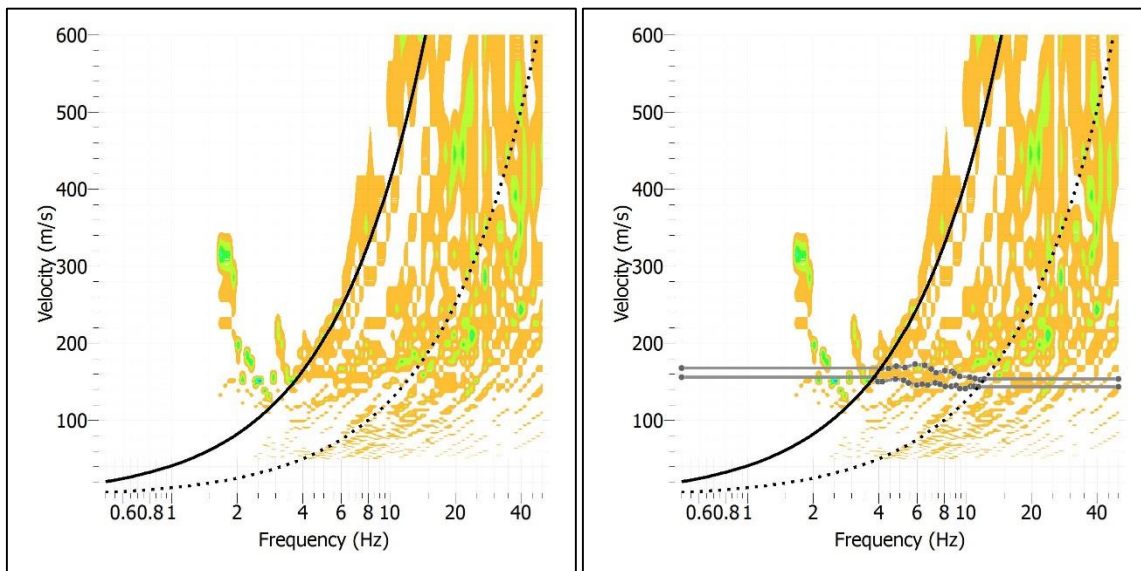


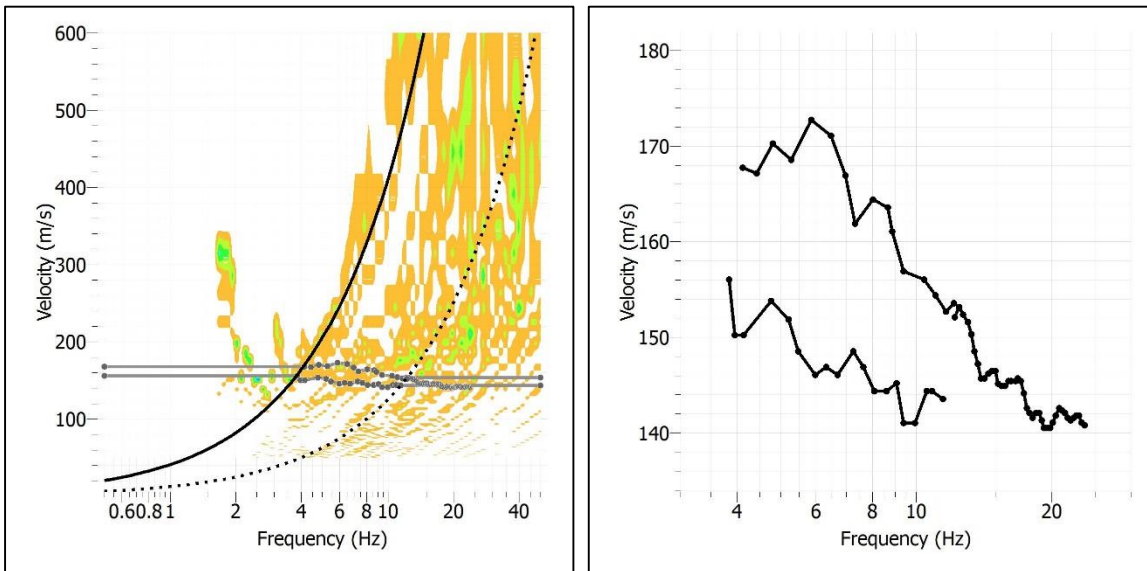
Gráfico D24. Picking elegido para la curva de dispersión experimental.

D.2.2.2. Medición ESAC

a. Configuración Circular



Gráficos D25 y D26. Curva de dispersión ESAC obtenida de medición de configuración circular (izquierda) y picking elegido (derecha), ambas en sector Universidad del Bío Bío.



Gráficos D27 y D28. Curvas de dispersión ESAC y MASW de la configuración circular en Geopsy (izquierda) y en dinver (derecha), ambas en sector UBB.

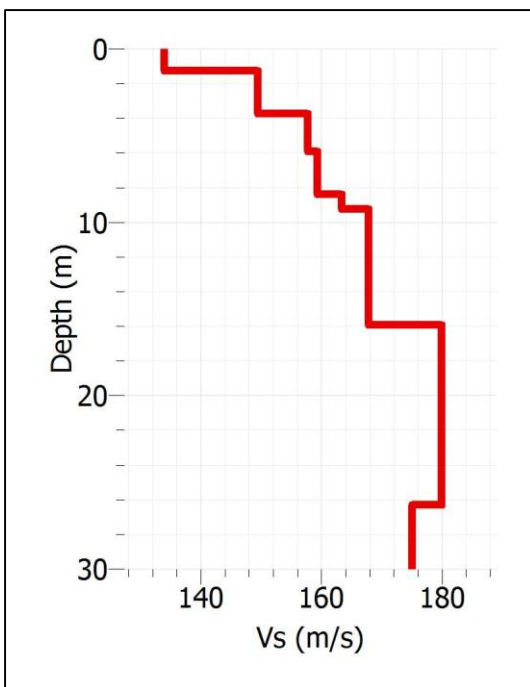
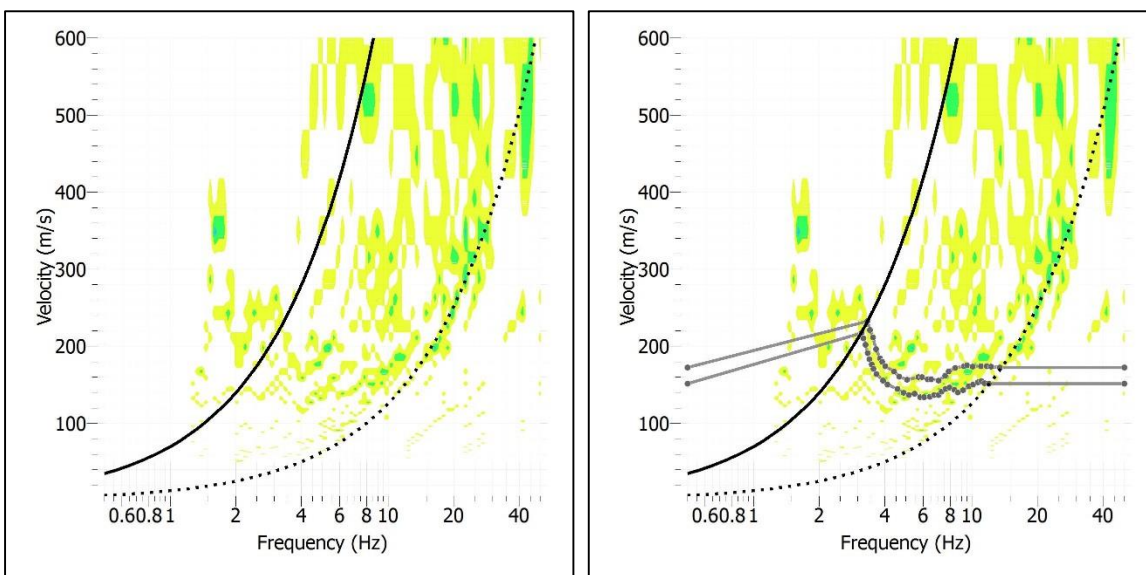


Gráfico D29. Gráfico Vs/Profundidad obtenido mediante la inversión de la curva de dispersión según análisis MASW y ESAC de configuración circular en sector UBB.

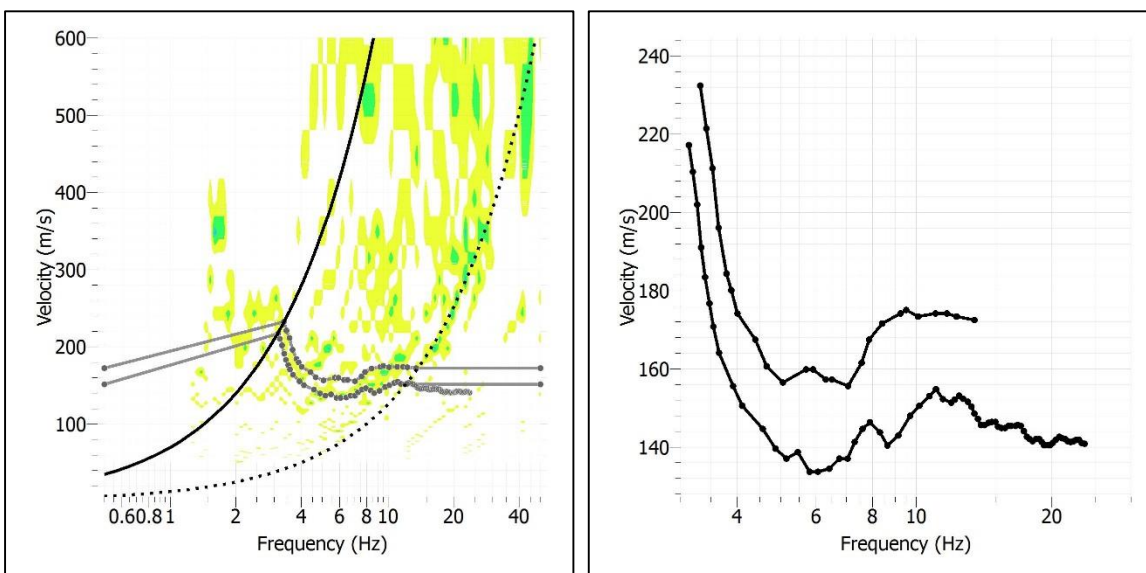
Tabla D6. Perfil de velocidades de ondas de corte obtenidas mediante análisis MASW y ESAC de configuración circular en sector Universidad del Bío Bío.

| Capa | Espesor | Profundidad | Vs [m/s] |
|------|---------|-------------|--------------------------|
| 1 | 1.3 | 1.3 | 133.9 |
| 2 | 2.5 | 3.7 | 149.4 |
| 3 | 2.2 | 5.9 | 157.8 |
| 4 | 2.5 | 8.4 | 159.3 |
| 5 | 0.9 | 9.3 | 163.4 |
| 6 | 6.7 | 15.9 | 167.8 |
| 7 | 10.4 | 26.3 | 180.0 |
| 8 | 3.7 | 30.0 | 175.0 |
| | | | Vs30: 167,5 [m/s] |

b. Configuración L



Gráficos D30 y D31. Curva de dispersión ESAC obtenida de medición de configuración L (izquierda) y picking elegido (derecha), ambas en sector Universidad del Bío Bío.



Gráficos D32 y D33. Curvas de dispersión ESAC y MASW de la configuración L en Geopsy (izquierda) y en dinver (derecha), ambas en sector Universidad del Bío Bío.

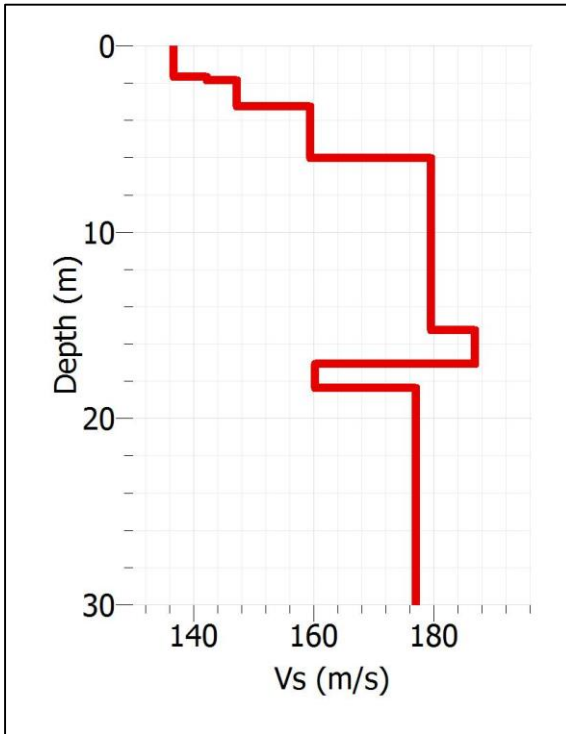
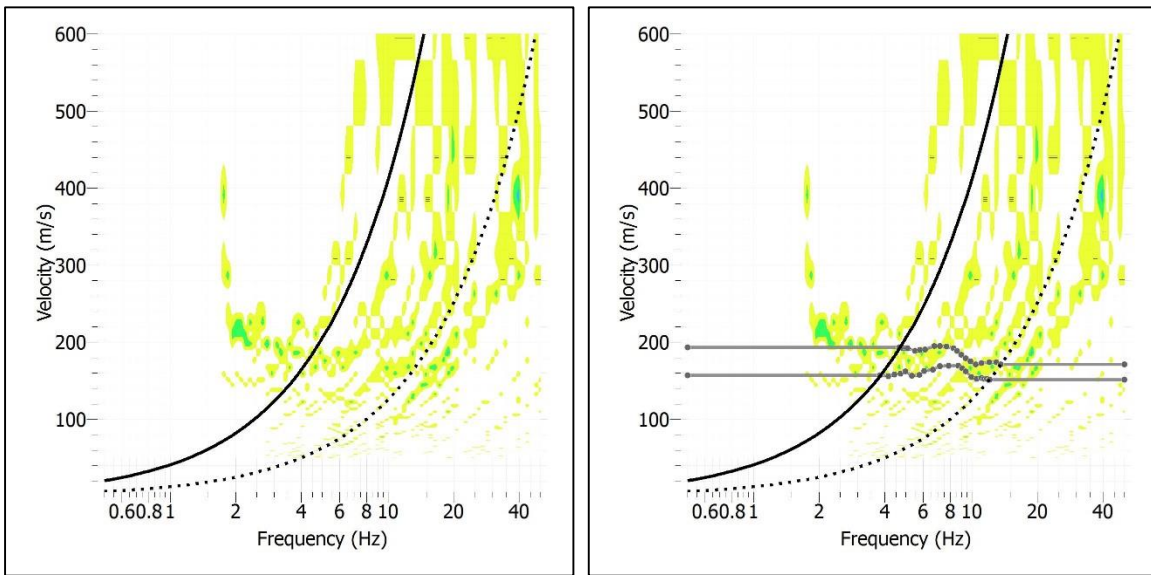


Gráfico D34. Gráfico Vs/Profundidad obtenido mediante la inversión de la curva de dispersión según análisis MASW y ESAC de configuración L en sector Universidad del Bío Bío.

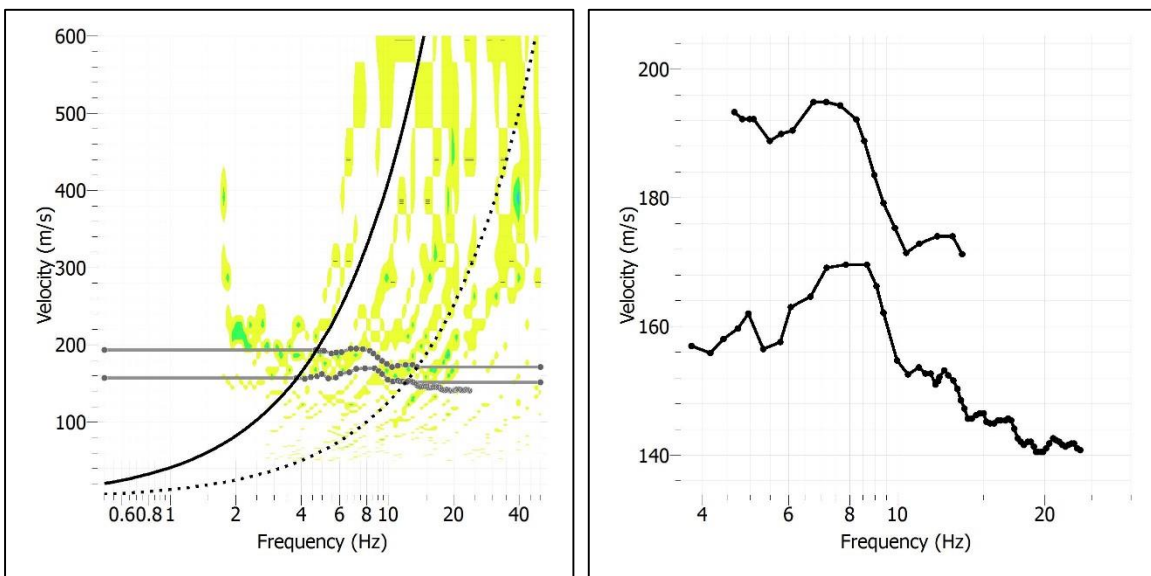
Tabla D7. Perfil de velocidades de ondas de corte obtenidas mediante análisis MASW y ESAC de configuración L en sector Universidad del Bío Bío.

| Capa | Espesor | Profundidad | Vs [m/s] |
|------|---------|-------------|--------------------------|
| 1 | 1.7 | 1.7 | 136.6 |
| 2 | 0.2 | 1.8 | 142.2 |
| 3 | 1.4 | 3.2 | 147.1 |
| 4 | 2.8 | 6.0 | 159.3 |
| 5 | 9.2 | 15.2 | 179.5 |
| 6 | 1.8 | 17.1 | 186.8 |
| 7 | 1.3 | 18.4 | 160.2 |
| 8 | 11.6 | 30.0 | 177.0 |
| | | | Vs30: 171,2 [m/s] |

c. Configuración C



Gráficos D35 y D36: Curva de dispersión ESAC obtenida de medición de configuración C (izquierda) y picking elegido (derecha), ambas en sector Universidad del Bío Bío.



Gráficos D37 y D38: Curvas de dispersión ESAC y MASW de la configuración C en Geopsy (izquierda) y en dinver (derecha), ambas en sector Universidad del Bío Bío.

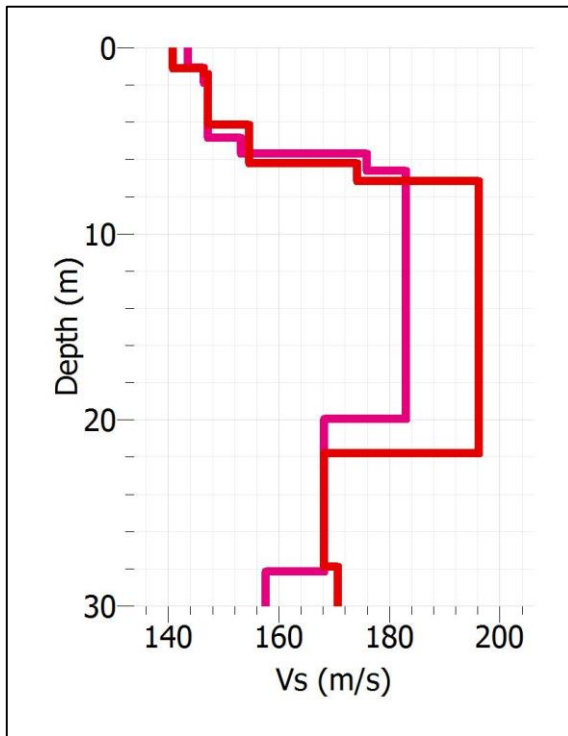
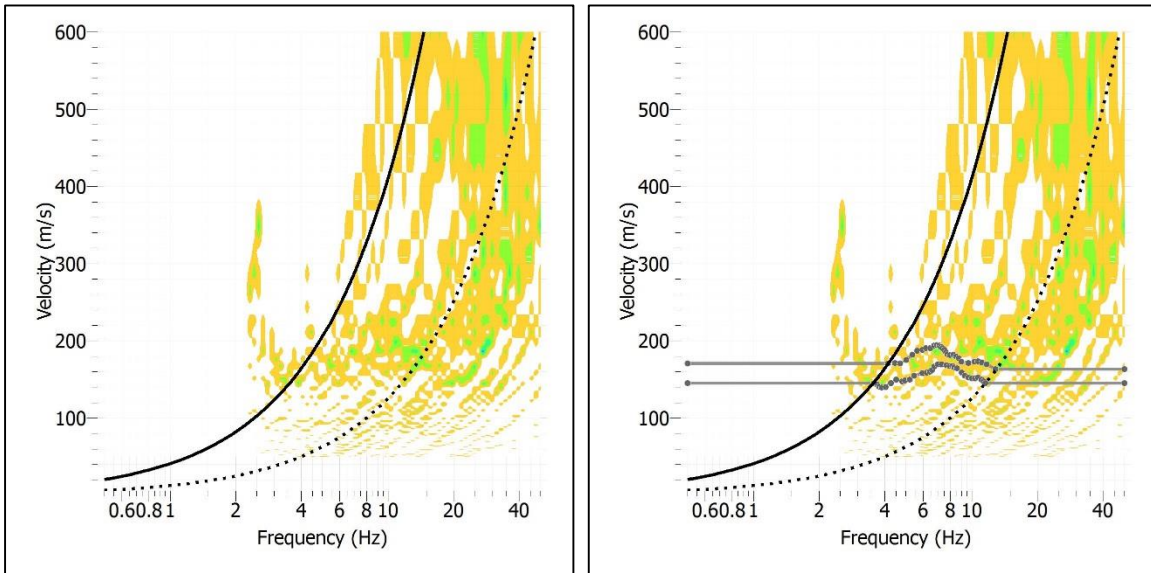


Gráfico D39. Gráfico Vs/Profundidad obtenido mediante la inversión de la curva de dispersión según análisis MASW y ESAC de configuración C en sector Universidad del Bío Bío (rosado).

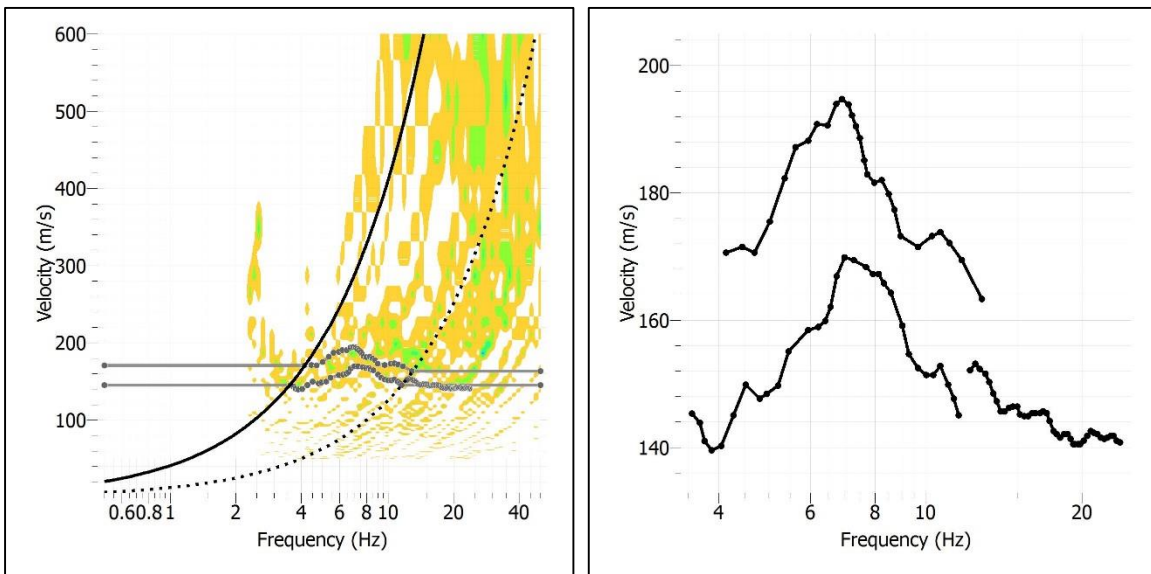
Tabla D8. Perfil de velocidades de ondas de corte obtenidas mediante análisis MASW y ESAC de configuración C en sector Universidad del Bío Bío.

| Capa | Espesor | Profundidad | Vs [m/s] |
|------|---------|-------------|--------------------------|
| 1 | 1.1 | 1.1 | 143.6 |
| 2 | 0.8 | 1.9 | 146.5 |
| 3 | 3.0 | 4.8 | 147.1 |
| 4 | 0.9 | 5.7 | 153.1 |
| 5 | 0.9 | 6.6 | 175.9 |
| 6 | 13.3 | 19.9 | 183.0 |
| 7 | 10.1 | 30.0 | 168.2 |
| 8 | 1.1 | 1.1 | 143.6 |
| | | | Vs30: 169,9 [m/s] |

d. Configuración Corchete



Gráficos D40 y D41. Curva de dispersión ESAC obtenida de medición de configuración corchete (izquierda) y picking elegido (derecha), ambas en sector Universidad del Bío Bío.



Gráficos D42 y D43. Curvas de dispersión ESAC y MASW de la configuración corchete en Geopsy (izquierda) y en dinver (derecha), ambas en sector Universidad del Bío Bío.

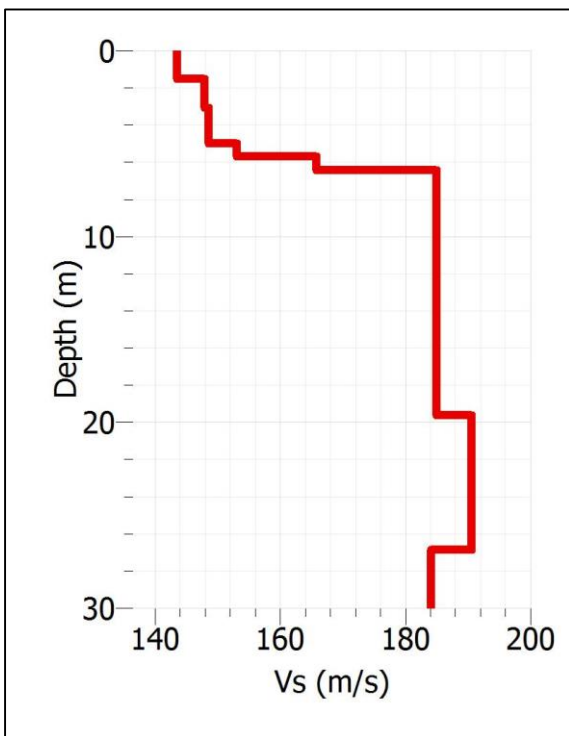


Gráfico D44. Gráfico Vs/Profundidad obtenido mediante la inversión de la curva de dispersión según análisis MASW y ESAC de configuración corchete en sector Universidad del Bío Bío.

Tabla D9. Perfil de velocidades de ondas de corte obtenidas mediante análisis MASW y ESAC de configuración corchete en sector Universidad del Bío Bío.

| Capa | Espesor | Profundidad | Vs [m/s] |
|------|---------|-------------|--------------------------|
| 1 | 1.5 | 1.5 | 143.6 |
| 2 | 1.6 | 3.1 | 148.0 |
| 3 | 1.9 | 5.0 | 148.6 |
| 4 | 0.7 | 5.7 | 153.1 |
| 5 | 0.7 | 6.4 | 165.8 |
| 6 | 13.2 | 19.6 | 185.0 |
| 7 | 7.2 | 26.8 | 190.6 |
| 8 | 3.2 | 30.0 | 184.2 |
| | | | Vs30: 177,1 [m/s] |

D.2.3. Sector 3: Tirúa.

El tercer sitio en estudio se ubica en la cancha de la localidad de Tirúa, cercana a al liceo y la escuela del sector.



Imagen D3. Ubicación zona de estudio sector Tirúa (Fuente mapa local: Google Earth).

D.2.3.1. Medición MASW

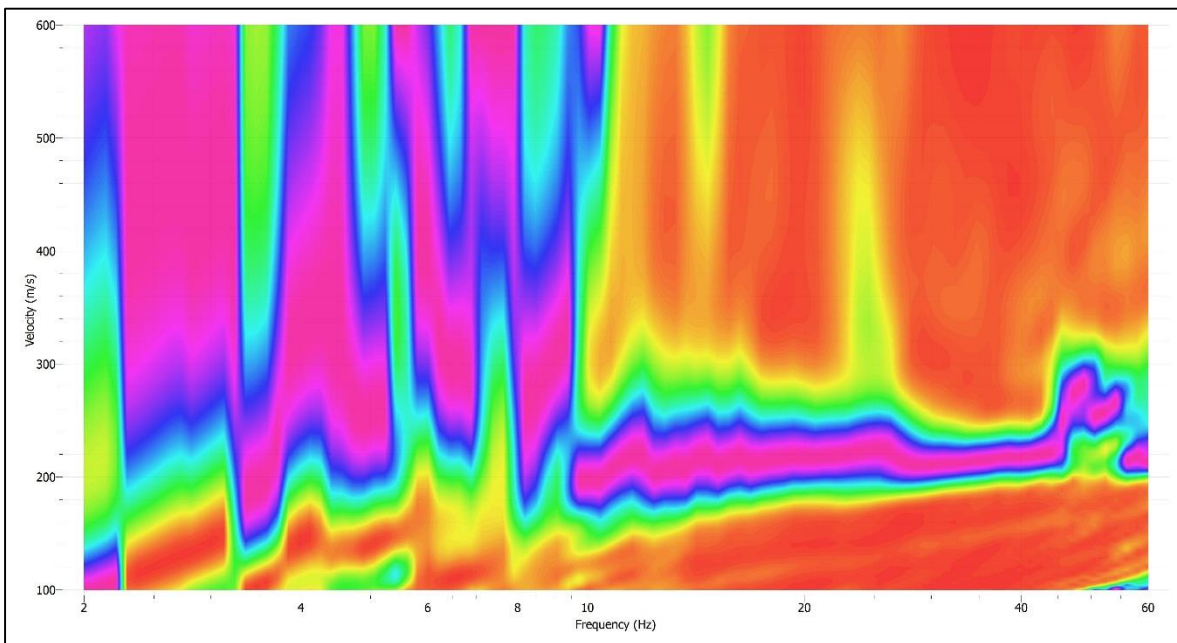


Gráfico 45. Curva de dispersión experimental obtenida de la medición MASW en sector Tirúa.

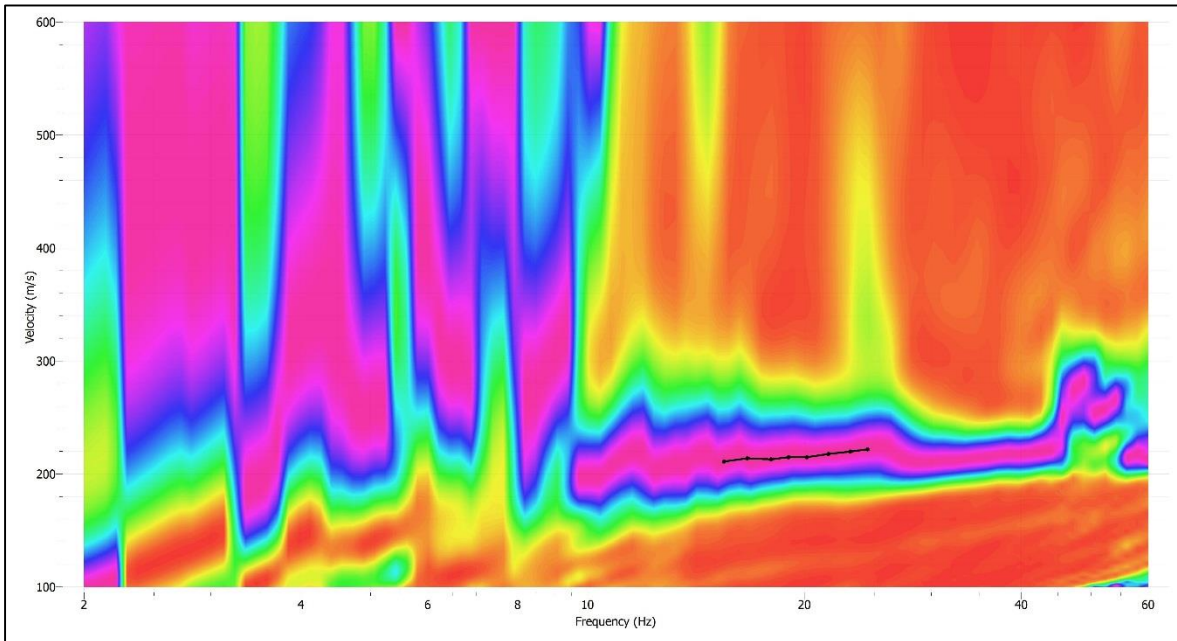
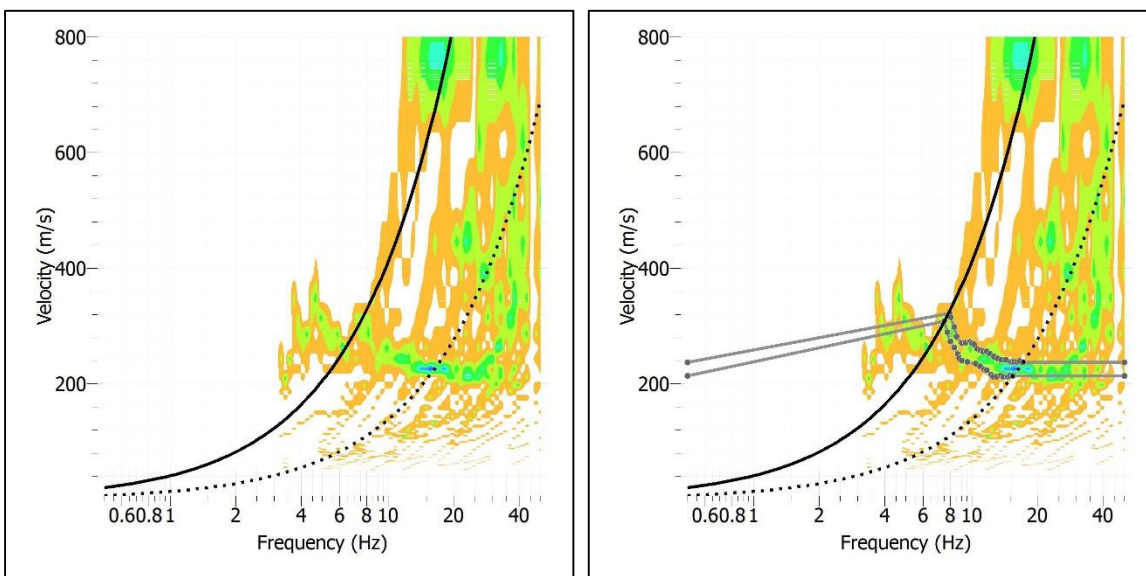


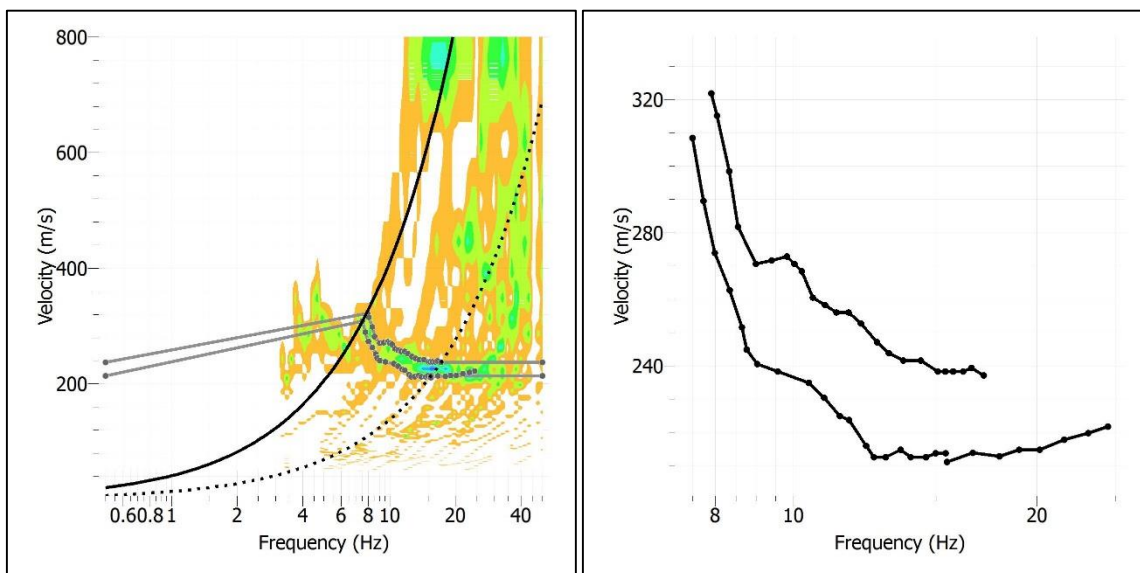
Gráfico D46. Picking elegido para la curva de dispersión experimental.

D.2.3.2. Medición ESAC

a. Configuración Circular



Gráficos D47 y D48: Curva de dispersión ESAC obtenida de medición de configuración circular (izquierda) y picking elegido (derecha), ambas en sector Tirúa.



Gráficos D49 y D50: Curvas de dispersión ESAC y MASW de la configuración circular en Geopsy (izquierda) y en dinver (derecha), ambas en sector Tirúa.

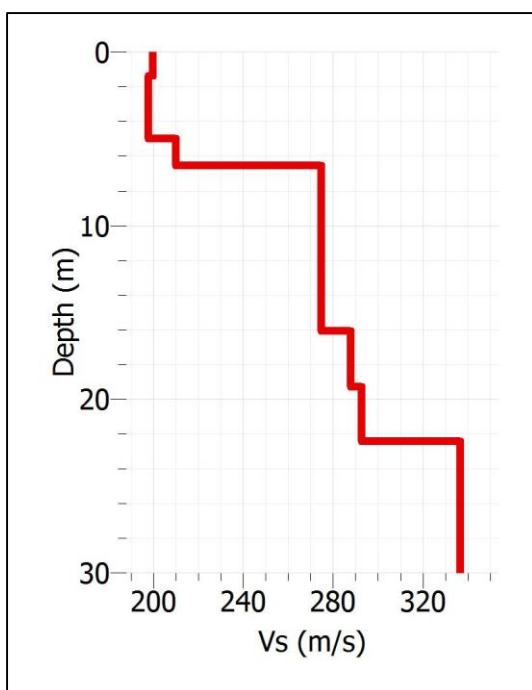
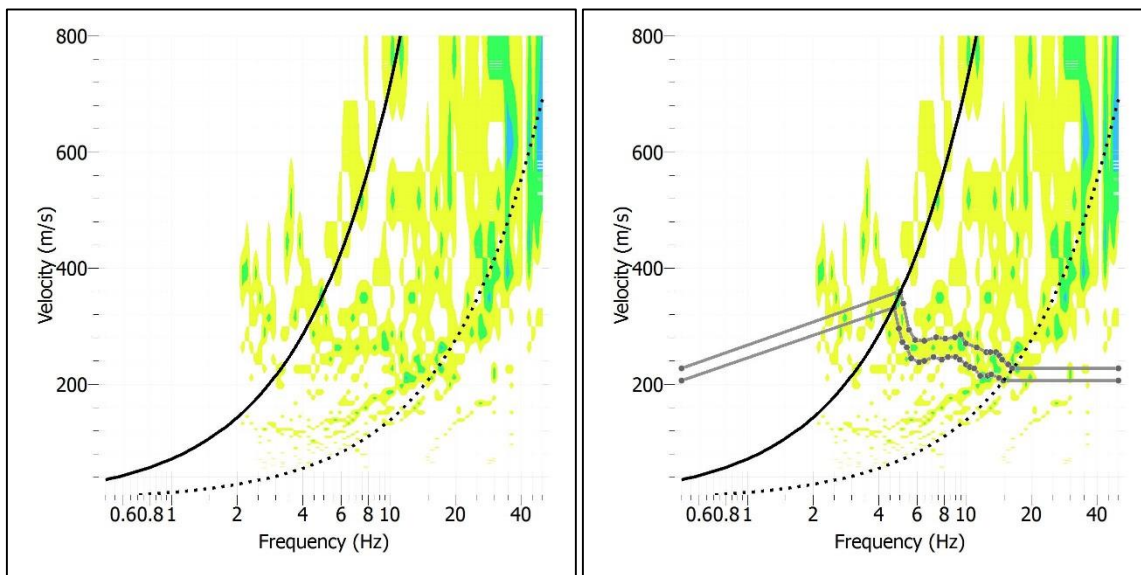


Gráfico D51. Gráfico Vs/Profundidad obtenido mediante la inversión de la curva de dispersión según análisis MASW y ESAC de configuración circular en sector Tirúa.

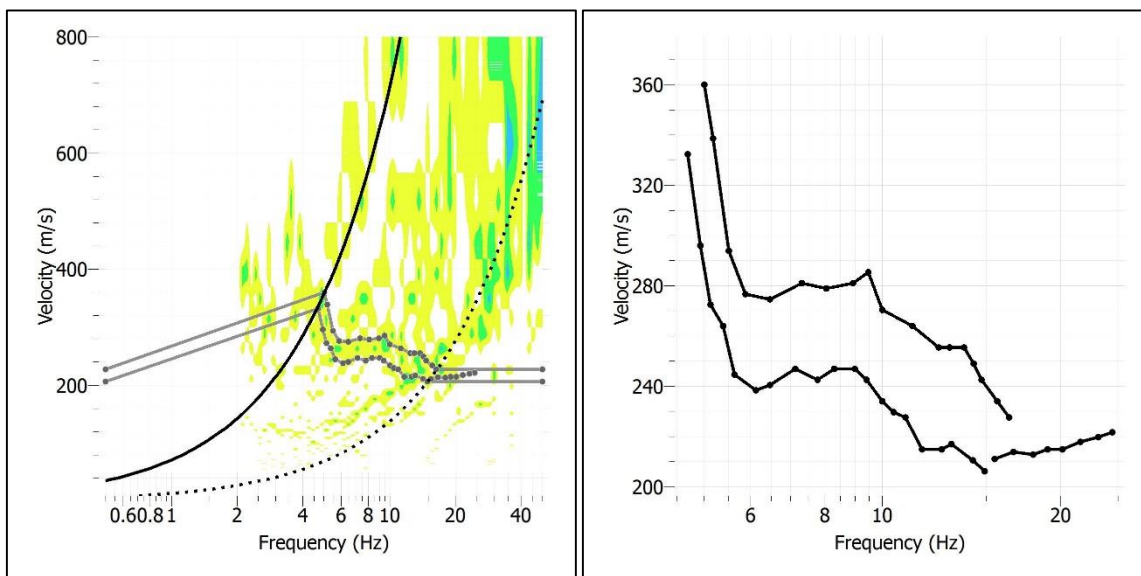
Tabla D10. Perfil de velocidades de ondas de corte obtenidas mediante análisis MASW y ESAC de configuración circular en sector Tirúa.

| Capa | Espesor | Profundidad | Vs [m/s] |
|------|---------|-------------|--------------------------|
| 1 | 1.4 | 1.4 | 199.7 |
| 2 | 3.6 | 5.0 | 197.7 |
| 3 | 1.6 | 6.5 | 210.2 |
| 4 | 9.5 | 16.1 | 274.7 |
| 5 | 3.2 | 19.3 | 287.8 |
| 6 | 3.1 | 22.4 | 292.8 |
| 7 | 7.6 | 30.0 | 336.6 |
| | | | Vs30: 268,8 [m/s] |

b. Configuración L



Gráficos D52 y D53. Curva de dispersión ESAC obtenida de medición de configuración L (izquierda) y picking elegido (derecha), ambas en sector Tirúa.



Gráficos D54 y D55. Curvas de dispersión ESAC y MASW de la configuración L en Geopsy (izquierda) y en dinver (derecha), ambas en sector Tirúa.

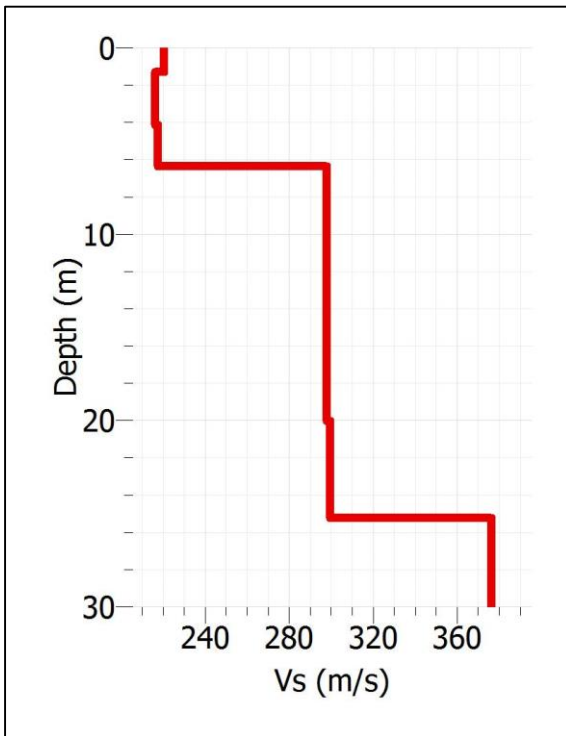
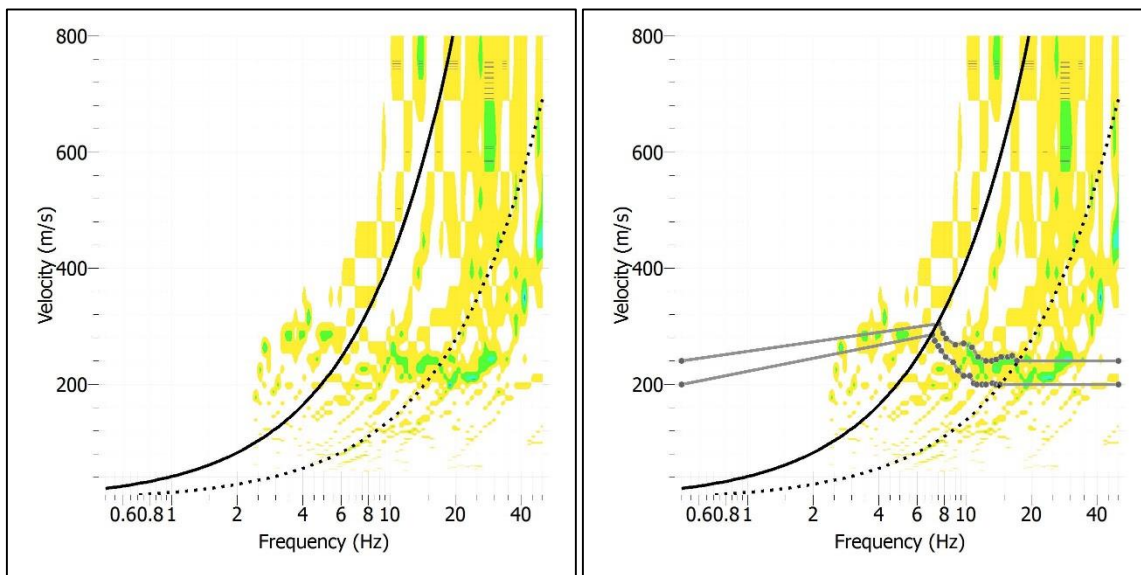


Gráfico D56. Gráfico Vs/Profundidad obtenido mediante la inversión de la curva de dispersión según análisis MASW y ESAC de configuración L en sector Tirúa.

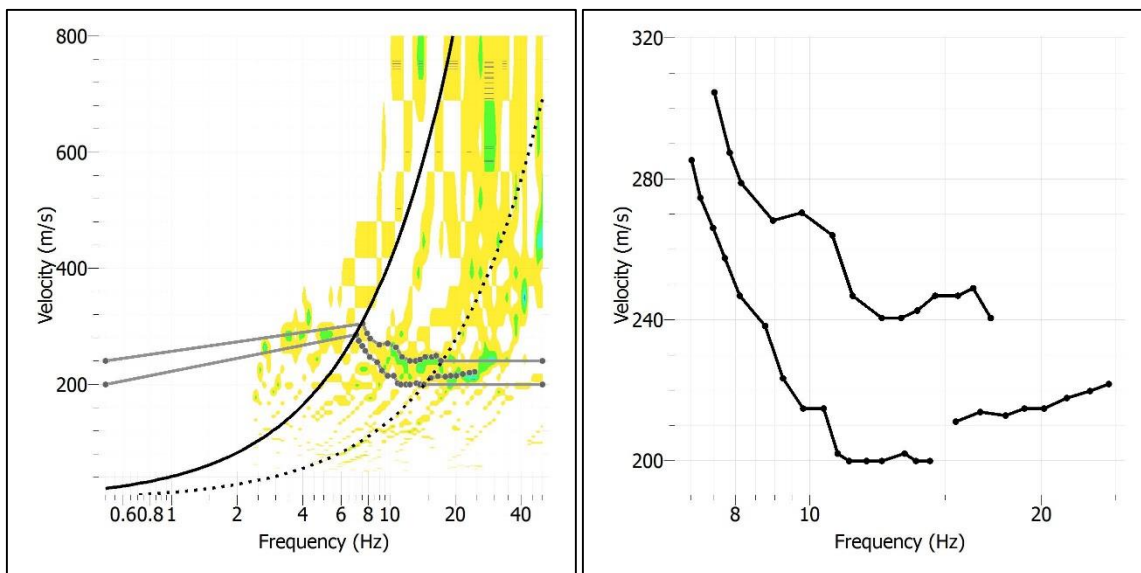
Tabla D11. Perfil de velocidades de ondas de corte obtenidas mediante análisis MASW y ESAC de configuración L en sector Tirúa.

| Capa | Espesor | Profundidad | Vs [m/s] |
|------|---------|-------------|--------------------------|
| 1.0 | 1.3 | 1.3 | 220.6 |
| 2.0 | 2.8 | 4.1 | 216.2 |
| 3.0 | 2.2 | 6.3 | 217.5 |
| 4.0 | 13.7 | 20.0 | 297.8 |
| 5.0 | 5.2 | 25.3 | 299.5 |
| 6.0 | 4.8 | 30.0 | 376.5 |
| | | | Vs30: 285,2 [m/s] |

c. Configuración C



Gráficos D57 y D58. Curva de dispersión ESAC obtenida de medición de configuración C (izquierda) y picking elegido (derecha), ambas en sector Tirúa.



Gráficos D59 y D60. Curvas de dispersión ESAC y MASW de la configuración C en Geopsy (izquierda) y en dinver (derecha), ambas en sector Tirúa.

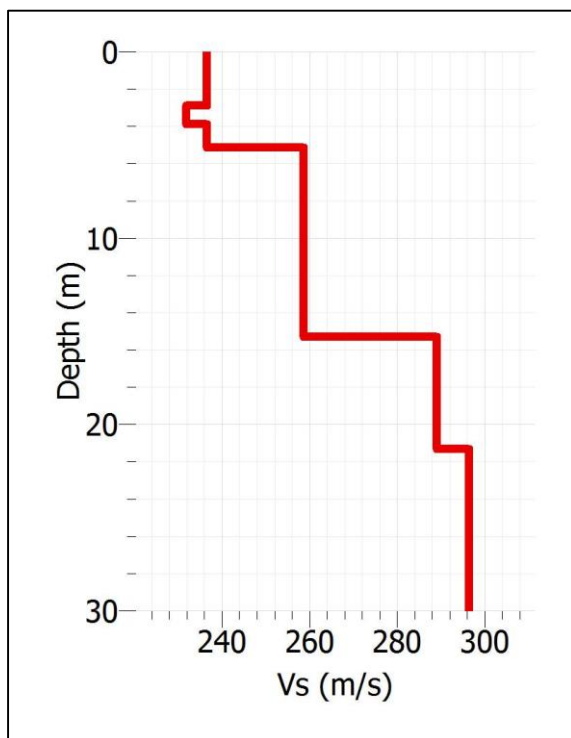
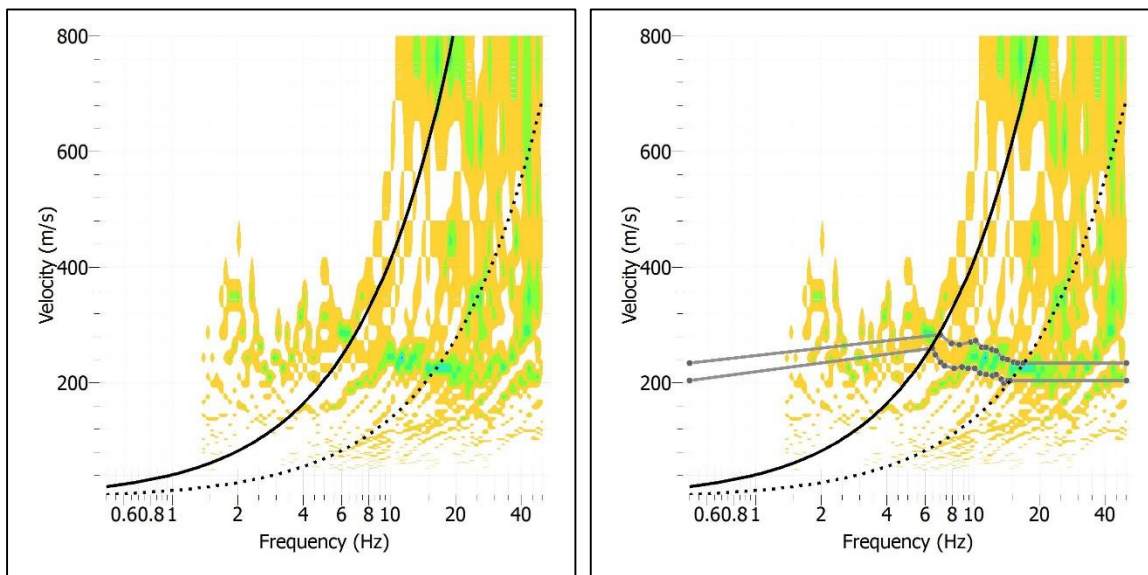


Tabla D12: Perfil de velocidades de ondas de corte obtenidas mediante análisis MASW y ESAC de configuración C en sector Tirúa.

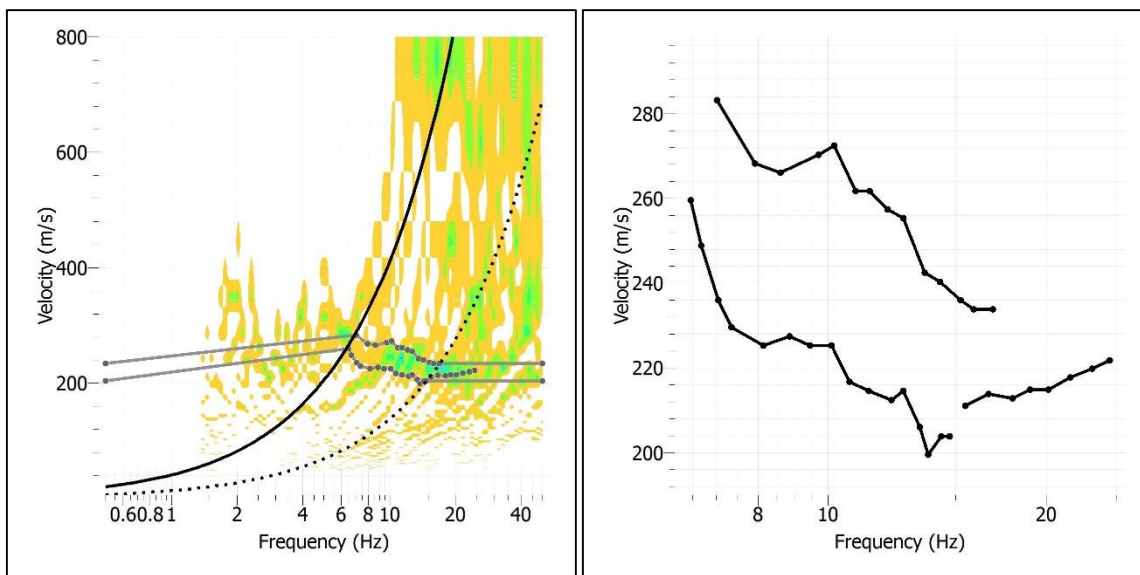
| Capa | Espesor | Profundidad | Vs [m/s] |
|------|---------|-------------|--------------------------|
| 1 | 2.9 | 2.9 | 236.5 |
| 2 | 1.0 | 3.9 | 231.8 |
| 3 | 1.3 | 5.2 | 236.5 |
| 4 | 10.1 | 15.3 | 258.7 |
| 5 | 6.0 | 21.3 | 289.0 |
| 6 | 8.7 | 30.0 | 296.5 |
| | | | Vs30: 269,8 [m/s] |

Gráfico D61: Gráfico Vs/Profundidad obtenido mediante la inversión de la curva de dispersión según análisis MASW y ESAC de configuración C en sector Tirúa.

d. Configuración Corchete



Gráficos D62 y D63. Curva de dispersión ESAC obtenida de medición de configuración corchete (izquierda) y picking elegido (derecha), ambas en sector Tirúa.



Gráficos D64 y D65. Curvas de dispersión ESAC y MASW de la configuración corchete en Geopsy (izquierda) y en dinver (derecha), ambas en sector Tirúa.

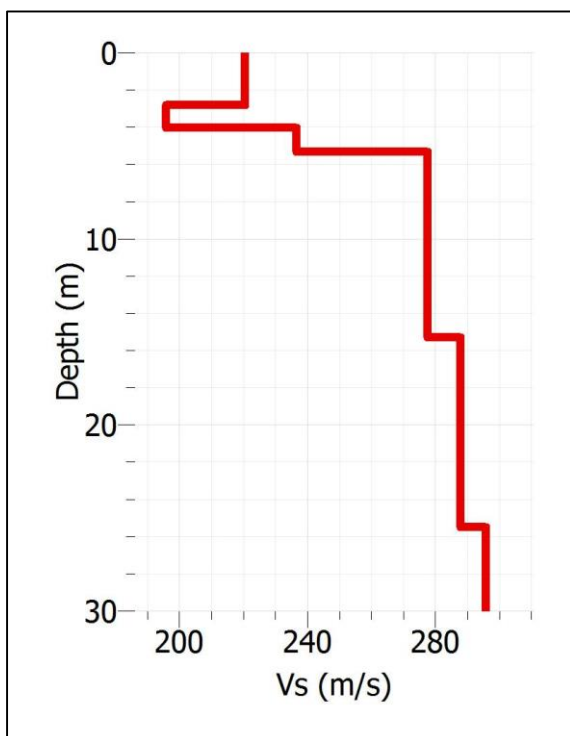


Tabla D13: Perfil de velocidades de ondas de corte obtenidas mediante análisis MASW y ESAC de configuración corchete en sector Tirúa.

| Capa | Espesor | Profundidad | Vs [m/s] |
|--------------------------|---------|-------------|----------|
| 1 | 2.8 | 2.8 | 220.6 |
| 2 | 1.2 | 4.0 | 195.8 |
| 3 | 1.3 | 5.3 | 236.5 |
| 4 | 10.0 | 15.3 | 277.5 |
| 5 | 10.2 | 25.5 | 287.8 |
| 6 | 4.5 | 30.0 | 295.8 |
| Vs30: 270,1 [m/s] | | | |

Gráfico D66: Gráfico Vs/Profundidad obtenido mediante la inversión de la curva de dispersión según análisis MASW y ESAC de configuración corchete en sector Tirúa.

D.2.4. Resumen de Vs30

Tabla 14. Resumen de cálculos de Vs30 realizados en los sitios de estudio.

| Sitio de estudio | Vs30 [m/s] | | | |
|-------------------------|------------|-------|-------|----------|
| | Circular | L | C | Corchete |
| Estadio italiano | 295,2 | 346,1 | 317,6 | 299,1 |
| Universidad del Bío Bío | 167,5 | 171,1 | 169,9 | 177,1 |
| Tirúa | 268,8 | 285,2 | 269,8 | 270,1 |

Tabla 15. Porcentajes de error de los Vs30 de la Tabla 3.

| Sitio de estudio | Errores | | |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | L | C | Corchete |
| 1. Estadio Italiano | 17.2% | 8.2% | 5.8% |
| 2. Universidad del Bío Bío | 0.9% | 0.7% | 4.6% |
| 3. Tirúa | 6.1% | 5.4% | 0.1% |
| Promedio | 8.1% | 4.8% | 3.5% |