

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Óscar Gutiérrez A.

Profesores Comisión: Álvaro Suazo S.

Ricardo Riveros

“ESTUDIO SOBRE EL EFECTO INTERLACE EN EL MÉTODO MASW, A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE CURVAS DE DISPERSIÓN”

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

Ignacio Videla Hidalgo

Concepción, Abril 2016

Dedicatoria

Dedicada a mi papá, mamá y hermana, porque sé que sin ellos no sería ni la mitad de la persona que llegó a estas alturas, ni habría logrado recorrer este camino sin su compañía. Sólo por estar ahí me brindan todo lo que necesito.

Dedicada también a mis abuelas, abuelos, tíos, tías, primos y primas. El final de esta etapa no es solamente un logro mío, sino que pertenece a cada persona presente en este clan. Desde los fondos de las minas de carbón, desde los rincones de las tierras del norte, en cada sopaipilla hecha en casa y en cada asado tradicional, nuestra historia se sigue escribiendo.

Agradecimientos

*A mi familia por cada palabra, cada gesto,
cada segundo que pasamos juntos, y
por toda la ayuda y valores entregados
para crecer y formarme como persona.*

*A mis amigos y amigas de la U, por cada noche
de estudio o trabajo, por esos asados, por
esas idas a comer al terminal, por cada rato
de ocio, por cada conversación en la que pude
aprender más. Les agradezco cada segundo
que compartimos en estos años.*

*A mis amigos y amigas del colegio Almondale,
por los asados, noches de películas, instancias
en que solamente nos dedicamos a comer, y un sinfín
de momentos memorables, todo gracias a los lazos
que se mantienen hasta el presente.*

*Al movimiento EJE, por ser parte fundamental
de mi crecimiento y formación, y por cada persona
que puso en mi camino y que se han convertido en
preciosas y valiosas piedras en mi vida. A mis amigos
y amigas que compartimos parte de este mundo,
por su amistad y por esos fines de semanas
con pocas horas de sueño.*

*To my friends at UIUC, for being my international
family. Those months, that part of my life, was way
greater than expected, just because of you. Thank you
for every moment, as you helped me to grow up, by
becoming smaller. I'm looking forward to see
each other again.*

*Al profesor Óscar Gutiérrez, por la oportunidad
de aprender sobre nuevas disciplinas de la
ingeniería, y a cada funcionario del departamento de
Ingeniería Civil y Ambiental, por su buena voluntad y
buen trato en todos los años de universidad.*

*De todo corazón, muchas gracias.
With all my heart, thank you very much.*

ÍNDICE

NOMENCLATURA	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1.- INTRODUCCIÓN	9
1.2.- Objetivos de la investigación	10
1.2.1.- Objetivo general.....	10
1.2.2.- Objetivos específicos.....	10
1.3.- Justificación del tema.....	11
1.4.- Metodología de trabajo	12
2.- MARCO TEÓRICO	13
2.1.- Ondas Sísmicas	13
2.2.- Métodos de medición de ondas	13
2.3.- Fenómeno de Dispersión de ondas Rayleigh	14
2.4.- Curva de dispersión.....	14
2.5.- Efecto Interlace	15
3.- METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS	16
3.1.- Equipo utilizado.....	16
3.2.- Mediciones en terreno.....	17
3.2.1.- Metodología MASW	17
3.2.2.- Incorporación efecto <i>Interlace</i>	17
3.2.3.- Espaciamiento entre geófonos	17
3.3.- Sitios de estudio	18
3.3.1.- Sitio 1: Universidad del Bio Bio	18
3.3.2.- Sitio 2: La Leonera, Chiguayante.....	20
3.3.3.- Sitio 3: Megacentro, San Pedro de la Paz.	21
3.3.4.- Ensayos GeoSolving.....	22
3.4.- Procesamiento de datos	22
4.- RESULTADOS Y ANÁLISIS	24
4.1.- Patrón de calidad	24
4.2.- Ruido y energía aislada	25
4.3.- Comparación curva Base vs curva Interlace.....	26

4.4.- Perfil estratigráfico y convergencia de Vs30	27
4.4.1.- Universidad del Bio Bio, dirección D1	27
4.4.2.- La Leonera, Chiguayante.....	29
4.4.3.- Megacentro, San Pedro de la Paz.	30
4.4.4 Ensayos GeoSolving – Curicó.....	32
5.- CONCLUSIONES.....	33
6.- REFERENCIAS	35

NOMENCLATURA

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

ReMi: Refracción de ruido ambiental (Refraction microtremor)

DS N°61: Decreto Supremo N° 61.

Vs: Velocidad de propagación de ondas de corte.

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

ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL EFECTO INTERLACE EN EL MÉTODO MASW, A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE CURVAS DE DISPERSIÓN

Autor: Ignacio Videla Hidalgo

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del
Bío-Bío Correo Electrónico: igvidela@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Oscar Gutiérrez Astete
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del
Bío-Bío Correo Electrónico: solving.cl@gmail.cl

RESUMEN

Luego del terremoto del 27 de Febrero de 2010 las normas establecidas para la clasificación de suelo fueron modificadas a través del DS N°61 para emplear un nuevo parámetro como criterio, conocido como la velocidad de onda de corte para los primeros 30 [m] de profundidad (V_{s30}) por medio de técnicas geofísicas no invasivas. Entre estos métodos los más populares son ReMi y MASW, donde el primero, un método pasivo, utiliza como recurso el ruido ambiental, correspondiente a frecuencias bajas, mientras que el segundo, un método activo, aprovecha la generación de ondas Rayleigh de alta frecuencia que, al ser captadas por geófonos, permiten obtener información de los estratos más superficiales del suelo. Para el método MASW, parámetros físicos como la distancia entre el primer geófono y la fuente, y el espaciamiento entre receptores afectan en gran medida el resultado de las mediciones. Existen, además, técnicas empleadas en el método para distintas finalidades, entre las que se conoce el efecto Interlace que permite entrelazar sismogramas para crear arreglos teóricos con el doble de receptores empleados en terreno. En el siguiente estudio se han analizado las curvas de dispersión obtenidas del entrelazado de sismogramas registrados en terreno con diferentes configuraciones de geófonos para analizar el comportamiento de diferentes parámetros, como la calidad de los registros y la presencia de ruido, entre otros, para luego poder compararlos con los arreglos físicos reales. Así, se ha concluido que el efecto Interlace permite emular de manera muy acertada un arreglo físico de geófonos por medio de la unión de dos registros con la mitad del total de receptores en cada uno, bajo las configuraciones adecuadas, donde la calidad de los archivos a utilizar repercute en gran medida en el resultado final,

así como la presencia de ruido, interferencias y energía aislada, sin responder a un patrón de comportamiento específico.

Palabras claves: MASW, Interlace, geófonos.

ABSTRACT

After the earthquake of February 27, 2010, the valid norms established for soil classification were modified by the DS N°61 to employ a new parameter as criteria, known as the shear wave velocity for the first 30 [m] deep (V_{s30}) through non invasive geophysical techniques. Among this methods the most populars are ReMi and MASW, where the first, a passive method, uses as resource the ambiental noise, corresponding to low frequencies, while the second, an active method, takes advantage of the generation of Rayleigh waves of high frequency that, being received by geophones, allow to get information of the most superficial strata of the ground. For the MASW method, physical parameters such as distance between the first geophone and the source, and the spacing between receivers affect in a large degree the result of the measurements. Exist, besides, techniques employed on the method for achieving different goals, among which is known the Interlace effect that allows to interweave seismograms to create theoretical arrangements with the double of receivers employed in terrain. In the following study dispersion curves obtained through the interlace of seismograms registered in terrain with different geophones configurations have been analyzed to comprehend the behavior of various parameters, such as quality of the records and presence of noise, among others, for later comparison with actual physical arrangements. Thus, it has been concluded that the Interlace effect allows to emulate quite rightly a physical arrangement of geophones through the interweave of two records with half of the total number of receivers each one, under the adequate configurations, where quality of the records employed impacts largely on the final result, as the presence of noise, interference and aised energy, without responding to a specific pattern.

Keywords: MASW, Interlace, geophones.

Número de palabras: $6076 + 12 \cdot 250 = 9076$

1.- INTRODUCCIÓN

La ingeniería geotécnica presenta gran importancia dentro de la gama de proyectos relacionados a la ingeniería civil, comprendiendo estudios de suelos que permitan obtener parámetros para entender el comportamiento del suelo y su influencia sobre las estructuras que se puedan alzar sobre ellos. Así, las propiedades dinámicas de los suelos permiten realizar análisis de fundaciones, comprender la geotecnia de los terremotos y modelar rigideces de suelos para estudiar la relación suelo-estructura, entre otros.

La velocidad de onda de corte de los suelos permite adquirir gran información sobre las características de los estratos presentes, por lo que su obtención en terreno presenta variadas ventajas.

El método MASW (Análisis multicanal de ondas superficiales) ha sido introducido con gran éxito en los últimos años para la obtención de la velocidad de onda de corte in-situ, al tratarse de una alternativa no invasiva y de tiempo de empleo corto en comparación con otras técnicas.

Variados estudios se han realizado en torno al método MASW, sus procedimientos y parámetros que permiten la obtención y análisis de curvas de dispersión, debido a que éstas se presentan de distintas formas según sea la tipología del suelo o por la influencia de factores externos. Dentro de estos estudios se han incorporado distintos efectos al momento de realizar mediciones con el método que pueden resultar beneficiosos según sea la ocasión. Uno de ellos corresponde al efecto Interlace, el que será estudiado en el siguiente informe para ampliar la comprensión sobre el método MASW.

1.2.- Objetivos de la investigación

1.2.1.- Objetivo general

- Estudiar el comportamiento del efecto Interlace sobre el método MASW, a través del análisis de curvas de dispersión.

1.2.2.- Objetivos específicos

- Evaluar la influencia de la calidad de la curva de dispersión de los registros a combinar por medio del efecto Interlace.
- Evaluar las curvas de dispersión confeccionadas con el efecto Interlace, con respecto a aquellas registradas in-situ.
- Definir el alcance del efecto Interlace con respecto al número de geófonos a emplear en los registros que se usarán para el entrelazado.

1.3.- Justificación del tema

Como consecuencia de los eventos ocurridos durante el terremoto del 27 de febrero del 2010, se trabajó en una nueva clasificación sísmica de suelos, obteniendo como resultado la introducción del DS N°61 a la NCh433 de Diseño sísmico de edificios. En éste se señala que el parámetro base para la clasificación corresponde a la velocidad de onda de corte para los primeros 30 [m] de profundidad, denominada Vs30 (Anexo A3.3).

En respuesta a lo anterior se comenzó la promulgación de las técnicas geofísicas indirectas como ReMi y MASW, que permiten el registro de ruido ambiental u ondas Rayleigh, respectivamente, a través de receptores para la obtención de gráficos de velocidad de fase vs frecuencia del que se puede obtener una lectura de las características dinámicas del suelo en estudio.

El método MASW o análisis multicanal de ondas superficiales genera respuestas confiables para frecuencias altas al trabajar con ondas Rayleigh generadas por el golpe de un martillo contra una placa. Los parámetros físicos del arreglo lineal, como distancia total del arreglo y distancia entre geófonos, con el que trabaja el método influyen en los alcances de frecuencia y profundidad, por lo que es importante poner énfasis en la cantidad de geófonos a emplear y la separación entre ellos.

Además de lo mencionado anteriormente, en campo se utilizan distintos efectos para la mejoría de la resolución de la curva de dispersión. Entre ellos se encuentra el denominado Interlace (Anexo A3.4), que permite entrelazar dos registros por medio de una diferencia de tiempo, dando como resultado un arreglo teórico que contenga una cantidad de geófonos equivalente a la suma de los registros empleados.

El estudio presente busca estudiar el funcionamiento del efecto Interlace para el método MASW, dejando constancia de los parámetros que influyen en su aplicación y sus resultados, para una correcta aplicación del efecto y una mejor comprensión del método en general.

1.4.- Metodología de trabajo

El plan de trabajo del siguiente estudio comprende las etapas mostradas en la Figura 1:

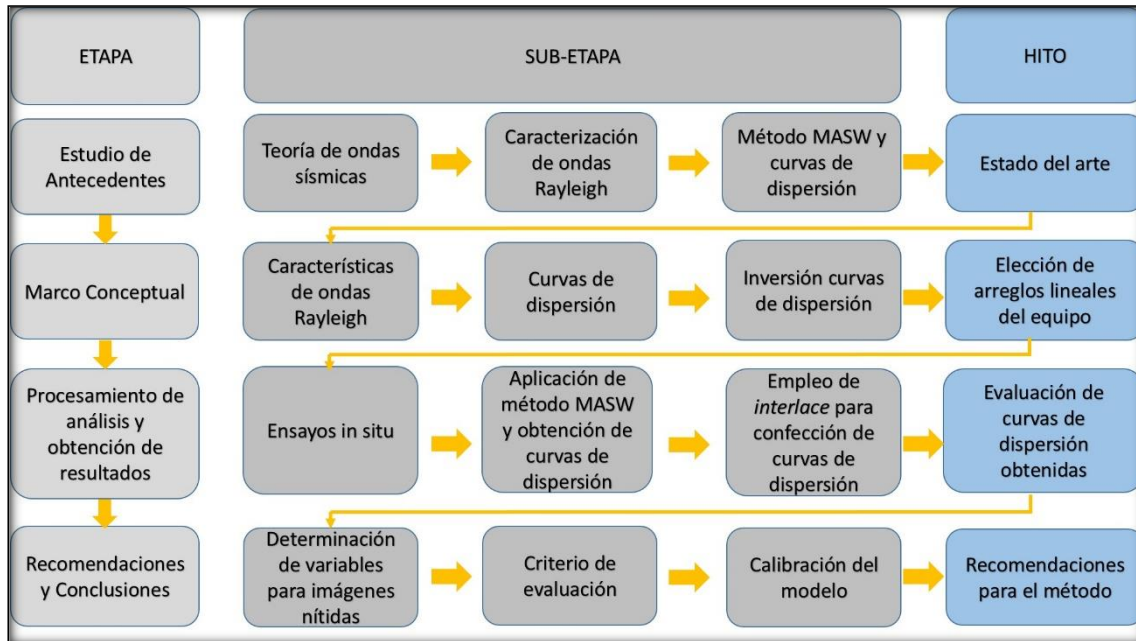


Figura 1. Esquema de Metodología de trabajo.

1. Estudio de Antecedentes: se realiza una investigación bibliográfica para la comprensión del método MASW, conceptos generales y parámetros que influyen en las mediciones.
2. Marco conceptual: se realiza estudio abarcando la concepción de las curvas de dispersión, el proceso de obtención de la curva aparente y posterior inversión, para la determinación del perfil de ondas característico del suelo.
3. Procesamiento de análisis y obtención de resultados: se procederá a la obtención de la curva de dispersión base para cada registro, para luego confeccionar arreglos teóricos con efecto Interlace y evaluar sus resultados con respecto a las bases definidas. Para los casos en que sea aplicable, se procederá a la obtención del Vs30.
4. Conclusiones y recomendaciones: tras el análisis de resultados, se determinarán los parámetros que influyen en el efecto Interlace y la efectividad de sus resultados para el método MASW.

2.- MARCO TEÓRICO

2.1.- Ondas Sísmicas

La energía de un movimiento sísmico viaja en forma de onda a través del suelo, perturbando sus partículas. Estas se clasifican según la profundidad a la que actúan, en 2 tipos: ondas de cuerpo y ondas superficiales, las que se detallan en el Anexo A.

Ondas Rayleigh: tipo de onda sísmica también llamada ground roll, que genera un movimiento de partículas de suelos de tipo elíptico retrógrado, vertical a la dirección de propagación (ver figura A3). Está comprobado que cerca del 80% de la energía liberada durante un movimiento sísmico corresponde a ondas Rayleigh, por lo que son las percibidas principalmente en un evento sísmico y las que generan más daños a las estructuras, debido a su baja frecuencia, provocando que algunas edificaciones puedan entrar en resonancia durante el movimiento.

2.2.- Métodos de medición de ondas

Los métodos de medición de ondas superficiales se clasifican, dependiendo del tipo de fuente que utilicen, en 3 tipos: activos, pasivos e híbridos. Ver Anexo A.

El método MASW (análisis multicanal de ondas superficiales) trabaja con el registro de las ondas Rayleigh generadas por el golpe de un martillo contra una placa ubicada en suelo, a través de la señal captada por geófonos situados en un arreglo lineal, equidistantes entre sí. Luego de ello, el registro permite visualizar el espectro de velocidad de onda de corte vs frecuencia, donde se puede determinar la ubicación del periodo fundamental del suelo y proceder a la selección de la curva de dispersión. Tras el proceso de inversión de la curva se obtiene el perfil de velocidades del suelo y se puede proceder al cálculo del parámetro V_{s30} .

Para obtener mediciones confiables se deben utilizar al menos 12 geófonos (Roma, 2006), con distancias cortas (1-2 [m]) o largas (50-100 [m]) (Linares, 2005).

2.3.- Fenómeno de Dispersión de ondas Rayleigh

Las ondas Rayleigh posee una naturaleza dispersiva, es decir, por cada frecuencia que posea el tren de ondas, ésta viajará a una distinta velocidad de fase, lo que implicará que cada frecuencia penetre a una profundidad específica (Khaheshi et al, 2010).

Ya que los suelos en su mayoría son heterogéneos en profundidad, las ondas Rayleigh penetrarán en grandes profundidades cuando presenten mayores longitudes de onda y generalmente presentarán mayores velocidades de fase (Louie, 2005).

Por lo tanto, esta cualidad dispersiva de las ondas Rayleigh permite que su análisis sea más favorable al elaborar un espectro de velocidad de fase vs frecuencia, lo que permite identificar curvas características del suelo que entreguen información de la distribución de velocidades de ondas de corte con respecto a la profundidad de penetración.

2.4.- Curva de dispersión

Park et al (1998) plantea que si las propiedades del material cercano a la superficie cambian, la onda Rayleigh se vuelve dispersiva, por lo que su velocidad de propagación (fase) cambia con su frecuencia. Además, la penetración de la onda se ve relacionada a su longitud de onda, donde mayores valores penetran más profundo.

Park et al (1999) plantea, además, que el suelo es un material atenuante, por lo que la amplitud de las ondas generadas disminuye a medida que se alejan de la fuente generadora.

Debido a lo anterior, el análisis de las curvas de dispersión de las mediciones realizadas permite la determinación de la velocidad de onda de corte presente en un estrato de suelo. Como el suelo tiende a aumentar su rigidez conforme aumenta su profundidad, las ondas de menor frecuencia reflejarán estratos de mayor profundidad, mientras que las altas frecuencias corresponderán a estratos superficiales. Así, la relación entre frecuencia y profundidad estará dada por la Ecuación 1.

$$z = 0.5 * \frac{f}{vf} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

- z: profundidad de penetración [m]
- f: frecuencia [Hz]

- v_f : velocidad de fase [m/s]

Gracias al espectro de velocidad de fase vs frecuencia, es posible encontrar la profundidad de penetración de cada par ordenado presente en la curva de dispersión seleccionada con el criterio del periodo fundamental.

Dado que el método MASW trabaja con el golpe de un martillo como fuente impulsora, las ondas generadas serán de alta frecuencia, por lo que no pueden penetrar grandes profundidades. Sin embargo, en la gran mayoría de los casos, la profundidad alcanzada puede ser de 30 [m], permitiendo obtener valores de V_{s30} confiables. En algunas mediciones puede que el método sea insuficiente al alcanzar valores de profundidad menores a los 30 [m], como se puede presentar en suelos de mala calidad, por lo que es útil, para tales casos, combinarlo con un método pasivo como ReMi.

2.5.- Efecto Interlace

El efecto interlace permite entrelazar dos registros de igual cantidad de geófonos a fin de crear un registro con un arreglo teórico que simula la posición de los geófonos de ambas mediciones de manera intercalada. Esto permite que el nuevo arreglo aumente la nitidez de profundidades cercanas a la superficie debido a la disminución entre los geófonos (Akkaya et al, 2010) y, en general, la nitidez del periodo fundamental del suelo.

Para poder crear dos registros que puedan ser entrelazados es necesario desplazar la fuente generadora antes de realizar el segundo registro, en una distancia equivalente a la mitad del espaciamiento entre geófonos, en dirección contraria al arreglo lineal. Con esto se simula un desplazamiento del arreglo de geófonos creando una variación del tiempo de viaje del impulso generado entre la fuente y el primer geófono, simulando la demora entre la fuente y la nueva posición del receptor.

3.- METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS

3.1.- Equipo utilizado

- Sismógrafo DoReMi de SARA Electronic Instruments.
 - Memoria: 64 kBytes.
 - Rango de frecuencias: 200 a 20000 [Hz]. (5 a 0.05 [ms])
 - Resolución: 24 Bytes.
 - Sistema dinámico: Hasta 155 dB.

- 18 Geófonos de 4.5 [Hz].
- Cables de transmisión de datos.
- Martillo (Peso = 20 [lb]).
- Placa de teflón.
- Soportes de PVC para geófonos.
- Software DoReMi para digitalización de registros
- Software GEOPSY para análisis de registros.



Figura 1.- Fotografía de equipo utilizado.

3.2.- Mediciones en terreno

Para el estudio en terreno se realizaron las siguientes consideraciones:

3.2.1.- Metodología MASW

Las mediciones se realizan por medio de un arreglo lineal de geófonos, espaciados de manera equidistante entre sí. La fuente impulsiva corresponde al golpe del martillo a la placa de teflón.

Para todas las mediciones base se consideró un máximo de 18 geófonos. Si bien la literatura sugiere el empleo de 24 geófonos, con 12 geófonos se puede obtener una medición confiable (Roma, 2008).

Además, para efectos de aplicación del efecto interlace la máxima distancia entre geófonos será de 2.5 [m] debido al limitado alcance del cable conector de geófonos, que posee una longitud máxima de 5 [m]. Las implicancias de esta limitante serán explicadas en la sección 3.2.2.

3.2.2.- Incorporación efecto *Interlace*

El cable empleado para la conexión de los geófonos con la fuente receptora de la señal posee una longitud de 5 [m] entre receptores. Este es un aspecto importante a considerar ya que para casos de estudio es necesario contar con un registro base para compararlo con aquellos que se creen empleando interlace. Cada medición efectuada para incorporar el efecto contará con un espaciamiento entre geófonos equivalente al doble del espaciamiento utilizado en el registro base, por lo tanto, éste último no podrá contar con un espaciamiento intergeofónico mayor a 2.5 [m], de lo contrario se necesitaría disponer de un espaciamiento mayor a 5 [m] en los registros de interlace, lo que no es posible debido al alcance de los cables.

3.2.3.- Espaciamiento entre geófonos

El espaciamiento entre geófonos puede afectar los resultados de las mediciones ya que está relacionado a la longitud de onda, la que permite definir la máxima profundidad de investigación, que equivale a, aproximadamente, la mitad del largo del arreglo (Park et al, 2002). Es por ello que la cantidad de geófonos y su espaciamiento es de importante consideración dentro de las mediciones.

Si bien las distancias entre geófonos para el método MASW pueden variar de 1 a 4 [m] (Cuadra, 2007, Sandoval, 2013), cuando se cree un registro como base de comparación empleando 18 geófonos no será posible emplear espaciamentos mayores a 2.5 [m], debido a que no se podrá incorporar el efecto interlace con 9 geófonos espaciados a más de 5 [m], como se explicó en la sección 3.2.2.-, por lo que éste será el límite para arreglos con fines comparativos.

Sandoval (2013) plantea que las mediciones in-situ pueden converger a un valor de V_s cuando los espaciamentos entre geófonos son de 2, 3 y 4 [m] al emplear 16 o más geófonos. Continúa mencionando que para los casos de 16 geófonos a 2 [m], dado que el largo del arreglo alcanza 32 [m], no se puede llegar a una profundidad deseada para obtener V_{s30} , por lo que las mediciones debiesen complementarse con la aplicación de un método pasivo como ReMi.

Por lo tanto, gracias a lo mencionado anteriormente, el empleo de 18 geófonos con distancias de 1 a 2.5 [m] permitirá obtener resultados que converjan a valores coherentes de velocidad de onda de corte.

3.3.- Sitios de estudio

3.3.1.- Sitio 1: Universidad del Bio Bio

El sector elegido corresponde a la cancha de rugby de la universidad. Dado el espacio disponible se realizaron mediciones a lo ancho y largo de la cancha, con diferentes arreglos de geófonos.



Figura2 .- Universidad del Bio Bio. Sitio de estudio: Cancha de rugby. Dirección de arreglo de geófonos D1 y D2.

N° geófonos	dx [m]	Dplaca [m]	N° ensayos
18	3	1.5	3
18	3	3	3
9	3	3	3
9	3	4.5	3

Tabla 1.- Configuración de geófonos para Universidad del Bio Bio, dirección D1.

N° geófonos	dx [m]	Dplaca [m]	N° ensayos
18	2	2	6
9	4	4	4
9	4	6	5

Tabla 2.- Configuración de geófonos para Universidad del Bio Bio, dirección D2.

3.3.2.- Sitio 2: La Leonera, Chiguayante.

El sitio corresponde a un terreno baldío cercano a la costanera, en el sector La Leonera, Chiguayante.



Figura 3.- La Leonera, Chiguayante. Sitio de estudio: terreno baldío en sector cercano a costanera.

N° geófonos	dx [m]	Dplaca [m]	N° ensayos
18	2.5	2.5	3
9	5	5	3
9	5	7.5	3

Tabla 3.- Configuración de geófonos para sector La Leonera

3.3.3.- Sitio 3: Megacentro, San Pedro de la Paz.

El tercer sitio corresponde a un costado del complejo Megacentro, en San Pedro de la Paz, cuyo acceso se encuentra por la Ruta 160.

El terreno donde fueron instalados los geófonos se encontraba a pocos metros de la línea férrea y de la ruta 160, además de contar con la presencia de movimiento de camiones a poca distancia, por lo que todo movimiento vehicular fue percibido como ruido ambiental. Esto significó tener que realizar varios ensayos por cada arreglo ya que los registros se veían contaminados o los geófonos se saturaban.



Figura 4.- Megacentro. Zona de estudio: Terreno arenoso.

N° geófonos	dx [m]	Dplaca [m]	N° ensayos
18	2.5	2.5	10
9	5	5	8
9	5	7.5	10

Tabla 4.- Configuración de geófonos para Megacentro, arreglo A1.

N° geófonos	dx [m]	Dplaca [m]	N° ensayos
18	1.5	1.5	6
9	3	3	5
9	3	4.5	5

Tabla 5.- Configuración de geófonos para Megacentro, arreglo A2.

3.3.4.- Ensayos GeoSolving

La oficina de ingeniería GeoSolving facilitó sismogramas disponibles de su historial de ensayos para poder llevar a cabo estudios sobre el efecto Interlace en arreglos de 18 geófonos, para poder generar arreglos teóricos de 36 receptores. Para esto, el criterio a aplicar para la selección de archivos fue la calidad del suelo, donde ésta debía ser notablemente mejor que la de los sitios estudiados hasta el momento.

3.4.- Procesamiento de datos

Con los registros de los ensayos en terreno es posible proceder con el procesamiento de los datos por medios de los software Geopsy (ver ANEXO B1) y Dinver (ver ANEXO B2).

En una primera instancia se emplea Geopsy para la obtención de la curva de dispersión por medio del gráfico de velocidad de fase vs frecuencia. Los colores de alta frecuencia representan la concentración de energía del modo fundamental, información con la que es posible realizar el picking y elegir la curva de dispersión aparente.

El software Dinver, extensión del Geopsy, permite realizar el proceso de inversión de la curva de dispersión y tras una serie de iteraciones permite obtener la estratigrafía del

suelo. Luego de elegir el perfil que más se adapte a la curva analizada se puede proceder con el cálculo de V_{s30} (ver ANEXO A3.3).

El software DoReMi (ver ANEXO B3) permite la creación de dos registros entrelazados por medio de su opción Interlace, permitiendo generar arreglos teóricos con el doble de geófonos utilizados en el arreglo físico.

4.- RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para cada parámetro analizado se menciona como antecedente el criterio empleado.

4.1.- Patrón de calidad

A fin de verificar la presencia de un patrón al combinar registros con Interlace se procedió a clasificar cada archivo dentro de un rango de calidad, como se menciona a continuación:

- Alta: gran nitidez y calidad de la curva característica y poca interferencia por ruido ambiental u otros factores.
- Intermedia (Int): mediana nitidez y calidad de la curva característica, con mediana presencia de interferencia por ruido ambiental u otros factores. Se considera aparición de otros modos de energía alta del suelo.
- Baja: baja o nula nitidez y calidad de la curva característica, con gran presencia de interferencia por ruido ambiental u otros factores. No es posible distinguir ningún modo fundamental del suelo y se cuenta con presencia de alta energía aislada.

Tras haber definido lo anterior, la calidad de cada combinación fue registrada acorde al archivo empleado, como se ilustra en la Tabla C4 (Anexo C).

En las combinaciones donde se mezclan calidades Alta+Alta se puede apreciar que hay un rango de frecuencias que coincide para ambos registros, que por lo general resulta ser sobre los 10 [Hz] y que en el resultado final no se ve alterado en gran medida. Sin embargo, bajo este valor, la frecuencia para cada registro varía y el comportamiento del resultado final no presenta un patrón en particular. Esto es apreciable en las Figuras C10, C28, C39, del Anexo C, entre otras.

En los casos de combinaciones Intermedia+Intermedia y Mala+Mala, la calidad resultante no parece seguir un patrón, ya que entre los resultados se ve predominancia de uno u otro registro utilizado en el efecto Interlace (ver Figuras C12, C31, C46, del Anexo C). Lo mismo ocurre para las combinaciones en que se mezclaron calidades Alta, Intermedia y Baja, donde es apreciable que la alta calidad de un archivo es deteriorado al ser combinado con uno de calidad Intermedia o Baja, independiente del orden que se emplee.

Finalmente, se tiene que para cada comparación realizada, el límite inferior de longitud de onda es desplazado hacia la derecha debido a la reducción del espaciamiento entre geófonos, lo que permite ganar información del terreno para profundidades más cercanas a la superficie.

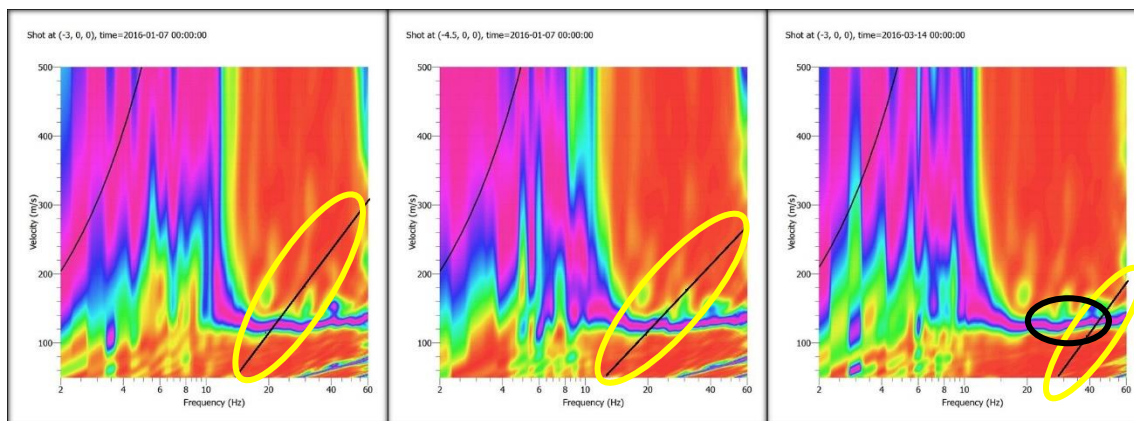


Figura 5.- Curvas de dispersión, combinación UBB-D1-INT4. a) Primer registro, b) Segundo registro, c) Resultado; en amarillo: límite inferior de longitud de onda desplazado, en negro: tramo de información ganado.

4.2.- Ruido y energía aislada

Se evaluó la presencia de ruido y energía aislada en los resultados de aplicar el efecto Interlace, así como las interferencias en la curva característica por presencia de los mismos.

Es posible observar que parte del ruido acarreado en los registros empleados para utilizar el efecto Interlace se ve mitigado en algunos resultados, mientras que en otros se sigue mostrando como interferencia en la curva característica. Así mismo ocurre con la energía aislada, la que se hace presente en el resultado final debido a su presencia en cada archivo utilizado.

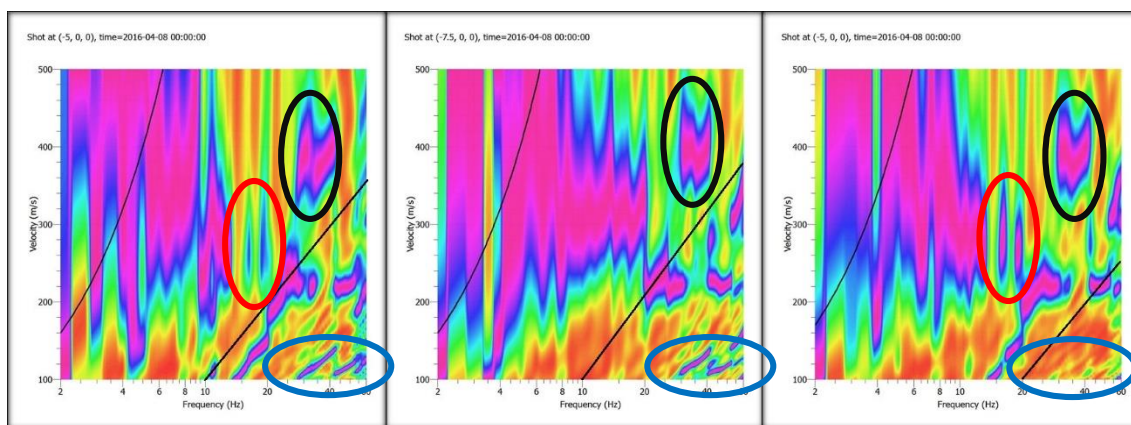


Figura 6.- Curvas de dispersión, combinación MC-A1-INT2. a) Primer registro, b) Segundo registro, c) Resultado; en rojo: interferencia acarreada por registro y resultado, en azul: mitigación de ruido en resultado, en negro: energía aislada.

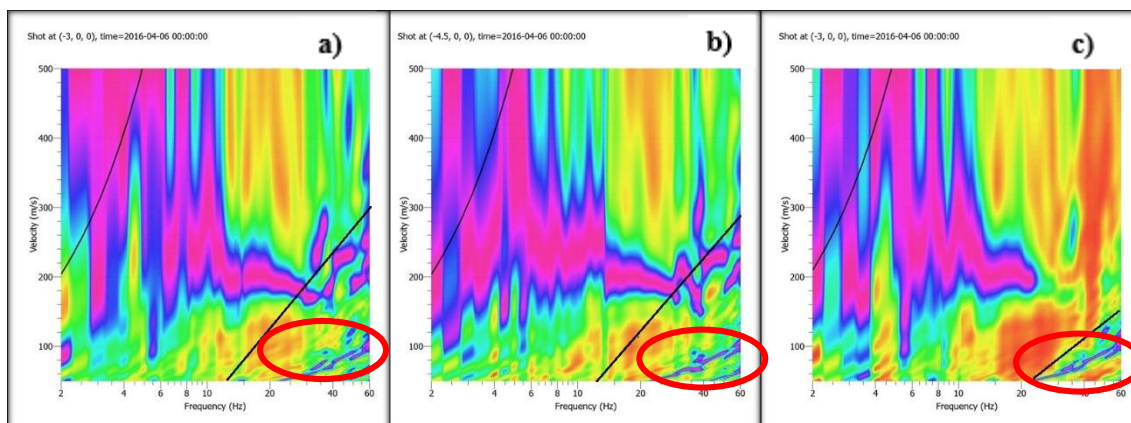


Figura 7.- Curvas de dispersión, combinación MM-D1-INT3. a) Primer registro, b) Segundo registro, c) Resultado. En rojo: ruido acarreado hasta resultado.

4.3.- Comparación curva Base vs curva Interlace

Los registros obtenidos en terreno fueron evaluados con respecto a la calidad de la curva de dispersión, en cuanto a nitidez y tendencia del modo fundamental. Para ello se emplearon los registros con mejor calidad de los ensayos de 9 y 18 geófonos obtenidos en terreno, y el archivo de 18 geófonos obtenido con el efecto Interlace. Además, para cada grupo de comparación, se incorporó el gráfico de comparación del picking realizado para cada curva, a fin de poder ver con mayor claridad la presencia de diferencias en el proceso debido a variaciones en la curva de dispersión.

En general, es posible apreciar que las curvas de 18 geófonos con y sin Interlace presentan una leve o casi despreciable variabilidad, donde este margen de error es más notorio a medida que la calidad del suelo disminuye. Además de ello, la curva obtenida con 9 geófonos también presenta un comportamiento similar, pero el alcance del rango de confiabilidad para realizar el picking es notablemente menor, debido al mayor espaciamiento entre geófonos.

Para cada suelo estudiado existe un rango de frecuencias donde las curvas de los tres registros presentan un comportamiento similar. Para la Universidad del Bío-Bío, por ejemplo, esta zona es apreciable en el rango de 10 a 60 [Hz] (ver Figura C13, Anexo C), mientras que para el sector La Leonera, este intervalo se extiende hasta, aproximadamente, 6 [Hz] (ver Figura C23, Anexo C), debido a la mejor calidad del suelo en comparación al primero.

Para el caso adicional estudiado correspondiente a Curicó, el suelo presenta una calidad notablemente superior con respecto a la Universidad del Bío-Bío, La Leonera y Megacentro, siendo posible apreciar que la curva característica se encuentra por sobre los 400 [m/s]. Como resultado se observa que las curvas de dispersión con 18 y 36 geófonos se presentan con gran nitidez, permitiendo que el picking presente un margen de error despreciable (ver Figuras C55 y C56, Anexo C).

4.4.- Perfil estratigráfico y convergencia de Vs30

Los perfiles estratigráficos fueron obtenidos para cada ensayo considerado base, tanto de los registros obtenidos en terreno con 9 y 18 geófonos como para los confeccionados con Interlace. Además, se agrega el cálculo del Vs30 para los casos en que sea aplicable, dependiendo de la calidad del suelo.

4.4.1.- Universidad del Bio Bio, dirección D1

Debido a la baja calidad del suelo no fue posible analizar el perfil estratigráfico más allá de 7 [m], por efecto de que las ondas Rayleigh hayan sido atenuadas con poca profundidad. Aun así es posible observar que la convergencia de la velocidad de onda de corte para los 7 [m] presenta baja variabilidad, lo que no es posible observar en el perfil del suelo debido a su poco alcance.

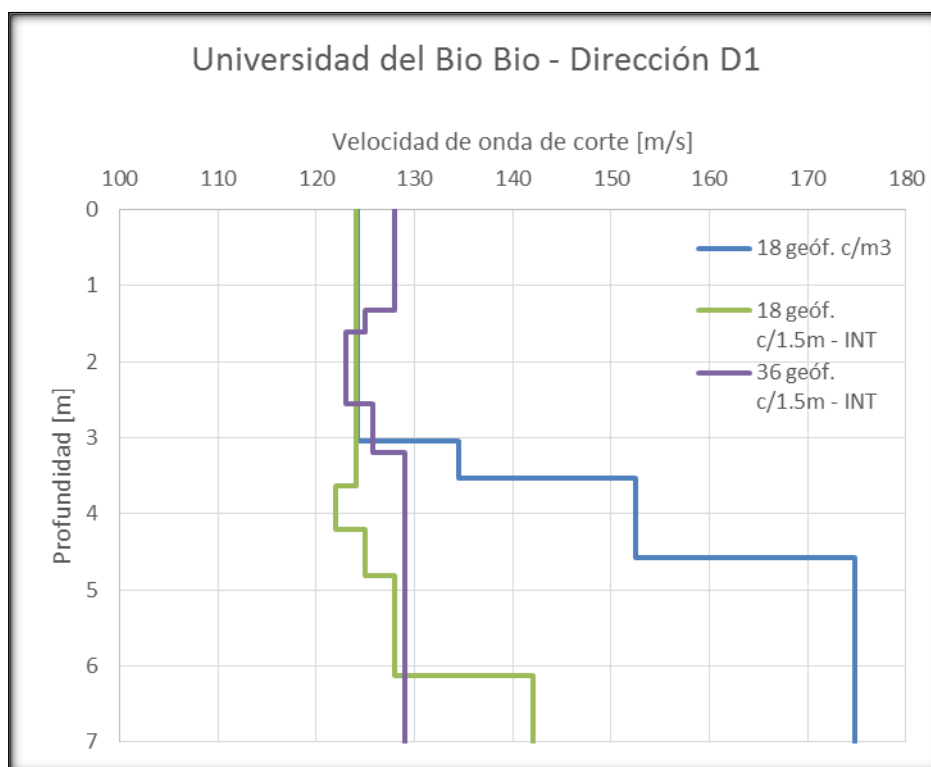


Figura 8.- Perfil estratigráfico para Universidad del Bio Bio, dirección D1.

Medición	Vs7 [m/s]
18 geóf. c/3m	143
18 geóf. c/1.5m -INT	127
36 geóf. c/1.5m - INT	142
Var. Max.	17

Tabla 6.- Valores de Vs7 para Universidad del Bio Bio, dirección D1.

El análisis del perfil del suelo no fue efectuado para la dirección D2 debido a que el comportamiento de las curvas de dispersión no presentaban mayor diferencia con respecto a la dirección D1, siendo posible asumir que el resultado del perfil estratigráfico y el Vs7 es el mismo para ambas direcciones.

4.4.2.- La Leonera, Chiguayante.

Dada la buena calidad del suelo fue posible realizar el cálculo de Vs30 hasta una profundidad de 30m. para los arreglos con 18 geófonos, mientras que la configuración de 9 geófonos solo pudo alcanzar una profundidad de 25m. Esto es apreciable en la figura 9.

Gracias al perfil estratigráfico de los tres arreglos se puede apreciar la gran similitud que existe entre los archivos de 18 geófonos con y sin Interlace, donde ambos presentan un comportamiento con leves diferencias. El arreglo de 9 geófonos presenta un leve desfase para los primeros 5m., pero luego tiende a comportarse de una manera similar con respecto a los otros archivos.

La comparación de valores Vs se obtuvo para 25m. y 30m. para poder analizar los casos de 9 y 18 geófonos, presentes en las tablas 7 y 8, respectivamente. A pesar de la diferencia de profundidad, los valores de Vs presentan una leve diferencia, con una variación máxima, con respecto al ensayo base, de 8 [m/s], correspondiente a un valor muy favorable para los ensayos MASW.

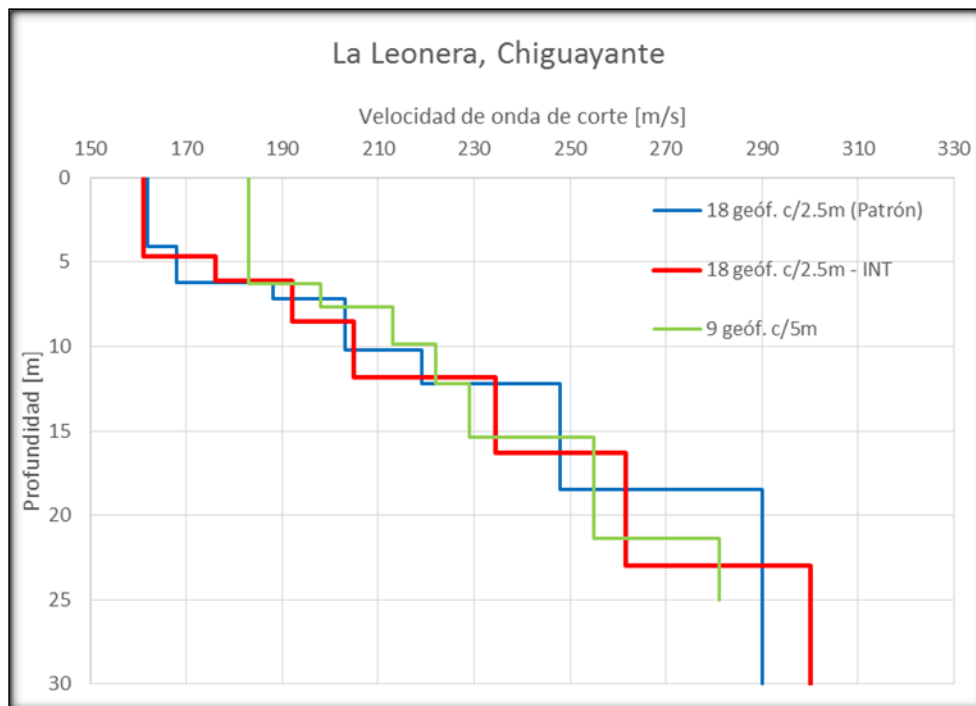


Figura 9.- Perfil estratigráfico para La Leonera, Chiguayante.

Medición	Vs25 [m/s]
18 geóf. c/ 2.5m	241
18 geóf. c/ 2.5m - INT	233
9 geóf. c/5m.	236
Var. Max.	8

Tabla 7.- Valores de Vs25 para La Leonera, Chiguayante.

Medición	Vs30 [m/s]
18 geóf. c/ 2.5m	249
18 geóf. c/ 2.5m - INT	244
Var. Max.	5

Tabla 8.- Valores de Vs30 para La Leonera, Chiguayante.

4.4.3.- Megacentro, San Pedro de la Paz.

De los dos arreglos, solamente el A1 fue evaluado con respecto a su valor Vs30, debido a que el A2 no pudo alcanzar una profundidad cercana a 30m. como resultado de que la distancia total abarcada por los geófonos fuese cercana a los 25m.

Gracias a que éste suelo presentaba una calidad levemente mejor al del sector La Leonera, el arreglo con 9 geófonos pudo alcanzar una profundidad de 30m., apreciable en el perfil estratigráfico, por lo que pudo ser posible la comparación de los valores Vs30 para los tres archivos.

Así, es posible apreciar que los perfiles con 9 y 18 geófonos presentan un comportamiento bastante similar, donde el de 9 receptores presenta una mayor diferencia hasta una profundidad de 10m. Los valores de Vs30 obtenidos para este sitio presentan una variación máxima, con respecto al patrón, de 10 [m/s], lo que se encuentran dentro del margen de error aceptable para ensayos MASW.

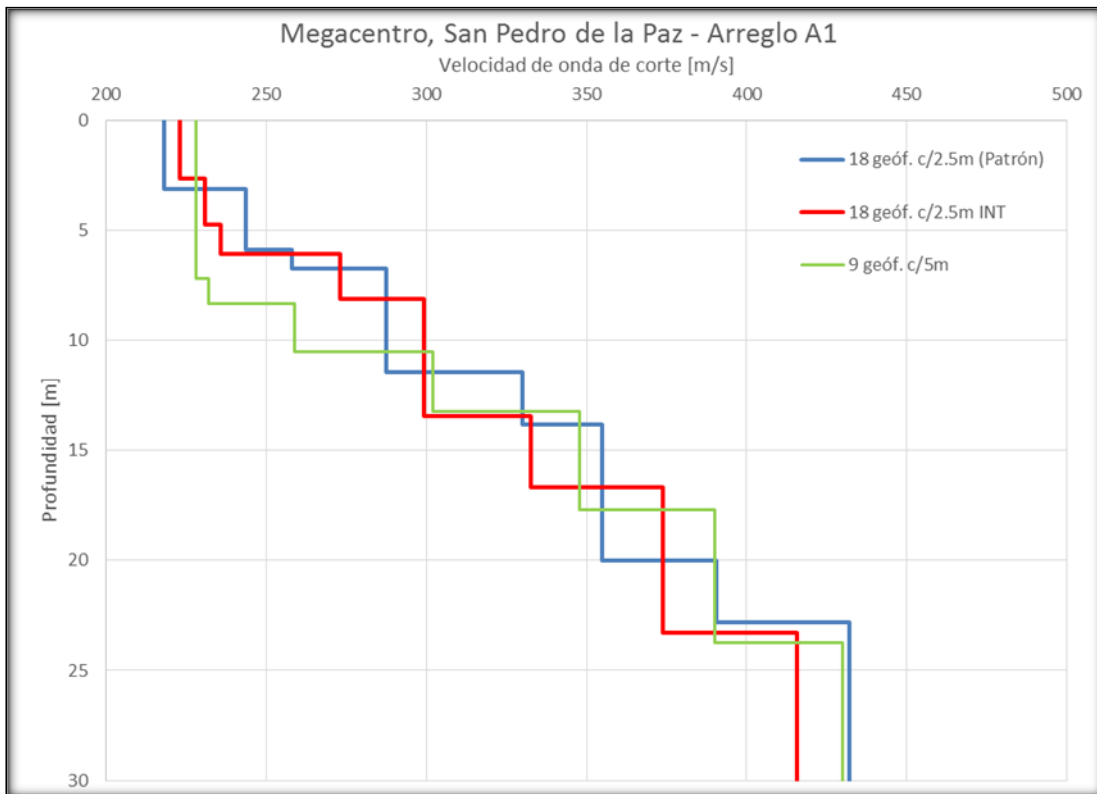


Figura 10.- Perfil estratigráfico para Megacentro, San Pedro de la Paz, arreglo A1.

Medición	Vs30 [m/s]
18 c/2.5m	320
18 c/2.5m - INT	315
9 c/5m	310
Var.max.	10

Tabla 9.- Valores de Vs30 para Megacentro, San Pedro de la Paz, arreglo A1.

4.4.4 Ensayos GeoSolving – Curicó

Es importante recordar que el picking realizado para los archivos de Curicó presentó un margen de error despreciable, lo que no quita la posibilidad de que los perfiles estratigráficos difieran, debido a que estos son obtenidos a través de las iteraciones del software DINVER.

Como consecuencia, se tiene que los perfiles para arreglos de 18 y 36 geófonos presentan un comportamiento similar, lo que también es apoyado por los valores de Vs30 obtenidos, que difieren en 7 [m/s].

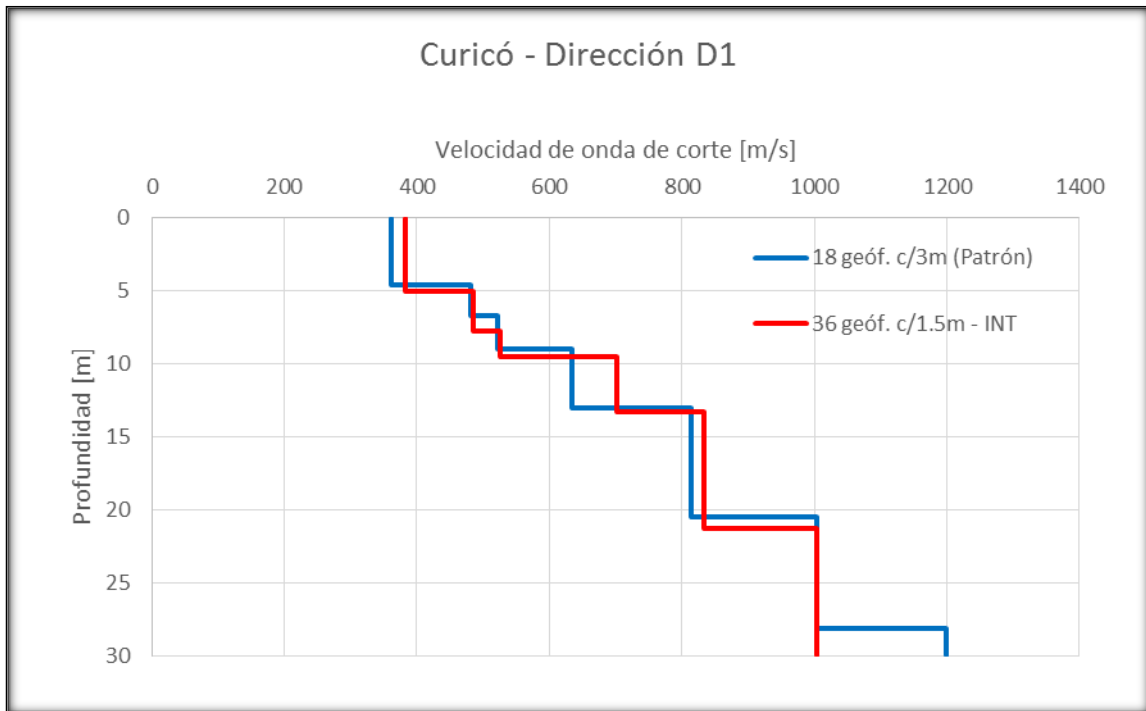


Figura 11.- Perfil estratigráfico para Curicó, dirección D1.

Medición	Vs30 [m/s]
18 geóf. c/3m	649
36 geóf. c/1.5m - INT	656
Var. Max.	7

Tabla 10.- Valores de Vs30 para Curicó, dirección D1.

5.- CONCLUSIONES

Se elaboró un estudio para la comprensión del comportamiento del efecto Interlace sobre el método MASW, por medio del análisis de las curvas de dispersión obtenidas en terreno y la posterior comparación con aquellas confeccionadas a través del efecto Interlace. Para ello se realizaron múltiples mediciones con distintos arreglos geofónicos y sobre suelos de distintas cualidades para evaluar diferentes parámetros que se ven comprometidos para el método MASW y que son apreciables a través de las curvas de dispersión. Gracias a lo anterior, es posible concluir que:

- La calidad de los registros utilizados para aplicar el efecto Interlace compromete en gran medida el resultado, pudiéndose distinguir que si un archivo de gran calidad es entrelazado con uno de baja calidad, el primero se verá afectado por el segundo reduciendo la nitidez de la curva característica, de lo que se concluye que el efecto Interlace no debe ser utilizado con archivos de calidad baja.
- El ruido presente en los registros al momento de los ensayos es transmitido por el efecto Interlace, en medida de que es posible que el resultado de aplicar el efecto mitigue o amplifique la presencia de éste en las zonas correspondientes. Esto se puede ver inclusive en la interferencia de la curva característica, donde si un registro presenta una discontinuidad en ésta, en el resultado final se podría expresar tal interferencia en la misma ubicación. La presencia de energía aislada en distintas zonas del gráfico de velocidad de fase vs frecuencia también se ve marcado por el mismo comportamiento, por lo que su ubicación se puede traspasar al resultado del efecto Interlace.
- El efecto Interlace permite emular con gran precisión arreglos físicos de geófonos a partir de la unión de archivos que presenten la mitad de receptores, siempre y cuando se respeten las condiciones para mantener la distancia entre geófonos constante. En caso de que no se respete tal acuerdo, el arreglo resultante presentará espaciamientos intergeofónicos variables, llevando a una configuración lineal distinta de la utilizada durante esta investigación.

- Es posible aplicar el efecto Interlace con mediciones realizadas con 9 geófonos y aun así obtener como resultado un arreglo teórico que entregue una solución confiable, siempre que se disponga de antecedentes del suelo que informen sobre la calidad de éste y permitan, a juicio del operador, emplear arreglos con 9 receptores. En caso de ser aplicable, el efecto Interlace permitirá, además, reducir el tiempo empleado para realizar un estudio MASW en el sitio.

6.- REFERENCIAS

1. Aguirre, J., Flores Estrella, H., Mijares Arellano, H., Vásquez Rosas, R. (2011). Microtremor studies using the SPAC method: Experiences and applications to four sites in Mexico.
2. Akkaya, I., Arisoy, M. Ö., Dikmen, Ü. (2010). Offset and linear spread geometry in the MASW method.
3. Cuadra, P. (2007). Aplicación de técnicas de vibraciones ambientales: Análisis de microtremores y vibraciones naturales, para la caracterización de sitio. Universidad Simón Bolívar. Venezuela.
4. Humire, F., Leyton, F., Sáez, E. (2015). Manual de Aplicación de Técnicas Geofísicas basadas en ondas de Superficie para la determinación del Parámetro Vs30.
5. Khareshi, K., Motazedian, D. (2010). On the Efficiency of Multi-Channel Analysis of Surface Wave Method for Shallow and Semideep Loose Soil Layers.
6. Linares, G. M. (2005). Introducción y aplicación del método de sísmica de microtremores en áreas urbanas. Universidad Simón Bolívar. Venezuela.
7. Louie, J. N., Pei, D., Pullammanappallil, S. K. (2005). Inversion of phase velocities of high-frequency fundamental-mode Rayleigh waves using simulated annealing approach.
8. Park, C., Miller, R. D., Xia, J. (1998a). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record.
9. Park, C., Miller, R. D., Xia, J. (1998b). Ground roll as a tool to image near-surface anomaly.
10. Park, C., Miller, R. D., Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves.

11. Park, C., Miller, R.D., Xia, J. (2001). Offset and resolution of dispersion curve in multichannel analysis of surface waves (MASW).
12. Park, C., Miller, R. D., Miura, H. (2002). Optimum Field Parameteres of an MASW Survey.
13. Roma, V. (2006). Caratterizzazione sísmica dei suoli con il método MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).
14. Sandoval, L. (2013). Estudio del método MASW para su aplicación según el Decreto Supremo N° 61. Universidad del Bio Bio. Chile.
15. Soussé Villa, R. (2015). Cerdanya basin characterization using H/V and F-K seismic noise methods.