

# UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

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

## “DETERMINACIÓN DE LA $V_s 30$ A TRAVÉS DEL CÁLCULO DE RAZÓN ESPECTRAL $H/V$ ”

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

Astryd Karol Escalona Medina

Concepción, Enero 2016.

***Dedicatoria***

*Dedicado a mi Mamita Olga  
y Mamita Rosa.*

## **Agradecimientos**

*Principalmente a Dios,  
quien ha puesto en mi camino de forma mágica  
todo lo necesario para estar donde estoy  
y ser quien soy.*

*También agradecer a mi familia  
quien me ha formado llenando de valores  
y entregando el amor y apoyo necesario  
para seguir a pesar de las dificultades.*

*Mi Madre, mi padre, mi hermana y mi hermano  
y al amor que me ha acompañado durante 8 años.  
También a mis abuelitas, a quien está dedicado el esfuerzo,  
por su ejemplo de fortaleza, paciencia y cariño.  
Personas indispensables en mi vida  
en mis tristezas, triunfos y éxitos*

*Agradecer a los profesores que me guiaron.  
Al profesor Oscar por darme la oportunidad  
de trabajar con él en mi proyecto de tesis,  
al profesor Franco quien me abrió las puertas de  
Ingeniería Civil la carrera que me llena profesionalmente,  
y a la profesora Gilda, excelente profesora llena de saber  
de quien admiro tanto conocimiento.*

*Finalmente, mis enormes agradecimientos  
a la Universidad del Bío Bío, la casa de estudios  
que me entrego todas las posibilidades de educarme  
con respecto a la carrera que era mi vocación.*

*Muchas Gracias....*

## **NOMENCLATURA**

**Vs:** Velocidad de propagación de ondas de corte.

**Vs30:** velocidad de propagación de ondas de corte promedio en los 30 metros de profundidad.

**T<sub>0</sub>:** medición de periodo fundamental de vibración del suelo.

**MOS:** Métodos de Ondas Superficiales

**HVSR:** Razón espectral Horizontal Vertical (Horizontal Vertical Spectral Ratio).

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

**SESAME:** Proyecto de Investigación Europea que trata la aplicación de la técnica H/V en el cálculo espectral de vibraciones ambientales (Site Effects assessment using Ambient Excitations).

**D.S. N° 61:** Decreto Supremo N° 61, aprobado el 6 de diciembre del 2011.

**NCh 433 of. 96 mod. 2009:** Norma Chilena 433 oficializada en 1996 y modificada en 2009.

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos.....	4
JUSTIFICACIÓN DEL TEMA.....	5
METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	6
MARCO TEÓRICO .....	7
Métodos Geofísicos para la Caracterización Geotécnica de Suelos.....	7
<i>Métodos Activos</i> .....	7
<i>Métodos Pasivos</i> .....	7
Métodos de Ondas Superficiales.....	8
<i>Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales</i> .....	8
<i>Método de Razón Espectral H/V (HVSR)</i> .....	9
METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS.....	12
Sistema de adquisición del método MASW.....	12
Equipo utilizado Razón Espectral H/V.....	12
MEDICIÓN EN TERRENO.....	13
Desarrollo en terreno MASW.....	13
Desarrollo en terreno Razón Espectral H/V.....	14
Áreas de Estudio.....	15
<i>Sector Cabrero</i> .....	15
<i>Sector Chillán</i> .....	15
<i>Sector Los Álamos</i> .....	15

<i>Universidad del Bío Bío.</i> .....	16
<i>Universidad de Concepción.</i> .....	16
PROCESAMIENTO DE DATOS .....	18
Análisis MASW .....	18
<i>Inversión de la Curva.</i> .....	18
Análisis Razón Espectral H/V. ....	19
<i>Proceso de inversión.</i> .....	19
RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	21
Análisis curva de dispersión .....	21
Análisis Curva H/V .....	22
Perfiles Estratigráficos. ....	23
<i>Localidad de Cabrero.</i> .....	23
<i>Localidad Villa El Roble, Chillán</i> .....	24
<i>Localidad de Los Álamos</i> .....	25
<i>Universidad del Bío Bío</i> .....	26
<i>Universidad de Concepción.</i> .....	27
Estimación de la Vs30. ....	29
Comparación de resultados y porcentajes de diferencia. ....	30
Períodos fundamentales. ....	32
Comparación de resultados T <sub>0</sub> y Vs30. ....	34
CONCLUSIONES .....	36
BIBLIOGRAFÍA Y LINKOGRAFÍA .....	38
REFERENCIAS .....	39

# **DETERMINACIÓN DE LA $V_s 30$ A TRAVÉS DEL CÁLCULO DE RAZÓN ESPECTRAL H/V.**

**Autor: Astryd Karol Escalona Medina.**

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

**Profesor Patrocinante: Oscar Gutiérrez Astete**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío  
Correo Electrónico: gutierrez.oscar@gmail.com

## **RESUMEN**

El estudio del suelo a través de mecanismos indirectos ha proporcionado a través de los años una gran gama de métodos geofísicos no invasivos que se componen en pasivo, activo e híbrido, dentro de estas se encuentran los métodos MASW, ReMi, ESAC, SAWS, HVSR, entre otros.

El análisis que se utiliza en esta investigación es el Método de Razón Espectral H/V, correspondiente a un método pasivo que trata el estudio del suelo a través de microtemores, provenientes de diversas fuentes como son las fuerzas ambientales y de tipo antropogénico, así se obtienen parámetros procedentes de la captura para procesar componentes como son los períodos fundamentales y las variaciones de frecuencias.

Por otro lado, la implementación de un método activo es de suma importancia, de esta manera se recurre a una de las técnicas más utilizadas como es el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, para determinar de manera confiable el cálculo de la  $V_s 30$ .

Por consiguiente, al obtener los resultados de ambos métodos se realizará un análisis comparativo para verificar la posibilidad de validar los resultados obtenidos por el cálculo de Razón Espectral H/V, y así de esta forma lograr aplicar este método como una técnica que no sólo disponga de información del subsuelo a través del período predominante sino de determinar además el comportamiento de los estratos de suelo a través de la  $V_s 30$ .

**Palabras Claves:** Razón Espectral H/V,  $V_s 30$ , Período Predominante.

**Número de Palabras:**  $6987 + 10 \cdot 250 + 1 \cdot 500 = 9987$  palabras totales.

## **DETERMINATION OF Vs30 BY CALCULATING REASON SPECTRAL H/V.**

**Autor: Astryd Karol Escalona Medina**

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

**Profesor Patrocinante: Oscar Gutiérrez Astete**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío  
Correo Electrónico: gutierrez.oscar@gmail.com

### **ABSTRACT**

The study of soil through indirect mechanisms have provided over the years a wide range of non-invasive geophysical methods that consist in passive and active within these are the MASW, ReMi, ESAC, SAWS, HVSR methods, including other.

The analysis used in this research is the method of spectral reason H/V corresponding to a passive method that deals with the study of the soil through microtremor from various sources as are the environmental and anthropogenic type forces, from capturing parameters are obtained for processing components such as the fundamental periods and frequency variations.

On the other hand, the implementation of an active approach is paramount, so it resorts to one of the most used techniques such as Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) to determine reliably calculate the Vs30.

Therefore, to obtain the results of both methods a comparative analysis to disagree the possibility to validate the results obtained by the HVSR method is carried out, and so thus achieving apply this method as a technique that not only has information of the subsoil through the critical period but also determine the behavior of soil layers through Vs30.

Keywords: Spectral Ratio H/V, Vs30, Predominant Period.



## INTRODUCCIÓN

A través de los años, los métodos de ondas superficiales han sido empleados para determinar las propiedades dinámicas de suelos cercanos a la superficie. Estos se han introducido dentro del estudio del subsuelo y se han ido implementando en gran magnitud tras los acontecimientos ocurridos en Chile por el terremoto del año 2010. Es así, que las técnicas no invasivas son utilizadas según lo especificado por la normativa sísmica del Decreto Supremo N° 61 del 2011.

Dentro de estos métodos geofísicos, se encuentran aquellos basados en el análisis de ondas superficiales. Uno de los más destacados en esta categoría es el método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, que se fundamenta en el análisis de ondas superficiales con las cuales se determinan las características dispersivas para caracterizar los suelos (Tokimatsu, 1997), ya que esta depende de la estratigrafía, y en particular del perfil de la propagación de velocidades de ondas de corte.

De igual manera, se investigará la técnica de Razón Espectral H/V, que determina el Período Fundamental de Vibración del Suelo, sin embargo la aplicación de este método se aplicará no sólo para el cálculo del período predominante, sino para las propiedades de rigidez según el estudio de las frecuencias que establecen el comportamiento de la estratigrafía para los primeros 30 metros de profundidad.

Los mecanismos a utilizar para este ensayo se llevan a cabo a través de un sismómetro triaxial con componentes espectrales horizontales (de norte a sur y oeste a este) y verticales del movimiento superficial. Cuyos parámetros serán procesados con el software GEOPSY y su aplicación DINVER para la determinación de propagación de onda de corte de los estratos del subsuelo.

Los resultados obtenidos por ambos métodos sobre la  $V_{s30}$ , serán analizados de manera comparativa para verificar si los parámetros conseguidos por el cálculo de Razón Espectral H/V están dentro de los rangos logrados por el análisis MASW, y de esta manera validar su aplicación sobre la clasificación del sitio en los estudios sobre velocidad de ondas de corte superficial y su perfil estratigráfico.

Por otro lado, se realizará un análisis del suelo a través del período fundamental para estimar la clasificación de este con respecto a la normativa vigente, basado en el Decreto Supremo 61 del 2011 y el efecto de la nueva propuesta realizada por la Sociedad Chilena de Geotecnia (noviembre 2015) para el Período Espectral, y finalmente comparando estos resultados sobre la clasificación del terreno con la información que se obtiene a través de la Vs30.

## **OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.**

### **Objetivo General.**

- Determinar la velocidad de onda de corte superficial para los primeros 30 [m] de profundidad, a través del cálculo de Razón Espectral Horizontal y Vertical.

### **Objetivos Específicos.**

- Describir métodos geofísicos correspondientes a Razón Espectral H/V y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales.
- Realizar ensayos de terreno y procesar las señales obtenidas en diversos lugares dentro de la región del Bío Bío utilizando el software GEOPSY - DINVER.
- Ejecutar análisis comparativo de los resultados adquiridos por Razón Espectral H/V y MASW en la determinación de la Vs30.
- Concluir sobre la validez de los resultados obtenidos por cálculo H/V según la información del perfil Vs adquiridos del MASW.
- Clasificar el suelo según el Periodo Fundamental y comparar con resultados obtenidos sobre la Vs30.

## **JUSTIFICACIÓN DEL TEMA.**

Después de la catástrofe ocurrida en una amplia zona considerada con daños sobre lo aceptable, producida por el terremoto de Febrero del año 2010 en Chile, se ha aplicado cambios en la normativa sísmica centrándose en el parámetro que se estima más relevante en un primer acercamiento, este hace referencia a la rigidez a bajas deformaciones de los estratos superiores correspondiente a la velocidad de propagación de ondas de corte en promedio a los primeros 30 (m) y el fenómeno de amplificación sísmico controlado por el período predominante de vibración.

De esta forma, según lo que se especifica en el Decreto Supremo 61 del año 2011, se hace referencia a la clasificación del suelo a través de la determinación de la  $V_{s30}$  y el período fundamental para tener referencia geofísicas del sitio.

Con el propósito de innovar sobre la gama de resultados que proporcionan los métodos de ondas superficiales, se ha requerido investigar sobre las diversas opciones de información que se pueden adquirir con las señales obtenidas en un solo ensayo.

Así, aplicar el método de razón espectral H/V no solo en la clasificación del suelo a través del período fundamental, sino para la determinación correspondiente a la  $V_{s30}$ , validando su uso en la adquisición de este parámetro y generar mayor capacidad y confiabilidad de resultados representativos del lugar de estudio.

## **METODOLOGÍA DE TRABAJO.**

1. Estudio de Antecedentes: Se realiza una búsqueda de información correspondiente a aplicación de los métodos que se implementan en la determinación de la velocidad de ondas de corte, investigando los criterios a emplear en el análisis del sitio.
2. Marco Conceptual: Se estudian los métodos geofísicos para la determinación de la velocidad de onda de corte a una profundidad de 30 metros, para así determinar la metodología a utilizar según la técnica de Razón Espectral H/V. Igualmente, se implementará el estudio del método MASW en la determinación del Vs30.
3. Procesamiento y Análisis de Resultados: Se efectúan mediciones en distintos lugares, procediendo al análisis de los registros a través del software de aplicación gratuita GEOPSY para el proceso de clasificación de los depósitos de suelo según los espectros de respuesta adquiridos por la técnica de Nakamura y los resultados del MASW.
4. Conclusiones y Recomendaciones: Según los resultados obtenidos con cada método, se verifica la validez de los resultados determinados en el cálculo H/V, generando el uso de este para ser una fuente de información complementaria para los cálculos determinados por otros métodos que obtengan información del sitio.

## MARCO TEÓRICO

### Métodos Geofísicos para la Caracterización Geotécnica de Suelos.

Dentro de la caracterización geotécnica de los suelos, existen variadas técnicas no invasivos y no destructivos utilizados para la determinación de velocidad superficial, estos se clasifican como métodos pasivos y activos.

- ***Métodos Activos***

Para este método, las ondas superficiales obtenidas son generadas por una fuente dinámica que corresponde a una perturbación en superficie, estas son registradas por geófonos alineados con la fuente. La perturbación es ejecutada con un mazo o martillo que deja caer un peso al terreno, de igual manera se pueden utilizar dispositivos más sofisticados que logren una mayor eficacia sobre el control de las perturbaciones generadas, como también sobre el rango de frecuencias y amplitud de las ondas (e.g. Stokoe et al., 2004).

Dentro de esta clase de clasificación se encuentran los métodos MASW, SASW, F-K.

- ***Métodos Pasivos***

Este tipo de métodos se basa en la medición de vibraciones ambientales. Dentro de estas se puede hacer mención a que vibraciones con una frecuencia superior a 1 Hz se originan por la actividad humana como son el tráfico, maquinaria, etc., este es conocido como microtemblores (Bonney-Claudet et al., 2008). Así se puede hacer referencia a las vibraciones de menor frecuencia, estas se asocian a fuentes de tipo natural, como el oleaje, ciclones o corrientes de viento (Asten y Hendrige, 1984) conocidos como microsismos.

Según esta clasificación se encuentran el método ESAC, SPAC y HVSR.

El método ReMi también es conocido como un método pasivo, aun así este corresponde a una clasificación tipo Híbrido, ya que en realidad es resultante de los métodos activo y pasivo.

## **Métodos de Ondas Superficiales**

### ***Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales.***

También conocido como método MASW, fue propuesto por Park et al. (1999) como un método que analiza las propiedades de propagación de las ondas sísmicas superficiales, principalmente sobre la medición de las Ondas de Rayleigh, las cuales se propagan de forma horizontal desde una fuente emisora artificial que genera ondas superficiales hasta los geófonos receptores.

Los equipos correspondientes a geófonos verticales son alineados en dirección a la fuente, estos deben ser al menos 12 geófonos para ejecutar la técnica de una manera confiable, los que se disponen con igual espaciamiento entre cada receptor, cada uno de estos receptores está conectado a un canal que registra de manera individual la captación de las ondas.

Las principales ventajas que presenta este método se basa en la capacidad de reconocimiento de patrones y la precisión en las medidas, esto permite un medio muy eficaz de control de calidad durante esta técnica en la adquisición y procesamiento de datos.

Mediante el análisis posterior de estas ondas superficiales se determina la curva de dispersión, obteniendo el perfil de velocidad de ondas de corte en profundidad mediante el análisis del Modo Fundamental de la Onda Rayleigh. Para la generación del perfil velocidad de ondas superficiales, este proceso se lleva cabo según la toma de muestras en terreno, adquiriendo el registro de las ondas superficiales, la determinación de sus características dispersivas y la inversión de la curva de dispersión junto con el cálculo del perfil de la Vs.

### ***Método de Razón Espectral H/V (HVSR).***

Esta técnica, pertenece a la gama conocida como un método Pasivo, que se basa en el análisis de las vibraciones asociadas a el ruido ambiental o microtemores en la evaluación de los efectos de sitio, utilizando la razón espectral entre las componentes horizontales y verticales. Además, a partir de este procedimiento se puede obtener la frecuencia natural de resonancia, que corresponde el peak de mayor amplitud generada. Esta técnica también es conocida como Método de Nakamura y se lleva a cabo con equipamiento correspondiente a un sismómetro triaxial de banda ancha (ortogonal de N – S, O – E y vertical).

Según los parámetros analizados por este método, el comportamiento del suelo puede ser generado por la exposición de vibraciones inducidas por fuerzas naturales, pero además pueden ser afectadas por las llamadas fuerzas antropogénicas que provienen de industrias, tráfico vehicular, trenes, entre otros. Estas deben considerarse como fuerzas generadoras de vibraciones, las que producen una sollicitación dinámica aleatoria, fomentando que los estratos del suelo tiendan a vibrar preponderantemente de acuerdo a su período preponderante.

Nakamura (1989) basa su trabajo en la hipótesis de que los microtemores estaban compuestos por un cuerpo principal de ondas y además por ondas superficiales Rayleigh, y se hace referencia a que el efecto de las ondas Rayleigh surge más intensamente en la componente vertical y su efecto se cuantifica calculando la razón entre la componente vertical superficial y la base del sustrato.

Al eliminar el efecto de las ondas Rayleigh, se obtiene un efecto de sitio que no considera el espectro de la fuente, esta es la función de transferencia la que será denominada  $S_T$ :

$$T = \frac{HS}{HB} E_S = \frac{VS}{VB}$$

- $S_{HS}$  y  $S_{HB}$ : corresponden a los espectros de amplitud de Fourier de las componentes horizontales del movimiento en superficie y en la base de la capa sedimentaria.
- $E_S$ : función de transferencia que representa principalmente el efecto de la onda Rayleigh en la componente vertical del movimiento.

- $S_{VS}$  y  $S_{VB}$ : corresponden a los espectros de la amplitud de Fourier de las componentes verticales del movimiento en superficie y en la base de la capa sedimentaria.

Por otra parte, se asume que el efecto de las ondas Rayleigh es similar en la componente horizontal a la vertical, por lo tanto se define la función de transferencia como  $S_{TT}$ :

$$T_T = \frac{T}{E_S}$$

Entonces se tiene

$$T_T = \frac{HS}{VS} * \frac{VB}{HB}$$

Se demuestra que el espectro de la componente de la vertical y horizontal, según esta función de transferencia, considera la eliminación del efecto de las ondas Rayleigh.

Por lo tanto

$$R_S = \frac{HS}{VS} R_B = \frac{HB}{VB}$$

Por lo que la ecuación de transferencia  $S_{TT}$ , se reescribe de la siguiente manera:

$$S_{TT} = \frac{R_S}{R_B} \quad S_{TT} = \frac{HS}{VS} * \frac{HB}{VB}$$

Según lo descrito por Nakamura (1989), se considera que la base del movimiento es igual en todas las direcciones, por lo tanto se demuestra que el espectro de la componente vertical y la horizontal son equivalentes en el manto rocoso, por lo que  $R_B$  alcanza valores en torno a la unidad.

Entonces se tiene

$$\frac{HB}{VB} = 1S_{TT} = R_S$$



De esta forma se representa la función de transferencia asociada a la propagación vertical de ondas de corte de un depósito de suelos, siendo estimada a través del movimiento medido en la superficie.

Por lo anterior, el método mencionado permitiría obtener la función de transferencia completa del suelo en período y amplificación. Aun así, se ha comprobado empíricamente que la utilidad primordial se centra en la determinación del período fundamental del suelo (Bonilla, Steidl, Lindley, Tumarkin y Archuleta, 1997; Lachet y Bard, 1994).

## **METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS.**

### **Sistema de adquisición del método MASW.**

El sistema utilizado se basa en un sismógrafo que procesa la señal a través de Doremi de “SARA electronic instruments”, este equipo está compuesto por:

- Memoria: 60 kBytes (30.000 muestras).
- Rango de Frecuencias: 500 a 20000 Hz. (2 a 0.05 ms).
- Rango Dinámico: Hasta 155dB.
- Ancho de bando: 2 a 200 Hz.
- Convertidor: tipo SAR a 16 bit (96 dB)

Con elementos correspondientes a:

- Geófonos de sensibilidad vertical de 4.5 Hz.
- Sensor de disparo.
- Línea de comunicación.
- Canales con convertidor de memoria A/D
- Placa para el golpe.

### **Equipo utilizado Razón Espectral H/V.**

El equipo utilizado para la adquisición de señales en el proceso de grabación de vibraciones ambientales, se logra a través de un sismómetro triaxial Geobox SR04 de “SARA electronic instruments”. Este dispositivo debe estar correctamente nivelado en la superficie del sitio y debe estar ubicado apuntando hacia la dirección Norte.

Características del sistema:

- Convertidor A/D con 3 canales de 24 bits.
- Sensibilidad: velocímetros 4,5 Hz
- Rango dinámico: 124dB (144dB, 24 bit de ENOB, entre 0.1 y 10Hz)

- Muestreo: simultaneo en los 3 canales para frecuencias entre 10 a 600 Hz
- Exactitud RTC: +/-10ppm entre -20/+50°C ( +/- 40  $\mu$ s respecto a UTC )
- Interfaz de datos: RS232, cable 8 metros y adaptador USB.
- Temperatura operativa: -20/+50C.

## MEDICIÓN EN TERRENO.

### Desarrollo en terreno MASW.

En la recolección de datos de este método, se considera un arreglo lineal con geófonos consecutivos espaciados a un misma distancia entre uno y otro. Este debe considerar un mínimo de geófonos correspondiente a 12, pero idealmente para una buena recepción de la señal correspondería a una cantidad de 24 geófonos, no obstante para tener resultados fiables se considerarán a lo menos 16 receptores. Rojas (2006)

El detalle sobre la adquisición de la señal para cada sitio varía según las características de este, considerando que para recolección de datos de 30 (s) los golpes deben realizarse de forma consecutiva y que para el caso de 2 (s) consiste en un sólo golpe.

Sin embargo, el detalle en la adquisición para cada sitio se presenta a continuación:

Sitio de Estudio	Arreglos	Nº de geófonos	Distancia entre geófonos (m)
Cabrero	1	18	2,5
	2	18	2
Chillán	1	18	3
	2	18	2
Los Álamos	1	18	3
	2	16	2,5
Universidad del Bío Bío	1	18	3
	2	18	3
Universidad de Concepción	1	16	3
	2	16	2,5

Tabla 1: Distribución de los arreglos de cada sitio

Las distancias de distribución de los canales estiman las longitudes de ondas que fórmulan los límites en la confiabilidad de la curva de dispersión. Estas son estimadas a continuación:

<b>Sitio de Estudio</b>	<b>Arreglos</b>	<b>D<sub>min</sub> (m)</b>	<b>D<sub>max</sub> (m)</b>	<b>λ<sub>min</sub> (m)</b>	<b>λ<sub>max</sub> (m)</b>
Cabrero	1	2,5	42,5	5	85
	2	2	34	4	68
Chillán	1	3	51	6	102
	2	2	34	4	68
Los Álamos	1	3	51	6	102
	2	2,5	37,5	5	75
Universidad del Bío Bío	1	3	51	6	102
	2	3	51	6	102
Universidad de Concepción	1	3	45	6	90
	2	2,5	37,5	5	75

Tabla 2: Distancias características en cada tendido.

Dentro de las características de estas mediciones, se obtuvieron en promedio tres registros por arreglo de cada sitio, estos son almacenados en un archivo de extensión en los formatos .seg2 o .drm.

### **Desarrollo en terreno Razón Espectral H/V.**

El desarrollo de estas mediciones se realizó a través de grabaciones entre los 5 a 16 minutos, adquiriendo en promedio tres registros en cada sitio, para obtener una buena recepción de la señal, además se debe considerar el cumplimiento de las características ambientales, de esta manera se procede a la realización del análisis del espectro a base del cumplimiento de los criterios basados del Proyecto SESAME para la verificación de un registro representativo. Mayor información se registra en el ANEXO B.

Esta recolección se realizó en las cercanías de las mediciones efectuadas con el método activo MASW, para poder realizar un análisis comparativo entre las dos técnicas.

## **Áreas de Estudio.**

### ***Sector Cabrero.***

El estudio fue ejecutado en el interior de una locación en la dirección correspondiente a Calle Miraflores 360, ubicado en el interior de la comuna Cabrero Provincia del Bío Bío.

Los arreglos realizados para efectuar los ensayos del MASW se ubicaron de manera ortogonal, el arreglo 1 se confeccionó sobre la acera de la calle para obtener un espaciamiento pertinente de los geófonos y su buena recepción. En el caso del arreglo 2 se realizó en el interior del sitio de estudio. Al mismo tiempo, se tomaron tres encuestas del método Nakamura a través del sismómetro triaxial.

### ***Sector Chillán.***

En este sector los estudios se efectúan para analizar el comportamiento dinámico del subsuelo a un sitio ubicado en el Pasaje 6 Sur, Villa el Roble, en la comuna de Chillán.

El área de estudio se ubica paralelamente a un jardín infantil de Integra, para realizar una ampliación de este, el terreno corresponde a una superficie uniforme con presencia superficial de material arcilloso. Los ensayos MASW y H/V se ejecutan en el interior del sitio.

### ***Sector Los Álamos.***

El sitio estudiado corresponde a un terreno ubicado en Calle la Virgen en la comuna de los Álamos, provincia de Arauco.

El lugar se encuentra al costado de una cancha de basquetball, presentando un cierre por uno de sus costados. Al ser un sitio de no mayores dimensiones, se procede a hacer uno de los arreglos del MASW en la acera de la calle del terreno. Considerando que al interior del lugar se realizan las encuestas de Nakamura.

### ***Universidad del Bío Bío.***

La ubicación en el interior de la Universidad del Bío Bío donde se llevó a cabo la realización de los diversos ensayos fue específicamente localizada en el sector de la cancha de rugby.

El sitio corresponde a un área extensa, que en uno de sus costados es limitado por un canal de no mayores dimensiones mientras que por el lado contrario se encuentra el paso del Estero Nonguén. Los ensayos correspondientes al MASW fueron ejecutados de manera ortogonal dentro de la superficie de la cancha, en cambio las encuestas de Nakamura se efectuaron en uno de los costados de la cancha con un espaciamiento de los registros de 50 metros aproximadamente.

### ***Universidad de Concepción.***

Los ensayos efectuados en la Universidad de Concepción, están enfocados a las cercanías de la Facultad de Física y Matemáticas.

La distribución de los geófonos en la ejecución del MASW se realizó en la parte frontal de la facultad, este corresponde a un espacio abierto con gran disponibilidad de superficie para obtener la recepción de las señales. Sin embargo, se debe considerar que en las cercanías del sitio se encuentra una laguna que puede inferir en la exactitud de los resultados.



Imágen 2: Localización de las zonas de estudio. (Google Earth)

## **PROCESAMIENTO DE DATOS**

Dentro de los softwares que se deben utilizar, se hace referencia a DOREMI para modificar los formatos de los archivos que sean necesario y también tener una visualización rápida de la señal obtenidos con el MASW.

Ademas, se utiliza el programa gratuito Geopsy y su aplicación Dinver para procesar datos y obtener los resultados sobre el perfil de la velocidad de onda.

### **Análisis MASW.**

Inicialmente, se efectuó el cambio de formato y visualización rápida de la señal para ver la disposición que entregan los geófonos por el efecto de saturación de estos.

Luego, se deriva a la realización del análisis a través de GEOPSY configurando el espectro a los requerimientos que sean necesarios para tener una visualización clara de este. Así, se efectúa el proceso de definición de la curva de dispersión según las longitudes de ondas determinadas anteriormente y también según los límites teóricos calculados para cada señal.

Para la verificación de la curva de dispersión, se hace referencia a la comparación de cada una de las muestras, especificando la tendencia que se presenta en las señales obtenidas por los arreglos de cada sitio, de esta manera se logra obtener mayor confiabilidad de la información adquirida por los ensayos.

### ***Inversión de la Curva.***

En el trascurso de análisis de la señal, la curva de dispersión determinada en GEOPSY se ejecuta a través de su aplicación DINVER para el proceso de modelación del perfil de la Vs.

Esto es efectuado, por el proceso de inversión realizado de la curva de dispersión, de esta manera se determina la configuración pertinente para el proceso de iteración.



Las iteraciones formuladas para cada una de los espectros, corresponden a diez configuraciones por cada uno de los sitios, con un análisis de cada uno de los perfiles obtenidos se logra discrepar de cuál es el más representativo para las características del sitio que se está estudiando.

Este perfil debe cumplir con las siguientes particularidades:

- Ajuste representativo de la curva de dispersión.
- Perfiles estratigráficos repetitivos en las iteraciones.
- Información geológica del área de estudio.
- Criterio y experiencia del ingeniero a cargo.

### **Análisis Razón Espectral H/V.**

La señal se debe analizar a través del software GEOPSY, inicialmente se debe configurar el programa para el estudio de la encuesta según el parámetro “H/V”, de esta forma se realiza la configuración respectiva para cada uno de los espectros.

La búsqueda de un espectro de respuesta con una visualización fiable y limpia, se ejecuta según lo estimado en el proyecto SESAME, eliminando el ruido antropogénico y ambiental para las características que cada sitio presenta.

De esta manera, la representación del espectro es a base de los microtremores, genera una correcta visualización de los peaks y variaciones de las amplitudes H/V y por ende de las frecuencias.

### **Proceso de inversión.**

Al obtener el espectro de respuesta de la señal, con el cumplimiento de los nueve criterios especificados por el SESAME, se efectúa un análisis empírico para determinar las profundidades según las variaciones de frecuencias obtenidas por la señal conseguida en GEOPSY. Es así, que a través de la ecuación  $h = \frac{Vs}{4 * fr}$  y del uso de información empírica, se logra obtener los rangos de parámetros necesarios para el proceso de iteración ejecutado en DINVER.

En este proceso se consideraran diez iteraciones por cada una de las señales, de esta forma al igual que en el proceso en el método MASW, se identificara el perfil de la velocidad de onda más característico para el área estudiada.

Se debe tener presente, que los resultados de este ensayo al ser ejecutados como un proceso de innovación empírico, especifican que son aproximaciones preliminares. Además, la confiabilidad de este ensayo depende de la experiencia del ejecutor del programa, y sería ideal que este ensayo se complemente con la información de un ensayo directo o de otro tipo.

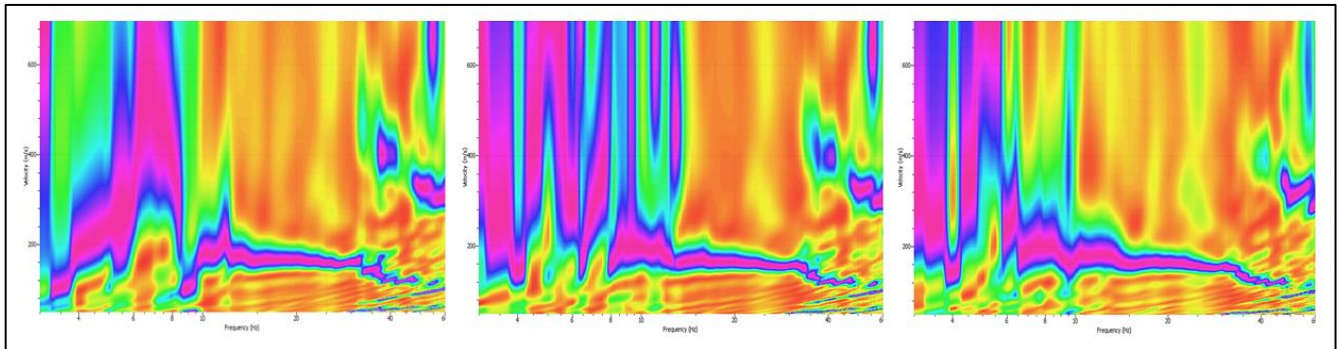
## RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se exponen los resultados que se obtienen sobre el cálculo del perfil estratigráfico según las técnicas utilizadas.

### Análisis curva de dispersión

Para cada sitio se realizaron dos tipos de arreglos, para cada uno de ellos se efectuaron aproximadamente tres mediciones, la elección de los espectros para la determinación de la curva de dispersión es la que presenta una mejor visualización, donde se aprecia la mejor claridad.

Para cada medición se analizó la longitud de onda que se obtiene de la disposición de los geófonos, especificando  $d_{\min}$  y  $D_{\max}$  de esta forma a través de los límites teóricos se determinan los límites confiables de la frecuencia adquirida para la curva de dispersión, un ejemplo es la visualización de los espectros mostrados a continuación.



Esquema 1: Curva de dispersión para el arreglo en Cabrero.

El límite teórico para este caso, evalúa que la frecuencia mínima rodea los 5 Hz dependiendo de la velocidad de onda que representa, esto se expresa a través de  $\lambda_{\max} = 2 * d_{\max}$ , de la misma manera se expresa para el caso contrario  $\lambda_{\min} = 2 * d_{\min}$  en la obtención de la frecuencia máxima de las características del espectro.

## **Análisis Curva H/V**

Los espectros obtenidos para cada sitio corresponden en promedio de tres, los cuales se analizaron para determinar la señal más característica según las especificaciones del sitio.

Idealmente se consideraron para todas las señales un mínimo de 10 ventanas, la duración de estas varían según el tiempo de cada una de las señales, la limpieza se ejecuta según los criterios del SESAME, eliminando del espectro el ruido antropogénico que perjudica la visualización de la curva H/V.

Lo evaluado para este análisis, es la selección de ventanas que representen los microtemores y eliminen el ruido residual, para este caso el análisis de la frecuencia será desde los 0,5 hasta los 50 Hz.

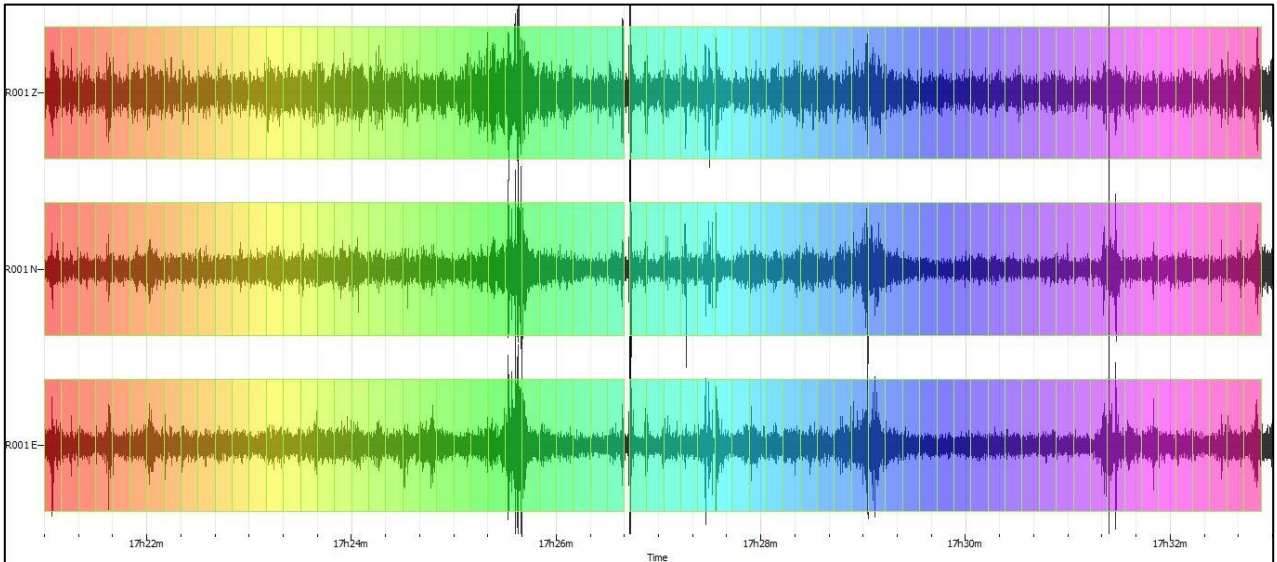
La técnica de Nakamura, es utilizada para determinar el período fundamental a través del peak de mayor amplitud, sin embargo este también da a conocer un cambio de la estratigrafía. Por otro lado, las pequeñas variaciones de la curva H/V (como peaks de menor consideración), representarían una estratigrafía secundaria, la que se analizará y se estimará según lo planteado por Ángelo Dolmetta, y especificado por el método empírico ejecutado en el artículo “Indagini geofisiche di superficie a supporto della ricostruzione del modello geológico”, Albarello. describiendo que la frecuencia puede ser analizada para estimar una profundidad, además de la velocidad asociada a esta. (Ver Anexo A)

Por otro lado, dentro de lo estimado para la clasificación del suelo a través del período predominante del espectro obtenido por el método de Razón Espectral H/V, se analiza que en diversas ocasiones los resultados de la tipología del material del depósito de suelo tiende a diferir de la clasificación adquirida por el estudio de Vs30.

Se plantea además, la nueva propuesta realizada por la Sociedad Chilena de Geotecnia sobre el período predominante de vibración según la expresión:

$$PE = 1,2 T_{NAK}$$

Donde PE corresponde al Período Espectral del sitio y cuyo detalle se encuentra en la teoría secundaria del ANEXO A.



Esquema 2: Señal H/V sin limpieza de ruido antropogénico para la localidad de Cabrero.

### **Perfiles Estratigráficos.**

Para la realización de los perfiles estratigráfico, se efectuó un perfil de velocidad de onda superficial para cada arreglo del MASW, de esta manera se comparó con el perfil obtenido por el método de Razón Espectral H/V.

### ***Localidad de Cabrero.***

Para el primer caso localizado en el sector de Miraflores 360 en Cabrero, se puede apreciar que el comportamiento en base de la tendencia del perfil obtenido es similar para los ensayos planteados, determinando que las velocidades van desde un aproximado de los 150 m/s hasta un valor promedio a los 450 m/s.

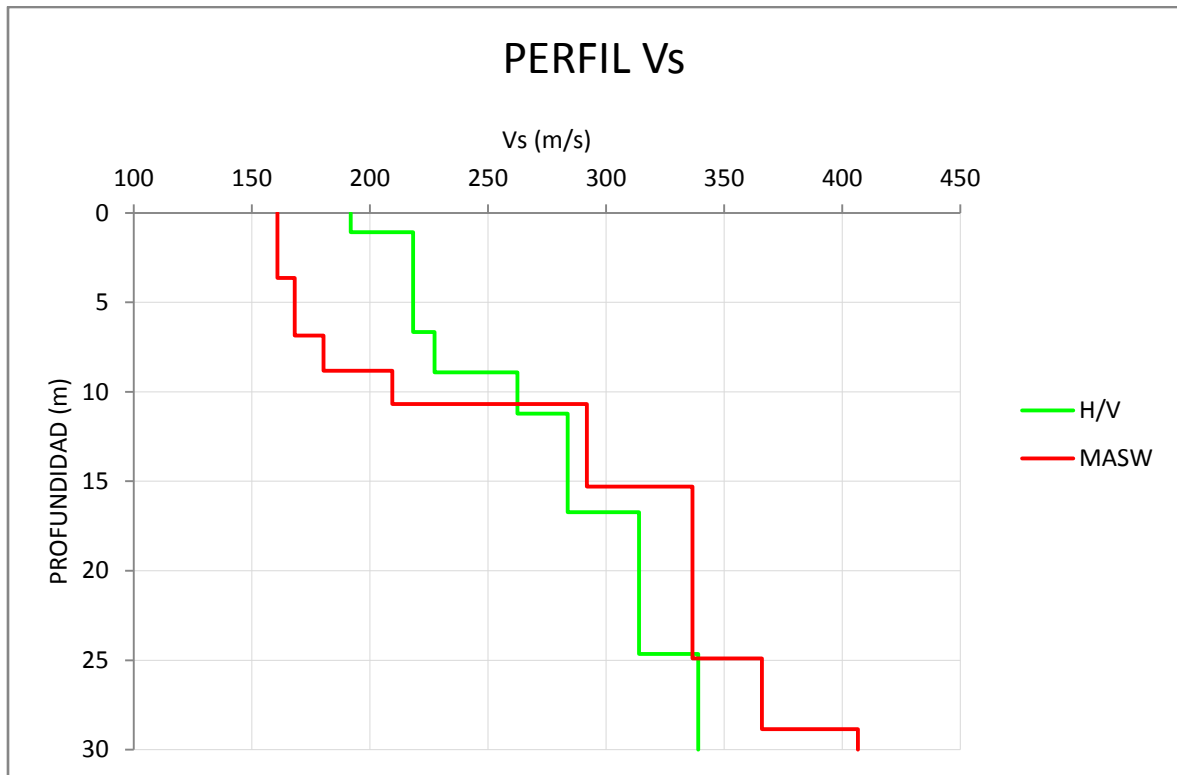


Gráfico 1: Mediciones según métodos MASW y la técnica de Razón Espectral H/V para la localización de Cabrero.

### *Localidad Villa El Roble, Chillán*

Las características que se obtienen del perfil estratigráfico para el sitio mencionado, corresponde a un rango de velocidades que varían entre los 200 hasta los 700 m/s, dentro de las especificaciones que se visualizan se logra apreciar que las velocidades iniciales del MASW difieren de lo estimado por el cálculo H/V, sin embargo el perfil tiene un comportamiento similar a lo determinado por el MASW.

A pesar de esto, la variación no provoca cambios del estimativo para la determinación del promedio armónico de la Vs30.

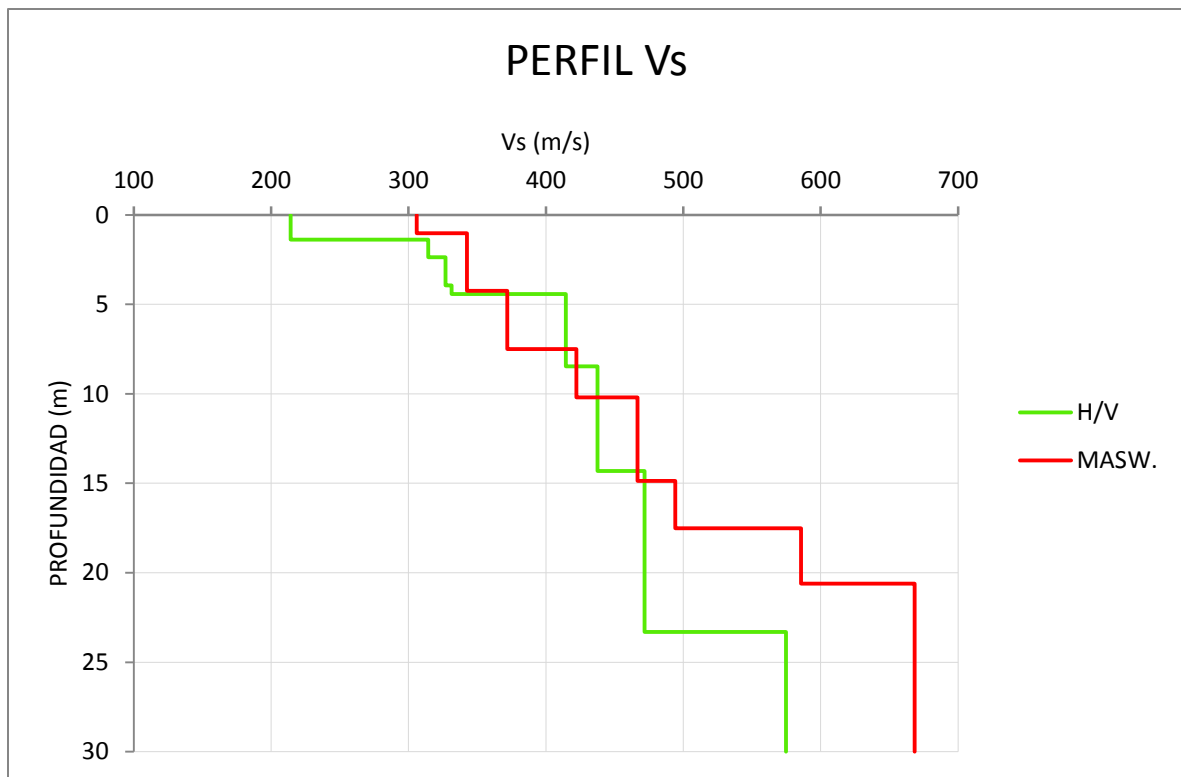


Gráfico 2: Mediciones según métodos MASW y la técnica de Razón Espectral H/V para el Sector de Los Álamos.

### *Localidad de Los Álamos*

La evaluación efectuada para este estudio, se realiza a uno de los costados de este, donde existe una sección pavimentada y al otro lado un cambio en la topografía, lo que puede influir en la señal obtenida por el análisis del cálculo H/V.

Dentro de las especificaciones del perfil estratigráfico se encuentra la variación de velocidades correspondientes entre los 100 m/s hasta valores cercanos a los 600 m/s. En las características de los perfiles determinados por cada método, se presenta una tendencia de velocidades, con pequeñas variaciones que se logran apreciar para mayores profundidades, esta diferencia se visualiza en el cálculo de razón Espectral H/V.

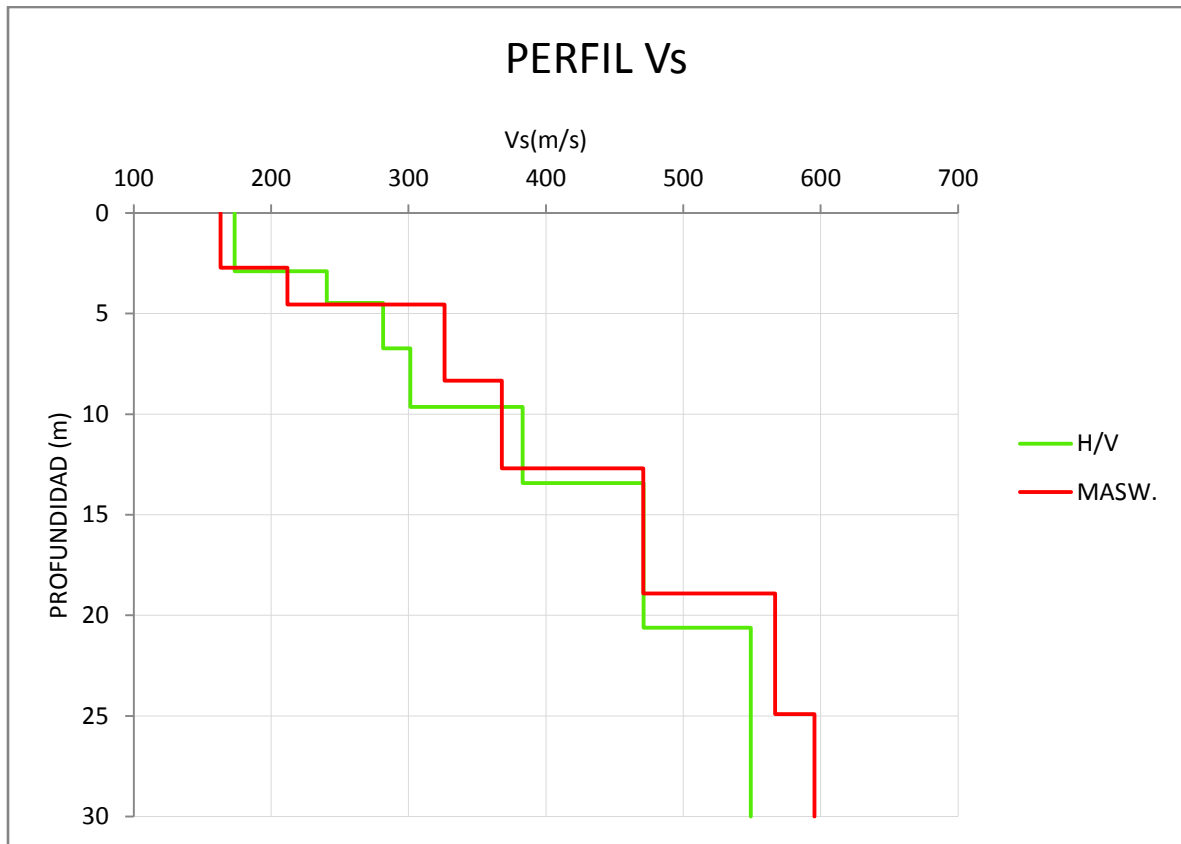


Gráfico 3: Mediciones según métodos MASW y la técnica de Razón Espectral H/V para la localización de Los Álamos.

### ***Universidad del Bío Bío***

En el interior de las instalaciones de la Universidad del Bío Bío, el sitio que se analizó está ubicado en el sector de la cancha de Rugby.

Los resultados que se obtuvieron por los perfiles obtenidos por los dos métodos presentan una variación de velocidades entre los 100 m/s hasta valores cercanos a los 350 m/s. En las características de los perfiles determinados por cada método, se presenta una tendencia de velocidades, con variaciones que se logran apreciar para profundidades más cercanas a la superficie, esta diferencia se visualiza en la gráfica de razón Espectral H/V.



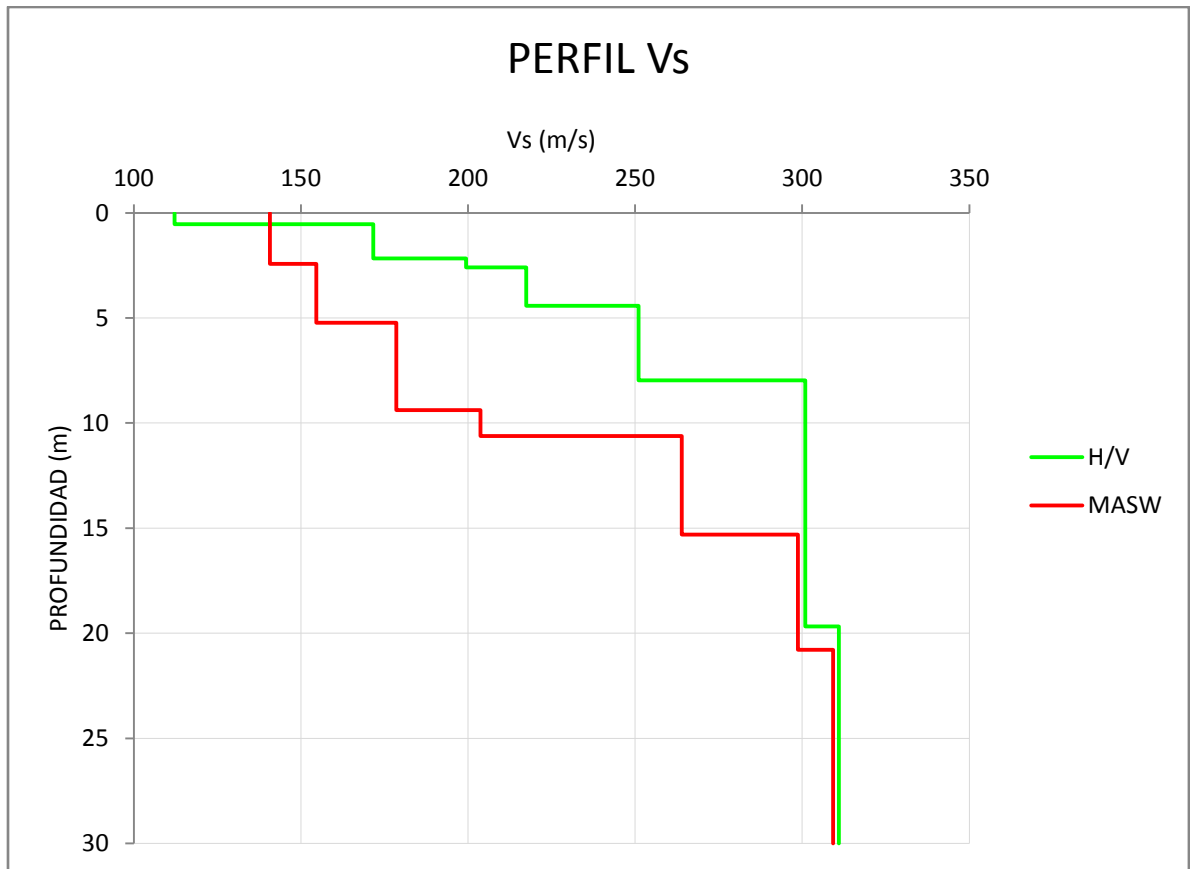


Gráfico 3: Mediciones según métodos MASW y la técnica de Razón Espectral H/V para el interior de la Universidad del Bío Bío.

### *Universidad de Concepción.*

El sector donde se realizó la investigación procede a las cercanías de la Facultad de Física y Matemática.

A través del análisis de los espectros de respuesta de las señales obtenidas por el método MASW y el cálculo H/V, presenta velocidades que varían entre los 100 y los 350 (m/s). Se puede apreciar que las variaciones de velocidad que se visualizan en el perfil, se exhiben a mayor profundidad del perfil Vs. Aun así, los perfiles para los dos métodos presentan una similar tendencia de velocidad que representa la estratigrafía del subsuelo.

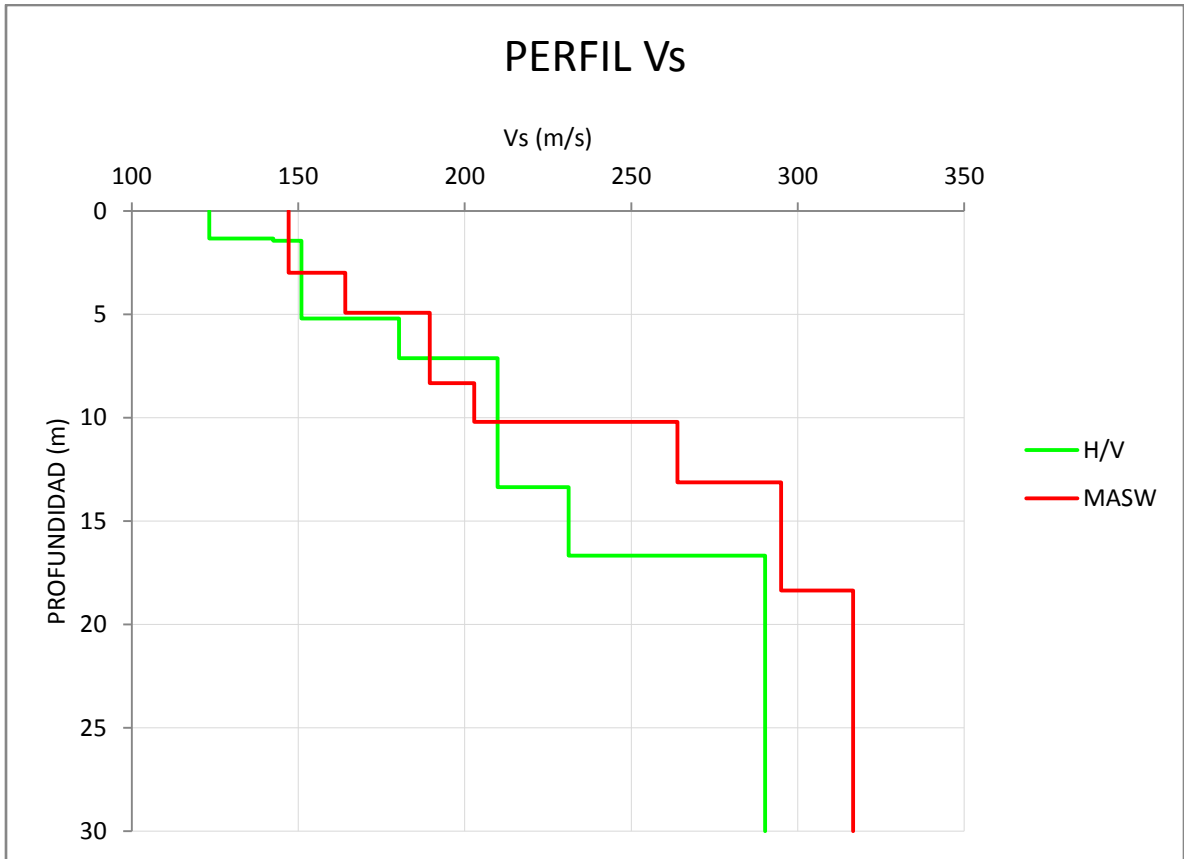


Gráfico 5: Mediciones según métodos MASW y la técnica de Razón Espectral H/V para el interior de la Universidad de Concepción.

### Estimación de la Vs30.

Para cada uno de los sitios, se efectuó la determinación de la Vs30 para cada una de las señales del MASW y también para la técnica de razón espectral H/V.

Para formular una estimación de este parámetro, se realiza una tabla comparativa para evaluar el comportamiento que se presenta a través de este y conjuntamente apreciar el perfil obtenido por cada uno de los casos.

Además, según los resultados adquiridos se realiza la clasificación del suelo según los valores que se obtuvieron de la Vs30, considerando que los métodos estudiados se analizaron de forma independiente, este análisis es basado según lo que se especifica en el DS 61 del año 2011.

SITIO	Vs30 (m/s)		Clasificación según DS 61	
	MASW	H/V	MASW	H/V
Cabrero	241	272	D	D
Chillán	329	335	D	D
Los Álamos	370	361	C	C
U. del Bío Bío	230	270	D	D
U. de Concepción	240	219	D	D

Tabla 3: Determinación de Vs30 y clasificación según resultados del MASW y H/V.

Del cálculo de la Vs30, se puede observar que los resultados tienen un comportamiento bastante similar. Dentro de lo que respecta a la clasificación, al existir un error prácticamente despreciable en los resultados, las clasificaciones de cada uno de estos demuestran la semejanza al tener la misma clasificación para sus respectivas localidades.

### Comparación de resultados y porcentajes de diferencia.

Según el promedio de los resultados MASW, que es el análisis confiable descrito por el DS 61, se determinó el porcentaje de diferencia que existe en el cálculo de Razón Espectral para la Vs30.

<b>Sitio de Estudio</b>	<b>MASW (m/s)</b>	<b>H/V (m/s)</b>	<b>Diferencia (%)</b>
Cabrero	241	272	12,7
Chillán	329	335	1,6
Los Álamos	370	361	2,5
U. del Bío Bío	230	270	17,6
U. de Concepción	240	219	8,9
<b>PROMEDIO</b>			<b>8,6</b>

Tabla 4: Porcentaje de diferencia existente del cálculo H/V según resultados del MASW.

Según el porcentaje de diferencia obtenido en cada localidad estudiada, se puede especificar que la variación entre la técnica de Razón Espectral H/V en relación a la determinada por el método MASW para el cálculo de la Vs30, no representa un contraste significativo.

Para la zona estudiada en las cercanías de Cabrero, se logró identificar que la clasificación corresponde a un suelo Tipo D, según lo especificado por el rango de velocidades para la Vs30 que varían entre los 180 y 350 m/s. Este resultado es considerado para las dos técnicas aplicadas, detallando que con el método de razón espectral H/V se obtienen resultados similares y certeros. Esto se corrobora con la determinación del porcentaje de diferencia que existe en los cálculos, si bien corresponde a un 12,7%, no es una discrepancia que represente cambios en la clasificación del suelo según los resultados obtenidos por los distintos métodos.

En el sector camino a la localidad de Él Roble Chillán, se determinó que el suelo correspondiente a esta zona es clasificada como Tipo D, detallando que este pertenece a un suelo basado en características medianamente densas o firme.

La diferencia determinada para esta localidad se estima como 1,6% según la comparación de los resultados entre el cálculo H/V y el método MASW. Este factor no provoca variaciones en la clasificación del suelo adquirida con la técnica de Nakamura.

Según los resultados obtenidos para el análisis del suelo en la localidad perteneciente a Los Álamos, formulan que según la determinación de la  $V_{s30}$  efectuada por las dos técnicas que se aplicaron, la clasificación del sitio correspondería a un suelo tipo C.

Las velocidades de corte correspondientes al promedio armónico para los 30 primeros metros del subsuelo están sobre los 350 m/s, mostrando un porcentaje de diferencia de la técnica H/V sobre lo evaluado por el cálculo del MASW de un 2,5%, lo que es básicamente despreciable en la ejecución de estos resultados.

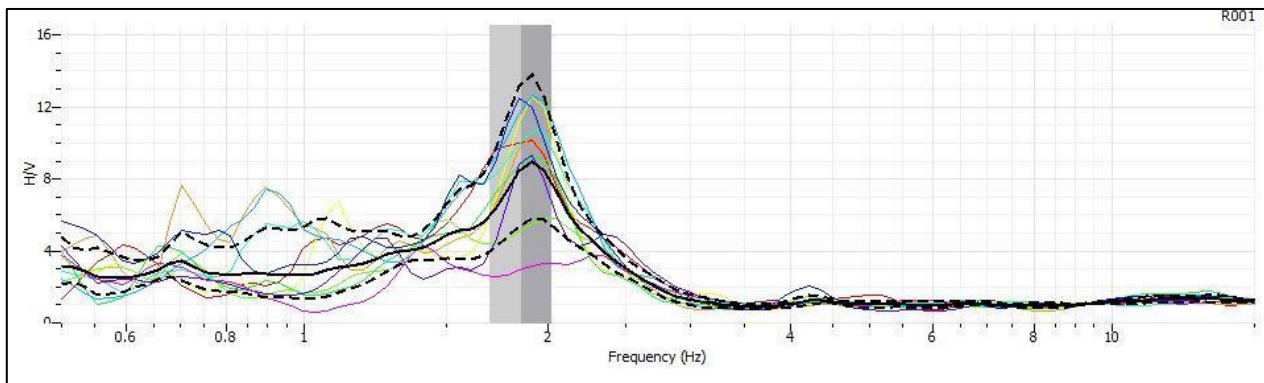
El sitio que se analizó en las instalaciones de la Universidad del Bío Bío, presenta un comportamiento del perfil  $V_s$  cercano entre las estimaciones obtenidas del sector. Esto provoca que la clasificación corresponda a un suelo tipo D.

A través de las velocidades, se determina que la diferencia entre las dos técnicas corresponde a un 17,6% estimando que para corroborar este resultado se debe realizar el proceso de grabación en un horario o día distinto.

En el interior de la Universidad de Concepción, se obtienen velocidades para los primeros 30 (m) de profundidad semejantes a la localidad de Cabrero, presentando una  $V_{s30}$  mayor a 180 m/s y menor a 350 m/s. El porcentaje de diferencia que se determina entre los dos métodos empleados es un 8,9%, sin embargo aunque este contraste es superior que los parámetros obtenidos en Chillán y Los Álamos, de igual manera esta diferencia no provoca variación en la clasificación del suelo.

**Períodos fundamentales.**

Para cada sitio de estudio se realizó un análisis a través del método de Razón Espectral H/V, para la determinación del período fundamental y su posterior clasificación según lo que es especificado en el DS 61 del 2011.



Esquema 3: Espectro de respuesta del cálculo H/V compuesto con ventanas seleccionadas de la Universidad de Concepción.

Se considera el estudio de la señal compuesta, donde el peaks de mayor amplitud indica la frecuencia natural fundamental del sitio.

Esto se realiza a través del software GEOPSY, donde se ejecuta la limpieza del espectro con la identificación de las ventanas y el cumplimiento de los criterios descritos por el SESAME.

Sitio de Estudio	T <sub>0</sub> (s)	PE (s)	Clasificación
Cabrero	0,81	0,97	<b>E</b>
Chillán	-	-	-
Los Álamos	0,19	0,23	<b>B</b>
U. del Bío Bío	1,09	1,31	<b>E</b>
U. de Concepción	0,54	0,65	<b>D</b>

Tabla 5. Clasificación del suelo a partir del período fundamental.

La clasificación a partir del período fundamental para el sitio ubicado en Cabrero, corresponde a un suelo tipo E. Donde los términos basados por el SESAME se cumplen para el registro de la

curva H/V, por lo que la visualización del peak de la frecuencia natural de vibración es clara y concisa a los 1,23 Hz.

En cambio, para los espectros obtenidos en las cercanías de El Roble Chillán, se visualizó una tendencia de la relación H/V compleja en los rangos de frecuencia analizados, lo que puede inferir con el tiempo de recepción del ensayo. Sin embargo, este comportamiento de la curva H/V representa un depósito de suelos de material rígido, donde el método de Nakamura no genera información fidedigna sobre el período predominante del suelo.

Por otro lado, según los resultados determinados en la localidad de Los Álamos, se logró identificar que el suelo es tipo B, con un peak de frecuencia de 5,1 Hz presentado por un comportamiento de la curva H/V clara, que denota a simple vista el contraste de impedancia con el bedrock.

Este mismo comportamiento sucede para los espectros obtenidos en el interior de la Universidad del Bío Bío y la Universidad de Concepción, al considerar 3 señales por cada uno de los sitios con tiempos superiores a los 12 minutos se logró obtener el espectro de respuesta con mejor visualización del peak de la curva H/V, obteniendo como resultado una frecuencia natural de 0,91 Hz y 1,87 Hz respectivamente.

Por otra parte, según los resultados expresados en la Tabla 5, se considera el análisis del Período Espectral dejando planteada la variación del período predominante según lo que se estima en el artículo de “Proposición Metodológica para la clasificación sísmica de suelos” generado por la Sociedad Chilena de Geotecnia.

Se debe especificar que para los casos investigados, la clasificación del suelo según el período de Nakamura con respecto al Período Espectral no genera variación en la tipología de los depósitos de suelos para las localidades de Cabrero, Los Álamos y la Universidad de Concepción. Sin Embargo, la clasificación del suelo en el terreno de la Universidad del Bío Bío, determinado como suelo tipo E según el período de Nakamura, presenta según el Período Espectral una tipología de suelo tipo F.

Para mayor información revisar los “*resultados clasificación dinámica de suelos*” ubicado en el ANEXO C.

### **Comparación de resultados $T_0$ y Vs30.**

Para la realizar la clasificación sísmica de un sitio, existen diversos factores que se deben considerar, dentro de estos parámetros se registra el estudio de la rigidez a bajas deformaciones de los estratos superiores del terreno de fundación, compuesto por el análisis de la velocidad de ondas de corte superficial (Vs30).

Otro de los factores que se analiza en el proceso de la clasificación sísmica, es la determinación del período fundamental de vibración, que se genera cuando hay un contraste con el lecho de roca, de esta manera se estudia los efectos de amplificación de los depósitos del terreno.

En consecuencia, después de las descripciones de los análisis antes mencionados, se quiere dar a conocer que en variadas ocasiones los espectros de respuestas efectuados con diferentes técnicas, para un mismo sitio, pueden generar diversos resultados.

<b>Sitio de Estudio</b>	<b>Clasificación</b>	
	<b>Vs30</b>	<b><math>T_0</math></b>
Cabrero	D	E
Chillán	D	-
Los Álamos	C	B
U. del Bío Bío	D	E
U. de Concepción	D	D

Tabla 6. Comparación de la clasificación del suelo según de Vs30 y  $T_0$ .

Según lo especificado en la tabla anterior, se identifica que la clasificación del suelo para el caso de la localidad de Cabrero, Los Álamos y al interior de la Universidad del Bío Bío, generan una diferente tipología de suelo.

Sin embargo, hay que considerar la influencia de diversas complicaciones. Alejándose de las variables técnicas que se pueden efectuar en las encuesta de señales para el caso de los dos



métodos aplicados, se identifica una variable teórica en la interpretación en el cálculo de Razón Espectral H/V.

Esta hace referencia a la técnica de Nakamura, se define como un método que es aplicado para terrenos de suelos finos y/o blandos, lo que entorpece la evaluación de los espectros en la determinación de resultados para los sitios caracterizados por material rígido.

Según las especificaciones que se encuentran en el SESAME y las que se pueden corroborar en los cálculos realizados, da a conocer que la señal para este tipo de sedimento tiene características que dificultan la visualización del peak de la frecuencia natural.

La evaluación de cada uno de los resultados se generó a través de lo que se establece en el DS61 del año 2011, basado en esta clasificación se pudo realizar una comparación y hacer la referencia quecuando la información sobre el suelo de fundación permite clasificarlo dentro de dos o más tipos de suelo, se debe optar por la clasificación sísmica que resulte en el caso más desfavorable.

Es por esta razón, que en estos casos es ideal realizar un estudio geotécnico para apoyar los resultados según ensayos directos del sitio, de esta forma poder discernir según lo que se especifica dentro de la normativa chilena vigente.

## CONCLUSIONES

- El método de Razón Espectral H/V, a través de su análisis basado en el comportamiento de vibraciones provocadas por origen natural y artificial, permite realizar la clasificación del suelo según el Período Fundamental, y además en un proceso de innovación se analizó esta técnica a través de un procedimiento empírico, obteniendo resultados en el cálculo de Vs30.
- De esta forma el método de Nakamura, mediante este procedimiento, permite el análisis de la curva H/V según el espectro de respuesta, logrando así calcular el perfil estratigráfico y las velocidades para la determinación de Vs30.
- Al obtener los resultados del cálculo de cociente H/V, los parámetros que se adquirieron para la clasificación de los suelos estudiados de la Vs30, correspondientes a diversas localidades de la Región del Bío Bío, genera una diferencia promedio de 8,6% con respecto a los resultados obtenidos por el método MASW.
- Es así, que en los diversos casos los perfiles de velocidad de ondas superficial determinados por estas distintas técnicas presentan para cada localidad una tendencia semejante con respecto a la profundidad, sin embargo para implementar el cálculo H/V en la determinación de este tipo de resultados se necesita conocimiento geotécnico del sitio, ya sea a través de estudios mecánicos que entreguen información directa del subsuelo.
- El método de Nakamura aun cuando no está indicado explícitamente en el decreto supremo 61 del 2011, puede apoyar el reconocimiento del perfil estratigráfico obtenido a través del MASW como información preliminar de los efectos de sitio.
- Se considera que el método de razón espectral H/V en el cálculo de los espectros de respuesta para la determinación de su período predominante consideran que en mediciones en afloramientos rocosos o en suelos muy rígidos presentan similares componentes en horizontal y vertical, se puede entonces deducir que no existe una dirección predominante de movimiento en estos casos, produciendo que la visualización del peak de frecuencia en el espectro de la localidad de Chillán no sea representativo.

- Se debe investigar y analizar el período fundamental asignado al detalle de clasificación de suelos, ya que no existe relación entre el  $T_0$  asignado por la clasificación de  $V_{s30}$  según el DS 61 y el período preponderante medido en terreno para ese tipo de depósitos.
- Con las clasificaciones adquiridas según el estudio de velocidad superficial para los 30 (m) y el periodo fundamental, se esperó que los resultados obtenidos sean semejantes, sin embargo en esta investigación se plantea según la información determinada que esto no se cumple a cabalidad, pues solo en los resultados de la Universidad de Concepción se logró igual clasificación del suelo dan a conocer la inexactitud de información que se pueden obtener de un mismo sitio, aun así según la normativa para ese tipo de casos se ha de considerar la tipología de un suelo más desfavorable.
- Es por esta situación, que la Sociedad Chilena de Geotecnia a través del grupo de clasificación sísmica ha generado una investigación para la nueva propuesta sobre el período predominante de depósitos de suelos, con la intención de seguir mejorando y ampliando las herramientas en los estudios geofísicos para los efectos de sitio.

## BIBLIOGRAFÍA Y LINKOGRAFÍA

- Dolmetta, Angelo. “Comunità di Geologia - dolfrang”. Manuale Geopsy – Dinver – HVSR – Metodo di Nakamura (2015). Disponible en la Web:  
<http://comunitadigeologia.blogspot.it/2015/02/parte-1-manuale-geopsy-dinver-hvsr.html>
- Albarello, D. (2011). Indagini geofisiche di superficie a supporto della ricostruzione del modelo geológico. Dip. di Scienze della Terra, Università degli Studi di Siena, Regione Toscana.
- European Commission & Reseach General Directorate (2004). Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations. Measurements Processing and Interpretation.
- Albarello D., 2013. Misure di rumore ambientale. . Dip. di Scienze Fisiche della Terra e dell’ Ambiente, Università degli Studi di Siena.
- Sandoval, V. & Vera, M. (2013). Estudio de la robustez de la estimación espectral de la técnica H/V de Nakamura para estudios de caracterización dinámica de suelos. Tesis, Escuela Ing. Civil Electrónica, Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Humire, F., Leyton, F., Saéz, E. Manual de Aplicación de Técnicas Geofísicas basadas en ondas de Superficie para la Determinación del Parámetro Vs30.
- Mariotti M., Sbirrazzuoli R. (2009-2013).Guida all’uso di GEOPSY per elaborazioni HVSR e MASW. Sara Electronic Instruments s.r.l.
- Grupo de Clasificación Sísmica & Sociedad Chilena de Geotecnia (2015). Proposición Metodológica para la clasificación sísmica de suelos.

## REFERENCIAS

- Nakamura. Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute.
- Nogoshi, M. and T. Igarashi, 1971. On the amplitude characteristics of the microtremors. J. Seism. Soc. Japan.
- Konno, K., and Ohmachi, T. (1998). Ground-Motion Characteristics Estimated from SpectralRatio between Horizontal and Components of Microtremor, *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 228-241.
- Nakamura Y., (1996). Real-time information systems for hazards mitigation. Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering. Acapulco, Mexico.
- Nakamura, Y. (2000), Clear identification of Nakamura's technique and its application, Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.
- Leyton, F., S.A. Sepúlveda, M. Astroza, S. Rebolledo, P. Acevedo, S. Ruiz, L. Gonzalez, and C. Fonca (2011), “Seismic Zonation of the Santiago Basin, Chile”, Proc. 5<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago, Chile.
- Lachet, C., D. Hatzfel, P. Y. Bard, N. Theodulidis, C. Papaionnou, and A. Savvaidis (1996). Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece) comparison of different approaches. Bull Seism. Soc. Am.
- Omori, F. (1908), On Micro-Tremors. Bull. Imperial Earth. Investigation Committee of Tokyo, Vol. II.
- Vivallos J. y Ramírez P. (2010). Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Concepción, Región del Biobío. Servicio nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile.
- Okada, H. and Matsushima, T., (1989). An exploration Technique using microtremors (1) – an analytical background to discriminate Love wave in microtremors –, 81st Annual Meeting for Society of Exploration Geophysicists of Japan, November 1989, Japan..
- Newmark, N. M., and Hall, W. J. (1982). Earthquake spectra and design, Engineering monographs on earthquake criteria, structural design, and strong motion records, Earthquake Engineering Research Institute, University of California, Berkeley, CA.

- Cuadra M. Pilar E. (2007). Aplicación de Técnicas de vibraciones ambientales: Análisis de microtemores y vibraciones naturales, para la caracterización de sitio. Universidad Simón Bolívar. Ingeniería Geofísica.
- Moros T. Luis R. (2004). Relación entre el Período Fundamental de Vibración del Suelo de Sedimentos en el este de la Ciudad de Caracas, mediante la aplicación del Método de Nakamura a datos obtenidos en una malla de mediciones de 250 metros. Universidad Central de Venezuela. Escuela de Geología, Minas y Geofísica.
- Roma, V. (2006). Caratterizzazione sismica dei suoli con il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves). Universidad de Pisa, Pisa, Italia.
- Vivallos J. y Ramírez P. (2010). Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Concepción, Región del Biobío. Servicio nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile.
- Errázuriz, J.T. (2012). Microzonificaciones Sísmicas En Ciudades Del Mundo Y Discusión Sobre La Aplicabilidad En La Ciudad De Santiago. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.
- Errázuriz. T., González. L., Sáez. E., Astroza. M. (2014), Algunas relaciones entre la respuesta sísmica en la superficie y las características dinámicas del suelo en el contexto de un microzonificación sísmica. VIII congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- Guerrero. R., Estudio de la dispersión de las ondas superficiales con fines geotécnicos. Universidad de los Andes.
- Franklin. R., Caselles. J. O., Canas. J.A., Caples. J., Pujadas. Pl. G., (2006), Estimación de la respuesta de sitio mediante el método del cociente espectral aplicado a ruido ambiental: Aplicación a la Ciudad Vella de Valencia. UPC. Barcelona, España.
- Bard, P.Y. (1999). Microtremor Measurements: A Tool for Site Effect Estimation?, In: Irikura, K., Kudo, K. Okada, H. Satasini, T. (Eds.), The Effects of Surface Geology on Seismic
- Motion. Balkema, Rotterdam, vol. 3, pp. 1251-1279. Linares. G. (2005). Introducción y Aplicación del método de sísmica de microtemores en áreas urbanas. Universidad Simón Bolívar.
- Cho I, Tada T, Shinozaki Y. (2004). A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms. Geophysics, 1535-1551.