

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA.

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante : Óscar Gutiérrez Astete
Profesores Comisión : Gilda Espinoza Valenzuela
: Juan Marcus Schwenk

Efecto de los errores en el posicionamiento de los geófonos en ensayos MASW.

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

NICOLE FERNANDA CAREAGA ARRIAGADA.

Abril 2016

Dedicatoria

*Dedicada a mis Padres,
Sara Arriagada y Fernando
Careaga, por su amor, trabajo
y sacrificios de toda la vida.
Gracias a ustedes he logrado
culminar mis estudios.
Me siento bendecida de ser su hija,
son los mejores padres.*

Agradecimientos

*A Dios por darme perseverancia y fé
para creer que podía terminar mi carrera
en momentos difíciles.
Además, de permitirme tener una excelente
experiencia universitaria,
donde conocí a grandes personas.*

*Agradezco a toda mi gran familia por
su incondicional cariño y ayuda
en estos años, además, por
su ejemplo de superación y humildad.*

*A mis Nanos Carlos y Jorge, por su
valiosa amistad, por estar siempre
conmigo y no permitir rendirme.*

ÍNDICE

NOMENCLATURA	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUCCIÓN.....	9
1.2 Objetivos de la investigación.....	10
1.3 Justificación del tema.	10
1.4 Metodología de trabajo	12
2 MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 Ondas Sísmicas.....	13
2.2 Caracterización de ondas Rayleigh.	13
2.3 Métodos de Medición de Ondas Superficiales.....	14
2.3.1 <i>Método MASW.....</i>	<i>15</i>
2.4 Curvas de dispersión	15
2.5 Errores en método MASW.....	16
2.6 Procesamiento de datos.	17
3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS.....	18
3.1 Equipo utilizado.	18
3.2 Mediciones en terreno.	19
3.2.1 <i>Configuraciones de geófonos.</i>	<i>19</i>
3.2.2 <i>Características de las mediciones</i>	<i>22</i>
3.3 Sitios de estudio.....	23
3.4 Procesamiento de datos.	25
3.4.1 <i>Determinación de la curva de dispersión.....</i>	<i>25</i>
3.4.2 <i>Inversión de la curva de dispersión.....</i>	<i>25</i>
4 RESULTADOS Y ANÁLISIS.	26

4.1 Resultados de ensayos MASW	26
4.1.1 <i>Curva de dispersión MASW</i>	26
4.1.2 Límites de la curva de dispersión.	26
4.1.3 <i>Perfiles estratigráficos MASW</i>	32
4.1.4 <i>Estimación de Vs30</i>	34
5 Conclusiones	36
6 REFERENCIAS	31

NOMENCLATURA

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

ReMi: Refracción de ruido ambiental (Refraction Microtremor).

SASW: Análisis Espectral de Ondas Superficiales (Spectral Analysis of Surface Waves).

Vs: Velocidad de propagación de ondas de corte.

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

DS N° 61: Decreto Supremo N° 61.

Efectos de los errores en el posicionamiento de los geófonos en ensayos MASW.

Autor: Nicole Fernanda Careaga Arriagada

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

Correo Electrónico: Nicole.careaga@gmail.com

Profesor Patrocinante: Óscar Gutiérrez Astete.

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

Correo Electrónico: solving.cl@gmail.com

RESUMEN

La velocidad de onda de corte nos permite predecir el comportamiento del suelo frente a la demanda sísmica, por esto resulta fundamental determinar de manera confiable el valor de este parámetro. Uno de los métodos activos más utilizados en la actualidad y propuesto por el DS°61, es el ensayo MASW.

La fuente receptora que utiliza el ensayo MASW son múltiples geófonos que están dispuestos linealmente equidistantes entre ellos. En ocasiones esta configuración de geófonos debe ser modificada, debido a las características propias del terreno o presencia de elementos que interrumpen la configuración lineal equidistante de geófonos.

Por lo tanto, en el presente Proyecto de Título, se empleó el método MASW para determinar cómo varía el V_{s30} en distintos tipos de suelos si algunos geófonos de la configuración lineal presentan desplazamiento en distintas direcciones.

Para así poder estimar un grado de error aceptable de desplazamiento de geófonos en la ejecución de ensayos MASW.

Palabras claves: MASW, geófonos.

ABSTRACT

The shear wave velocity (SWV) allows us to predict the ground behavior under seismic waves. Therefore, it is of great significance to accurately determine the value of this parameter. The multichannel analysis of surfaces (MASW) technique is nowadays one of the most used methods to measure the SWV, as recommended by DS°61.

The MASW technique utilizes a series of equidistant geophones, which are linearly arranged. Sometimes, this configuration has to be modified due to land characteristics or obstacles, which do not allow an equidistant linear arrangement.

The MASW method has been used in this thesis to determine the variation of the Vs30 for different ground types by monitoring the geophone displacements, in order to estimate an acceptable geophone displacement error for the MASW technique.

Keywords: MASW Geophones

Número de palabras: $5012 + 21 * 250 + 3 * 500 = 11762$ Palabras Totales

1 INTRODUCCIÓN.

Las propiedades dinámicas del suelo son uno de los factores que influyen en la respuesta de sitio frente a una sollicitación sísmica. Siendo la velocidad de onda de corte la que nos permite estimar estas propiedades dinámicas del suelo y nos ayuda a predecir el comportamiento del suelo frente a un sismo.

El Decreto Supremo N°61 oficializado en diciembre de 2011, modificó la clasificación sísmica de los suelos de la NCh 433, siendo el parámetro base de la clasificación de la velocidad de propagación de las ondas de corte.

Debido a esto resulta primordial determinar de manera confiable la velocidad de propagación de las ondas de corte en los primeros 30 metros. Por eso, la normativa exige que se realicen mediciones mediante métodos geofísicos del tipo invasivos o no invasivos con lo que se puede obtener la velocidad de onda de corte.

Uno de estos métodos más utilizados es el método MASW, que consiste en la ubicación de geófonos verticales dispuestos linealmente en la superficie del terreno y a una distancia de separación equidistantes entre ellos.

Producto de las características de suelo, calidad de los sitios de estudios, existe una variabilidad en los resultados de la curva dispersión, debido existen ocasiones donde equidistancia entre los geófonos no se puede respetar.

En este Proyecto de Título se implementará el método MASW, utilizando diversas configuraciones de geófonos verticales de 4.5 Hz y se realizaran mediciones en distintos sitios de estudios, para así poder determinar la variación que sufre el Vs30 si algunos geófonos de la configuración lineal sufren desplazamientos.

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 El objetivo general del proyecto de título es:

- ✓ Determinar el rango de error que me permite el método MASW si la distancia inter-geofónica es variable

1.2.2 Los objetivos específicos son:

- ✓ Describir el método Análisis Multicanal de ondas de superficie (MASW).
- ✓ Elegir diversas configuraciones lineales de geófonos, incorporando un % desplazamiento en distintas direcciones, para poder obtener el Vs30.
- ✓ Comparar las curvas dispersión para así poder seleccionar la de mayor calidad.
- ✓ Estimar la variación del Vs30 entre la configuración patrón utilizada y las configuraciones con un % de desplazamiento incorporado.

1.3 Justificación del tema.

El suelo es uno de los factores más relevantes desde el punto de vista del diseño sísmico, debido a que éste altera y modifica la demanda sísmica.

Este fenómeno es conocido como respuesta de sitio, que consiste que cuando entra una señal sísmica en la base, el suelo filtra y propaga las ondas sísmicas de manera distinta a la superficie. La amplificación de las ondas sísmicas en la superficie depende principalmente de un parámetro que es la rigidez el suelo y éste se mide a través del Vs30.

Debido al acontecimiento sísmico ocurrido el 27 de febrero del 2010, se promulgó el DS 61, que modifica la actual norma chilena NCh 433 de Diseño sísmico de edificios, en la cual el objetivo es proponer una nueva clasificación de suelos en función de un parámetro base que es la velocidad de propagación de las ondas de corte en los 30 m de profundidad de la superficie.

Según el DS 61 la obtención del Vs30 es obligación 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.

Al surgir la necesidad de realizar medición de ondas de corte, se dieron a conocer distintos métodos con los cuales se pueden obtener dicho parámetro, algunos de estos son Down-hole, Cross-hole, MASW, SASW y REMI.

El método MASW se caracteriza por ser del tipo activo, no invasivo, de bajo costo y donde su fuente generadora es impulsiva. La fuente receptora usa múltiples geófonos o canales, que están dispuestos linealmente, equidistantes entre ellos. Con la obtención de los datos en terreno se obtienen la curva de dispersión de las ondas superficiales (Rayleigh) que permite aceptar o rechazar el perfil de velocidades de la onda.

En algunas ocasiones existen diversos factores que alteran la precisión de la curva de dispersión, como es el ruido ambiental que existe en terreno y/o la modificación de la configuración lineal equidistante entre geófonos, debido a imperfecciones en el terreno, superficies de apoyo demasiado flexibles y/o presencia de elementos de diseño de urbanización, que modifican los puntos de penetración de los geófonos.

Con lo anteriormente señalado, en esta memoria se propone estudiar el efecto sobre la obtención del Vs30 si algunos puntos de penetración de los geófonos son modificados con respecto a su configuración lineal, debido a las características morfológicas del suelo y/o presencia de elementos de apoyos no adecuados.

Además, proponer un rango de desplazamiento en el cual la penetración de los geófonos pueda variar con respecto a su configuración patrón, para que así la curva de dispersión todavía tenga una precisión confiable, al igual que el resultado del Vs30.

1.4 Metodología de trabajo

Para cumplir el objetivo general de esta Memoria de título se llevara a cabo el siguiente plan de trabajo mostrado en el Figura 1:

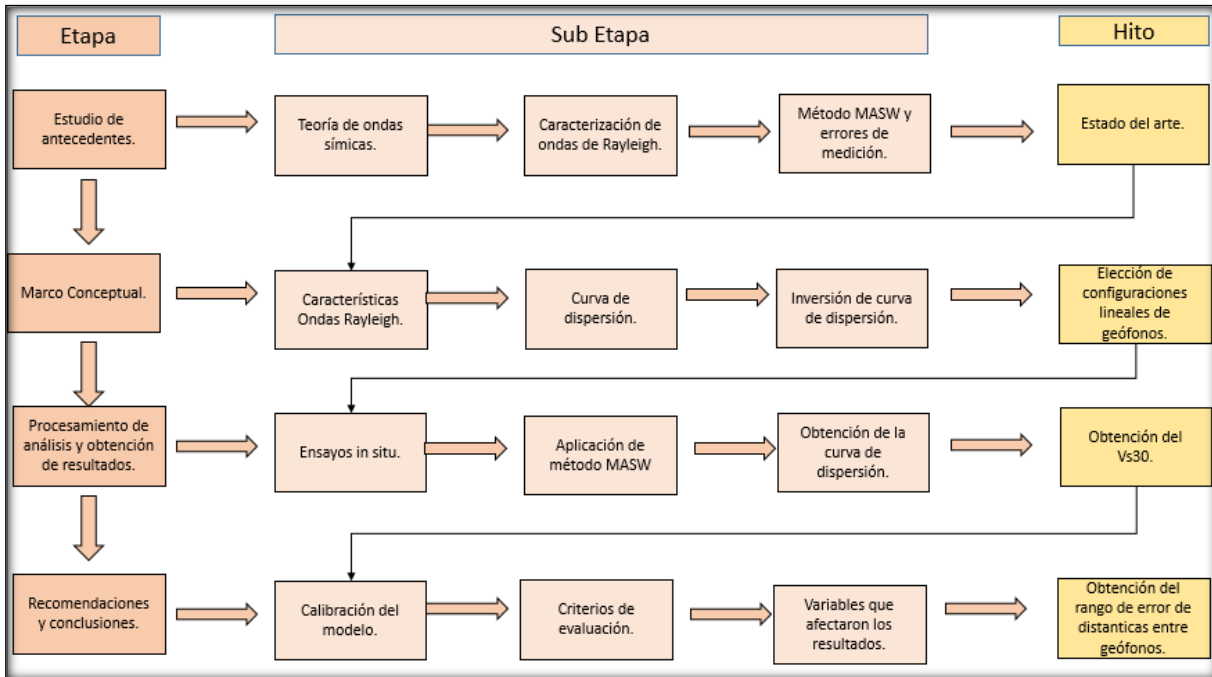


Figura 1: Plan de trabajo para el “Efecto de los errores en el posicionamiento de los geófonos en ensayos MASW”.

- I. Estudio de antecedentes: Se realiza una búsqueda de información sobre la teoría de ondas sísmicas, análisis de la ondas de Rayleigh, descripción del método MASW y los tipos de error en la medición.
- II. Marco conceptual: Se estudia que tipo de onda es la más representativa para la aplicación del método MASW, además se debe investigar y analizar el proceso para la obtención de la curva de dispersión y la inversión de la curva.
- III. Procesamiento de análisis y obtención de resultados: Con los datos obtenidos en terreno para las distintas configuraciones lineales de geófonos, se analizan las distintas curvas de dispersión generadas para cada configuración mediante el software GEOPSY, para así obtener el VS30.
- IV. Conclusiones y recomendaciones: Se determina la máxima distancia variable entre geófonos que me permite el método MASW, para que el VS30 del suelo tenga un resultado confiable.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Ondas Sísmicas.

En un evento sísmico existe una liberación de energía producido por una perturbación en la corteza terrestre, ésta se trasmite mediante ondas que viajan al interior de la tierra, siguiendo caminos curvos de acuerdo a la variada densidad y composición de las capas del interior de la tierra. Estas ondas sísmicas se dejan sentir tanto por población o las estructuras, dependiendo de la amplitud del movimiento (desplazamiento, velocidad y aceleración del suelo).

Las ondas se pueden clasificar según el lugar de propagación y se dividen en dos grupos: Ondas de cuerpo o de superficie, las que se explican en forma más detallada en el Anexo A.

Ondas Rayleigh:

Un tipo de onda superficial son las ondas Rayleigh que producen un movimiento elíptico retrógrado, éstas viajan a través de la superficie de la tierra en dirección paralela, con una amplitud decreciente con la distancia y profundidad (Biot.1962).

Son ondas más lentas que las ondas de cuerpo y su velocidad de propagación es aproximadamente un 70% de la velocidad de la onda S (Henríquez C. 2007).

2.2 Caracterización de ondas Rayleigh.

Las ondas Rayleigh en un espacio estratificado tienen la propiedad de transmitirse con una velocidad en función de la frecuencia, debido a que existe el fenómeno de dispersión.

Este fenómeno se puede explicar teniendo en cuenta un medio compuesto por una serie de capas homogéneas, isotrópicas, lineales y elásticas, considerando el grado de deformación del suelo causado por una perturbación de una determinada longitud de onda que viaja por la superficie. Tal como se presenta en la imagen en el caso b se tiene una perturbación representada por una longitud de onda corta, mientras que el caso c corresponde a una perturbación representada por una longitud de onda larga.

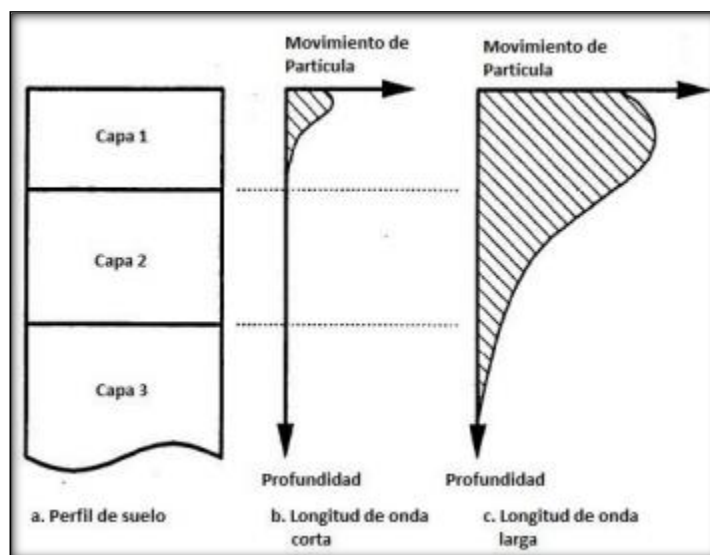


Figura 2: Representación de la dispersión de las ondas Rayleigh dependiendo de la longitud de onda (Modificado Rix 1988, Foti 2000)

Este sistema se caracteriza entonces por una curva de dispersión, que viene a ser una relación entre la frecuencia y la velocidad de fase de la onda de superficie, la que permitirá mediante su inversión, el perfil de velocidad de onda de corte en la profundidad.

Los métodos geofísicos basados en el análisis de ondas superficiales recurren a esta característica dispersiva para caracterizar los suelos, pues esta propiedad depende de la estratigrafía del sitio y, en particular, del perfil de velocidades de ondas de corte. Dado que las ondas de Rayleigh movilizan al suelo hasta una profundidad dependiente de su longitud de onda, cuando la longitud de onda es pequeña, la velocidad de fase dependerá de las propiedades de la(s) capa(s) superficial(es), mientras que si la longitud de onda es mayor, la velocidad también dependerá de estratos más profundos.

2.3 Métodos de Medición de Ondas Superficiales.

Para poder obtener las propiedades dinámicas de un suelo, existen métodos geofísicos, los cuales se clasifican en 3 tipos principalmente: métodos activos, pasivos y los híbridos.

Ver Anexo A.

2.3.1 Método MASW

Es un tipo de ensayo geofísico activo y no invasivo, esto quiere decir que las ondas superficiales registradas son provocadas por una fuente impulsiva como el golpe de un mazo o martillo en el suelo, lo que genera una perturbación en la superficie.

Al ser un ensayo del tipo no invasivo no considera la extracción de muestra ni la necesidad de realizar uno o más sondajes de perforación, lo que permite realizar el muestreo o ensayo sin tener que perturbar el terreno.

La fuente activa utilizada debe estar alineada con múltiples receptores, se recomienda una utilización mínima de 12 receptores (Roma, 2006), equidistantes entre ellos a una distancia máxima de 5 metros (Humire, F. Leyton, F. Saéz, E, 2015). Dónde el arreglo lineal utilizado tenga una distancia mínima de 45 metros de largo (Humire, F. Leyton, F. Saéz, E, 2015).

A continuación del registro de datos, se debe seleccionar la curva experimental de dispersión de las ondas superficiales, que es una relación entre la frecuencia y la velocidad de fase de la onda de superficie, para así poder seguir el próximo proceso que es la identificación del perfil de velocidad de onda de corte (VS).

2.4 Curvas de dispersión

La obtención de la curva de dispersión es uno de los pasos fundamentales para así poder generar el perfil exacto de velocidad de onda de corte del suelo.

Las curvas de dispersión generalmente se muestran como un registro de velocidad de fase y frecuencia. Debido a esta relación se puede obtener esta curva mediante la aplicación de la transformada de Fourier, donde realiza una modificación al registro tiempo a frecuencia. La precisión de la curva de dispersión puede mejorar mediante el análisis y eliminación de los ruidos en los datos de las ondas de Rayleigh (Park et al. 1999).

La inversión de las ondas superficiales ha supuesto una estimación de las propiedades elásticas del suelo, y éstas están representadas por varios parámetros independientes, como el módulo elástico, módulo de Young, módulo de corte, etc.

Sin embargo, en la práctica es necesario disponer de una medición sencilla de las propiedades físicas del suelo, como lo son la velocidad de onda P y S y la densidad In situ. Entre estas propiedades, es la velocidad de onda de corte, VS, la cual se estima del proceso de inversión de los datos adquiridos de ondas superficiales. Esto es debido a que el tipo de datos utilizados en

la inversión corresponde al modo fundamental (M0), cuya forma es determinada principalmente por la estructura de VS en el terreno. Una expresión más exacta es la que ha asumido que el modo fundamental predomina en los datos recogidos en terreno.

2.5 Errores en método MASW

En los ensayos que se utiliza la fuente activa, las ondas superficiales mejor generadas son en terrenos planos, donde existe una menor variación topográfica dentro de una en la zona de estudio.

Sin embargo, cualquier relieve superficial cuya dimensión es mayor que el 10 % de D (largo de arreglo de geófonos), se convertirá en un significativo obstáculo para la generación de superficie de onda.

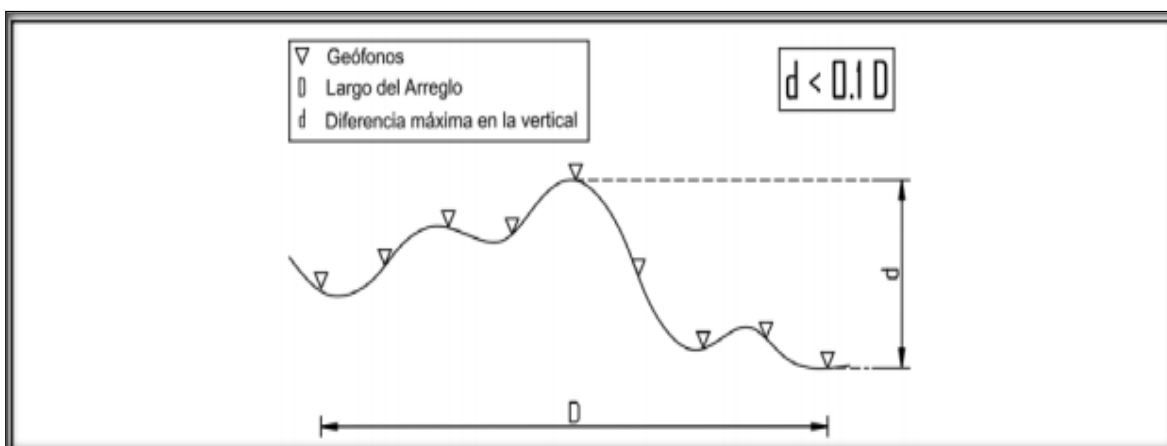


Figura 3: Disposición de geófonos en terrenos sinuosos.

Cabe mencionar que la mayor parte de los software de análisis comerciales no disponen de la opción para incorporar los desniveles de los geófonos al análisis. Si existe dicha restricción, es fundamental que el arreglo en terreno sea prácticamente horizontal (Humire, F. Leyton, F. Saéz, E, 2015).

2.6 Procesamiento de datos.

Luego de la etapa de adquisición de datos en terreno es posible determinar el perfil de Vs30, el cual se puede resumir en 3 etapas:

- Obtención de la curva de dispersión experimental
- Estimación la curva de dispersión aparente
- Proceso de inversión de la curva de dispersión aparente

Para luego determinar el perfil de velocidad de ondas de corte del suelo en estudio y el Vs30. Se detallan estas etapas en el Anexo B.

3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS.

Las mediciones en terreno se realizaron mediante configuraciones lineales de geófonos, donde los instrumentos están dispuestos linealmente, y el posicionamiento de los geófonos sufrirá una variación entre un 3.33% a un 20 % con respecto a la separación de los instrumentos. La fuente activa utilizada será el golpe de un martillo de 9 Kg (20 lb) sobre una placa metálica alineada con el arreglo.

Como parte importante en el desarrollo de los ensayos, se tuvo que determinar en qué tipo de suelos la curva de dispersión se podía obtener en forma más nítida y así poder asegurar una profundidad de muestreo de por lo menos 30 metros.

Es así, como en el desarrollo de este capítulo se describen las decisiones y del procedimiento que se llevó a cabo en el desarrollo de este trabajo.

3.1 Equipo utilizado.

Las principales componentes del equipo utilizado en terreno para la realización de ensayos MASW son los siguientes:

- Sismógrafo DoReMi de SARA Electronic Instruments, donde sus características generales se detallan a continuación:
 - 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 =20 [lb]).
- Placa para el golpe.
- Soportes de PVC para geófonos.
- Software DoReMi para digitalización del registro.
- Software Geopsy para análisis del registro.



Figura 4: Equipo de medición para la adquisición de datos en terreno.

3.2 Mediciones en terreno.

De acuerdo a los antecedentes planteados en este Trabajo de Título, los ensayos en terreno se realizaron bajo las siguientes consideraciones:

3.2.1 Configuraciones de geófonos.

Para la realización de los ensayos MASW se utilizó 18 geófonos espaciados a 1.5, 2.5 y 3 metros.

Este número de geófonos es suficiente para realizar una medición confiable, debido a que se recomienda el uso de al menos 12 receptores, aunque la configuración ideal son 24 geófonos (Roma, 2006).

El % desplazamiento de los geófonos con respecto a la distancia de separación entre ellos, fue elegido según los factores mencionados en el punto 2.5 y cuyos valores se encuentran en la Tabla 1, mostrada a continuación:

Tabla 1. Diversas configuraciones de geófonos

Sitio de Estudio	Nº geófonos	D máx. [m]	Espaciamiento entre geófonos	% Desplazamiento geófonos	Desplazamiento geófonos [cm]
UBB	18	51	3	3.33	10
UBB	18	51	3	5	15
Chiguayante	18	51	3	10	30
San Pedro de la Paz	18	24.5	1.5	15	22.5
San Pedro de la Paz	18	42.5	2.5	20	50

Cabe mencionar que los geófonos seleccionados para moverse de su posición original fueron escogidos de forma aleatoria, al igual que el número total de instrumentos a desplazar. Debido a que no sé tiene conocimiento en qué posición de la configuración lineal de geófonos el terreno en estudio va a presentar irregularidades.

- Configuración de geófonos utilizados en Universidad del Bío- Bío.

En esta configuración se utilizó un desplazamiento en x de un 3.33 % y 5 % con respecto a la separación entre geófonos. En la figura 5 se pueden observar que círculos de color rojo fueron los elegidos para realizar este desplazamiento. Dónde para ambos niveles de desplazamientos los geófonos escogidos fueron el N° 4, 7, 9, 11, 13, 15,17.

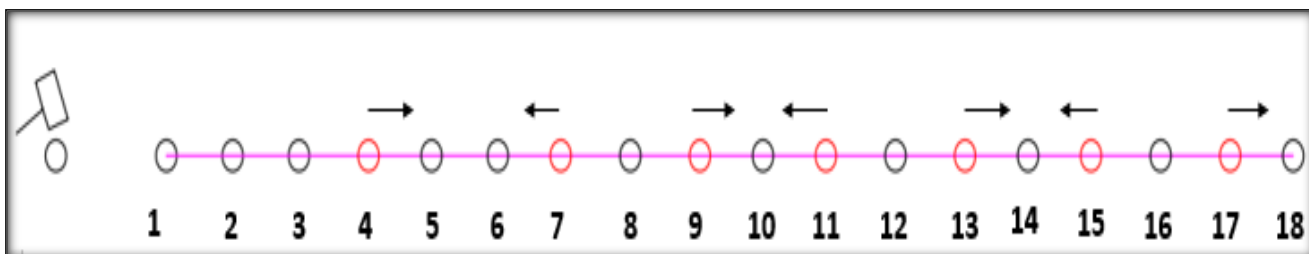


Figura 5: Configuración de geófonos utilizados en la Universidad del Bío-Bío.

- Configuración de geófonos utilizados en Chiguayante.

En esta configuración se utilizó un desplazamiento en x, y, x e y de un 10 % con respecto a la separación entre geófonos. En la figura 6 se pueden observar que círculos de color rojo fueron los elegidos para realizar este desplazamiento. Donde los geófonos escogidos fueron el N° 3, 6, 11, 15, 18.

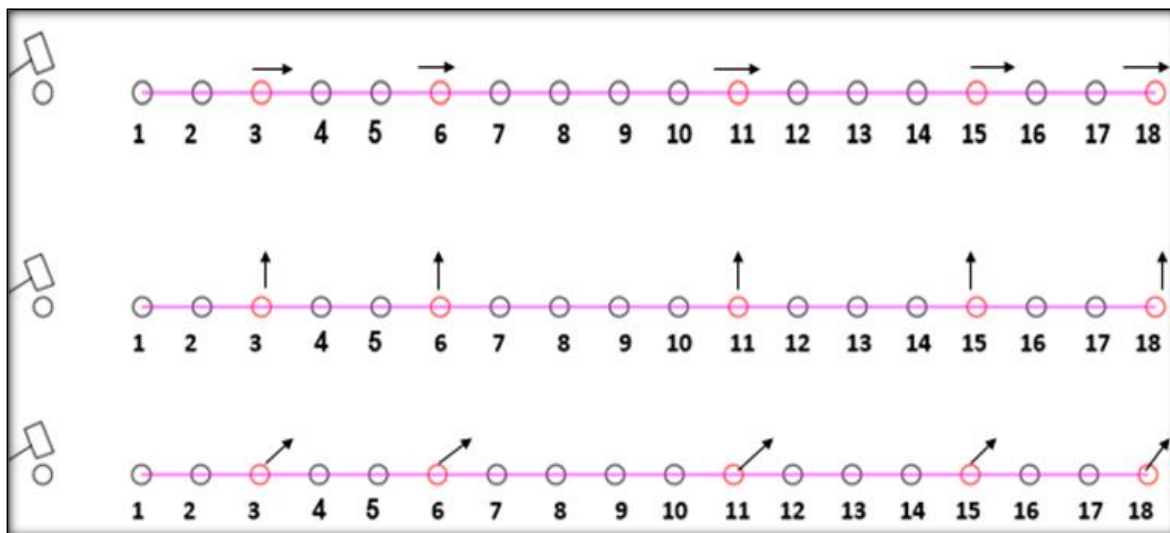


Figura 6: Configuración de geófonos utilizados en Chiguayante.

- Configuración de geófonos utilizados en San Pedro de la Paz, con 18 geófonos espaciados a 1.5 metros.

En esta configuración se utilizó un desplazamiento en x, y, x e y de un 15 % con respecto a la separación entre geófonos. En la figura 7 se pueden observar que círculos de color rojo fueron los elegidos para realizar este desplazamiento. Donde los geófonos escogidos fueron el N° 2, 5, 9, 12, 16.

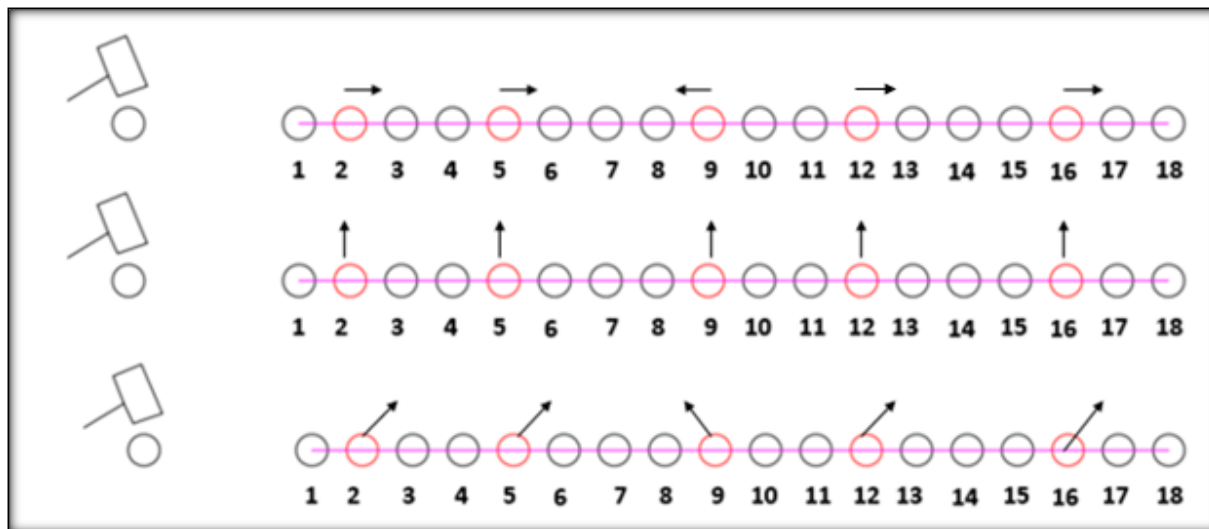


Figura 7: Configuración de geófonos utilizados en San Pedro de la Paz.

- Configuración de geófonos utilizados en San Pedro de la Paz, con 18 geófonos espaciados a 2.5 metros.

En esta configuración se utilizó un desplazamiento en x, y, x e y de un 20 % con respecto a la separación entre geófonos. En la figura 8 se pueden observar que círculos de color rojo fueron los elegidos para realizar este desplazamiento. Donde los geófonos escogidos fueron el N° 3, 5, 8, 11, 14, 18.

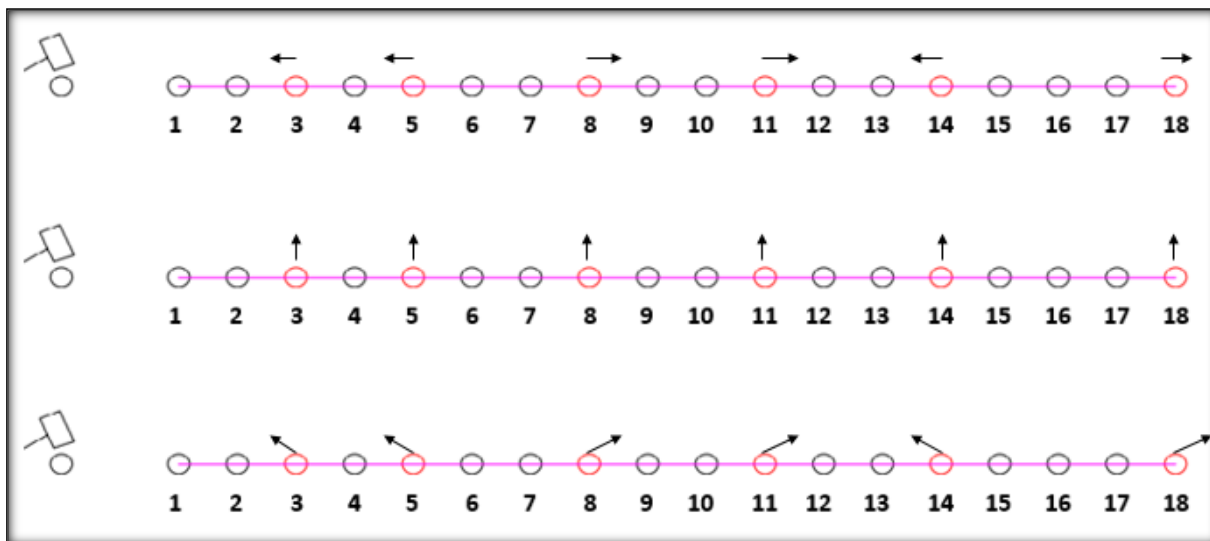


Figura 8: Configuración de geófonos utilizados en San Pedro de la Paz.

3.2.2 Características de las mediciones.

Por cada configuración de geófonos se realizó un promedio de 3 ensayos con las siguientes características:

- Método MASW
 - Tiempo de adquisición de datos: 2 [seg]
 - Intervalo de muestreo: 1 [ms]
 - Frecuencia: 1000 [Hz]
 - Gain: 40[dB]

3.3 Sitios de estudio.

Los ensayos se efectuaron en los siguientes 3 sitios de la VIII región y su elección se basó, principalmente, en la disponibilidad del equipo para realizar los ensayos en terreno y en la calidad de suelo para obtener una curva de dispersión más definida.

- Sitio 1: Universidad del Bío-Bío

El ensayo fue realizado en la cancha de rugby de la Universidad del Bío-Bío, como se muestra en la Figura 9. En este ensayo se desplazaron 7 geófonos de un total de 18, donde los geófonos y su dirección de desplazamiento de muestra en la Figura 5. Además, el % de desplazamiento de los geófonos que se utilizó fue de un 3.33 % y 5%.



Figura 9: Ensayo cancha de rugby Universidad del Bío-Bío.

- Sitio 2: Chiguayante.

El ensayo fue realizado en el sector Leonera en la comuna de Chiguayante, como se muestra en la Figura 10. En este ensayo se desplazaron 5 geófonos de un total de 18, donde los geófonos desplazados y su dirección se muestran en la Figura 6. Además, el % de desplazamiento de los geófonos que se utilizó fue de un 10 %.



Figura 10: Ensayo sector Leonera, Chiguayante.

- Sitio 3: San Pedro de la Paz.

El ensayo fue realizado en el sector MegaCentro en la comuna de San Pedro de la Paz, como se muestra en la Figura 11. En este ensayo se utilizaron 2 configuraciones de geófonos, como se muestra en la Tabla 1. En el primer ensayo se desplazaron 6 geófonos y en el segundo ensayo se desplazaron 5 geófonos de un total de 18 instrumentos, dónde los geófonos desplazados y su dirección se muestran en la Figura 7 y 8.



Figura 11: Ensayo sector MegaCentro, San Pedro de la Paz.

3.4 Procesamiento de datos.

Los datos obtenidos en terreno fueron procesados mediante la utilización del software Geopsy, que posee acceso libre y gratuito.

Se procedió a realizar el análisis MASW en Geopsy (Anexo B) para cada sitio de forma independiente. Este análisis consta de dos etapas: determinación de la curva de dispersión e inversión para obtener el perfil de velocidad de onda de corte.

3.4.1 Determinación de la curva de dispersión.

La determinación de la curva de dispersión se realizó utilizando la opción del software Geopsy de realizar un análisis f-k con fuente activa para ensayos lineales. Luego de ingresar en este módulo se procede a establecer el proceso de análisis en la pestaña de herramientas de Geopsy, para así poder definir la geometría del arreglo, tiempos de análisis y rangos de frecuencias y velocidades para el análisis.

Una vez definidos los parámetros se da inicio al cálculo de la curva de dispersión, en donde se procedió a realizar el picking, que se refiere a cuando el usuario manualmente selecciona los puntos de mayor intensidad de energía, de acuerdo a la apreciación y experiencia del usuario.

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 en el punto 4.1.2, y la frecuencia hasta la que son iguales las curvas en todos los gráficos (confiables) se definió la curva de dispersión MASW (San Martín, 2015).

3.4.2 Inversión de la curva de dispersión.

El proceso de inversión de la curva de dispersión se realizó mediante un programa auxiliar de Geopsy, dinver, en él se analizaron las curvas de dispersión obtenidas (Anexo C).

Se ejecutó un promedio de 10 iteraciones por configuración en cada sitio, independientemente, y se obtuvo un perfil estratigráfico representativo para cada disposición 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.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS.

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos en los 3 terrenos de estudios mencionados anteriormente

4.1 Resultados de ensayos MASW

Los resultados obtenidos son a partir del programa Geopsy en análisis MASW.

4.1.1 Curva de dispersión MASW.

En cada sitio de estudio se realizó un promedio de 3 ensayos por cada configuración de geófonos, se analizaron todos los ensayos obtenidos para su respectiva configuración y se eligió la curva de dispersión más nítida para analizar las variaciones de los perfiles de Vs30.

Realizando el picking de los ensayos MASW se concluyó que hasta una frecuencia de 12 [HZ] la curva de dispersión es confiable y queda bien definida. Existe una zona de “dispersión” en donde se pierde información con respecto al modo fundamental del suelo, por esta causa algunos sitios de estudio no se pudo llegar a estimar el Vs30 (Anexo C).

A continuación se presentan los resultados de obtenidos de las configuraciones patrones utilizadas en terreno, los demás resultados asociados a las configuraciones de geófonos con desplazamiento se pueden ver en el Anexo C.

4.1.2 Límites de 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 2. Límites de confiabilidad de resultados en la curva de dispersión.

Sitio de estudio	$\lambda_{MÁX}$	$\lambda_{MÍN}$
Universidad de Bío-Bío	102	6
Chiguayante	102	6
San Pedro de la Paz	51	3
San Pedro de la Paz	85	5

- Universidad del Bío-Bío: Utilizando una configuración patrón de 18 geófonos espaciados cada 3 metros.

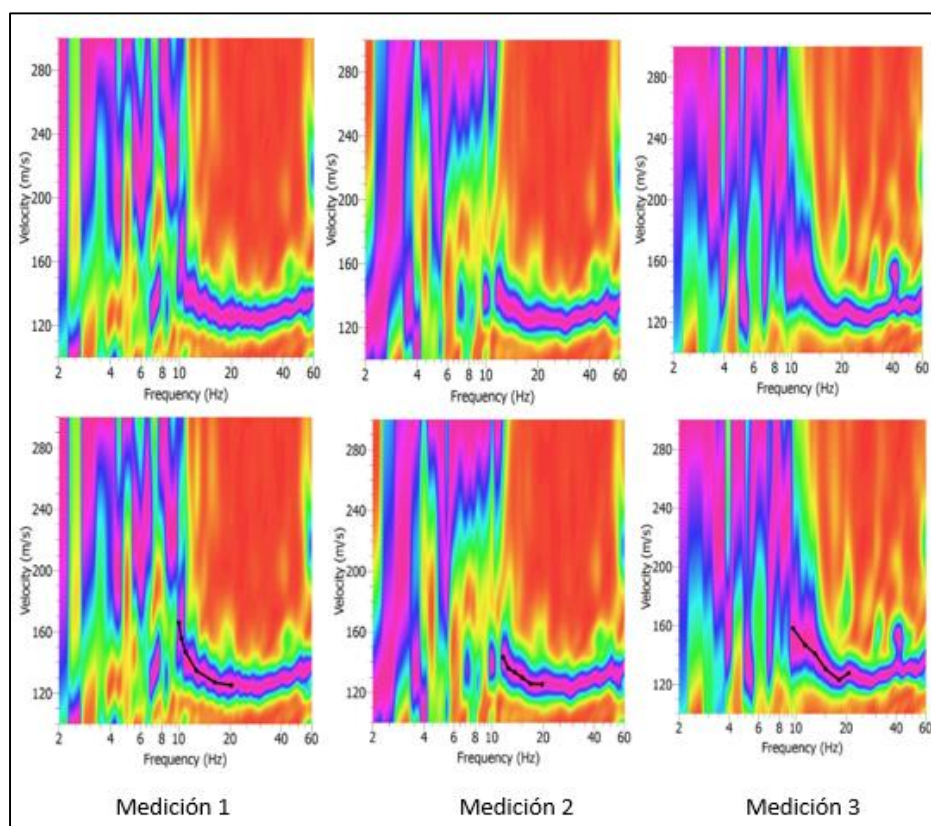


Figura 12. Curvas de dispersión de las mediciones de Universidad del Bío Bío.

En los espectros de frecuencia y velocidad obtenidos (Figura 12) se puede observar que existe información confiable hasta los 10 Hz, en frecuencias menores a ese rango no sé tiene información y no sé puede seguir con la selección de puntos de la curva de dispersión. Es por este motivo que la profundidad promedio a la que llega el ensayo es de 7 metros. Debido al carácter dispersivo del suelo en estudio se realizó una comparación de la selección de puntos de la curva de dispersión (Picking) para la configuración lineal de 18 geófonos espaciados a 3 metros y entre las diversas configuración de desplazamientos de geófonos utilizadas en terreno, mencionada en el punto 3.2.1.

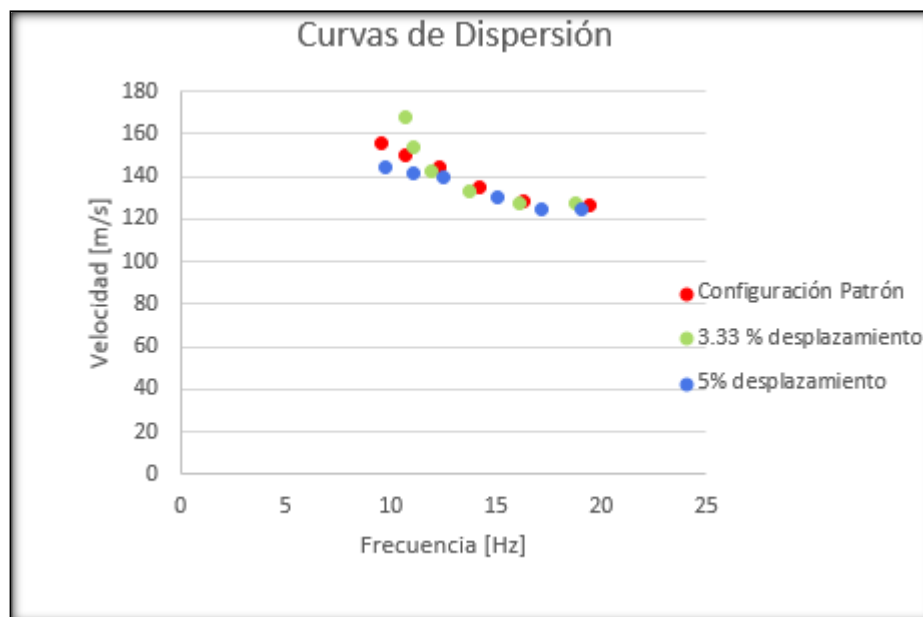


Figura 13. Superposición de las curvas de dispersión obtenidas en Universidad del Bío- Bío para las distintas configuraciones.

Es visible en la Figura 13 que las curvas de dispersión obtenidas en la Universidad del Bío-Bío siguen una misma tendencia tanto la configuración patrón como las configuraciones con desplazamiento incorporado.

- Chiguayante: Utilizando una configuración patrón de 18 geófonos espaciados cada 3 metros.

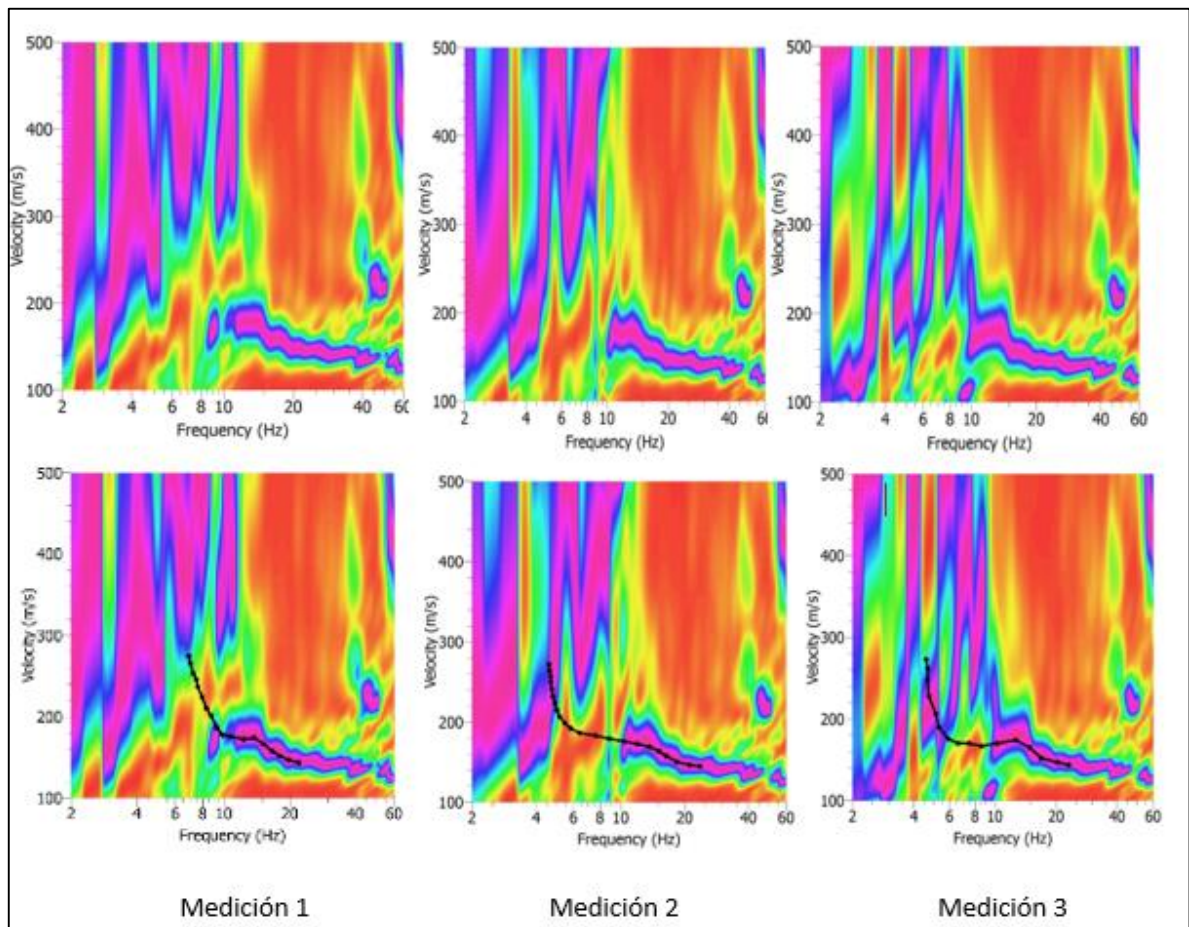


Figura 14. Curvas de dispersión de las mediciones de Chiguayante.

- San Pedro de la Paz: Utilizando una configuración lineal de 18 geófonos espaciados cada 1.5 metros.

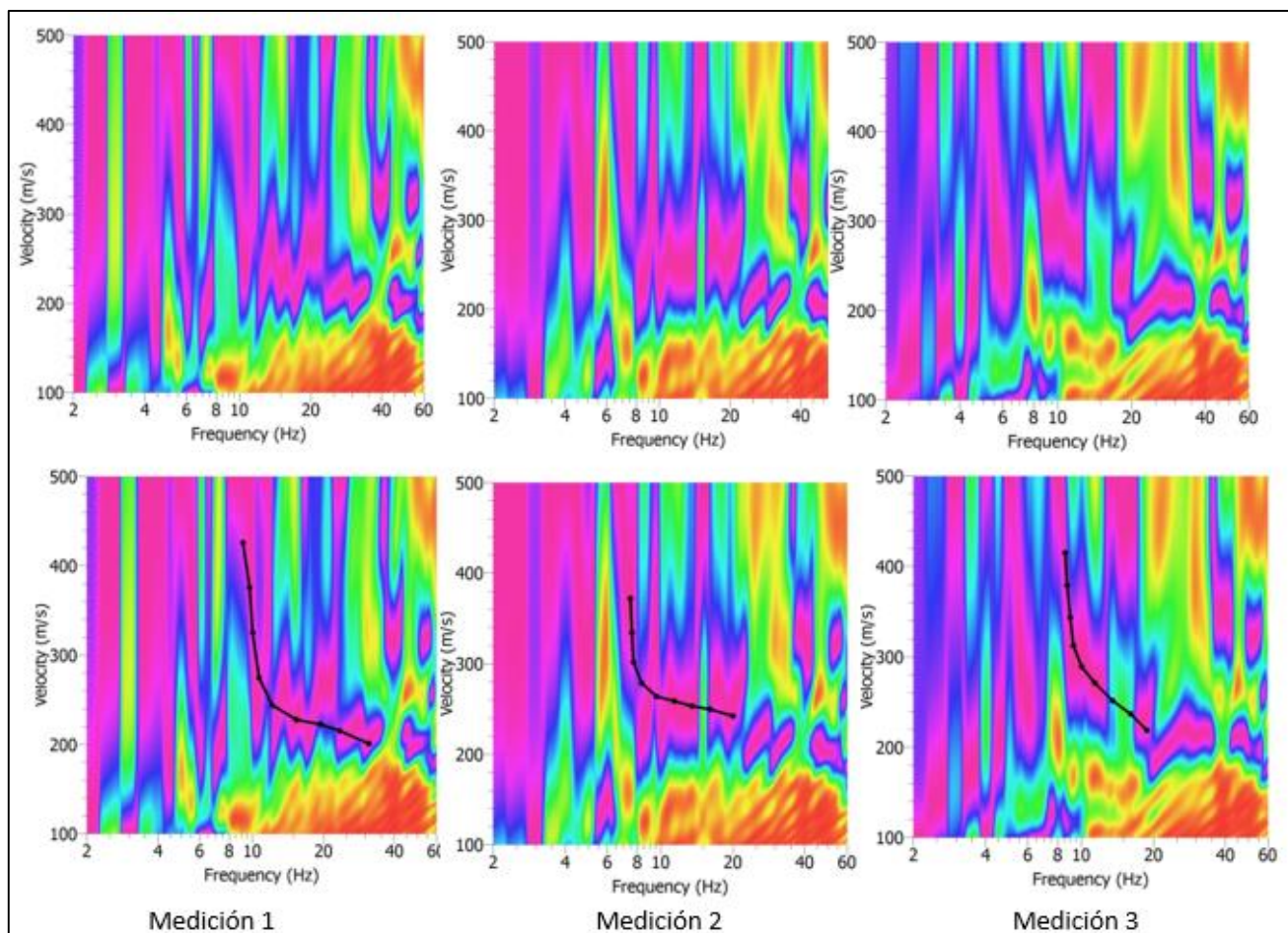


Figura 15. Curvas de dispersión de las mediciones de San Pedro de la Paz.

- San Pedro de la Paz: Utilizando una configuración lineal de 18 geófonos espaciados cada 2.5 metros.

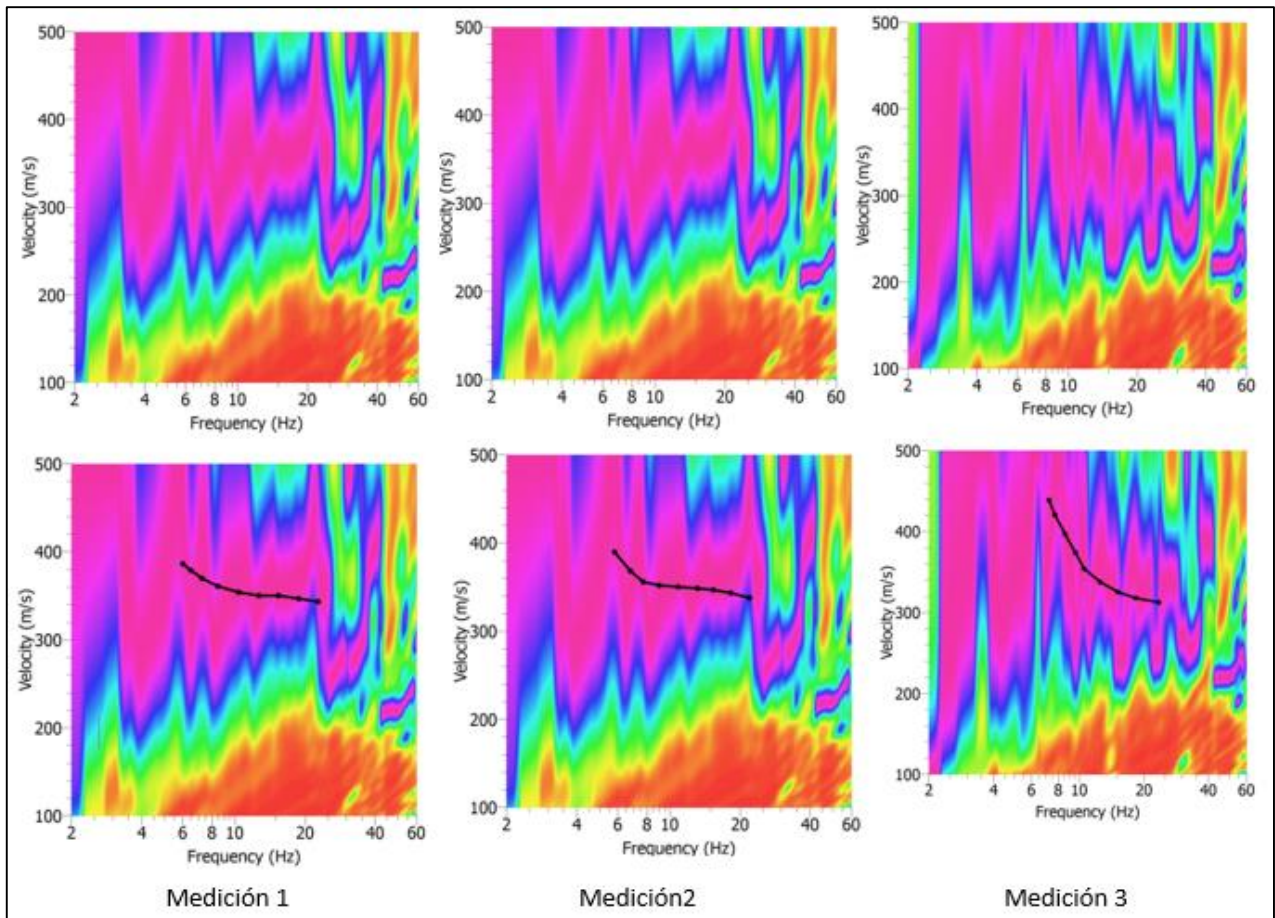


Figura 16. Curvas de dispersión de las mediciones de San Pedro de la Paz.

4.1.3 Perfiles estratigráficos MASW.

Se obtuvieron los perfiles estratigráficos para las distintas configuraciones de geófonos utilizados, presentados en los Gráficos 17, 18 y 19. Se pueden observar de forma independiente en el Anexo C, clasificados según sitio en estudio.

- Chiguayante

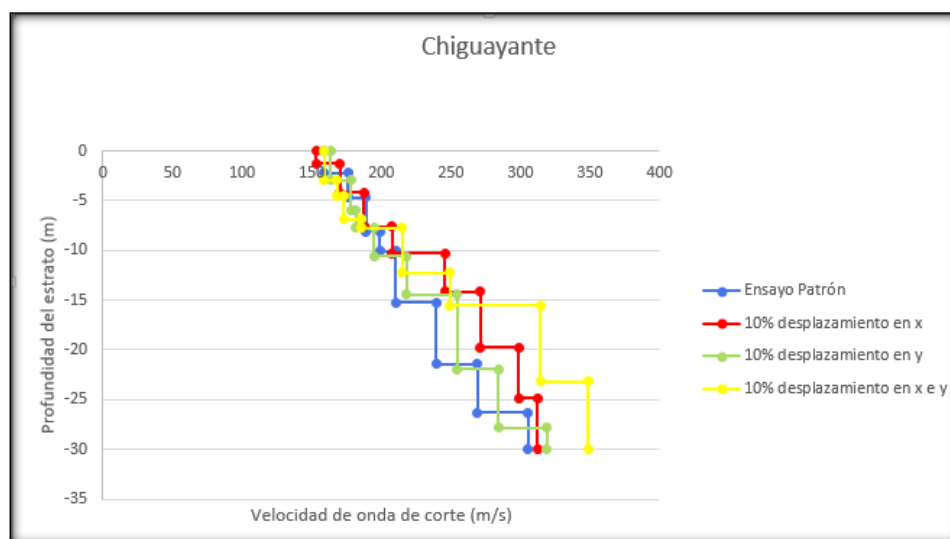


Figura 17. Perfiles estratigráficos de Chiguayante.

En los perfiles estratigráficos obtenidos de las curvas de dispersión aparente se puede observar que las 3 mediciones se comportan de manera muy similar, se aprecia un aumento de V_{s30} a estratos más profundos y no se produce una gran variación entre los perfiles estratigráficos.

Los gráficos de cada ensayo en particular se puede observar de forma independiente en el Anexo C.

- San Pedro de la Paz

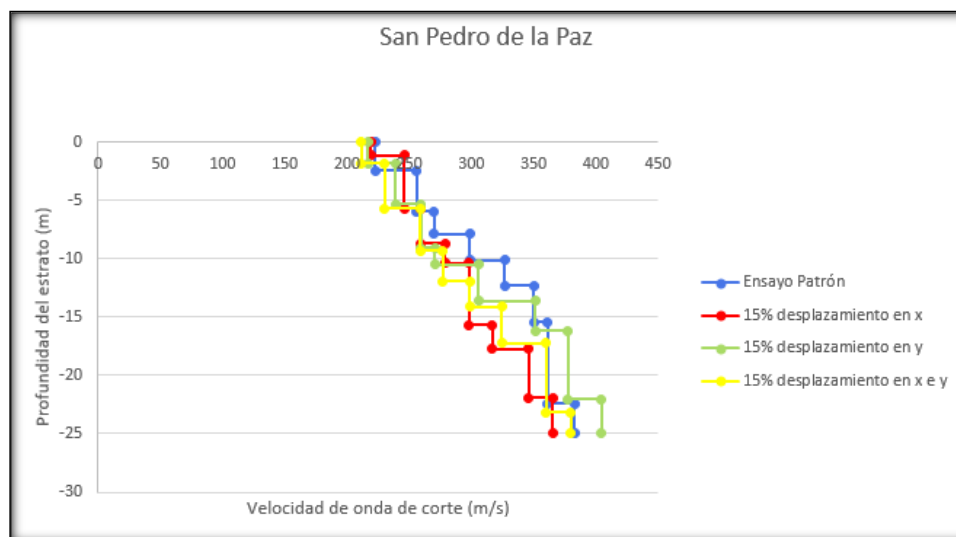


Figura 18. Perfiles estratigráficos de San Pedro de la Paz.

Del perfil estratigráfico se observa que a medida que aumenta la profundidad de los estratos también aumenta su V_s , se aprecia un porcentaje de error aceptable.

- San Pedro de la Paz

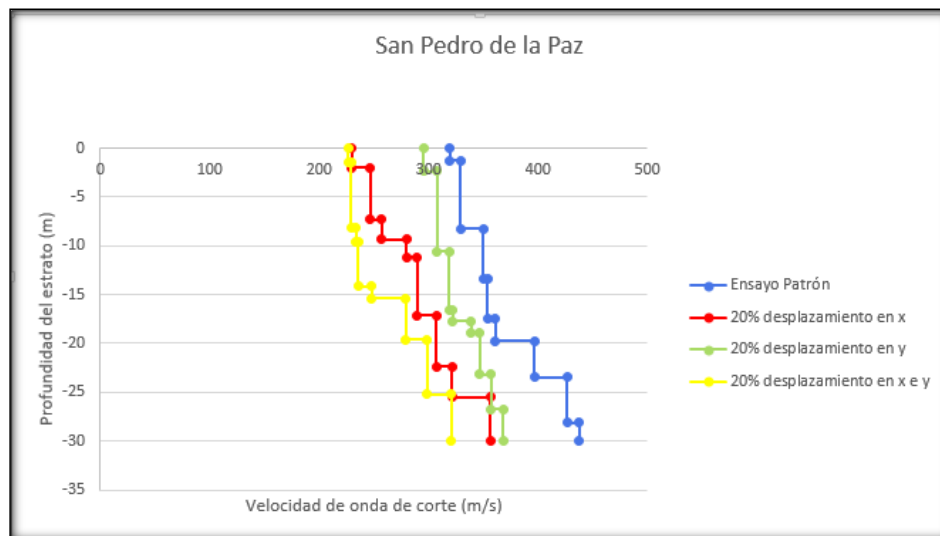


Figura 19. Perfiles estratigráficos de San Pedro de la Paz.

Se observa que existe una variación significativa de los perfiles estratigráficos entre la configuración patrón y las configuraciones con desplazamiento de geófonos.

4.1.4 Estimación de Vs30.

- Chiguayante: Utilizando una configuración lineal de 18 geófonos espaciados cada 3 metros.

Tabla 2. Vs30 obtenido en Chiguayante.

	Patrón	10 % desplazamiento en X	10 % desplazamiento en Y	10% desplazamiento en XY
Medición	Vs30 [m/s]	Vs30 [m/s]	Vs30 [m/s]	Vs30 [m/s]
1	219.6	237.2	239.34	241.51
2	221.02	221.17	223.7	232.97
3	210.63	220.62	221.85	234.2
Promedio	217.08	226.33	228.29	236.22
Tipo de suelo	D	D	D	D

- San Pedro de la Paz: Utilizando una configuración lineal de 18 geófonos espaciados cada 1.5 metros.

Tabla 3. Vs25 obtenido en San Pedro de la Paz.

	Patrón	15 % desplazamiento en X	15 % desplazamiento en Y	15% desplazamiento en XY
Medición	Vs25 [m/s]	Vs25 [m/s]	Vs25 [m/s]	Vs25 [m/s]
1	308.39	290.09	300.8	286.96
2	311.87	289.17	306.64	295.54
3	309.8	298.54	297.47	293.63
Promedio	310.02	292.6	300.63	292.04
Tipo de suelo	D	D	D	D

- San Pedro de la Paz: Utilizando una configuración lineal de 18 geófonos espaciados cada 2.5 metros.

Tabla 4. Vs30 obtenido en San Pedro de la Paz

	Patrón	20 % desplazamiento en X	20 % desplazamiento en Y	20% desplazamiento en XY
Medición	Vs30 [m/s]	Vs30 [m/s]	Vs30 [m/s]	Vs30 [m/s]
1	363.37	254.49	249.01	279.62
2	354.58	286.52	327.14	271.53
3	364.6	276.06	298.83	261.05
Promedio	360.85	272.35	291.66	270.73
Tipo de suelo	C	D	D	D

Los valores seleccionados de color amarillo corresponden al VS30 asociado a la curva de dispersión de mayor calidad obtenida y según estos valores se puede comentar lo siguiente:

En el sitio 1 no se pudo calcular un valor de VS30 debido a que el suelo es muy dispersivo y el ensayo MASW sólo podía obtener información de los 7 primeros metros del suelo. Es por esta razón que se muestran las tablas referentes al picking realizado para poder seleccionar las curvas de dispersión. En las tablas obtenidas se puede observar que la curva de dispersión patrón no varía en gran medida de las curvas de dispersión en el que se realizó un desplazamiento de geófonos en un 3.33 y 5 %.

El sitio de estudio 2 presenta un Vs30 de 219.6 [m/s], este tipo de suelo puede ser clasificado como tipo D. Se puede apreciar en la tabla 2 que la mayor variación de Vs30 se produce cuando los geófonos son desplazados en la dirección x e y un 10 % con respecto a la separación entre geófonos, se estima que existe una variación de velocidad de 19.14 [m/s], de igual modo el suelo siendo clasificado como tipo D.

En el sitio de estudio 3 usando una configuración patrón de 18 geófonos espaciados a 1.5 metros no se pudo llegar a los 30 metros de profundidad debido al largo del arreglo, es por esto que se calculó el Vs sólo en los primeros 25 metros del suelo. Se puede observar que el valor de Vs obtenido en la configuración patrón es de 308.39 [m/s], clasificando al suelo como tipo D.

La máxima variación de Vs se produce cuando se desplazan en la dirección x e y los geófonos un 15 % de su posición original, generando así una variación de 21.43 [m/s], pero dicha variación no genera un cambio de clasificación de tipo de suelo.

En la segunda configuración patrón utilizada en el sitio de estudio 3, se obtuvo un valor de Vs30 de 363.37 [m/s], clasificando el suelo como tipo C. En este estudio se presenta la mayor variación de Vs30 cuando los geófonos son desplazados un 20 % en la dirección x e y con respecto a su configuración patrón, generando así una disminución de 102.32 [m/s] y cambiando la clasificación de suelo tipo C a suelo tipo D.

5 Conclusiones.

Se elaboró un estudio para la determinación del rango aceptable de desplazamiento en distintas direcciones que pueden tener los geófonos con respecto a su configuración patrón usando el método activo MASW en distintos tipos de suelos, donde se puede concluir que :

- El método MASW es capaz de captar un rango de altas frecuencias, desde los 12 [Hz]. Generando una respuesta óptima es los estratos de suelo que están más cercanos a la superficie.
- En el proceso del análisis de las curvas de dispersión se aprecia que existe un rango de frecuencias donde se pierde información para poder identificar de manera óptima la curva de dispersión.
- En el sitio de estudio 1 (Universidad del Bío- Bío), se aprecia que para un rango de frecuencias válido para el método MASW no hay variaciones entre los desplazamientos de un 3.33% y 5%.
- En el sitio de estudio 2 (Chiguayante) para un desplazamiento de 10 % de los geófonos no se produce una variación significativa de perfil de Vs30 obtenido en terreno. Dónde la máxima variación se produce cuando se mueven los geófonos en la dirección x e y, generando así un aumento en el Vs30 de un 8.81 %.
- En San Pedro de la Paz para una variación de 15 % de desplazamiento de los geófonos se aprecia una disminución del Vs30 de un 9.18 %, siendo este valor una variación aceptable en el método MASW.
- En la comuna de San Pedro de la Paz para una variación del 20 % del desplazamiento de los geófonos, se produce una variación significativa del perfil de Vs30, generando una disminución en la velocidad de un 25 %. Produciendo así un cambio en la clasificación del tipo de suelo, pasando de un suelo tipo C a suelo tipo D.
- Es trascendental mantener la equidistancia en el sentido en que se realiza el ensayo (x), debido a que existe una mayor variación del Vs30 cuando los geófonos se desplazan en esta dirección, en comparación cuando los geófonos sufren un desplazamiento lateral.
- Los sitios examinados muestra una tendencia en los resultados, pero de igual forma se debería complementar el estudio con más ensayos en suelos que tengan una mayor rigidez, debido a que el método MASW responde de mejor manera en suelos de carácter más rígidos.

6 REFERENCIAS.

1. Biot, M.A (1962). Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media. *Journal of Applied Physics* 33 (4).
2. Henríquez C. (2007). Mejora de Terrenos Potencialmente Licuables con Inyecciones de Compactación. Universidad Politécnica de Madrid.
3. Khaheshi, B., Kasgin y Dariush M. (2010). On the Efficiency of the Multi-Channel Analysis of Surface Wave Method for Shallow and Semideep Loose Soil Layers. Ottawa, Canada.
4. Linares, G. (2005). Introducción y aplicación del método de sismica de microtemores en área urbanas. Universidad Simón Bolívar. Venezuela.
5. Manual de Aplicación de Técnicas Geofísicas basadas en ondas de Superficie para la Determinación del Parámetro Vs30. Humire, F., Leyton, F., Saéz, E.
6. Park, C., Miller, R. y Xia, J., (1999). Multichannel analisis of surface waves. Kansas Geological Survey, Lawrence, Kansas, Estados Unidos.
7. Rix, G., Leipski, E. (1991). Accuracy and Resolution of Surface Wave Inversion. Recent advances in instrumentation, data acquisition and testing in soil dynamics.
8. Roma, V. (2006). Caratterizzazione sismica dei suoli con il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves). Universidad de Pisa, Pisa, Italia.
9. San Martín, C. (2015). Estudio de la eficiencia de diferentes configuraciones de geófonos para la utilización del método ESAC. Universidad del Bío- Bío.
10. Winterstein, D. (1990). Velocity anisotropy terminology for geophysicists.
11. Yoon, S., Rix, G. (2004). Combined active-passive surface wave measurements for near-surface site characterization.