

# UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

**Profesor Patrocinante: Mg. Franco Benedetti L.**

**Profesores Comisión: Mg. Carmen González L.**

**Mg. Oscar Gutiérrez A.**



## “APLICACIÓN DE TÉCNICAS GEOFÍSICAS BASADOS EN ONDAS SUPERFICIALES PARA LA CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE TALUDES Y/O LADERAS”

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

**Luis Felipe Parada Troncoso**

Concepción, Septiembre 2018

**DEDICATORIA:**

*Dedicado primeramente a Dios, a mis padres  
Jacqueline Troncoso y Ricardo Parada por su  
infinito amor a hacia mí, a mis familiares y  
amigos, quienes siempre fueron un apoyo  
durante mi etapa universitaria.*

**AGRADECIMIENTOS:**

*A Dios por darme vida, salud y alegría.*

*A mis padres por su esfuerzo en poder cumplir  
mi sueño de ser profesional y por su apoyo  
en los momentos en que flaqueé y que  
quise “tirar la toalla”.*

*A mi profesor guía, Don Franco Benedetti,  
por darme esta oportunidad, por tener  
tanta paciencia conmigo y por siempre tener  
la mejor disposición posible aun cuando  
estaba muy ocupado, al profesor Ricardo Riveros  
por su ayuda que fue muy importante en esta  
investigación. “Infinitas gracias”.*

*Al “Team Geófonos” Claudia Espinoza y  
Camilo Figueroa, por acompañarme  
en todas las mediciones, costo, pero sin  
su ayuda, esto no podría haber sido posible.*

*A mis amigos y compañeros que hicieron  
muy amenos estos 6 años de estudios.*

*“Gracias Totales...”*

## **APLICACIÓN DE TÉCNICAS GEOFÍSICAS BASADO EN ONDAS SUPERFICIALES PARA LA CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE TALUDES Y/O LADERAS**

**Autor: Luis Felipe Parada Troncoso**

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

Correo Electrónico: [lparada@alumnos.ubiobio.cl](mailto:lparada@alumnos.ubiobio.cl)

**Profesor Patrocinante: Franco Paolo Benedetti Leonelli**

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

Correo Electrónico: [fbenedet@ubiobio.cl](mailto:fbenedet@ubiobio.cl)

### **RESUMEN**

En las últimas décadas, las técnicas geofísicas se han utilizado cada vez más para fines de investigación de deslizamientos de tierra por alrededor del mundo, debido a sus innumerables ventajas frente a técnicas de carácter invasivas. Sin embargo, el éxito de cualquiera técnica geofísica es controlado en general por la existencia de un fuerte contraste de impedancia producido entre las capas de suelos afectadas y una buena relación Señal/Ruido.

En este estudio se evaluó la factibilidad de implementar técnicas geofísicas de carácter sísmicos, específicamente HVSR, Tomografía de Refracción Sísmica y MASW para la caracterización sísmica de taludes y/o laderas, debido a que, en combinación con datos geológicos y estudios de mecánica de suelos, son capaces de proporcionar información precisa sobre la estructura interna y la distribución estratigráfica de los diferentes estratos que componen el subsuelo.

Las exploraciones sísmicas se realizaron sobre un talud ubicado en una zona residencial de la comuna de Talcahuano, compuesto principalmente de arcilla, limo y arenas cementadas de alta compacidad. Los resultados obtenidos manifiestan una buena correlación entre los modelos geofísicos y los ensayos SPT, presentando variaciones menores al 10 %, asimismo, las Velocidades de Ondas de Cortes aportan información valiosa sobre el comportamiento de la masa de suelo a deslizar y que a futuro podría ser utilizado como un indicador para establecer la dinámica que tendría el deslizamiento a través del tiempo y evitar los grandes daños que provocan estos eventos a nivel mundial.

**Palabras claves:** Taludes y/o Laderas, Técnicas geofísicas, Contraste impedancia, Deslizamientos.

## **APPLICATION OF GEOPHYSICAL TECHNIQUES BASED ON SURFACE WAVE FOR THE SEISMIC CHARACTERIZATION OF SLOPE AND/OR HILLS**

**Author: Luis Felipe Parada Troncoso**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio

Email: [lparada@alumnos.ubiobio.cl](mailto:lparada@alumnos.ubiobio.cl)

**Professor Sponsor: Franco Paolo Benedetti Leonelli**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio

Email: [fbenedet@ubiobio.cl](mailto:fbenedet@ubiobio.cl)

### **ABSTRACT**

In recent decades, geophysical techniques have been used increasingly for research purposes of landslides around the world, due to its innumerable advantages over invasive techniques. However, the success of any geophysical technique is controlled in general by the existence of a strong impedance contrast produced between the affected soil layers and a good Signal / Noise ratio.

In this study, the feasibility of implementing seismic geophysical techniques, specifically HVSR, Seismic Refraction Tomography and MASW for the seismic characterization of slopes and / or slopes was evaluated, because, in combination with geological data and soil mechanics studies, are able to provide accurate information about the internal structure and stratigraphic distribution of the different strata that make up the subsoil.

The seismic explorations were carried out on a slope located in a residential area of the commune of Talcahuano, composed mainly of clay, silt and cemented sands of high compactness. The results obtained show a good correlation between the geophysical models and the SPT tests, presenting variations of less than 10%. Likewise, the Cut Wave Speeds provide valuable information about the behavior of the soil mass to slide and that in the future it could be used as an indicator to establish the dynamics that sliding would take over time and avoid the great damage caused by these events worldwide.

**Keywords:** Slopes and / or Slopes, Geophysical Techniques, Impedance Contrast, Landslides.

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	iv
ABSTRACT .....	v
INDICE GENERAL .....	vi
1. INTRODUCCION .....	1
1.1 Objetivos de la investigación.....	2
1.1.1 Objetivo General.....	2
1.1.2 Objetivos Específicos.....	2
1.2 Justificación del tema.....	3
1.3 Metodología de Trabajo.....	4
1.4 Estado del Arte.....	6
1.5 Métodos Geofísicos .....	8
2. ANTECEDENTES GEOTECNICOS .....	10
2.1 Descripción Zona de Estudio.....	10
2.1.1 Topografía .....	12
2.2 Mecánica de Suelo .....	13
2.2.1 Exploración Mecánica.....	13
2.2.2 Columnas Estratigráficas.....	15
2.2.3 Ensayo Corte Directo .....	16
3. METODOLOGIA .....	17
3.1 Equipos utilizados.....	17
3.2 Configuración espacial del estudio .....	18
3.3 Procedimientos de Campos.....	19
3.3.1 Metodología Ensayos Activos.....	19
3.3.2 Metodología Ensayo Pasivo .....	20
3.4 Procesamientos datos sísmico.....	21
3.4.1 Método MASW .....	21
3.4.2 Método Tomografía Refracción sísmica .....	22
3.4.3 Método HVSr.....	24
4. ANALISIS Y RESULTADOS.....	26
4.1 Razón Espectral H/V .....	26

4.2 Tomografía Refracción Sísmica .....	28
4.3 Inversión de Ondas Superficial (MASW).....	31
4.3.1 Curva de Dispersion .....	31
4.3.2 Perfiles de Velocidad .....	32
4.4 Estimación Final Zona a Deslizar .....	34
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	36
5.1 Conclusiones .....	36
5.2 Recomendaciones .....	38
6. REFERENCIAS .....	39
ANEXOS .....	42

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Esquema metodología de trabajo.....	4
<b>Figura 2:</b> Localización sector de Estudio. ....	10
<b>Figura 3:</b> a) Árbol caído recientemente. b) Material superior con materia orgánica y pendiente variable. c) Escarpe hacia la corona del talud. d) Fragmentación frágil del material cementado. 11	
<b>Figura 4:</b> Topografía de Detalle (Figura superior) y Modelación Topográfica 3D (Figura inferior). .....	12
<b>Figura 5:</b> Columna Estratigráfica e Índice de golpe para Sondaje N°1.....	15
<b>Figura 6:</b> Columna Estratigráfica e Índice de golpe para Sondaje N°2.....	15
<b>Figura 7:</b> Ensayo de Corte Directo. ....	16
<b>Figura 8:</b> Ubicación espacial tendidos sísmicos.....	18
<b>Figura 9:</b> Diseños de los arreglos MASW y Tomografía Refracción Sísmica.....	19
<b>Figura 10:</b> Ejemplo sismograma y selección de los primeros arribos obtenido del arreglo N°1 con fuente a los 22,5 m.....	22
<b>Figura 11:</b> Secuencia Obtención Perfil de velocidad Vp. a) Selección de velocidad por capas en Domocroma. b) Refracción Sísmica. c) Tomografía Sísmica. ....	23
<b>Figura 12:</b> Espectro de Fourier resultante de la señal C3 a) Con todas las ventanas seleccionadas. b) Con las ventanas alteradas eliminadas. ....	24
<b>Figura 13:</b> Espectro de Fourier combinando todas las mediciones de razón H/V. ....	26

**Figura 14:** Variación de la amplitud H/V en diferentes puntos a lo largo de la pendiente del terreno. ....27

**Figura 15:** Visualización 2D de las velocidades  $V_p$  del subsuelo. a) Arreglo N°1 "corona del Talud". b) Arreglo N°5 "Zona media del Talud". c) Arreglo N°7 "Pie del Talud".....28

**Figura 16:** Resultados Arreglo N°8. a) Domocroma obtenido mostrando comparación de velocidades. b) Perfil Refracción Sísmica. c) Perfil Tomografía Sísmica. ....30

**Figura 17:** Espectro de Velocidad obtenidas de los modos fundamentales. ....31

**Figura 18:** Perfiles  $V_s$  comparados con correlaciones en función del Número de Golpe (N). ....32

**Figura 19:** Medición N°8. a) Modelo sísmico MASW 2D. b) Perfil sísmico 1D del modelo 2D. ....33

**Figura 20:** a) Ubicación y dirección de deslizamiento de tierra en el área de estudio. b) Perfil  $V_s$  arreglo N°8. c) Perfil  $V_p$  arreglo N°8. ....34



## 1. INTRODUCCION

Las construcciones de líneas férreas en el siglo XIX obligaron a realizar grandes movimientos de tierras, lo cual trajo como consecuencia la aparición de importantes deslizamientos. Estos eventos ocurren principalmente en respuesta a fuerzas gravitacionales, ayudadas muchas veces por actividad sísmica.

Las características geotécnicas intrínsecas que tiene el suelo se han convertido en una información valiosa para la ingeniería, esto adquiere mayor relevancia en Chile, debido a la ocurrencia de grandes terremotos que han acontecido en la historia de nuestro país y que han hecho necesario desarrollar metodologías enfocadas en poder mitigar sus daños y consecuencias hacia las personas y/o edificaciones. En este contexto, durante las últimas décadas, los métodos geofísicos han contribuido de manera importante a las metodologías aplicadas en la ingeniería civil, mostrando ser muy efectivos y de menor costo que métodos invasivos típicamente utilizados para la caracterización del suelo.

Los métodos geofísicos tradicionales, especialmente los de prospección sísmica, son utilizados para la investigación del suelo, con la finalidad de obtener parámetros de velocidad de ondas de compresión ( $V_p$ ) o de corte ( $V_s$ ), de los cuales es posible determinar propiedades dinámicas del suelo y definir las características principales de la estratigrafía de algún lugar en estudio. Pero en nuestro país, su principal uso es para la determinación del promedio armónico de la velocidad de ondas de corte de los 30 m más superficiales ( $V_{s30}$ ), en el cual tuvo mayor relevancia a partir del terremoto ocurrido el 27 de febrero de 2010, no obstante esta técnica, permite realizar aplicaciones que van más allá de la obtención de algún parámetro, es por ello que se pretende dar un plus a esta metodología y presentar un estudio que permita evaluar en forma rápida y no destructiva las características de taludes y laderas, poniendo énfasis en la determinación de zonas inestables o fallas geológicas que son responsables de provocar grandes deslizamientos de masa por alrededor del mundo.

## **1.1 Objetivos de la investigación.**

### ***1.1.1 Objetivo General.***

- Aplicar técnicas de mediciones de ondas Rayleigh para caracterizar el estado de taludes y laderas, a través de la evaluación experimental in-situ.

### ***1.1.2 Objetivos Específicos.***

- Sintetizar el estado del arte a partir de los métodos geofísicos aplicados a la caracterización de taludes y definir caso en estudio.
- Establecer el plan experimental a utilizar en la ejecución de las pruebas de campos.
- Ejecutar plan experimental in-situ, identificando las principales variables que intervienen en la caracterización de taludes y/o laderas.
- Analizar la condición de estado de un talud en función de las técnicas aplicadas y las mediciones obtenidas en terreno.

## 1.2 Justificación del tema

Los deslizamientos de taludes y/o laderas son unos de los procesos geológicos más destructivo que afectan a la humanidad hoy en la actualidad, no por menos, son considerados como el tercer evento de riesgo natural que más número de muertes genera en todo el mundo después de los terremotos y las inundaciones. Estos eventos naturales son los responsables de ocasionar la muerte de miles de personas al año, provocar cortes de caminos, carreteras o líneas férreas, además de producir daños en estructuras que se pueden cuantifican en pérdidas por billones de dólares cada año.

En la actualidad, los métodos más efectivos para determinar las zonas de falla de un talud son sondajes o perforaciones, donde estos métodos son de carácter destructivo para el suelo, requieren de maquinaria muy voluminosa para su ejecución, son poco amigable con el medio ambiente, además de entregar resultado de carácter puntual, por lo cual, para obtener resultados confiables, se deben realizar una gran cantidad de perforaciones, que solo ayudan a encarecer el proyecto, no obstante, los métodos geofísicos en el campo de la ingeniería civil, ha tenido un gran auge y desarrollo en las últimas décadas, debido a las innumerables aplicaciones que tiene en el área de la geotecnia (Mohamed, Abel Azim, Taha ,2013), producto que son capaces de proporcionar parámetros dinámicos de la masa de suelo, además de otorgar una visualización de la estructura interna de la masa rocosa sin la necesidad de hacer alguna exploración que sea destructiva para el suelo, entregando una mejor resolución comparándolas csherion la de otras técnicas, lo que proporciona valiosas restricciones al estado físico dentro del medio.

Es por ello, que, con el propósito de innovar en la gama de resultados obtenidos a través de estas metodologías, es que se busca mitigar de forma efectiva el peligro de los deslizamientos de la masa de suelo, en donde se requiere un conocimiento detallado de la estructura interna del suelo para poder pronosticar la localización de la masa deslizante y poder establecer los trabajos de mitigación a emplear a futuro, con el objetivo de minimizar los riesgos tanto hacia las personas como las obras civiles.

### 1.3 Metodología de Trabajo

Los objetivos de la presente Memoria de Título se cumplirán de acuerdo a las siguientes etapas mostradas en la Figura 1:

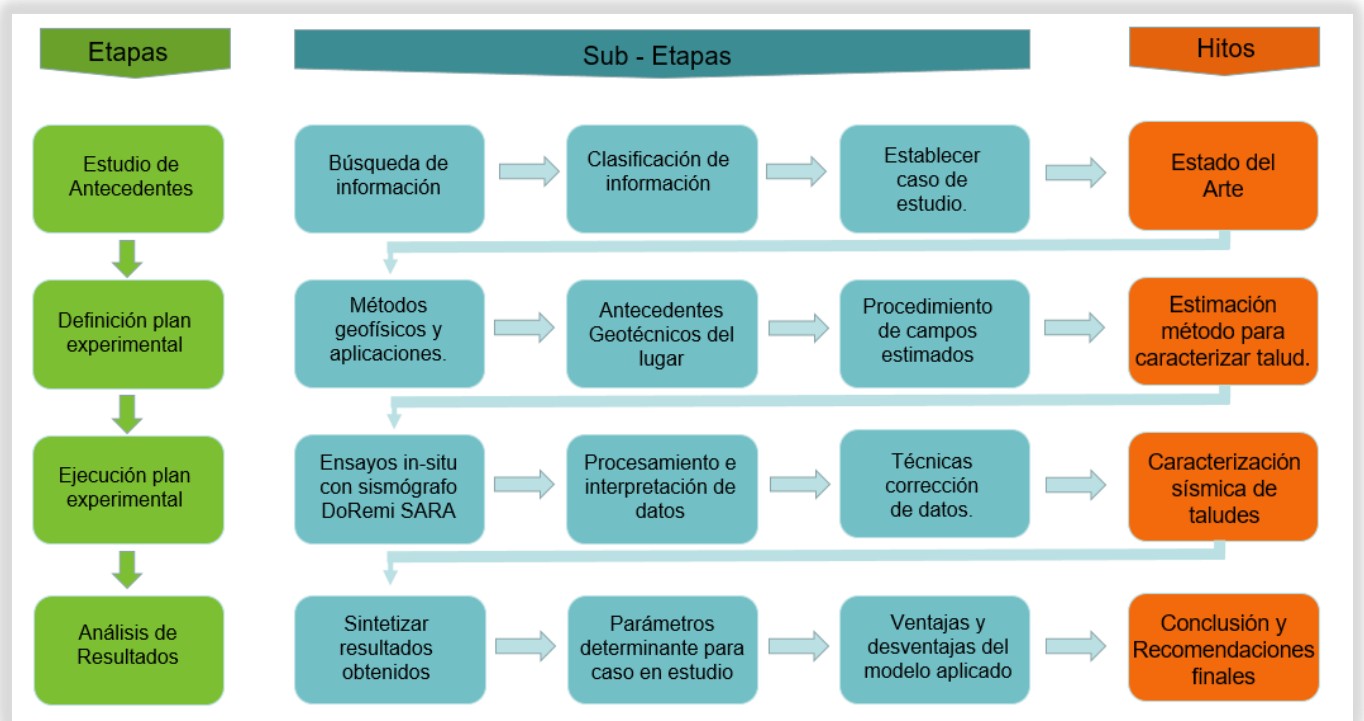


Figura 1: Esquema metodología de trabajo.

**Etapa 1.- Estudio de antecedentes:** Se realizará una búsqueda de información de material existente sobre distintos temas que avalen al desarrollo del trabajo, logrando sintetizar el estado del arte y establecer el caso de estudio

**Etapa 2.- Definición Plan Experimental:** Se estudia los métodos geofísicos aplicados para la caracterización de taludes y/o laderas, además de estimar cual será el método más idóneo para el desarrollo de esta investigación junto con establecer los procedimientos de campos a utilizar, es decir, largo total de arreglo, espaciamiento entre geófonos, ganancia a emplear, etc., consiguiendo una mejor resolución y calidad de los datos.

**Etapa 3.- Ejecución Plan Experimental:** En esta etapa se realizará la toma de muestras en terreno a través del sismógrafo DoRemi SARA logrando obtener una serie de sismograma multicanal con datos relevantes para la investigación. A continuación, se analizarán los sismogramas obtenidos y se interpretara lo que se visualiza en ellos a través de software para los diferentes métodos que se aplicaran, para posterior, poder aplicar alguna técnica que ayude a mejor la resolución de los datos con el objetivo de poder estimar de mejor manera alguna característica particular del sitio en estudio.

**Etapa 4.- Análisis de Resultados:** Después de la interpretación de los resultados obtenidos, se procede a sintetizar el trabajo logrando determinar los criterios más efectivos que se obtuvieron con las mediciones, además de estimar la susceptibilidad de la variación de algunos parámetros de modo de lograr aplicar esta metodología con el mayor grado de precisión posible para investigaciones posteriores.

## 1.4 Estado del Arte

Para la realización de esta investigación se ha hecho un recorrido por varios de los trabajos realizados por diversos autores que tengan relación con el problema de deslizamiento o desprendimiento de masa de suelo, ya sea en taludes y/o laderas. La base de estos estudios se centra en poder desarrollar y promover los métodos geofísicos como un elemento no destructivo y de bajo costo versus otros métodos que se utilizan en la actualidad.

La mayoría de los autores concuerdan en que los deslizamientos de masas de suelos inestables pueden representar una grave amenaza para áreas altamente pobladas y pueden causar daños relevantes. Méric et al., (2005) determinó que los métodos eléctricos entregan información relevante sobre la saturación agua/fluido que se encuentra en la masa de suelo, debido a que la resistividad eléctrica está fuertemente influenciada por el contenido de agua y su conductividad, así como por el estado de la fractura; por otro lado, Jeannin et al., (2006); Willenberg et al., (2008) estimaron a través del radar de penetración en el suelo (GPR) que esta puede ser una herramienta bastante útil para la obtención de una imagen de la zona fracturada de alta resolución cuando la masa de suelo investigada permite una profundidad de penetración suficiente. Además, Barnhardt y Kayen et al. (2000) utilizaron GPR para la investigación de dos deslizamientos grandes que fueron inducidos en Anchorage, Alaska. Sus estudios reproducen con precisión la geometría subsuperficial de la zona de falla, obteniendo imágenes con gran resolución como grietas y/o fisuras en el suelo, pero con poca profundidad. Roch et al. (2006) exploró el potencial del GPR para monitoreo de fracturas de laderas, en sus estudios adquirió datos de GPR 3D y fotogramétrico, lo que permitió caracterizar el suelo y hacer una interpretación 3D de las discontinuidades de la ladera.

Sin embargo, entre los métodos geofísicos disponibles, los métodos basados en ondas sísmicas son las únicas para las cuales las mediciones están directamente relacionadas con las propiedades mecánicas de la masa de suelo (densidad y módulos de deformación), además, los datos sísmicos también son fundamentales para la definición de un campo de velocidad confiable para ser utilizado en aplicaciones de monitoreo microsísmico. Es por ello que, Bruno y Marillier *et al.* (2000) emplearon métodos de reflexión sísmica de alta resolución combinadas con otras pruebas geofísicas en un derrumbe en los Alpes suizos. Su metodología permitió la identificación de la superficie de deslizamiento dentro de una capa de yeso ubicada a una profundidad de 50 m, pero hace hincapié en la importancia de elegir cuidadosamente los parámetros de adquisición de datos, debido a que el suelo sobre la superficie de deslizamiento absorbe la energía sísmica, es por ello, que la fuente es

quizás el factor más importante para determinar la calidad de los datos sísmicos de un deslizamiento de tierra. Ferrucci et al. (2000) trabajo con reflexion sismica pero no tuvo mucho éxito producto de que no pudo detectar la superficie de ruptura del lugar debido a la baja resolucion a poca profundidad y a lo complejo del contexto geologico en donde realizo los ensayos. Por otro lado, Mauritsch *et al.* (2000) aplicó métodos de refracción sísmica para la investigación de un gran deslizamiento gravitatorio alpino en el sur de Austria, que afectó las laderas con una superficie compleja compuesto principalmente por calizas, conglomerados dolomíticos, areniscas y lutitas. Las variaciones en la velocidad de la onda P se interpretaron como cambios litológicos y datos sísmicos apoyados en la determinación del lecho de roca estable. Todos los autores llevaron a cabo estudios sísmicos tradicionales en base a las ondas de compresión P, con la excepción de Bichler *et al.* (2004) que realizo sus estudios basándose tanto en la propagación de las ondas de compresión P como de las ondas de cortes S, pero este método tuvo poca contribución en la localización de la zona de fractura en la localidad de “Quesnel Forks”.

En las últimas décadas, las imágenes tomográficas geofísicas han crecido considerablemente, lo que lleva a una imagen bidimensional o tridimensional del medio analizado, a través de procedimientos de inversión. Esta técnica fue utilizada por Jongmans et al. (2007) y Méric et al. (2005) que muestra una disminución significativa de la velocidad de la onda P cerca de la superficie de falla dentro de la masa inestable. Heincke et al. (2006) aplicó tomografía sísmica 3-D a una ladera de montaña alpina inestable, encontrando velocidades aparentemente más bajas en el campo en comparación con las que se obtuvieron a partir de análisis de laboratorio de masa de suelo intactas recogidas en el sitio investigado. Se puede interpretar que la diferencia entre los contrastes de impedancia de la masa de suelo sea debido a la presencia generalizada de fisuras secas, zonas de fractura y fallas a diferentes escalas. Otra técnica poco empleada en estudio de caracterización de laderas es la de ruido sísmico, más conocida como la técnica de Nakamura. Delgado et al.(2000) baso sus estudio en aplicación de ruido sismico, comparando ensayos realizado bajo elementos finitos con mediciones practica de H/V, estableciendo que esta es una herramienta robusta para determinar los espesores de los depositos blandos, pero presentan ciertas limitaciones cuando en la zona de estudio existe ausencia de un contraste mecanico y/o una geologia compleja.

## **1.5 Métodos Geofísicos**

De todos los métodos mencionados en la sección 1.4, en esta investigación se utilizarán solo métodos de exploración sísmica, ya que es una de las técnicas más usadas en los estudios de caracterización de suelos debido a que en combinación con datos geológicos y estudio de mecánica de suelos, son capaces de proporcionar información precisa sobre la estructura y distribución estratigráfica de diversos tipos de rocas que se encuentran en el subsuelo. Dentro de la gama de métodos de exploración sísmica que existen en la actualidad, en este estudio se emplearán:

### **Método MASW**

El Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), es un método no destructivo que consiste en el registro y análisis de la propagación tanto de las ondas Rayleigh como de las ondas Love. La generación de ondas sísmicas se hace a partir de una fuente móvil y controlada, donde dichas ondas viajan a través de los distintos medios que componen el subsuelo. El movimiento debido a la propagación de las ondas, es detectado por un arreglo de geófonos colocados sobre la superficie, estos captan la señal y la convierten en diferencias de voltajes las cuales son almacenadas por instrumentos electrónicos especializados como lo son los sismógrafos. A través de ellos es posible obtener espesores de estratos, velocidad de ondas, parámetros del suelo, etc.

### **Método Refracción Sísmica**

El método de refracción sísmica está basado en la medición de los tiempos de viaje de las ondas compresionales (ondas P), y algunas veces de las ondas de corte (ondas S), generada por una fuente de energía impulsiva a unos puntos localizados a diferentes distancias a lo largo de un eje sobre la superficie del suelo. La fuente de energía es generalmente una carga pequeña de explosivo o un golpe de martillo. La energía es detectada, amplificada, y registrada de tal manera que puede determinarse su tiempo de arribo en cada punto, la metodología es bastante parecida a la aplicada en los ensayos de MASW. A partir de la observación, procesamiento y análisis de los sismogramas es posible construir graficas de tiempo-distancia, misma que mediante el análisis y procesamientos adecuados permiten determinar el número de capas en el subsuelo, sus espesores, geometría de la superficie refractante y velocidad de propagación a través de los distintos medios.



## **Método Tomografía de Refracción Sísmica**

En el área de la exploración sísmica se ha utilizado para la reconstrucción del campo de velocidades del subsuelo mediante el análisis de los tiempos de viaje medidos (Russell, 1988). El método de tomografía de refracción sísmica involucra la creación de un modelo de velocidad inicial, e iterativamente rastrea los rayos a través del modelo, mediante la técnica de reconstrucción simultánea iterativa, comparando el tiempo de viaje calculado con el tiempo de viaje observado, modificando el modelo, y repitiendo el proceso hasta que la diferencia entre los tiempos calculados y observados se minimiza, mediante el criterio de error RMSE el cual es una medición frecuentemente usada en el cálculo de la diferencia entre valores predichos por un modelo y los valores en realidad observados del parámetro o propiedad física que está siendo modelada o estimada, estas diferencias individuales también son llamadas residuales.

## **Método HVSR**

Es un método Pasivo, propuesto por Nakamura (1989) en la cual trabaja a partir de la utilización de ondas de microtemores para la evaluación de los efectos de sitio, relacionando las componentes espectrales horizontales y vertical del movimiento superficial registrado en un lugar (H/V). Obteniendo una señal compuesta donde el peak de mayor amplitud indica la Frecuencia fundamental del suelo (Konno y Ohmachi, 1998), implicando, que este tiende a vibrar en torno a su frecuencia fundamental. Esta técnica se desarrolló bajo sobre tres hipótesis:

- El ruido sísmico ambiental (RSA) es generado por la reflexión y refracción de ondas de corte al interior de capas de suelo superficiales y por ondas de superficie.
- Fuentes superficiales locales, no afectan el RSA en la base de la estructura no consolidada.
- Capas de suelo suave no amplifican la componente vertical del ruido ambiental.

Este método permite obtener, por lo tanto, el período predominante del suelo y las amplificaciones asociadas. Sin embargo, investigaciones experimentales (Lachet y Bard, 1994) han demostrado que las amplitudes entregadas, por este método, no representan las amplificaciones de sitio, dejando únicamente al método como herramienta para la determinación del período fundamental.

## 2. ANTECEDENTES GEOTECNICOS

La zona de estudio se encuentra localizado en la Región del Bio - Bio, específicamente al Sur-Este del casco urbano de la comuna de Talcahuano, considera la ladera de cerro que colinda a las viviendas que se encuentran al poniente de la calle principal Carlos Dittborn específicamente entre calle Desiderio García y calle Las Azaleas.

### 2.1 Descripción Zona de Estudio

El talud de características urbanas se encuentra ubicado tras los patios de las viviendas de la población Huachicoop, es un talud de corte con aproximadamente 46.000 m<sup>2</sup> de extensión de superficie de área, que además presenta alturas verticales promedios cercana a los 25 metros con pendientes con mucha variación e irregulares en toda la superficie del talud.



**Figura 2:** Localización sector de Estudio.

El terreno es bastante extenso y presenta distintas condiciones físicas, hacia el norte observan deslizamientos y derrames parciales de data anteriores, en cambio, en la dirección sur del talud se observan cortes muy pronunciado y denota deslizamientos actuales y activos (Figura 3.a). El talud está constituido principalmente por arenas finas y limos que en profundidad se encuentran cementadas. El material superior ha perdido un poco de cementación y se ha incorporado materia

orgánica acelerando su meteorización, haciéndolo más susceptible a procesos erosivos y se presencian deslizamientos superficiales. En la parte superior del talud se presenta una planicie con una frondosa vegetación de árboles, principalmente de Boldo y Aromos. En este sector no se evidencian escarpes que manifiesten movimientos de masa profundos, ni tampoco grandes pendientes que concentren flujos de aguas lluvias hacia la cara del talud (Figura 3.b). Con respecto a la parte baja, esta presenta una marcada foliación y denota el depósito de material en tiempos geológicos, incluso se pudo observar la presencia de conchas marinas. El material presenta un alto grado de cementación, sin embargo, resulta bastante frágil a la fracturación mecánica (Figura 3.d).



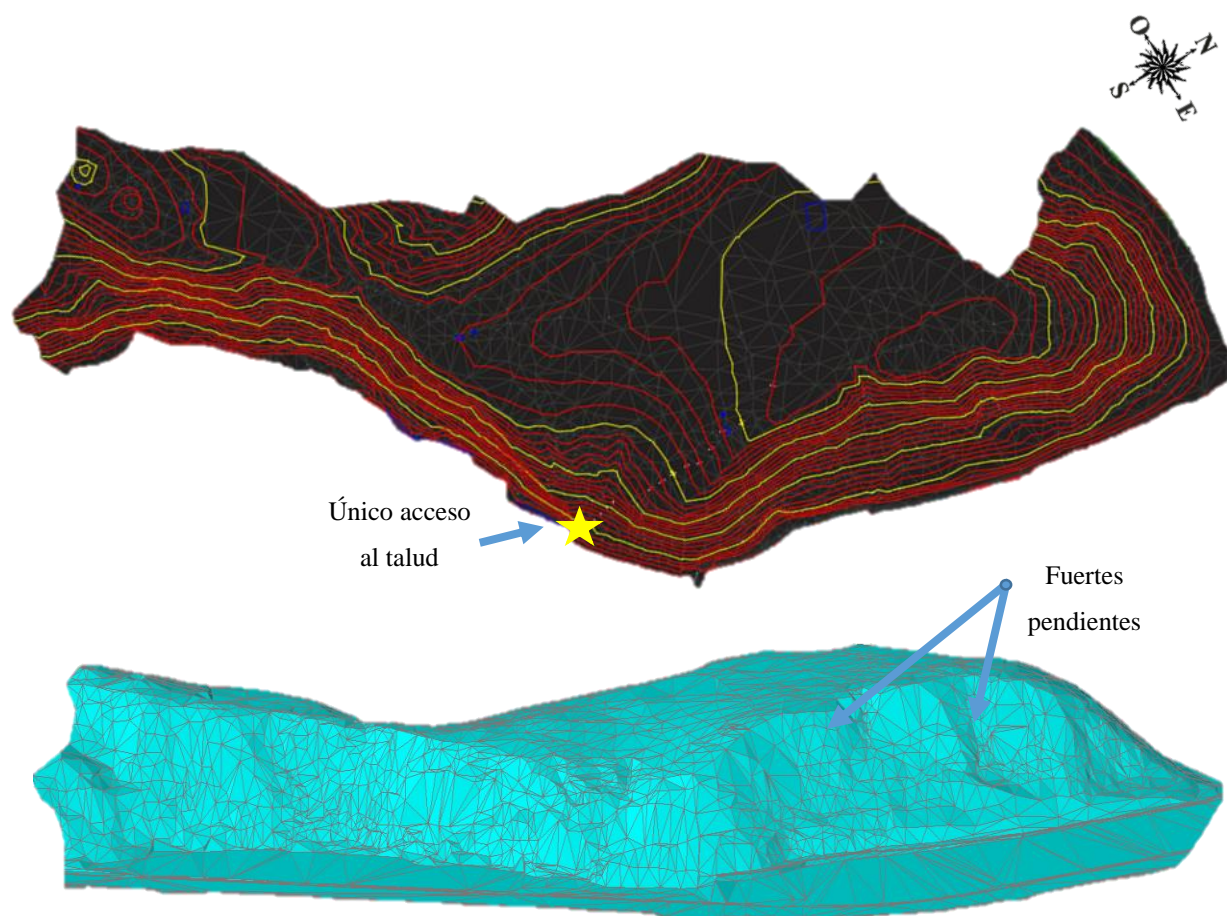
**Figura 3:** a) Árbol caído recientemente. b) Material superior con materia orgánica y pendiente variable. c) Escarpe hacia la corona del talud. d) Fragmentación frágil del material cementado.

Un punto importante del talud, es la presencia de árboles caídos recientes y la recuperación de la verticalidad de otros, lo que hace de suponer que los movimientos en el sector han sido recurrentes en el tiempo, sin embargo, cabe la notoriedad que los materiales expuestos en superficie (arenas finas y limos de baja plasticidad) encabezan la escala de erodabilidad y son los más susceptibles a la erosión, lo que sumado al deficiente sistema de evacuación de aguas lluvias, podría acelerar el arrastre de material por escurrimiento y generar nuevos deslizamientos de masa de la ladera, afectando las viviendas que se encuentran a los pies del talud.



### 2.1.1 Topografía

La particularidad que presenta este talud son las grandes elevaciones con respecto a la superficie y las fuertes pendiente que se producen en algunos sectores, esto queda plasmado en la Figura 4 donde se muestra la Topografía de detalle y modelación 3D del lugar, es posible observar que en todo el contorno del talud (zona media) las curvas de nivel se encuentran muy cercanas una de otra, es en este sector donde se producen las pendientes más pronunciadas del talud, logrando medir en algunos lugares pendiente mayores a  $50^\circ$  con respecto a la horizontal. sin embargo, se observa que en la zona de la corona del talud las curvas de nivel están más alejadas entre sí, haciendo el terreno más plano y es en donde se logró realizar las mediciones sin peligro.



**Figura 4:** Topografía de Detalle (Figura superior) y Modelación Topográfica 3D (Figura inferior).

## 2.2 Mecánica de Suelo

Para el análisis de estudio del talud de Talcahuano se cuenta con información de trabajos realizados anteriormente en el lugar que fueron proporcionada por la empresa IGMA (Ingeniería Geotecnia y Medio Ambiente) y que ayudaran a conocer mejor las características propias del sector, la información con que se cuenta son de exploraciones mecánicas y ensayos de laboratorios.

### 2.2.1 Exploración Mecánica

Dentro de las exploraciones mecánicas se tiene como registro realizados en el lugar de 2 sondajes SPT de los cuales se encuentran separados a una distancia de 65,6 m entre sí, además fue posible extraer muestras in-situ para la realización de ensayos de laboratorio. Los ensayos de laboratorio corresponden a Granulometría, Clasificación según USCS y ASSHTO, densidad de las partículas y contenido de humedad, todo esto es posible verlo en las Tablas 1 y 2.

	Profundidad (m)	Nspt	Contenido fino %	LL %	LP %	IP %	USCS	Descripción
<b>SONDAJE N°1</b>	0,00 – 0,45	3	75	39	22	17	<b>CL</b>	Arcilla de baja plasticidad y consistencia baja a media
	0,55 – 1,00	7	75	39	22	17	<b>CL</b>	
	1,00 – 1,45	14	75	39	22	17	<b>CL</b>	
	1,45 – 1,90	26	82	49	32	17	<b>ML</b>	Limo de baja plasticidad de consistencia muy firme
	1,90 – 2,35	26	82	49	32	17	<b>ML</b>	
	2,40 – 2,85	17	82	49	32	17	<b>ML</b>	
	2,85 – 3,30	37	64	43	29	14	<b>ML</b>	
	3,30 – 3,70	100	43	29	29	13	<b>SM</b>	Arena limosa tipo arenisca, compacidad muy alta
	3,70 – 3,90	100	43	29	29	13	<b>SM</b>	

**Tabla 1:** Información in-situ y resultados de laboratorio para muestras Sondaje N°1.

Según la clasificación USCS para el sondaje N°1 y a través de la información obtenida de ensayos de laboratorio, existen tres estratos bajo ese lugar, esta información es muy diferente a la que se obtuvo para el sondaje N°2 (ensayos que se encuentran a distancia no muy lejanas entre sí), por lo que se puede inferir que el lugar presenta una estratigrafía muy dispersa entre un lugar a otro.

	Profundidad (m)	Nspt	Contenido fino %	LL %	LP %	IP %	USCS	Descripción
<b>SONDAJE N°2</b>	0,00 – 0,45	6	75	47	32	15	<b>ML</b>	Limo de baja plasticidad de consistencia muy firme
	0,50 – 0,95	12	75	47	32	15	<b>ML</b>	
	1,00 – 1,45	12	75	47	32	15	<b>ML</b>	
	1,50 – 1,95	16	75	47	32	15	<b>ML</b>	
	1,95 – 2,40	24	75	47	32	15	<b>ML</b>	
	2,50 – 2,95	24	64	43	30	13	<b>ML</b>	
	3,00 – 3,45	25	64	43	30	13	<b>ML</b>	
	3,45 – 3,90	21	64	43	30	13	<b>ML</b>	
	3,90 – 4,35	26	64	43	30	13	<b>ML</b>	
	4,35 – 4,80	29	64	43	30	13	<b>ML</b>	
	4,80 – 5,25	19	62	43	31	12	<b>ML</b>	
	5,30 – 5,75	24	62	43	31	12	<b>ML</b>	
	5,75 – 6,20	42	59	41	32	9	<b>ML</b>	
	6,20 – 6,65	100	59	41	32	9	<b>ML</b>	
6,60 – 7,05	100	70	46	30	16	<b>ML</b>		

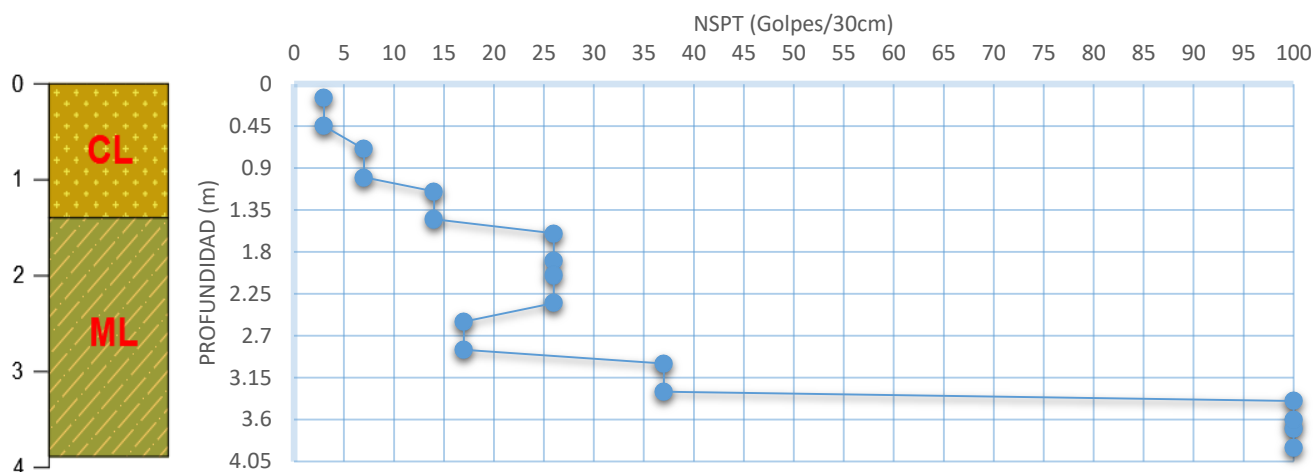
**Tabla 2:** Información in-situ y resultados de laboratorio para muestras Sondaje N°2.

Como se puede observar de las Tablas 1 y 2 que el registro de índice de golpes Nspt observado en el lugar de exploración, fue creciendo a medida que se aumentaba la profundidad de penetración llegando hasta obtener un rechazo de 3,85 m para el sondaje N°1 y de 6,85 m para el sondaje N°2, se pudiese inferir entonces, que el rechazo puede deberse a la presencia de arenisca que se encuentra en el sector de estudio.

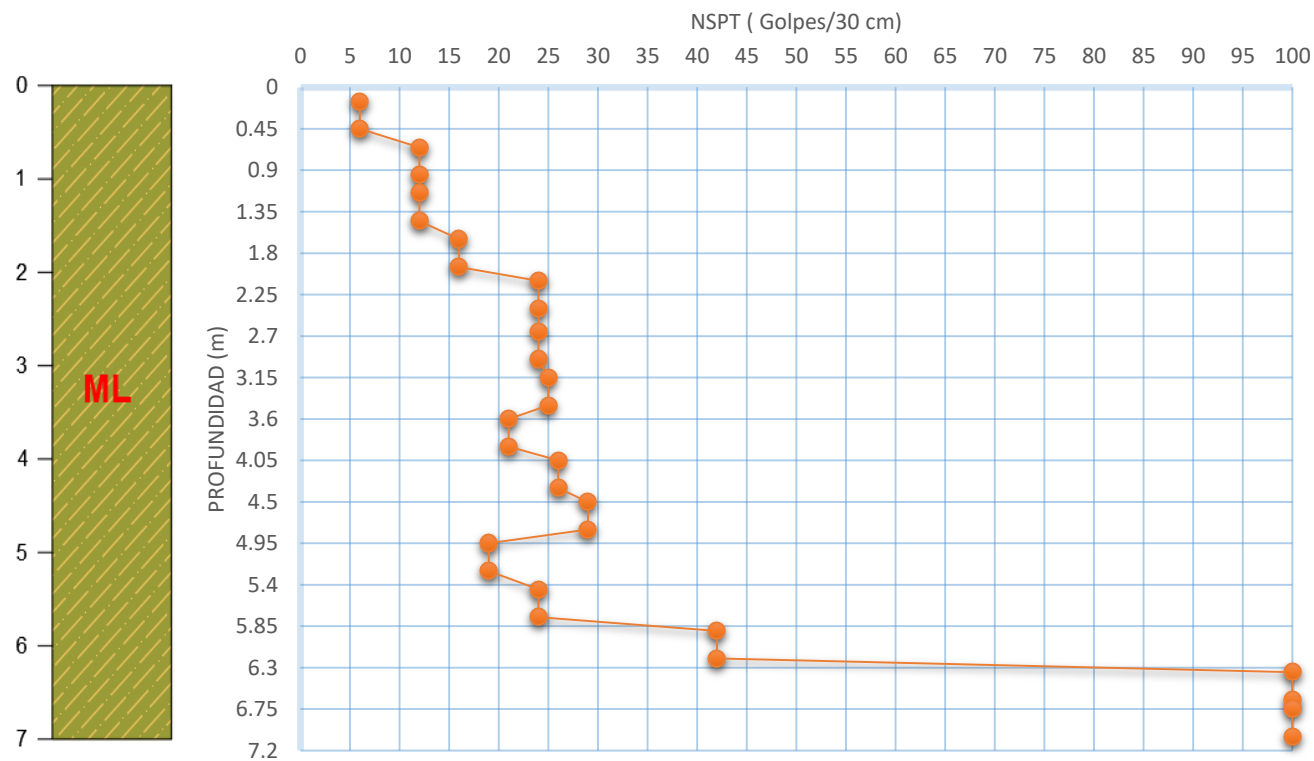
Por otro lado, cabe destacar que a la fecha en que se realizaron los ensayos y a la profundidad que se logró llegar con las prospecciones, NO se observa presencia del nivel freático en el lugar, por lo que no sería un factor determinante para la realización y posibles resultados que se obtuviesen en el talud.

### 2.2.2 Columnas Estratigráficas

A partir de la información obtenida de los sondajes realizados se construyeron columnas estratigráficas que muestra mejor la distribución de los estratos que se encuentran en el suelo además de estimar como varía los índices de golpes en profundidad.



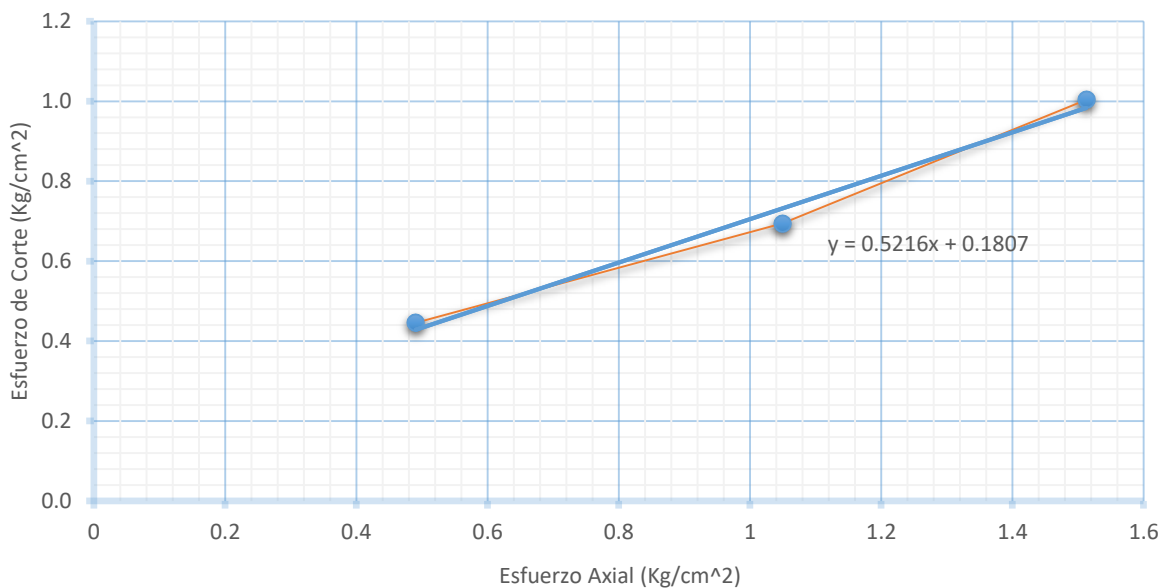
**Figura 5:** Columna Estratigráfica e Índice de golpe para Sondaje N°1.



**Figura 6:** Columna Estratigráfica e Índice de golpe para Sondaje N°2.

### 2.2.3 Ensayo Corte Directo

De las muestras que se pudieron extraer de las calicatas, se realizaron ensayos de corte directo a las muestras inalteradas obteniendo la siguiente gráfica:



**Figura 7:** Ensayo de Corte Directo.

De la Figura 7 se pudieron obtener los parámetros estimados de cohesión del suelo que es cercano a los 0,18 Kg/cm<sup>2</sup> y presenta un ángulo de fricción del material de 27, 5°. Cabe destacar que los parámetros obtenidos corresponden al material superficial (limo) que se pudo observar en las calicatas.



### 3. METODOLOGIA

Como ya se explicó en el Capítulo 1, los métodos que se aplicaron en esta investigación son métodos geofísicos de carácter sísmico, específicamente MASW, Tomografía Refracción Sísmica y HVSR. Las mediciones ejecutadas en terreno se realizaron mediante arreglos sísmicos lineales, esto quiere decir, que la disposición de los sensores (geófonos) fue en línea recta separados a una distancia equidistante entre sí. La longitud de los arreglos fue dependiendo de las condiciones del lugar, pero siempre se intentó abarcar la mayor cantidad de área posible. Por otro lado, para los ensayos de HVSR (Sismógrafos Triaxiales) se trató de formar una grilla que pudiese abarcar la mayor cantidad de área posible para poder tener la mayor información del lugar en estudio.

#### 3.1 Equipos utilizados

El equipo utilizado en la adquisición de datos para los ensayos de carácter activos fue un sismógrafo de DoRemi de Sara Electronic Instruments, que trabaja en un rango de frecuencia de 500 a 20.000 Hz, también se contó con 16 geófonos de componente vertical de una frecuencia natural de registro de 4.5 Hz más un geófono externo que cumplía las funciones de trigger, a la vez, se utilizó un martillo de 20 lb (9 kg aprox.), una placa circular, cable de conexión para los geófonos y el sismógrafo, además de equipos menores.

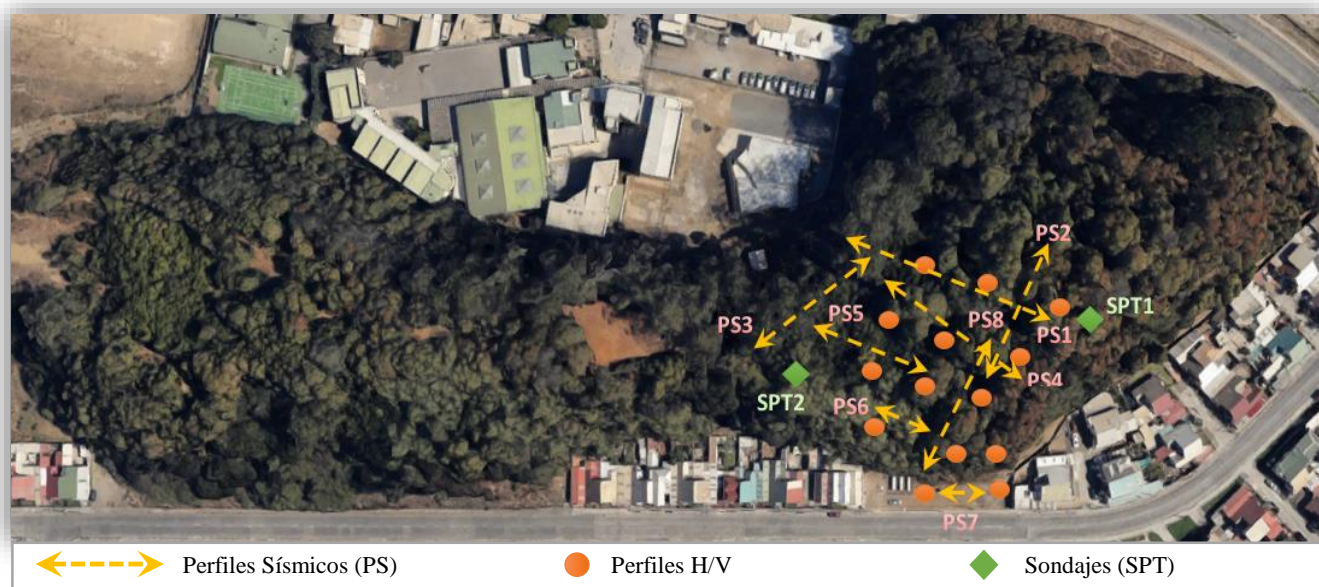
La configuración para la digitalización del registro de los datos que se utilizó para todas las mediciones fue:

- ✓ Intervalo de muestreo de datos : 1 ms
- ✓ Tiempo de adquisición de datos : 2 s
- ✓ Frecuencia de muestreo de datos : 8.000 a 10.000 Hz

En cambio, las grabaciones de vibración ambientales se obtuvieron utilizando 2 sismómetro triaxiales Geobox de SARA Electronic Instruments de frecuencia natural de 2 Hz y 4,5 Hz. La correcta utilización de estos instrumentos es que deben orientarse con ubicación en dirección Norte y ser correctamente nivelado

### 3.2 Configuración espacial del estudio

En el área de estudio del talud de Talcahuano se realizaron un total de 8 tendidos geofísicos de carácter sísmicos y 14 grabaciones ambientales combinadas entre los triaxiales de 2 y 4,5 Hz (ver Figura 8). El diseño de los arreglos se trató de orientar logrando abarcar el mayor espacio posible que se encontraba en el lugar formando tendidos con longitud muy variables (desde 10 m hasta 45 m los más largos realizados) y según las condiciones propias del terreno (vegetación, accesibilidad, tipo de suelo, etc.).



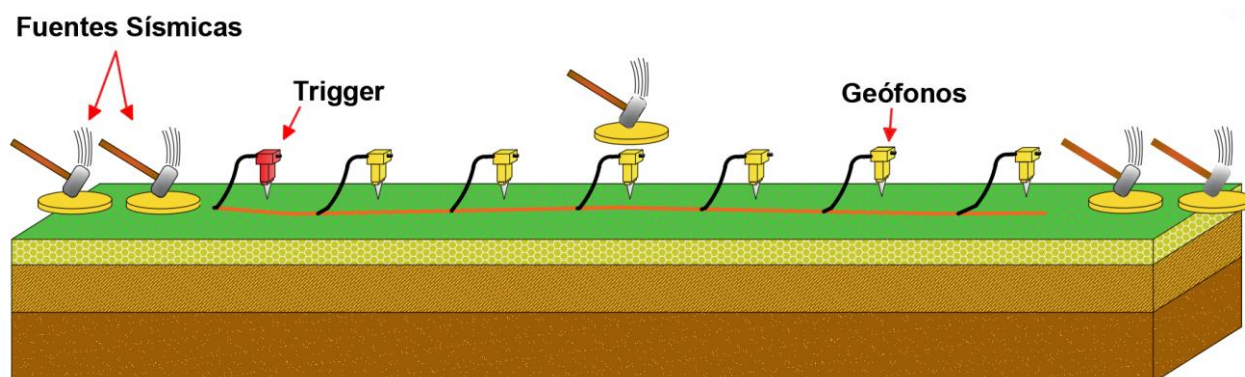
**Figura 8:** Ubicación espacial tendidos sísmicos.

La disposición de los geófonos y la ubicación de la fuente se dispuso por antecedentes realizado en investigaciones anteriores. Para los ensayos de grabaciones ambientales, se pretendió formar una grilla de separación de 15 m entre las mediciones y logrando abarcar la misma área o superficie que se abarco con los tendidos geofísicos activos. El tiempo se estudió que se ocupó con las grabaciones HVSR fue variable, entre 5 a 30 minutos, dependiendo de las condiciones del lugar y el ruido antropogénico que existía en él.

### 3.3 Procedimientos de Campos

#### 3.3.1 Metodología Ensayos Activos

La técnica de campo empleada durante los estudios de MASW y Tomografía Refracción Sísmica, consistió en el diseño de perfiles longitudinales, donde se realizaron 5 *shoot* por medición, es decir, dos disparos al principio del tendido, dos al final y uno en la mitad del arreglo, similar a lo presentado en la Fig. 9.



**Figura 9:** Diseños de los arreglos MASW y Tomografía Refracción Sísmica.

Las características de los arreglos geofísicos activos se muestran en la tabla 3 y se trató de lograr abarcar el mayor espacio posible que existiese en el lugar, además de las condiciones propias que presentaba el terreno (accesibilidad, vegetación, etc.).

	<b>N° Geófonos</b>	<b>Espaciamiento (m)</b>	<b>Longitud (m)</b>
<b>SP1</b>	16	3	45
<b>SP2</b>	16	2	30
<b>SP3</b>	16	2,4	36
<b>SP4</b>	16	2,5	37,5
<b>SP5</b>	16	1,5	33,5
<b>SP6</b>	11	1	10
<b>SP7</b>	14	1	13
<b>SP8</b>	16	2,6	39

**Tabla 3:** Características ensayos activos.

El Software utilizado para las grabaciones de las trazas sísmicas fue DoReMi V<sub>1.2.32</sub>. Antes de comenzar el proceso de adquisición de datos de los tendidos sísmicos, se realizó uno o dos *shoot* de prueba para determinar la ganancia óptima (medida en decibeles) que se debiese aplicar al suelo donde se está realizando el ensayo. Por el tipo de suelo, la ganancia empleada fue entre 27 a 31 decibeles, ganancia óptima para no saturar o atenuar demasiado las señales de las trazas sísmicas.

La fuente utilizada para generar de manera puntual la energía sísmica consistió en un martillo de 9 kg aproximadamente, el cual se hizo incidir de manera vertical sobre una placa acoplada al terreno. Se realizaron entre cuatro a cinco mediciones por cada *shoot*, promediando aproximadamente 25 disparos por arreglos. Para no trabajar con tantas mediciones, se utilizó la técnica de *Stacking*, por lo que, de los 25 sismogramas obtenidos por arreglo, se disminuyó a 5. Finalmente, los sismogramas obtenidos son óptimos para guardarlos en formato SEG-2 y analizarlos con softwares especializado en ondas sísmicas.

### **3.3.2 Metodología Ensayo Pasivo**

El procedimiento de campo para el ensayo HVSR es bastante sencillo, la ubicación de los triaxiales se estimó forma una grilla que abarcara la mayor área posible, el posicionamiento fue que siempre quedarán nivelado con el terreno natural y con su directividad de energía siempre en dirección al norte geográfico (según recomendación del fabricante), sin embargo, investigación de Díaz-Segura (2017) establece que la mejor posición de los instrumento de grabación de ruido ambiental para terrenos con inclinación mayor a 15°, es que su directividad de energía sea en forma perpendicular a las curvas de nivel del terreno, debido a que en esta posición se acentúa de mejor forma el espectro H/V, por lo que es más fácil caracterizar el suelo y determinar su periodo característico. Sin embargo, para esta investigación las mediciones se realizaron en dirección al norte geográfico, pero basta con tomar el ángulo formado por el norte geográfico y la perpendicularidad de las curvas de nivel del terreno, en este caso forma un ángulo de 104°, con eso y a través de software especializado es posible modificar la directividad de energía y trabajar las mediciones como si se hubiesen medido en sentido perpendicular a las curvas de nivel.

### 3.4 Procesamientos datos sísmico

#### 3.4.1 Método MASW

Para el procesamiento de MASW 1D se utilizaron dos paquetes de análisis para tener mayor información de resultados y ver la congruencia que entregan ambos. El primero es de la familia de SeisImager llamado *Surface Wave Analysis Wizard* (SW<sup>TM</sup>) y el segundo es *GEOPhysical Signal database for noise arraY processing* (GEOPSY). El objetivo principal de ambos softwares es poder estimar la curva de Dispersion del modo fundamental del suelo, para ello a través de la inversión de los datos que pasan del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia es posible determinar el espectro de velocidad que caracteriza al suelo en estudio, la selección del espectro es muy subjetiva y depende de los conocimientos de la persona a cargo del estudio.

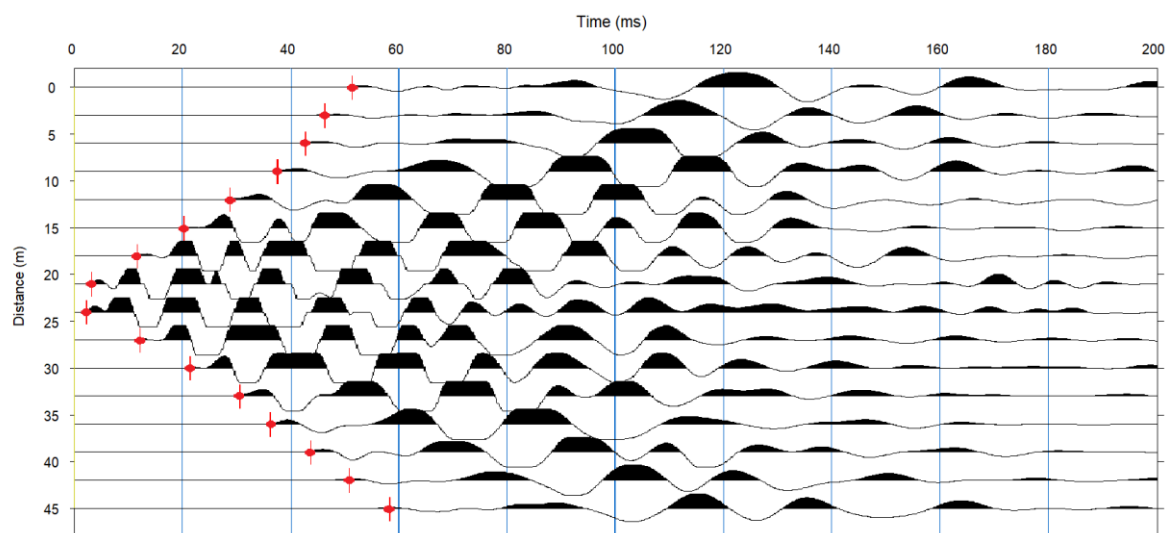
Una vez seleccionada el espectro de velocidad, y a través de la inversión de los datos e iteraciones en el modelo inicial, es posible generar un perfil de velocidad Vs en función de la profundidad, para ello, se utilizaron módulos apartes para ambos casos, *Surface Wave Analysis* (WaveEq) y DINVER respectivamente.

Para la generación de un perfil de velocidad 2D, se trabaja con todas las mediciones realizadas por arreglos, ellas se procesaron a través del módulo SW<sup>TM</sup> y se genera un gráfico de Frecuencia – Velocidad de Fase que contiene el espectro de velocidad grupal de las mediciones, se establece el límite máximo y mínimo del espectro, y se aplica un suavizados que ayuda a eliminar aquellos datos que no son tan predominante en él. Posteriormente, establecido el espectro de velocidad grupal, este se procesa con el módulo WaveEq<sup>TM</sup> en donde se obtiene un perfil de velocidad de ondas S en 1D a través de la inversión del espectro de velocidad, cabe destacar dicha inversión trabaja a partir de RMS estableciendo que si la selección del espectro de velocidad arroja un RMS menor a un 5% se infiere que el resultado está dentro de un rango de confiabilidad. A partir de ese primer modelo de velocidad Vs se realiza una segunda inversión con la finalidad de disminuir el RMS inicial, estableciendo parámetros de profundidad, números de capas, número de convergencia, entre otro, que finalmente muestre como resultado final un perfil de Vs en 2D a través del módulo de GeoPlot<sup>TM</sup>.

### 3.4.2 Método Tomografía Refracción sísmica

Para el procesamiento de los sismogramas de refracción sísmica se utilizó el paquete integral de SeisImager/2D<sup>TM</sup>. Este paquete consta de dos módulos, el primero *Pick First Breaks or Dispersion Curves* (Pickwin<sup>TM</sup>), el objetivo principal de este es poder identificar los primeros arribos de las ondas P en cada una de las trazas sísmicas, almacenarlos y guardarlos en un archivo para su posterior entrada al programa de análisis. La selección de los primeros arribos de ondas P, se realizó bajo selección manual, debido a que entrega resultados con mayor precisión que la selección automática.

En la Figura 10 es posible observar la selección de las primeras llegadas de las ondas P y la no necesidad de aplicación de filtros a los datos sísmicos, debido a la poca contribución de ruido externo que existía en el lugar, en la mayoría de las mediciones sísmicas realizada se aplicó filtros a los datos, pero no hubo variación significativa de ellos.



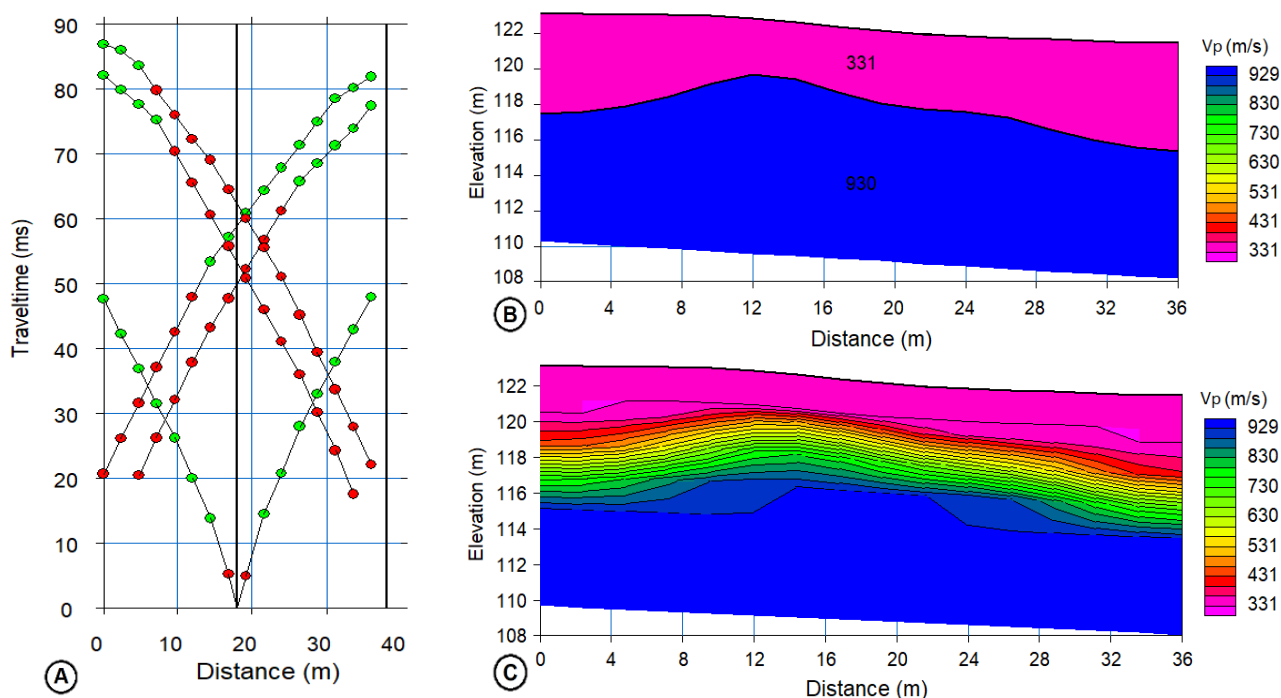
**Figura 10:** Ejemplo sismograma y selección de los primeros arribos obtenido del arreglo N°1 con fuente a los 22,5 m.

El segundo módulo *Refraction Analysis* (Plotrefa<sup>TM</sup>) es el programa de análisis principal del paquete, de modelación e interpretación. Este módulo trabaja a partir del archivo empleado en Pickwin<sup>TM</sup> y mediante la aplicación de una de las siguientes técnicas de interpretación:

Time – Term por mínimos cuadrados, Tiempo de retraso (reciproco) o inversión de tomografía, de las cuales es posible generar una sección transversal de velocidad del subsuelo.

En esta investigación se aplicó el análisis de las curvas de Distancias – Tiempo de viaje, es decir, se hace la asignación de capas sobre las curvas obtenidas en el domocroma, con sus respectivas velocidades (Figura 11.a), posteriormente se realiza el proceso de inversión, el cual genera un modelo inicial que compara la velocidad calculada con la velocidad observada, creando un RMS que muestra una aproximación del resultado final a obtener.

La Tomografía sísmica trabaja a partir del modelo inicial creado, que contiene los parámetros de velocidad máxima, mínima y elevación promedio de la superficie del modelo a generarse, se aplica el cálculo de la inversión tomográfica, que modifica el modelo inicial haciendo disminuir el RMS entre las velocidad, generando un modelo de variaciones de velocidad mediante un gradiente de suavizado, para así obtener un modelo de capas, según lo observado en las curvas de Distancia – Tiempo, del cual se extraen finalmente los datos de profundidad de cada horizonte o superficie refractora, correspondiente a la ubicación de cada geófono (Figura 11.c).

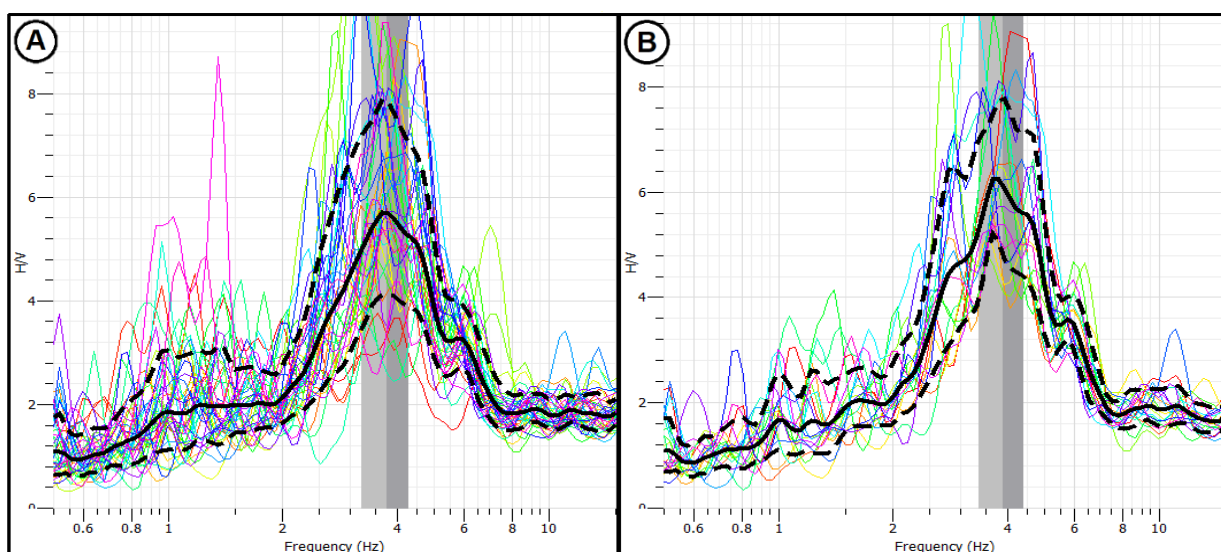


**Figura 11:** Secuencia Obtención Perfil de velocidad Vp. a) Selección de velocidad por capas en Domocroma. b) Refracción Sísmica. c) Tomografía Sísmica.



### 3.4.3 Método HVSR

Las grabaciones obtenidas en terreno se procesaron con el Software GEOPSY, el cual se rige por el criterio SESAME para el análisis de H/V, pero no muestra una comprobación visible de los parámetros de este. El total de las grabaciones que se realizaron en terreno fueron 14 con duración relativa dependiendo de las condiciones intrínsecas del lugar. Los parámetros que se consideraron para el análisis fue de una longitud de ventanas ( $L_w$ ) entre 20 a 30 s., amplitud de la señal de un periodo a largo ( $T_{lta}$ ) y corto tiempo ( $T_{sta}$ ) de 30 y 1 segundo respectivamente, además de un valor de umbral que evita ventanas de tiempo con amplitudes anormalmente bajas ( $S_{mín}$ ) de 0,2 y de amplitudes transitorias energética ( $S_{máx}$ ) de 2,5. A cada ventana de registro se le aplicó un tape del 5% de la longitud total de la ventana y un solape del 10%, posteriormente se calcularon los espectros de amplitud de Fourier, los que fueron suavizados mediante la Función de Konno y Ohmachi con una constante de suavizado del 40%.



**Figura 12:** Espectro de Fourier resultante de la señal C3 a) Con todas las ventanas seleccionadas. b) Con las ventanas alteradas eliminadas.

La duración de las ventanas dependió del tiempo empleado en las grabaciones, de la frecuencia resultante y la consideración de al menos 10 ventanas como mínimo (según recomendación de SESAME) para el análisis. En ocasiones, esta condición no se cumplía, por lo cual, se debió bajar la duración de las ventanas, debido a que la señal no respetaba los parámetros expuestos anteriormente.



Luego de cada selección de ventanas y de generar la gráfica, se procedió a filtrar la señal resultante. En la Figura 12 es posible observar un ejemplo de los espectros de Fourier de cada ventana seleccionada.

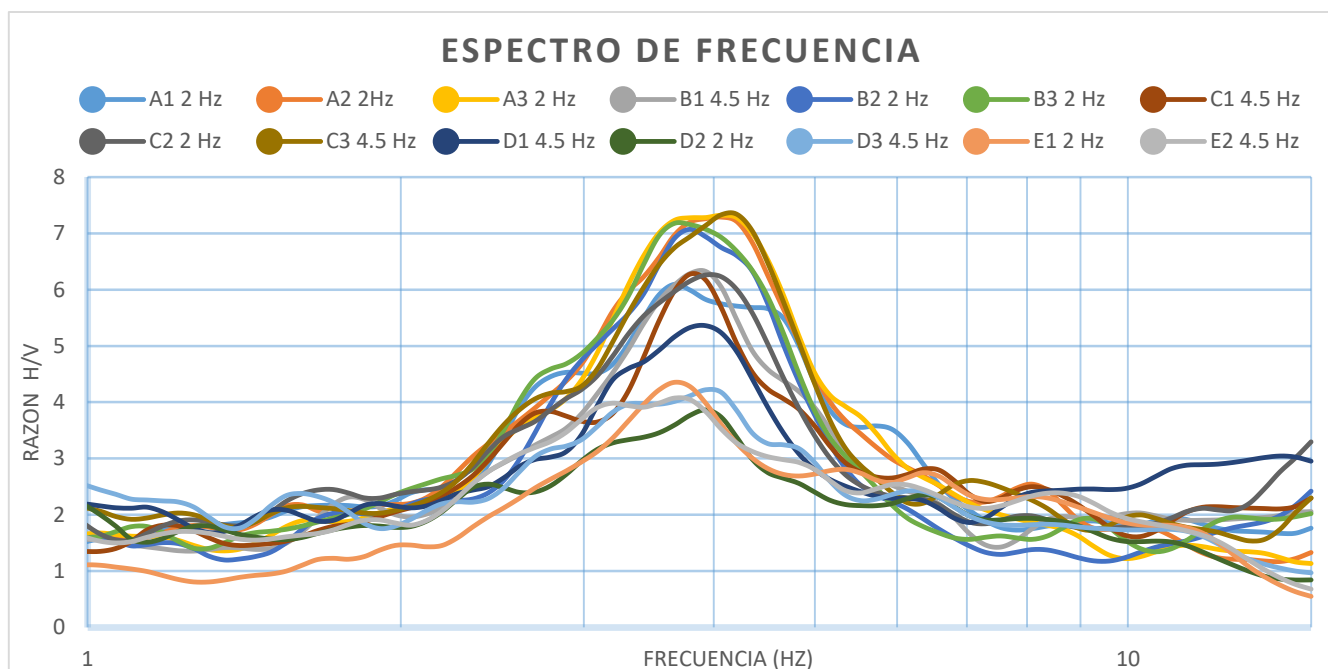
Aunque a simple vista, no se distinguen mayores contrastes de frecuencias en los resultados entregados por el software, lo que sí es posible notar, es un leve aumento en la amplitud de la señal con las ventanas alteradas eliminadas, ayudando a poder distinguir de mejor manera la fo del suelo. En este caso, se observa un peak claro a los 3,83 Hz, relacionado a la mayor amplitud H/V. no obstante, hay ocasiones en que existe más de un peak notorio en los resultados de H/V, siendo necesario verificar los criterios adoptado para cada uno. Esto peak podrían deberse a perturbaciones al momento de comenzar las grabaciones de ruido sísmico en terreno, lo cual hace generar falsos peaks a la señal resultante.

## 4. ANALISIS Y RESULTADOS

Una vez establecidos todos los antecedentes relacionados con los métodos geofísicos y sus principales variables, es posible sintetizar el capítulo de Análisis y Resultados para poder caracterizar de mejor forma el talud en estudio. En este capítulo, se mostrarán los resultados de acuerdo a los 3 tipos de metodología aplicada.

### 4.1 Razón Espectral H/V

La característica principal de este método es poder determinar el periodo fundamental del suelo, pero algunas investigaciones han podido establecer que a partir de variaciones significativas de los espectros de frecuencia es posible determinar zonas de fallas o fracturas que tenderían a deslizar antes eventos sísmicos. Todos los espectros de frecuencias obtenidos se analizaron desde 0,5 hasta 15 Hz, donde es posible ver claramente los peaks que predominan en las mediciones, en la Figura 13 se muestra los peaks de las 14 mediciones que se realizaron en el sitio de estudio.

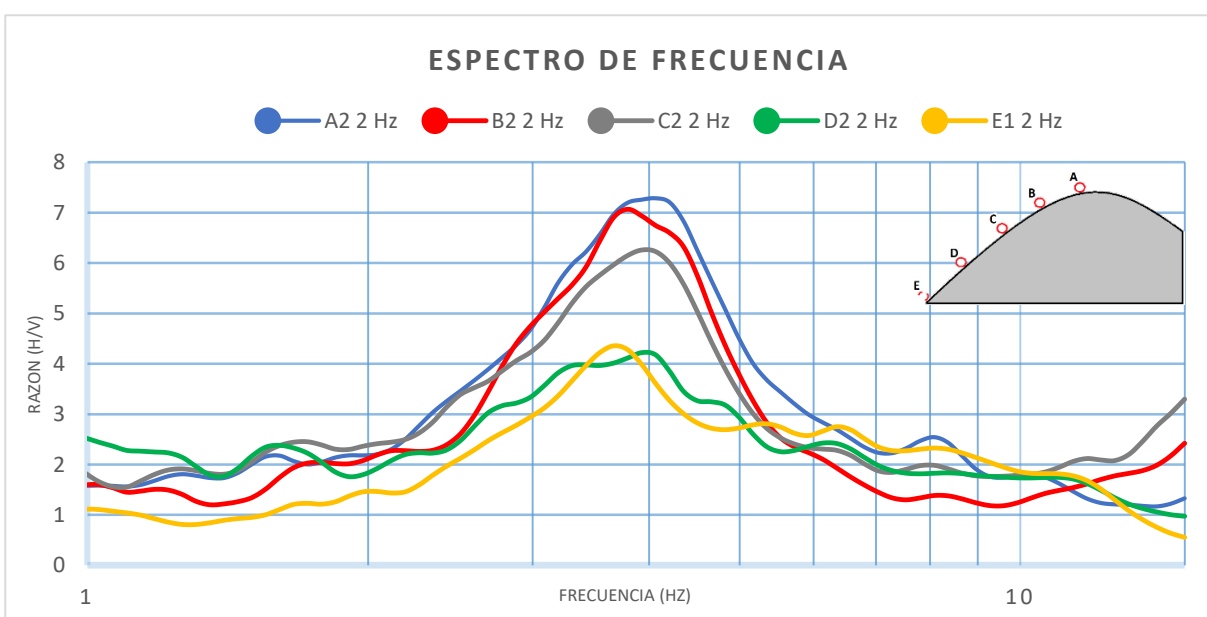


**Figura 13:** Espectro de Fourier combinando todas las mediciones de razón H/V.

El comportamiento de los espectros de frecuencias obtenidos es similar en todo el rango de frecuencia analizado, estos se mueven a través de un mismo ancho de banda y solo difieren en las amplitudes alcanzadas por los peak máximos. Las curvas H/V muestran un peak bien definidos y único entre 3,7 y 4,1 Hz, y con amplitudes superiores a 7, lo cual es posible caracterizar al sitio en estudio con un periodo predominante entre 0,27 a 0,24 segundos. sin embargo, no es posible identificar otros peaks que sean más relevantes dentro del espectro de frecuencia, esto, para identificar zonas de suelos con presencia de fallas de tipo geológicas o reconocer algún desprendimiento de masa de suelo a futuro.

Estos resultados explican las limitaciones que presenta esta metodología al ser aplicado en terreno con cierta inclinación, debido a la ausencia de un marcado contraste de impedancia mecánico producido entre las capas estudiadas y/o a la existencia de una estructura geológica compleja, que da lugar a un Vs altamente variable con la profundidad dentro de la región, como lo han observado varios autores (Delgado et al., 2000).

Sin embargo, destacar la variación que sufren las amplitudes a medidas que las mediciones avanzaban hacia la corona del talud. Es posible observar de la Figura 14 que las amplitudes aumentan a medida que las mediciones se acercan hacia la corona del talud no así las frecuencias, que permanece dentro del mismo rango, esto se asemeja a los resultados obtenidos por Díaz-Segura, 2017. Las variaciones de las amplitudes observadas en las diferentes mediciones pueden atribuirse a las condiciones propias que caracterizan a los terrenos inclinados y a los diferentes modos de vibrar que se producen en ellos.

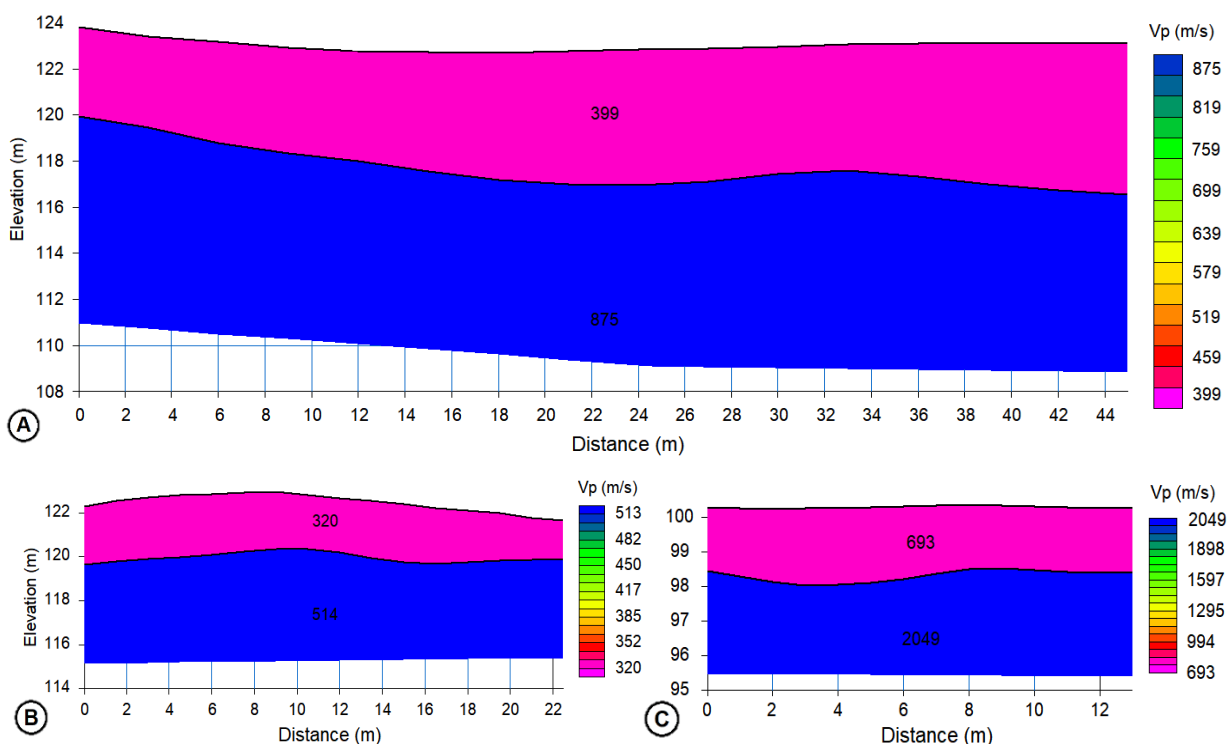


**Figura 14:** Variación de la amplitud H/V en diferentes puntos a lo largo de la pendiente del terreno.

## 4.2 Tomografía Refracción Sísmica

De las 8 mediciones de Tomografía de Refracción Sísmica, se logra identificar que existe 3 tipos de perfiles que caracterizan de buena forma al área de estudio, estos perfiles muestran velocidades de ondas diferentes entre sí y espesores de capas muy similares a los que se obtuvo en la mecánica de suelo. Las 3 zonas características dentro del talud son:

- Zona alta del talud, con rango de velocidad entre 389 – 875 (m/s) (Arreglos N°1, N°2 y N°4).
- Zona media del talud, con rango de velocidad entre 323 – 558 (m/s) (Arreglos N5 y N°6).
- Zona baja del talud, con velocidades entre 693 – 2049 (m/s) (Arreglo N°7).



**Figura 15:** Visualización 2D de las velocidades  $V_p$  del subsuelo. a) Arreglo N°1 "corona del Talud". b) Arreglo N°5 "Zona media del Talud". c) Arreglo N°7 "Pie del Talud".

Al comparar los perfiles obtenidos con los valores de los sondajes realizados en el lugar, estos muestran cierta similitud y entregan un mayor grado de confiabilidad a los resultados de Tomografía Sísmica, considerando que se trata de una metodología no invasiva. La Fig.15.a muestra una estratigrafía con densidad variada que aumenta con la profundidad, la primera capa sísmica

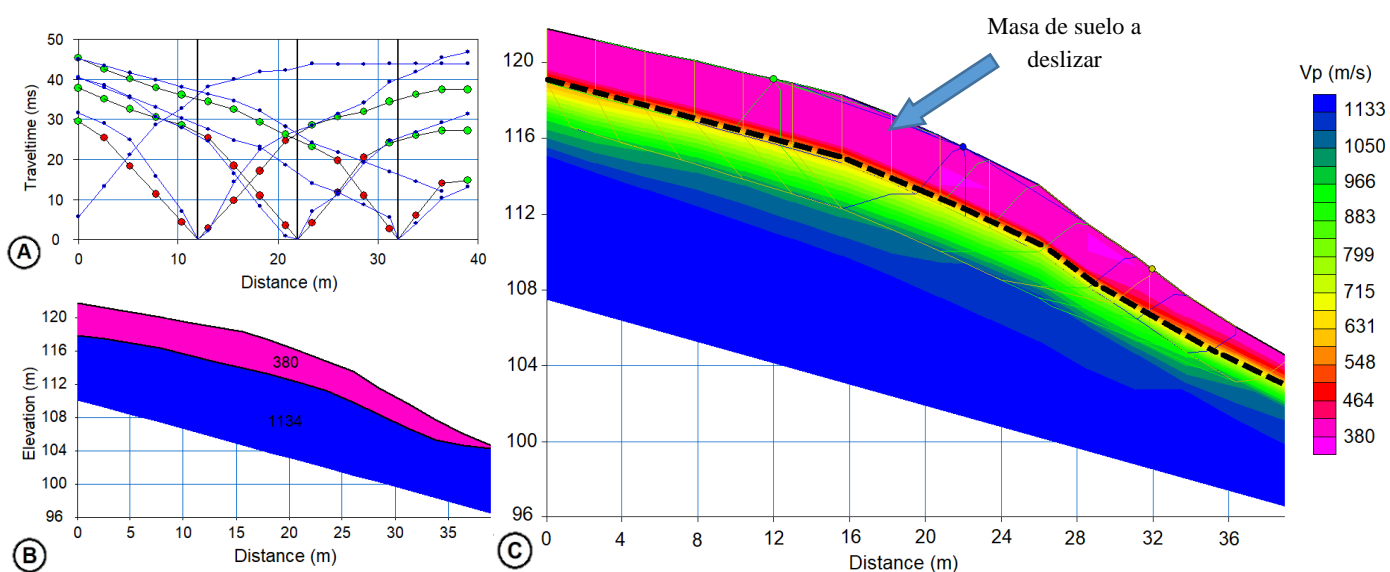
corresponde a los depósitos de arcilla y limo de compacidad baja, mientras que la segunda capa que aumenta ligeramente la velocidad sísmica correspondería a la arena cementada de compacidad alta que se encontró en el lugar. La capa sísmica superficial alcanza una profundidad de 3,84 m al inicio de la medición y aumenta gradualmente hacia el sur hasta 6,49 m, estos resultados no están tan alejados de la información proporcionados por los ensayos de SPT, considerando que el inicio se realizó a 3 m de distancia del sondaje N°1 y que esta muestra un cambio significativo del NSPT a los 3,5 m (ver tabla N°1), arrojando una diferencia entre ambos resultados de 0,34 m (variación 9.71 %).

El arreglo N°3 que está ubicado a 8,25 m del sondaje N°2 y que es el más cercano, la capa sísmica superficial alcanza una profundidad de 6,09 m, información bastante cercana a la estratigrafía obtenida del sondaje N°2, que muestra un contraste diferenciado del Nspt a los 6,4 m, esto arroja una diferencia de 0,31 m (variación 4,84 %). Los resultados obtenidos de los perfiles geofísicos son bastantes confiables, producto que la variación son menores al 10 % en ambos casos, considerando que estos muestran información más global de la estratigrafía interna del suelo en vez del resultado de carácter puntual de los ensayos SPT.

Las mediciones emplazadas en la zona media del talud (Fig. 15.b) presenta velocidades de  $V_p$  menores comparadas a las demás, esto se debe a la compleja distribución topográfica (fuertes pendientes) y a que es la más expuesta a fenómeno de erosión (erosión fluvial). La baja velocidad presente, hace que este sector sea el más inestable del lugar, debido a los pequeños desprendimientos de suelos activos que existen y a la presencia de árboles caídos.

Si bien no existe variación lateral de las velocidades de ondas P, el contraste de impedancia que se produce en los perfiles geofísicos podría provocar deslizamiento de masa de suelo en la zona de estudio, debido a que en todos los perfiles realizados se encuentra una capa sísmica de baja compacidad y con velocidades  $V_p$  menor sobre una capa más cementada con mayor velocidad de ondas P. La delimitación del deslizamiento comenzaría en la corona del talud y disminuiría gradualmente hasta los pies de este. El arreglo N° 8 (Fig. 16) es la medición más representativa de la zona, muestra como podría ser el comportamiento del deslizamiento y la porción de suelo a deslizar.

Esta sección sísmica presenta capas de suelo que incrementan su velocidad con la profundidad gradualmente en el intervalo de 380 a 1133 (m/s). El RMS arrojó un 4,41% de error en la comparación de velocidades, y es posible observar a través de las líneas de refracción sísmica (Fig. 16.c) que bajo ese sector se encuentran una estratigrafía que concuerda con la información proporcionada por el sondaje N°1, la capa superficial estaría compuesta por materia orgánica y arcilla de baja compacidad (capa color rosa) con un  $V_p$  cercano a los 380 m/s, seguido de una delgada capa que aumenta su velocidad hasta los 470 m/s que se trataría de limo con compacidad baja a media (capa color rojo) producto del  $V_p$  que la caracteriza, por último se observa una capa más compacta (capa color verde-azul) que aumenta gradualmente su velocidad en un rango de 600 m/s hasta 1050 m/s.



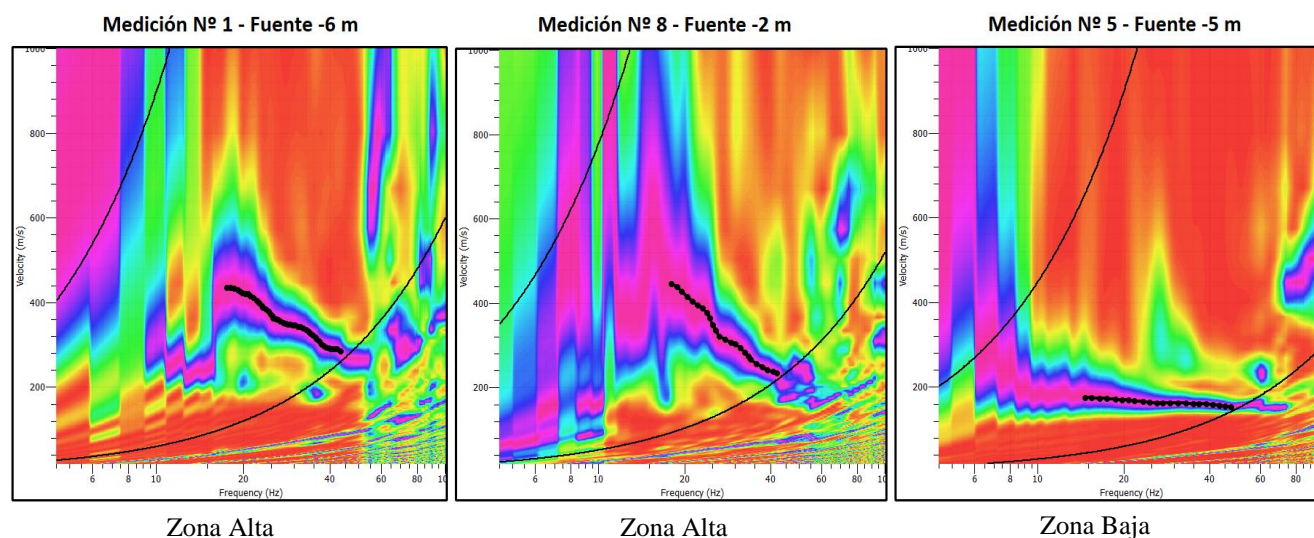
**Figura 16:** Resultados Arreglo N°8. a) Domocroma obtenido mostrando comparación de velocidades. b) Perfil Refracción Sísmica. c) Perfil Tomografía Sísmica.

El hecho de que la estructura superficial presente valores de velocidad tan bajo se debe principalmente a que ha estado sujeta a agentes de intemperismo, los cuales debilitan y erosionan los materiales que conforman esta estructura. Considerando esto, sumado al contraste de velocidad que se produce en las capas de suelo superficial y una compleja distribución topográfica que presenta el terreno, la masa deslizante tendría un movimiento de tipo traslacional y comenzaría cercano a la corona del talud a una profundidad de 3.6 m aproximadamente y disminuiría de espesor a medida que avanza hacia los pies de este, como se ilustra en la Fig. 16.c.

### 4.3 Inversión de Ondas Superficial (MASW)

#### 4.3.1 Curva de Dispersion

La selección de los espectros de velocidad se determinó de forma manual y mediante los softwares mencionados en la sección 3.4.1. El grado de confiabilidad de estos, arrojó en todas las mediciones un RMS inferior al 5 %, esto quiere decir que la incertidumbre generada en los perfiles finales de Vs es muy pequeña.

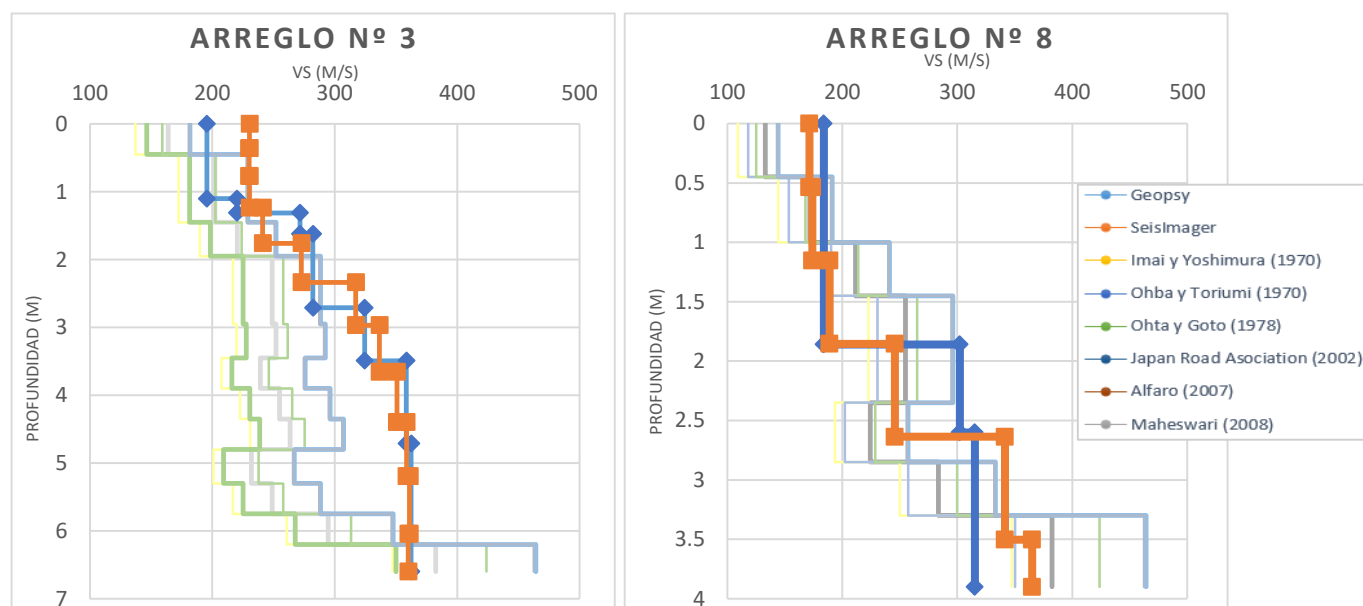


**Figura 17:** Espectro de Velocidad obtenidas de los modos fundamentales.

Considerando los resultados mostrados en la Fig.17, los espectros realizados sobre el talud se mueven dentro de un mismo rango de frecuencia, comprendido entre 15 a 45 Hz. Los comportamientos de los espectros de velocidades obtenidos de los modos fundamentales son diferentes entre sí, las mediciones realizadas en la corona del talud presentan velocidades de fase cercanas a los 400 m/s y disminuyen a medida que aumentan la frecuencia, haciendo que su rigidez aumente profundidad o dicho de otra manera, los contrastes de velocidad de las capas de suelos son mucho más significativo, en cambio, las mediciones realizadas en la zona media del talud presentan velocidades más bajas (200 m/s) y no sufren variación de la velocidad a medida que aumenta el rango de frecuencia, por lo que no habría una variación significativa de las rigideces del suelo en esa zona, comportándose como un estrato muy homogéneo en profundidad, sin grandes contrastes de velocidades entre las capas de suelos, estos resultados son similares a los obtenidos por la Tomografía Refracción Sísmica (Fig. 15).

### 4.3.2 Perfiles de Velocidad

La obtención de los perfiles de Vs en 1D se realizaron con ambos softwares, se consideraron los mismos parámetros de análisis (iteraciones, números de capas, etc.) y se utilizó la medición con el *offset* más lejano de ellos, además, se estimaron perfiles de Vs en función del número de golpes (N) a través de correlaciones determinadas por diferentes autores para ver el comportamiento de estos frente a los resultados obtenidos a través de MASW 1D.



**Figura 18:** Perfiles Vs comparados con correlaciones en función del Número de Golpe (N).

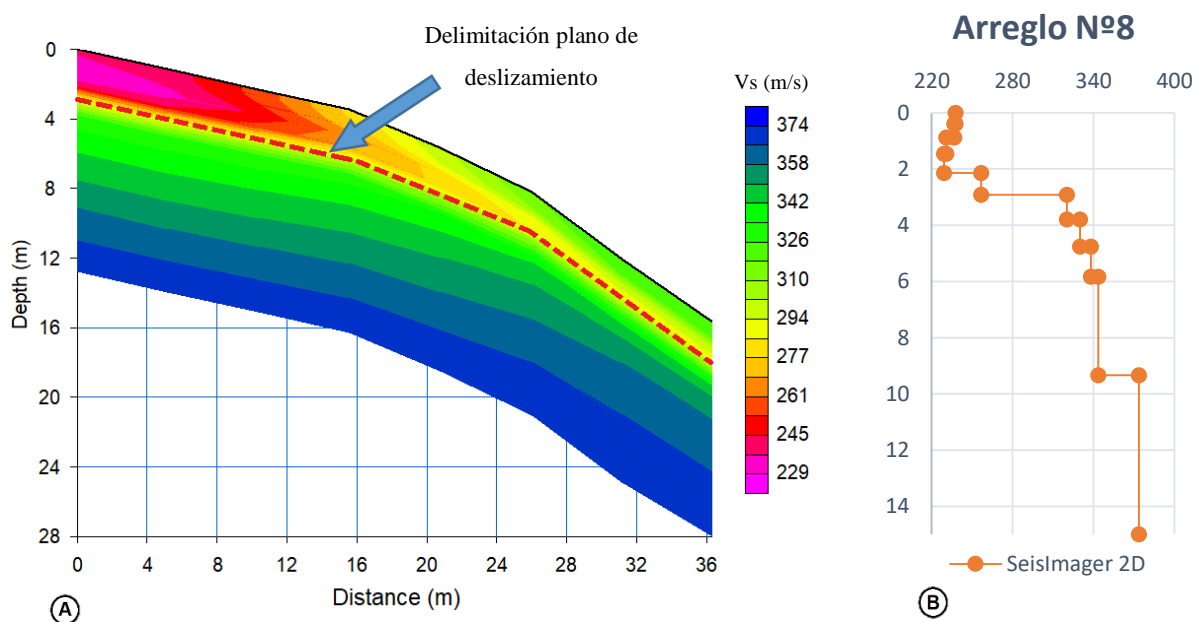
Los resultados obtenidos de los perfiles Vs 1D (ver Anexo B) presentan un aumento progresivo de la velocidad en profundidad. Los contrastes de velocidad se hacen notar más en las mediciones realizadas en la corona del talud con rango entre 150 -200 m/s, no así, en las mediciones ejecutadas en la zona media, donde las variaciones de velocidad son menores a 60 m/s. aun así, los perfiles presentados a través de los dos softwares muestran una tendencia similar de la velocidad con la profundidad.

Dentro de lo que respecta a las correlaciones en función de N, muestran un comportamiento similar a los resultados obtenidos de MASW 1D, por lo que no habría una sobreestimación de los valores tanto de Vs como del comportamiento de los estratos en profundidad obtenidos a través de MASW 1D, presentando un alto grado de confiabilidad a los resultados obtenidos en esta investigación.



Por otro lado, los modelos de  $V_s$  en 2D manifiestan un comportamiento bastante similar a los obtenidos en los modelos de  $V_p$ , no obstante, logran presentar mejor resolución en las capas más superficiales con variaciones laterales de las velocidades.

El modelo de  $V_s$  de la medición N°8 (Fig.19.a) muestra una estructura más compleja en las capas superficiales en comparación al modelo  $V_p$  en la sección 4.2, con variaciones laterales de  $V_s$  que oscila entre de 229 a 374 m/s. El contraste de velocidad comienza a incrementar desde los 2 m hasta cercano los 4,5 m de profundidad (Fig. 19.b), este rango es consistente con la profundidad del plano de deslizamiento detectada en los perfiles de Tomografía Sísmica (Fig.16) y la información proporcionada por los sondajes (Tabla1).



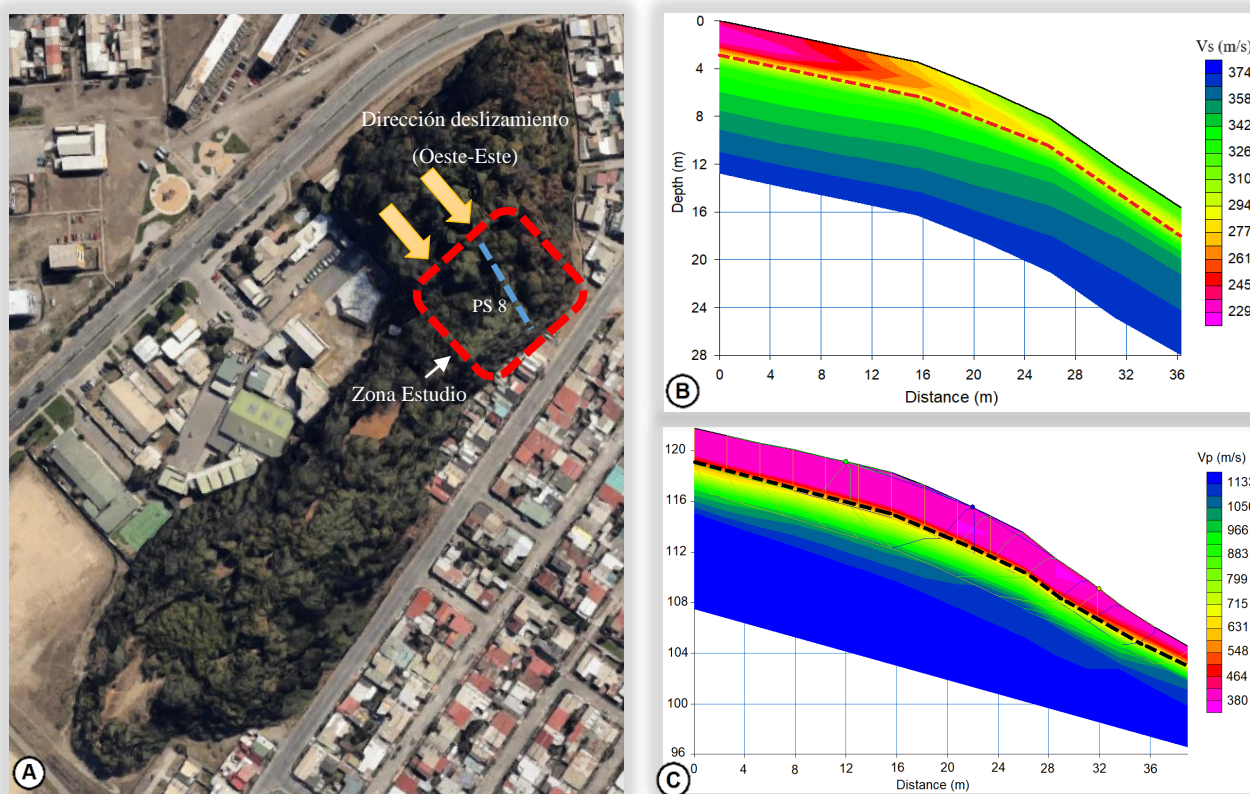
**Figura 19:** Medición N°8. a) Modelo sísmico MASW 2D. b) Perfil sísmico 1D del modelo 2D.

Si bien, el contraste de velocidad sísmica entre las capas no es tan elevado, los antecedentes de suelo expuesto en el talud agudizan los peligros de deslizamiento en él, sumado a una capa de arcilla de baja compacidad guía por sobre un estrato de arenas cementadas, una topografía muy compleja y un deficientes escurrimiento de las aguas superficiales que acrecientan los deslizamientos de suelos sobre el plano delimitado.

#### 4.4 Estimación Final Zona a Deslizar

En síntesis, considerando los resultados obtenidos a partir de los métodos HVSR, Tomografía Refracción Sísmica e Inversión de Velocidad 1D y 2D, en la Figura 20 se muestra un resumen del comportamiento de la delimitación del plano de deslizamiento identificado en el talud en estudio. Tanto los perfiles de Vs como Vp (Fig. 20.b y 20.c) presentan un comportamiento similar en profundidad, manifestando mejor resolución de las capas superficiales los modelos de Vs con variaciones laterales de la velocidad que no son observadas en los modelos Vp.

Los resultados obtenidos de los modelos geofísicos confirman la descripción geotécnica generada a partir de los ensayos de mecánica de suelos. La delimitación del plano de deslizamiento estaría determinada por un estrato compuesto de arcillas y limos consistentes (Vs 229 – 261 m/s) con un espesor entre 3 - 4 m que yacen sobre una arena limosa altamente cementada (Vs 342 – 374 m/s).



**Figura 20:** a) Ubicación y dirección de deslizamiento de tierra en el área de estudio. b) Perfil Vs arreglo N°8. c) Perfil Vp arreglo N°8.

El movimiento relativo de la masa deslizante tendría dirección de Oeste a Este y aumentaría gradualmente de espesor hacia el sur, el comportamiento del deslizamiento sería de tipo traslacional debido a que la masa inestable (arcilla-limo) está guiada en forma paralela al estrato más resistente (arena limosa).

Con respecto a los deterioros observados en el lugar, los mayores inconvenientes obedecen a deslizamientos parciales y relativamente superficiales, guiados por sobre el estrato de arenas cementadas, producto a que el material superficial es altamente erodable y su exposición a las condiciones ambientales de la zona prevé serios peligros de deslizamientos por erosión.

Todos los resultados sugieren que, a diferencia de los modelos de  $V_p$  o los valores de las frecuencias fundamentales obtenidos, el mapeo a través de modelos en función de  $V_s$  podría proporcionar información valiosa sobre el estado de deformación del material en profundidad, y que la evolución  $V_s$  con el tiempo podría ser utilizada como un indicador para caracterizar la actividad de deslizamiento de tierra y disminuir el efecto negativo que genera hacia las personas u obras civiles.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Dentro de los procedimientos geofísicos empleados, el uso de ondas superficiales ha logrado incorporarse como un método bien evaluado para la caracterización geotécnica del suelo, debido a su eficiencia y simpleza con respecto a la adquisición y procesamientos de los datos. Sin embargo, la teoría que la sustenta y el desarrollo que se encuentra tras ella no es trivial y requiere de un buen entendimiento para su correcta aplicación.

Los resultados obtenidos muestran un comportamiento de tipo estático, que se aplican al momento de la medición, sin mostrar signos significativos de la dinámica del movimiento. Con la aplicación de las mediciones en forma repetitivas, es posible conseguir información de los cambios físicos que sufren las capas de suelos a través del tiempo y que podrían tener relación con la dinámica del deslizamiento, no obstante, la interpretación de los resultados obtenidos sirve solamente como una guía para la delimitación del espacio afectado por este fenómeno y la consecuente realización de una adecuada clasificación para proceder a los trabajos de mitigación a futuro.

Con la aplicación del método Razón Espectral H/V fue posible determinar sin problemas el periodo predominante del suelo en estudio, que se estableció entre 0,27 a 0,24 segundo, sin embargo, los resultados mostrados explican las limitaciones que presenta esta metodología, en el cual, al no existir un marcado contraste de impedancia entre las capas de suelos estudiadas, no es posible identificar zonas de inestabilidad dentro de la estructura y menos determinar con exactitud las variaciones de los espesores de los estratos, que es una de las principales informaciones para entender la distribución de los deslizamientos.

Considerando lo anterior, el parámetro más importante para el éxito de la determinación de zonas de deslizamiento a través de métodos sísmico, es el contraste de impedancia que se produce entre las capas de suelo, en este caso, el contraste de velocidad de ondas de corte se estableció entre 150 – 200 m/s, si bien, no es un holgado contraste, las características intrínsecas del talud fueron claves para la determinación de la delimitación de la masa de suelo a deslizar.

Por otro lado, la topografía puede ser la principal limitante en la realización de las mediciones in-situ, la presencia de zonas inaccesibles en el lugar conduce a realizar una distribución espacial irregular sobre las mediciones, presentando como resultado final, un mapeo deficiente que no representa el comportamiento global de la zona a caracterizar, ya que las variaciones laterales de los estratos cambian a partir de distancias muy pequeñas.

Con respecto a los espectros de velocidad analizados, estos pierden resolución en baja frecuencia, se observaron que para ambos softwares utilizados (Geopsy y SeisImager) los rangos mínimos de frecuencias alcanzados fueron cercanos a 15 Hz, entregando longitud de onda máxima de 7,5 m, profundidad suficiente para la investigación, no obstante, es posible mejorar la resolución en baja frecuencia mediante el uso de una fuente monótona o complementando los resultados con métodos pasivos y/o híbridos (SASW, ReMi) para mejorar la resolución en profundidad y conocer el comportamiento de los estratos más profundos.

En relación a los perfiles de velocidad tanto de  $V_s$  y  $V_p$  en 2D, los perfiles de  $V_s$  alcanzan mejor resolución de las capas más superficiales, logrando entregar mayor información de las variaciones laterales que sufren los estratos, sin embargo, ambas metodologías pierden resolución en profundidad debido a las frecuencias alcanzadas y al tipo de fuente utilizada.

Por otro lado, existe una buena correlación entre los perfiles de  $V_p$  obtenidos de la Tomografía Refracción Sísmica y los datos adquiridos a través de los ensayos SPT, presentando variaciones menores al 10 % en los resultados, no obstante, se reconoce necesario contar con información geotécnica del lugar (sondajes y/o calicatas) como apoyo para los ensayos, con el objetivo de disminuir la incertidumbre que se genera en los valores tanto de profundidad como de velocidad de los perfiles geofísicos.

En fin, las técnicas aplicadas cumplen el objetivo principal propuesto, sin embargo, debido al bajo contraste de impedancia producido entre las capas estudiadas, la técnica no resulta del todo viable. Existen otras técnicas geofísicas que son capaces de identificar con gran exactitud la forma y la profundidad de las líneas de deslizamiento, como lo son la Tomografía eléctrica o GPR. Estos son métodos más costosos, pero tiene a favor la exactitud de sus resultados.

## 5.2 Recomendaciones

Este proyecto de título se limitó a la caracterización de taludes y/o laderas a partir de tres técnicas geofísicas (HVSr, MASW y Tomografía Refracción Sísmica), sin embargo, es recomendable para investigaciones futuras poder explorar otras técnicas geofísicas como lo es Reflexión Sísmica y/o Radar Penetración del Suelo (GPR) para determinar con mayor exactitud la forma y la geometría de la masa deslizante que afecte a la zona a estudiar.

Asimismo, se recomienda poder emplear el uso de fuentes sísmicas de mayor energía con el objetivo de poder ampliar el rango de frecuencia analizado del suelo y poder conocer el comportamiento de los estratos más en profundidad. También es necesario que en el sector el ruido ambiental sea mínimo, ya que éste podría afectar los resultados de las curvas de dispersión, y podría alterar las velocidades de fase, proporcionando resultados erróneos.

Además, considerando que se realizaron 5 *shoot* o mediciones por arreglos geofísicos, se recomienda poder aumentar la cantidad de disparos por arreglos para que no se generen ambigüedades en los resultados de los estratos a estudiar y poder tener la mayor información lateral del comportamiento de los estratos a caracterizar.

Y, por último, tratar de hacer un esfuerzo en poder desarrollar arreglos geofísicos en forma repetitiva, con el objetivo de poder conseguir mayor información de los cambios físicos que sufren los estratos a través del tiempo y ver si estos cambios físicos tienen alguna relación con la dinámica del deslizamiento a futuro.

## 6. REFERENCIAS

Barnhardt W. A. & Kayen R. E. (2000) – Radar structure of earthquake-induced coastal landslides in Anchorage, Alaska. – *Environ. Geosciences*, 7, 38-45.

Bichler A., Bobrowsky P., Best M., Douma M., Hunter J., Calvert T. & Burns R. (2004). – Three-Dimensional Mapping Of A Landslide Using A Multi-Geophysical Approach: The Quesnel Forks Landslide. – *Landslides*, 1 (1), 29-40.

Bruno, F., Marillier, F., (2000). Test of high-resolution seismic reflection and other geophysical techniques on the Boup landslide in the Swiss Alps. *Surv. Geophys.*, 21, 333–348.

Coliente, A. (2010). *Inestabilidad en Laderas y Taludes*, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería.

Delgado J, Lopez Casado C, Giner J, Estevez A, Cuenca A, Molina S (2000) Microtremors as a geophysical exploration tool: applications and limitations. *Pure Appl. Geophys* 157:1445–1462.

Díaz-Segura, E. (2017). Incertidumbres en la estimación del periodo fundamental de terrenos inclinados. *Obras y Proyectos* 21, 38-44.

Ferrucci F., Amelio M., Sorriso-Valvo M. & Tansi C. (2000). – Seismic prospecting of a slope affected by deep-seated gravitational slope deformation: The Lago Sackung, Calabria, Italy. – *Eng. Geol.*, 57, 53-64.

Grit, M., Kanli, A. (2016). Integrated Seismic Survey for Detecting Landslide Effects on High Speed Rail Line at Istanbul-Turkey. *Open Geosci*; 8:161-173.

Heincke, B., Maurer, H., Green, A. G., Willenberg, H., Spillmann, T. and Burlini, L., (2006). Characterizing an unstable mountain slope using shallow 2D and 3D seismic tomography, *Geophysics*, 71, 6, B241-B256. doi: 10.1190/1.2338823.

Humire, F., (2013). *Aplicación de Métodos Geofísicos Basados en Ondas Superficiales para la Caracterización Sísmica de Suelos. Aplicación a la Microzonificación Sísmica del Norte y Poniente de Santiago.* Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Jeannin, M., Garambois, S., Gregoire, S., Jongmans, D. (2006). Multi-configuration GPR measurements for geometrical fracture characterization in limestone cliffs (Alps). *Geophysics*.

Jongmans, D., Bièvre, G., Renalier, F., Schwartz, S., Beaurez, N., Orengo, Y., (2009). Geophysical Investigation of a Large Landslide in Glaciolacustrine Clays in the Trièves Area (French Alps). *Engineering Geology* 109: 45-56.

Jongmans, D., Garambois, S., (2007). Geophysical investigation of landslides: a review. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 178, 2, 101–112.

Konno, K., and Ohmachi, T. (1998). Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Components of Microtremors, *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 228-241.

Lachet, C., D. Hatzfel, P. Y. Bard, N. Theodulidis, C. Papaionnou, and A. Savvaidis (1994). Site effects and micro-zonation in the city of Thessaloniki (Greece) comparison of different approaches. *Bull Seism. Soc. Am.*

López, J., Mejía, J., Danilo, N. (2008). *Aplicación del método de Refracción Sísmica para la determinación de Velocidades de ondas P*, Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Ingeniería Civil.

Mauritsch, J. H., Seiberl, W., Arndt, R., Römer, A., Schneiderbauer, K., Sendlhofer, G. P., (2000). Geophysical investigations of large landslides in the Carnic Region of southern Austria. *Eng. Geol.*, 56, 373-388.

Méric, O., Garambois, S., Cadet, H., Malet, J-P., Guéguen, P., Jongmans, D., (2007). Seismic noise based methods for soil landslide characterization. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 178, 2, 137-148.



Méric, O., Garambois, S., Jongmans, D., Wathelet, M., Chatelain, J.-L., Vengeon, J.-M. (2005). Application of geophysical methods for the investigation of the large gravitational mass movement of Séchilienne, France.

Mohamed, A., Abu El Ata, A., Abdel, F., Taha, M. (2013). Site specific shear wave velocity investigation for geotechnical engineering applications using seismic refraction and 2D multi-channel analysis of surface waves. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2(1), 88–101.

Nakamura Y. (1989). – A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on ground surface. – *Quar. Report. Railway. Tech. Res. Institute*, 30, 25-33.

Ordoñez, J., Lermo J., Ordoñez, J., Martínez, J., Angulo, J. (2012). Correlación entre el número de golpes (N) del ensayo de penetración estándar y la velocidad de ondas de corte (Vs) para las arcillas de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.

Roch, K.H., Schwatal, B. and Bruckl, E. (2006). Potentials of monitoring rock fall hazards by GPR: considering as example the results of Salzburg. *Landslides*, 3, 87-94.

SeisImager/SW<sup>TM</sup> Manual v.3.0 (2009). Windows Software for Analysis of Surface Waves.

Vergara, F. (2011). Caracterización de fallas y estructuras someras usando tomografía de refracción sísmica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra.

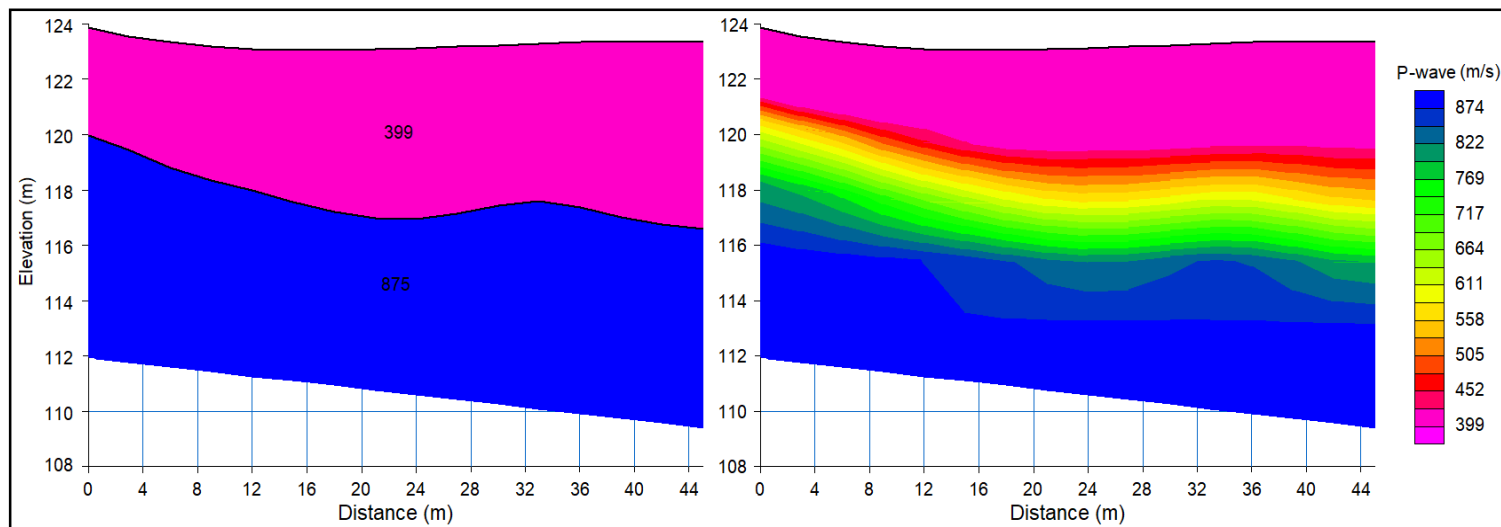
**ANEXOS**

## INDICE ANEXO

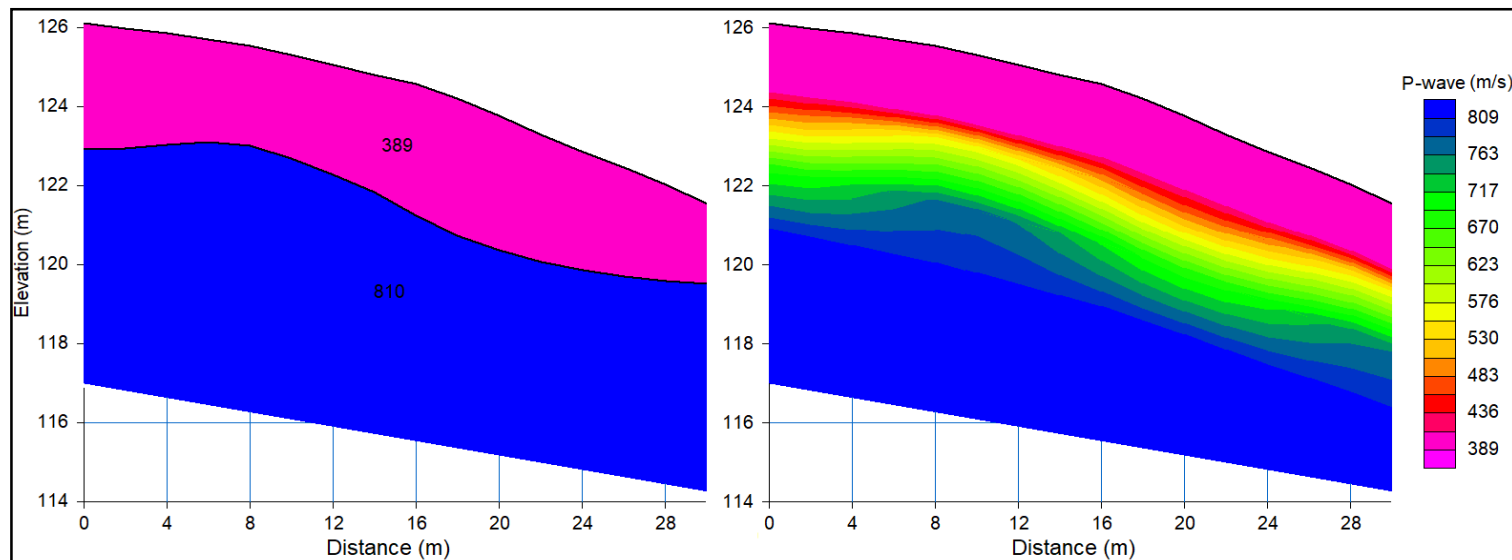
1.	ANEXO A: Resultados Tomografía Refracción Sísmica .....	44
2.	ANEXO B: Resultados Inversión de Velocidad MASW .....	48
3.	ANEXO C: Resultados Análisis Razón Espectral H/V .....	52

## 1. ANEXO A: Resultados Tomografía Refracción Sísmica

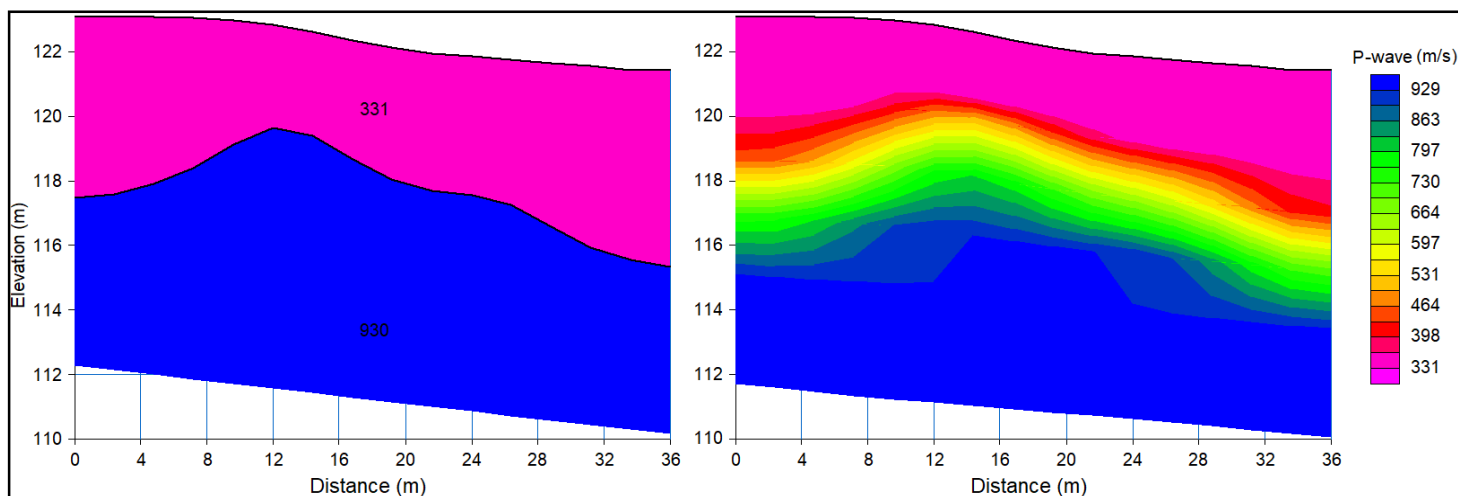
A continuación, se presentarán los resultados obtenidos de la metodología de Tomografía Refracción Sísmica a partir del Módulo Plotrefa.



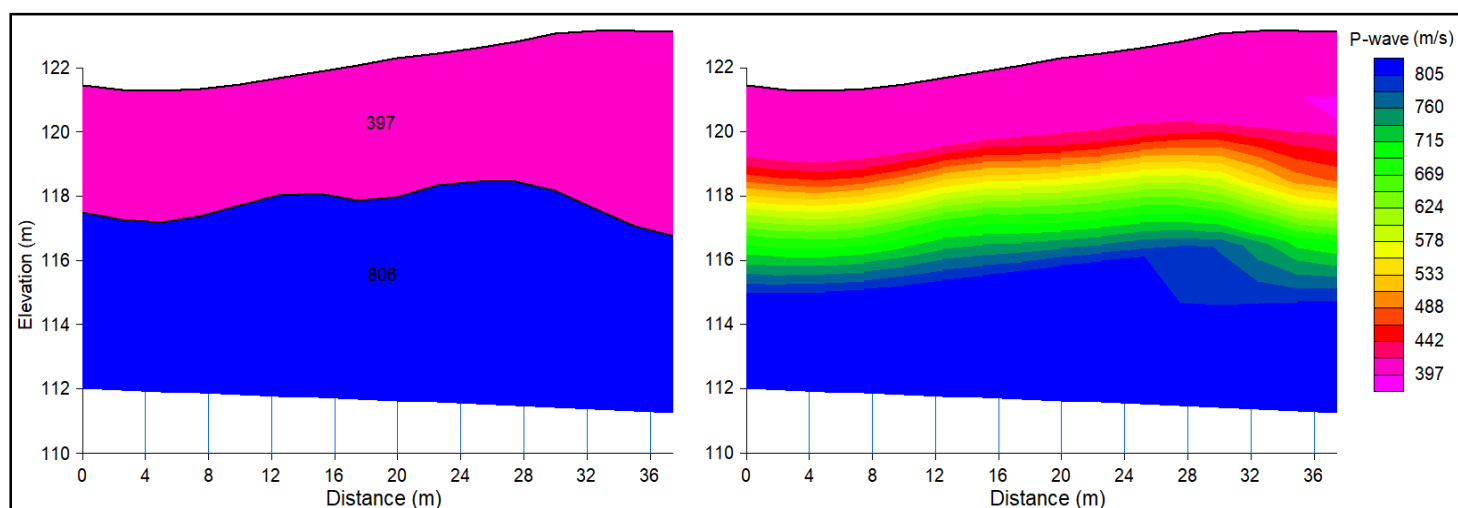
**Figura A1:** Perfil Vp Medición N° 1. a) Refracción Sísmica. b) Tomografía Refracción Sísmica.



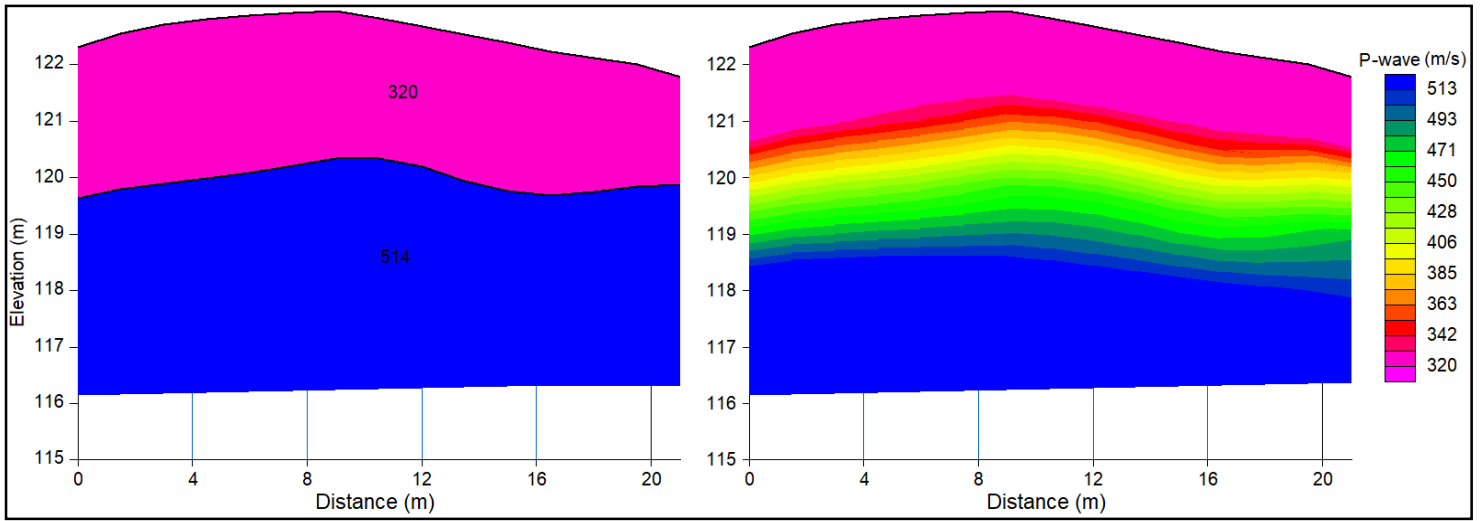
**Figura A2:** Perfil Vp Medición N° 2. a) Refracción Sísmica. b) Tomografía Refracción Sísmica.



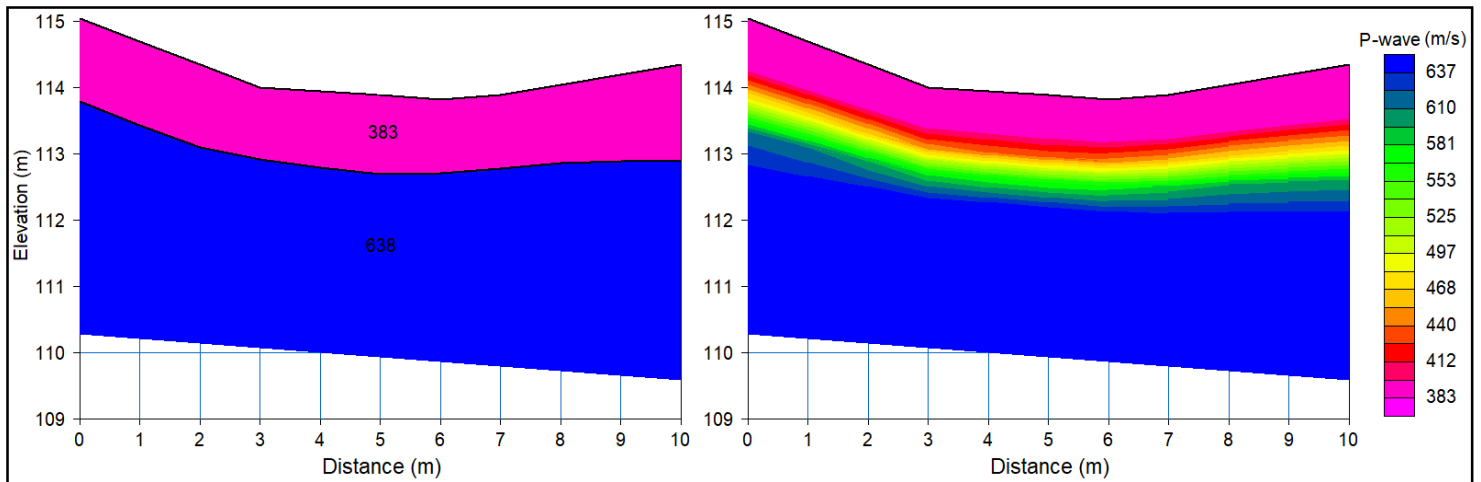
**Figura A3:** Perfil Vp Medición N° 3. a) Refracción Sísmica. b) Tomografía Refracción Sísmica.



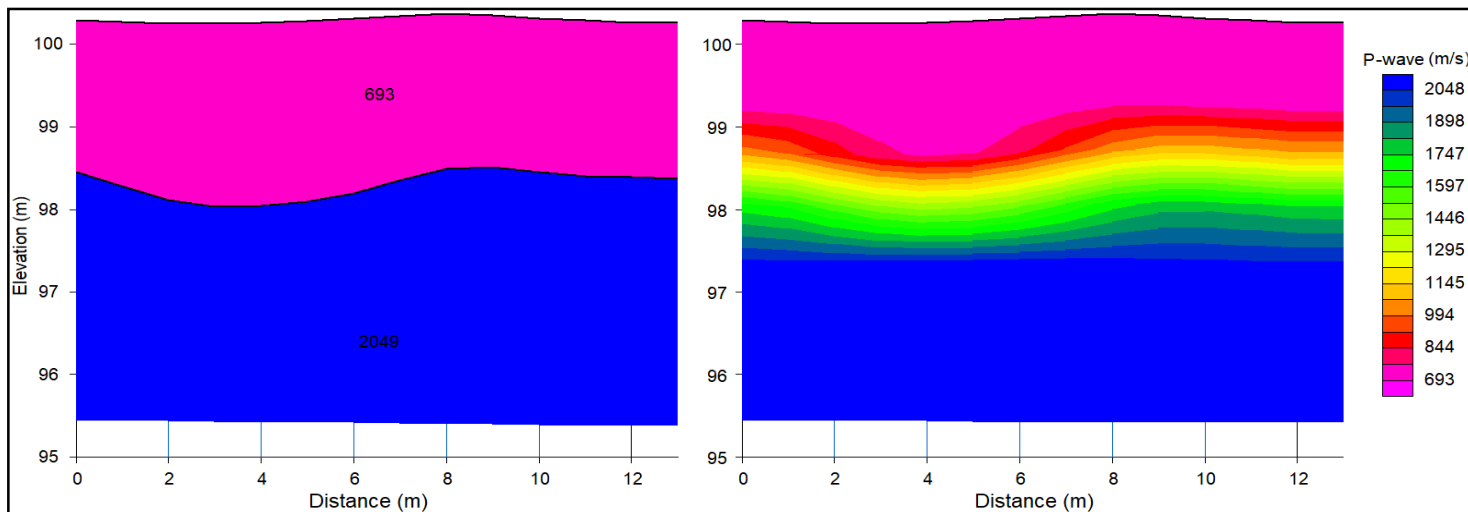
**Figura A4:** Perfil Vp Medición N° 4. a) Refracción Sísmica. b) Tomografía Refracción Sísmica.



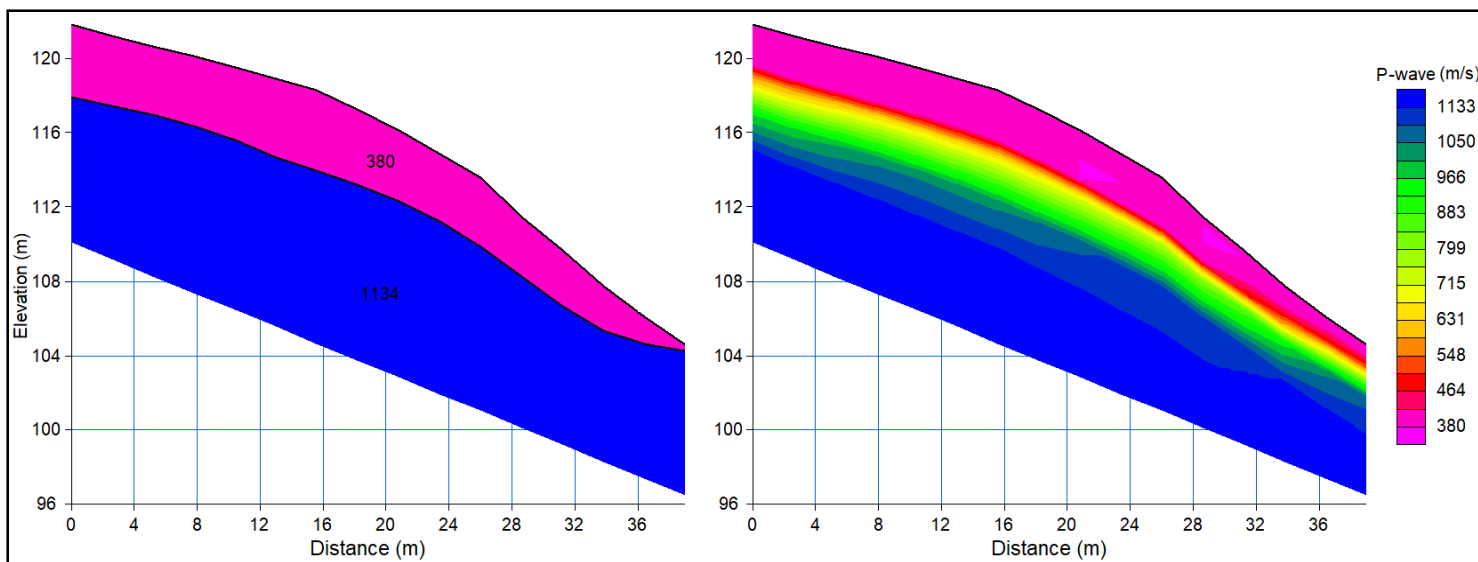
**Figura A5:** Perfil Vp Medición N° 5. a) Refracción Sísmica. b) Tomografía Refracción Sísmica.



**Figura A6:** Perfil Vp Medición N° 6. a) Refracción Sísmica. b) Tomografía Refracción Sísmica.



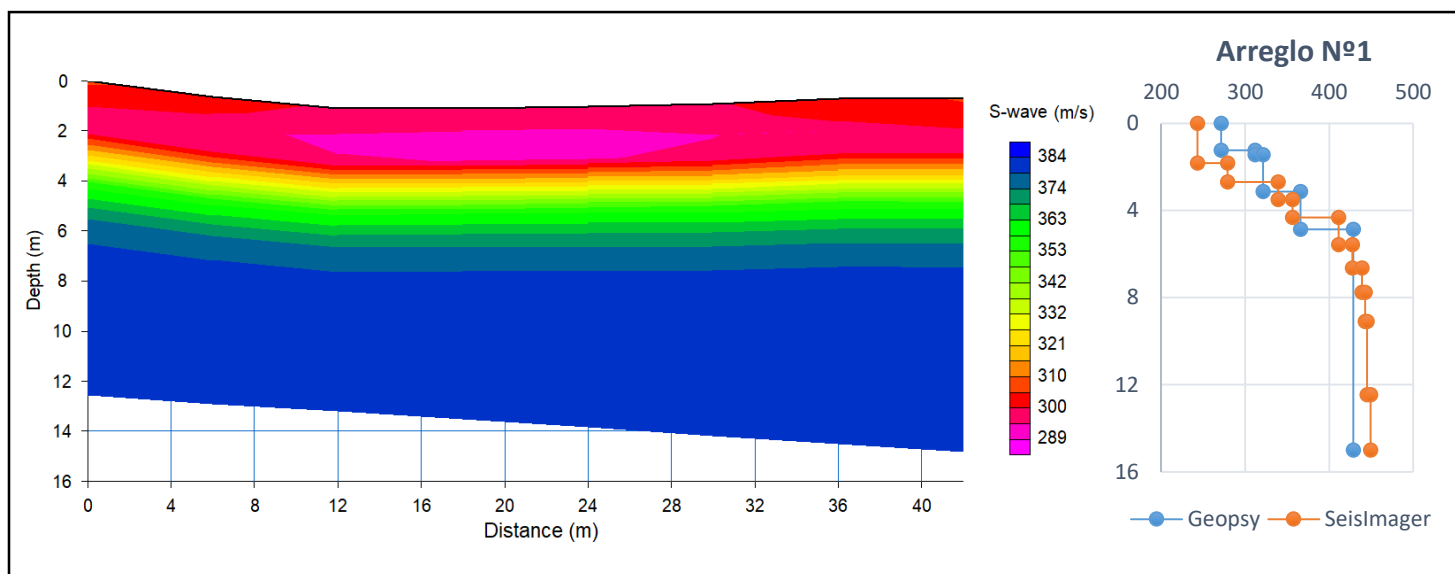
**Figura A7:** Perfil Vp Medición N° 7. a) Refracción Sísmica. b) Tomografía Refracción Sísmica.



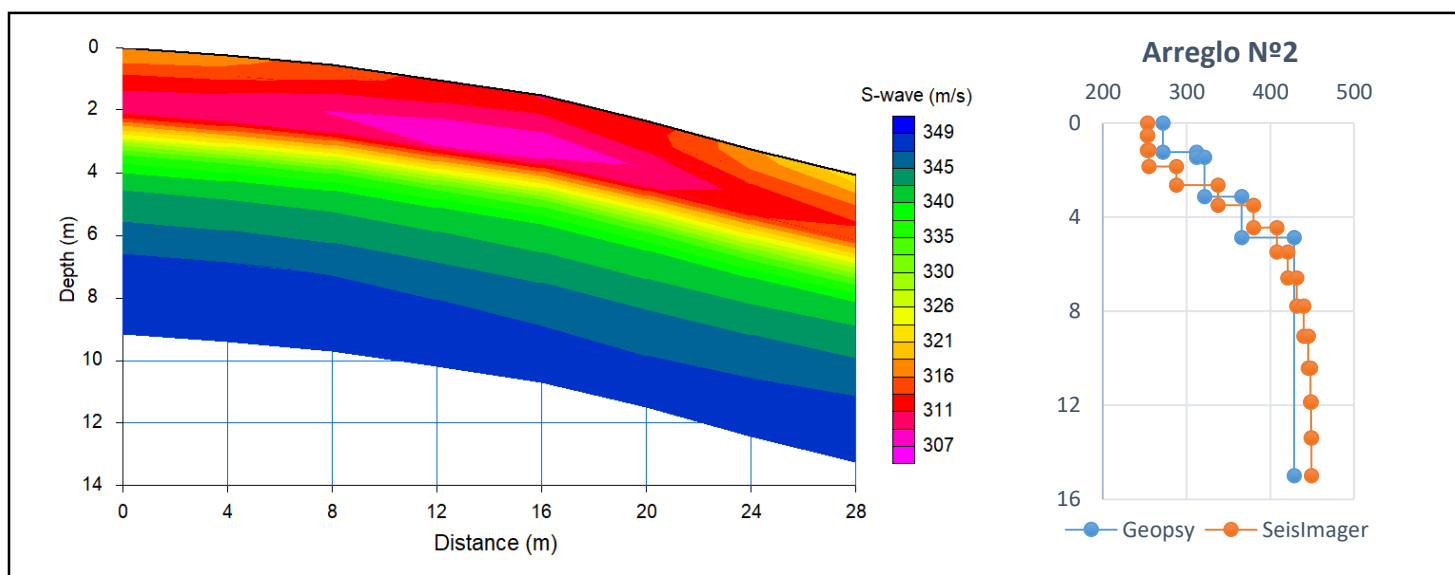
**Figura A8:** Perfil Vp Medición N° 8. a) Refracción Sísmica. b) Tomografía Refracción Sísmica.

## 2. ANEXO B: Resultados Inversión de Velocidad MASW

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos de la metodología de Inversión de Velocidad MASW a través de modelos 2D generados con el módulo GeoPlot y perfiles de 1D generados con los módulos Geopsy y SeisImager.

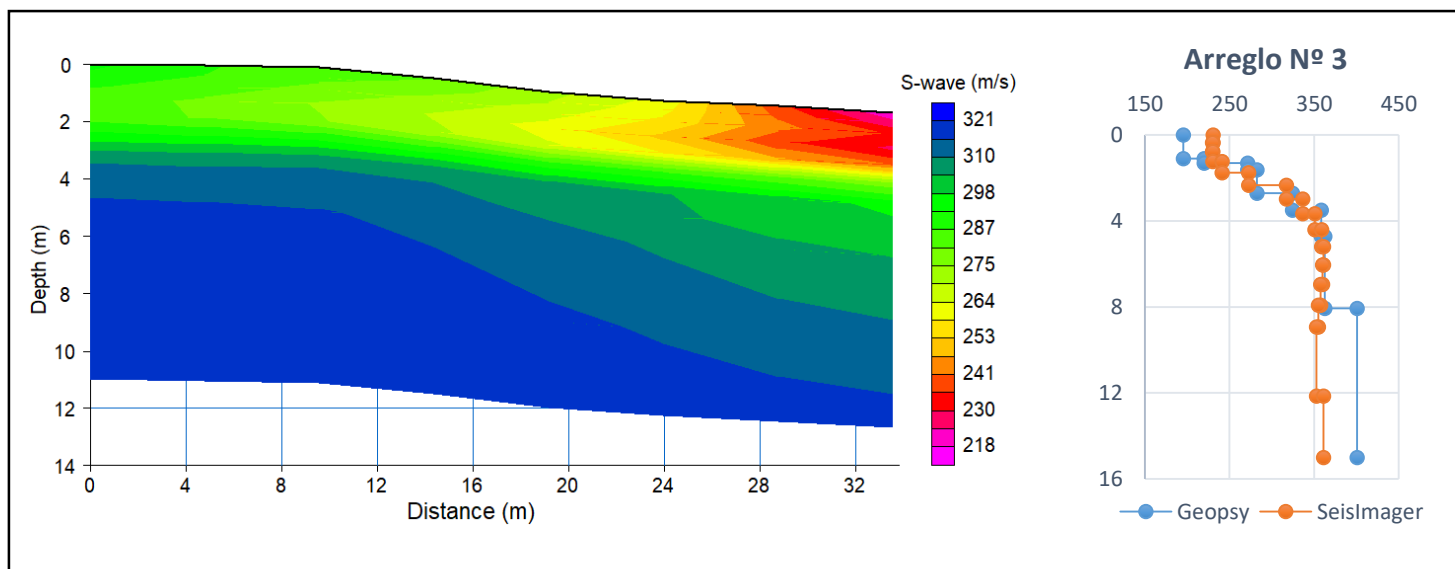


**Figura B1:** Perfiles Vs Medición N° 1. a) Modelo 2D a través de GeoPlot. b) Comparación Vs 1D.

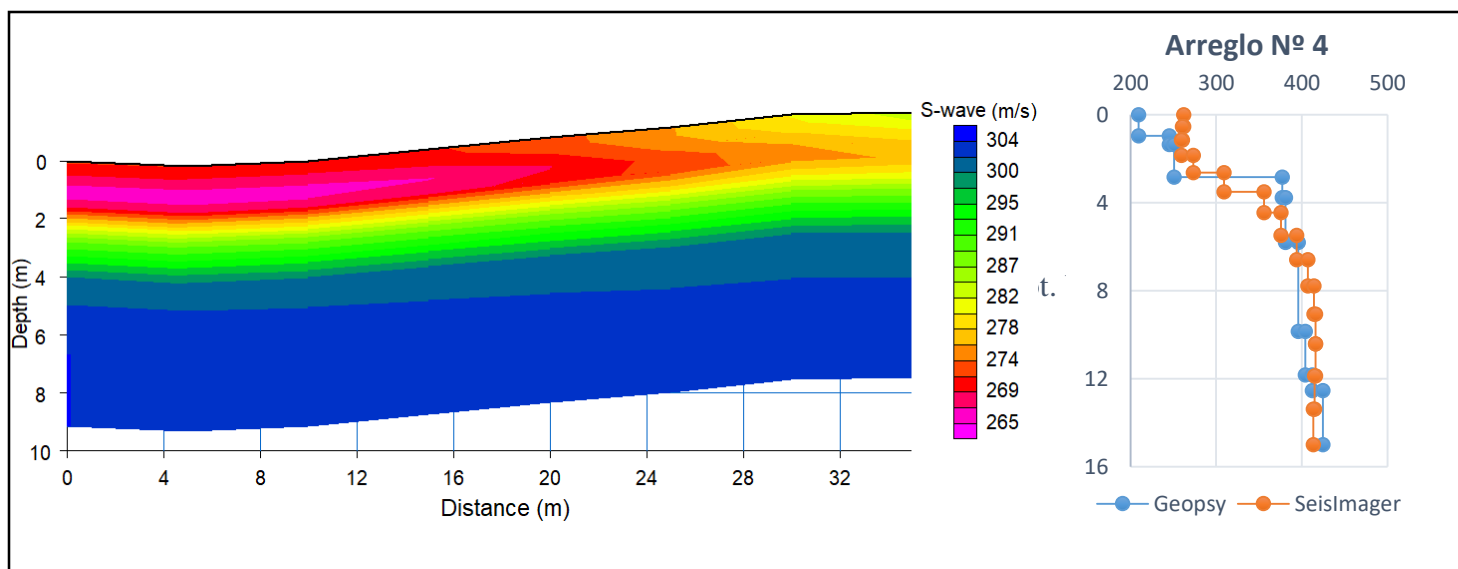


**Figura B2:** Perfiles Vs Medición N° 2. a) Modelo 2D a través de GeoPlot. b) Comparación Vs 1D.

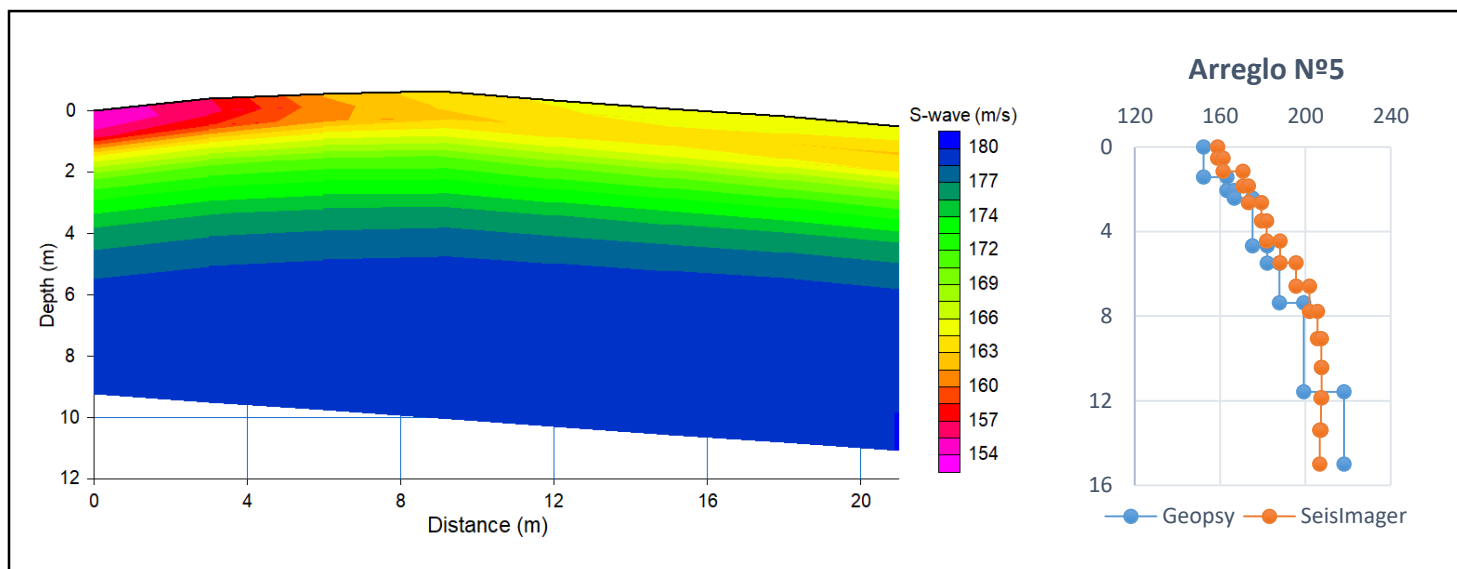




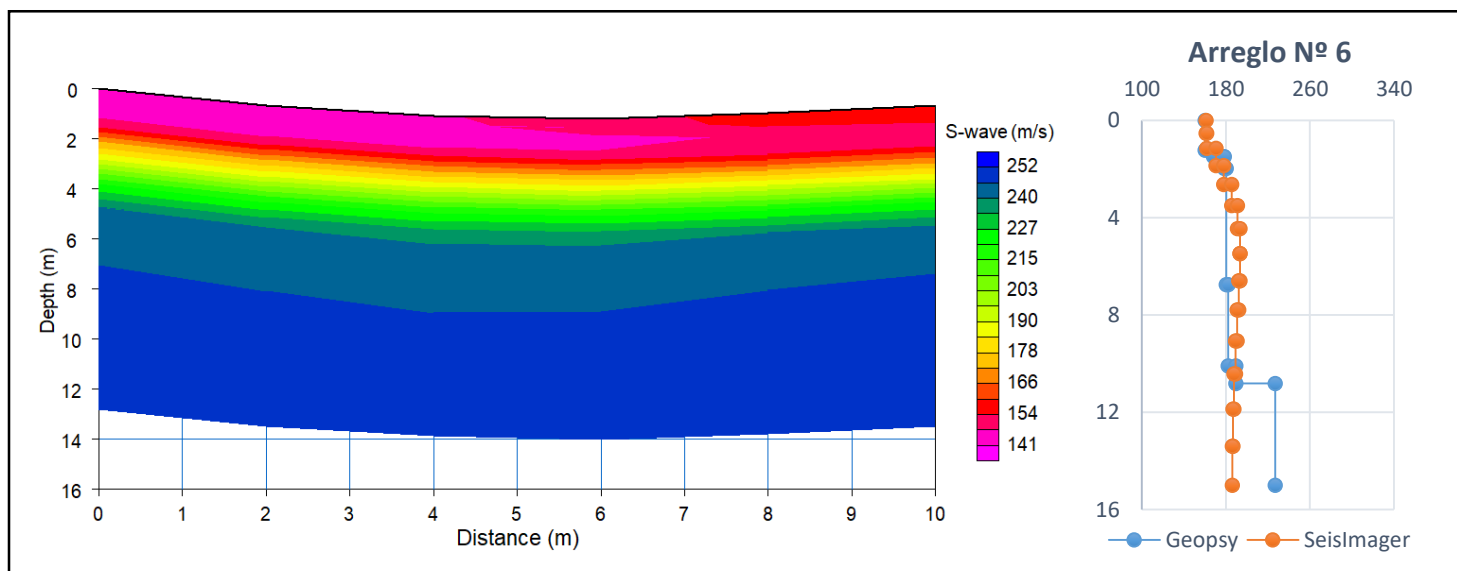
**Figura B3:** Perfiles Vs Medición N° 3. a) Modelo 2D a través de GeoPlot. b) Comparación Vs 1D.



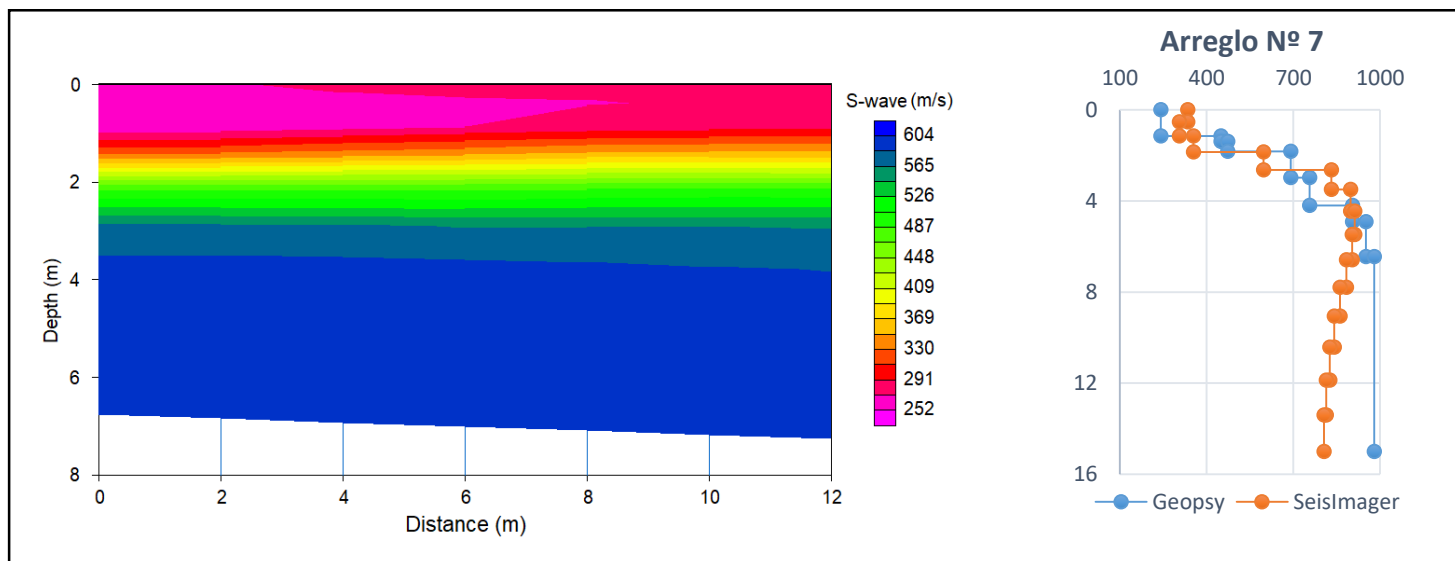
**Figura B4:** Perfiles Vs Medición N° 4. a) Modelo 2D a través de GeoPlot. b) Comparación Vs 1D.



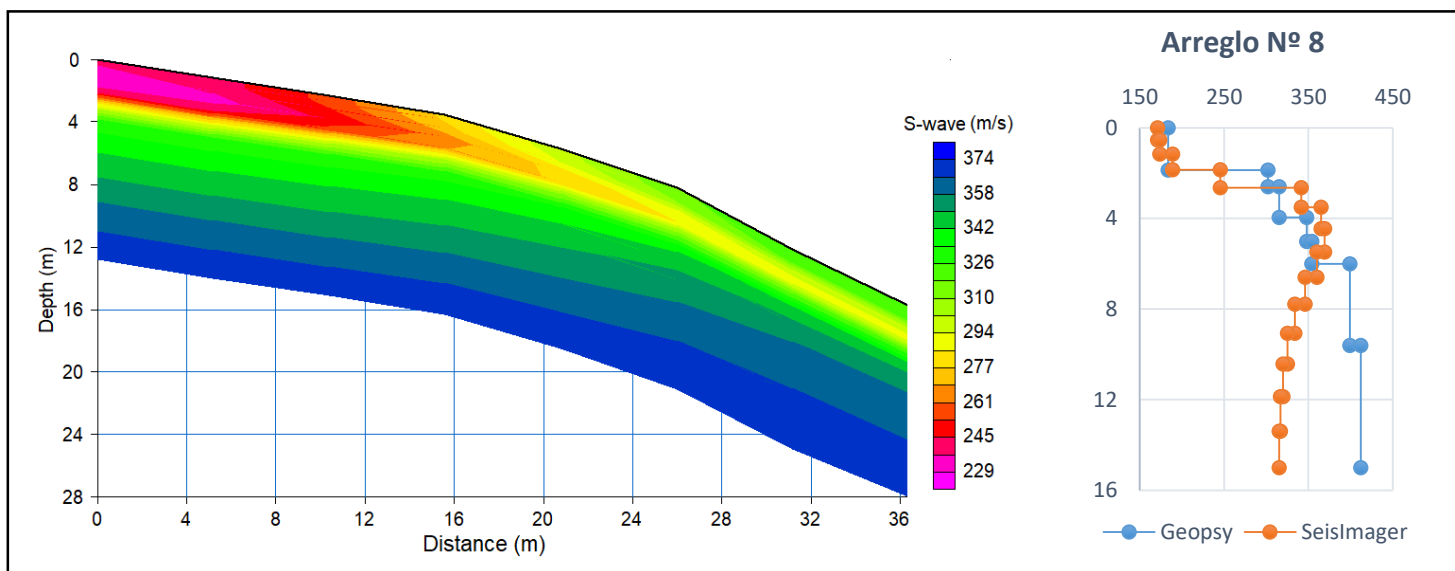
**Figura B5:** Perfiles Vs Medición N° 5. a) Modelo 2D a través de GeoPlot. b) Comparación Vs 1D.



**Figura B6:** Perfiles Vs Medición N° 6. a) Modelo 2D a través de GeoPlot. b) Comparación Vs 1D.



**Figura B7:** Perfiles Vs Medición N° 7. a) Modelo 2D a través de GeoPlot. b) Comparación Vs 1D.



**Figura B8:** Perfiles Vs Medición N° 8. a) Modelo 2D a través de GeoPlot. b) Comparación Vs 1D.

### 3. ANEXO C: Resultados Análisis Razón Espectral H/V

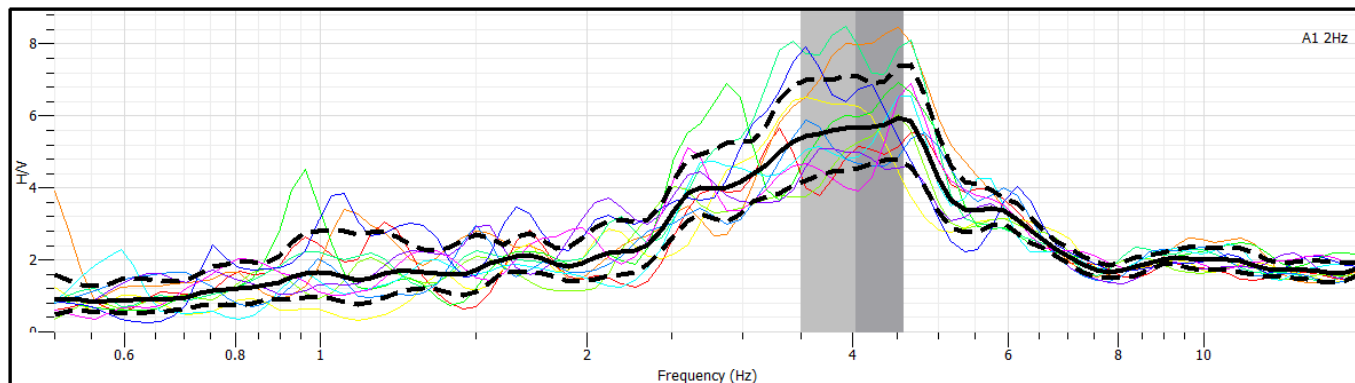


Figura C3: Espectro de Frecuencia H/V medición A1 con sismógrafo de 2 Hz.

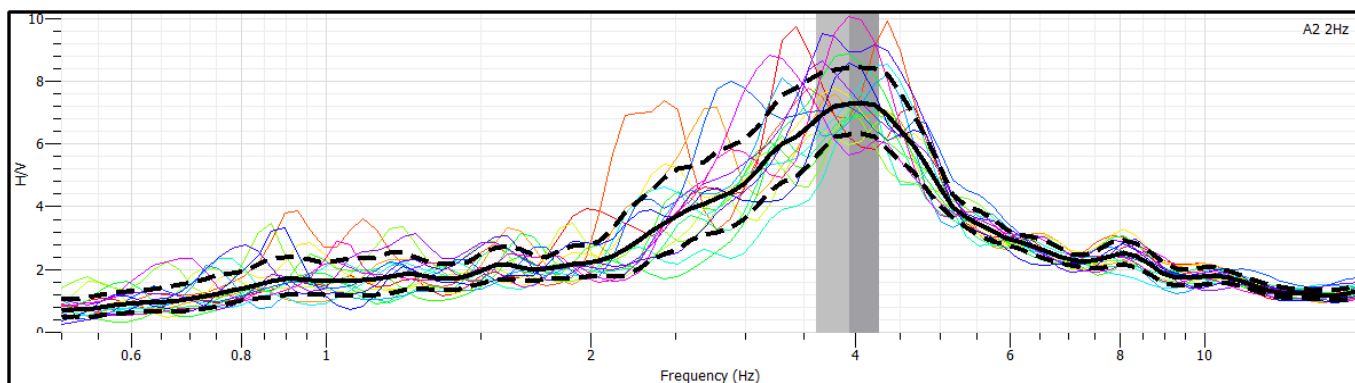


Figura C3: Espectro de Frecuencia H/V medición A2 con sismógrafo de 2 Hz.

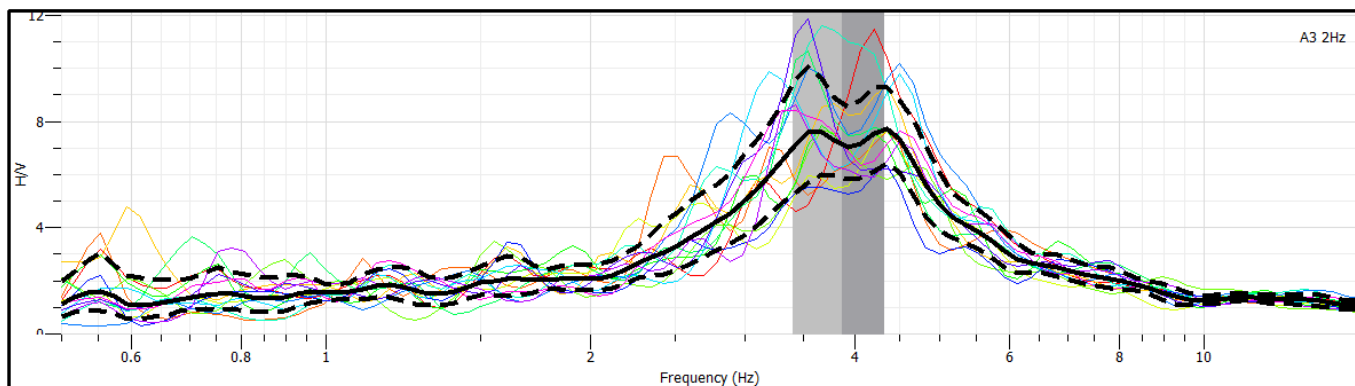
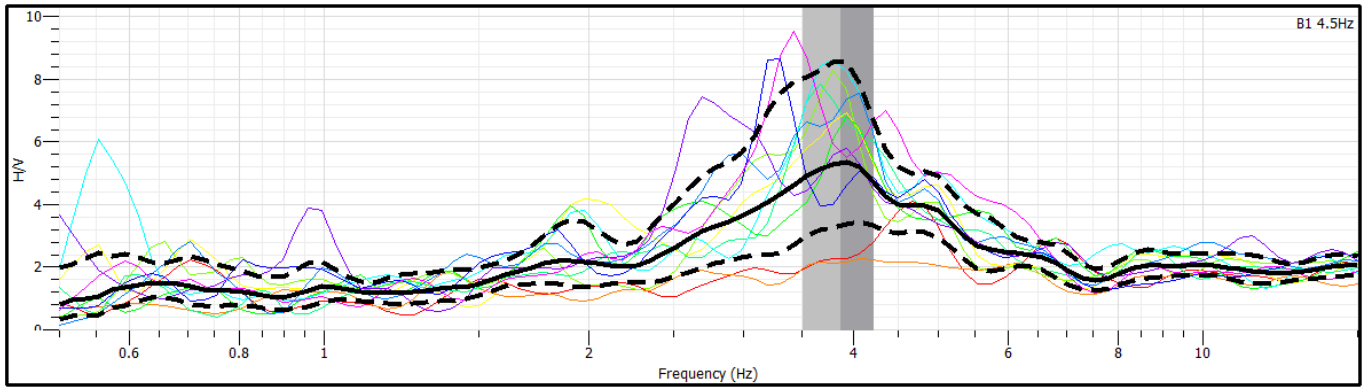
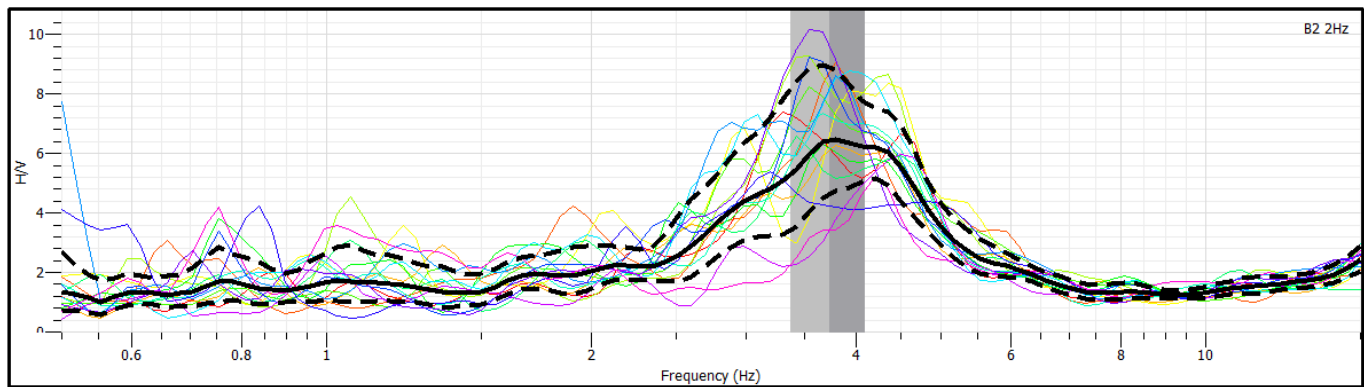


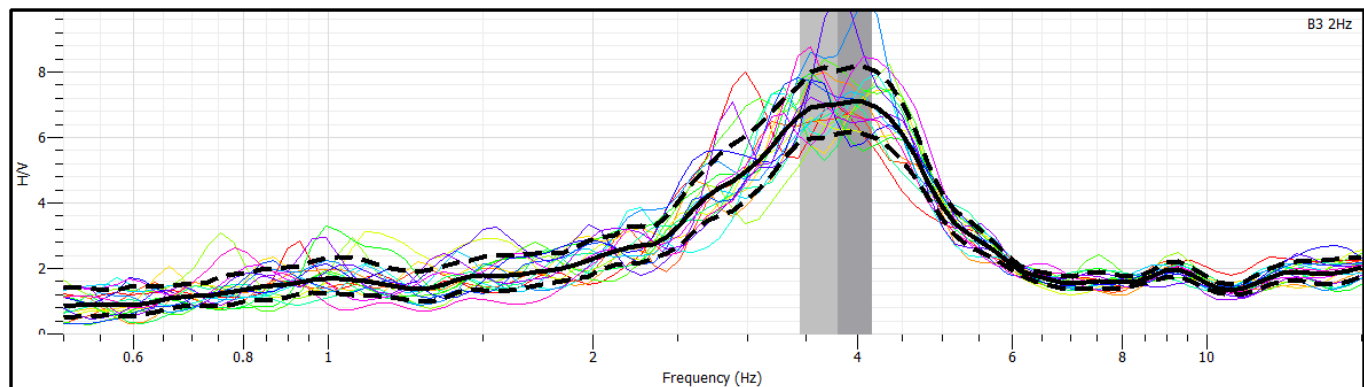
Figura C3: Espectro de Frecuencia H/V medición A3 con sismógrafo de 2 Hz.



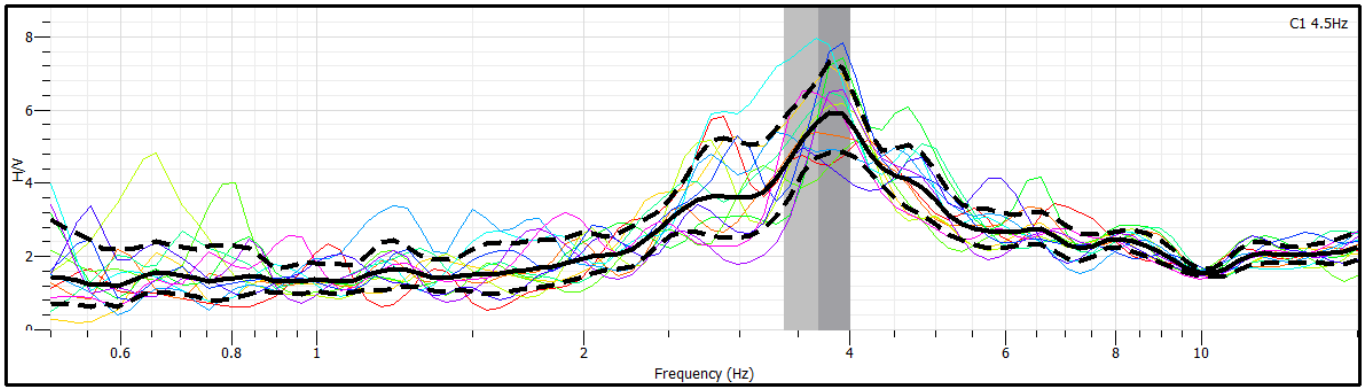
**Figura C6:** Espectro de Frecuencia H/V medición B1 con sismógrafo de 4,5 Hz.



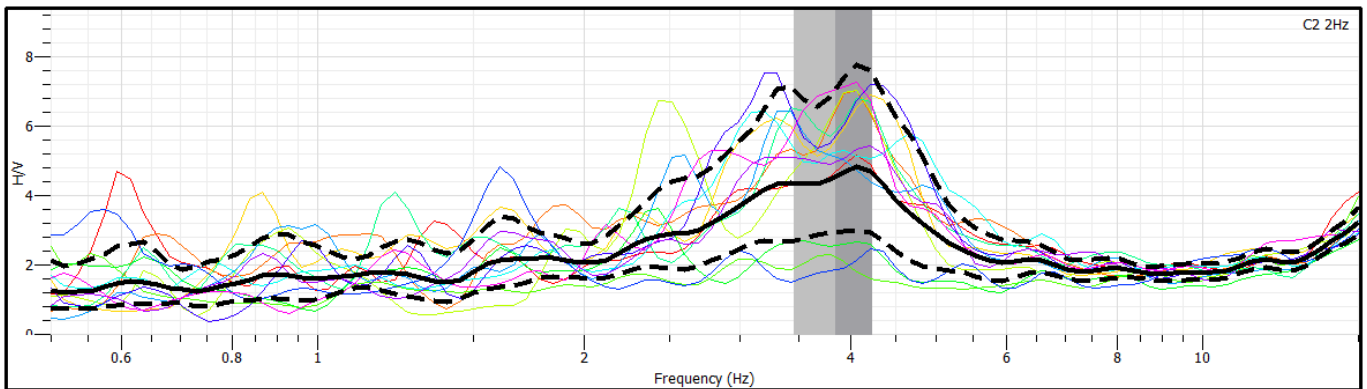
**Figura C6:** Espectro de Frecuencia H/V medición B2 con sismógrafo de 2 Hz.



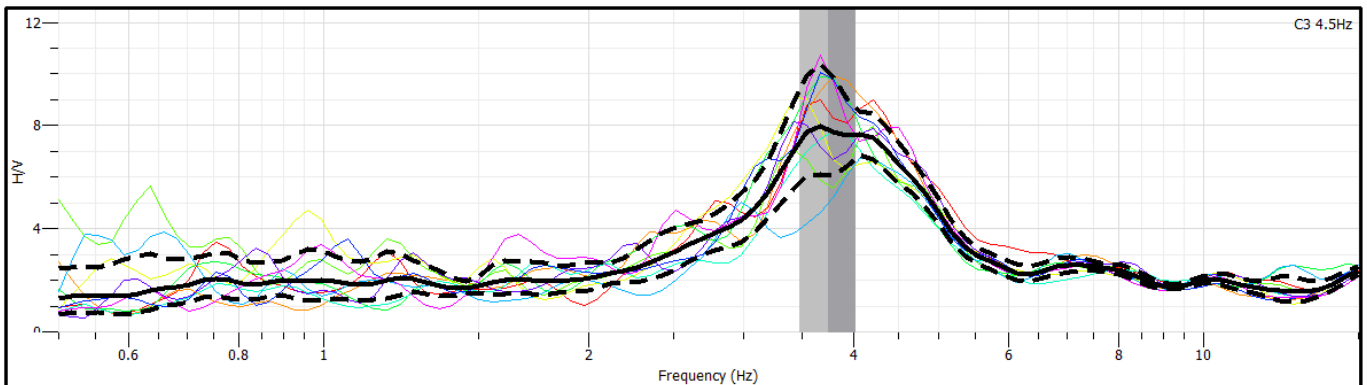
**Figura C6:** Espectro de Frecuencia H/V medición B3 con sismógrafo de 2 Hz.



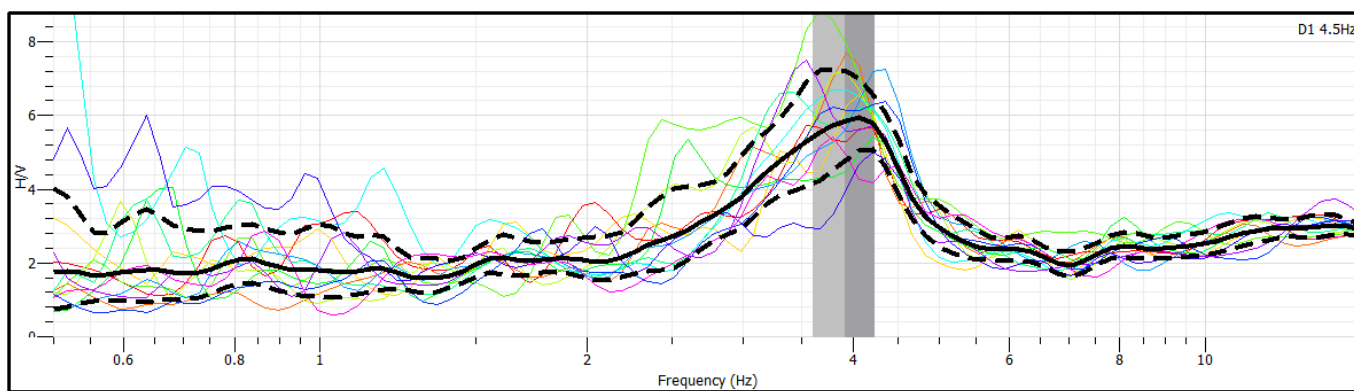
**Figura C9:** Espectro de Frecuencia H/V medición C1 con sismógrafo de 4,5 Hz.



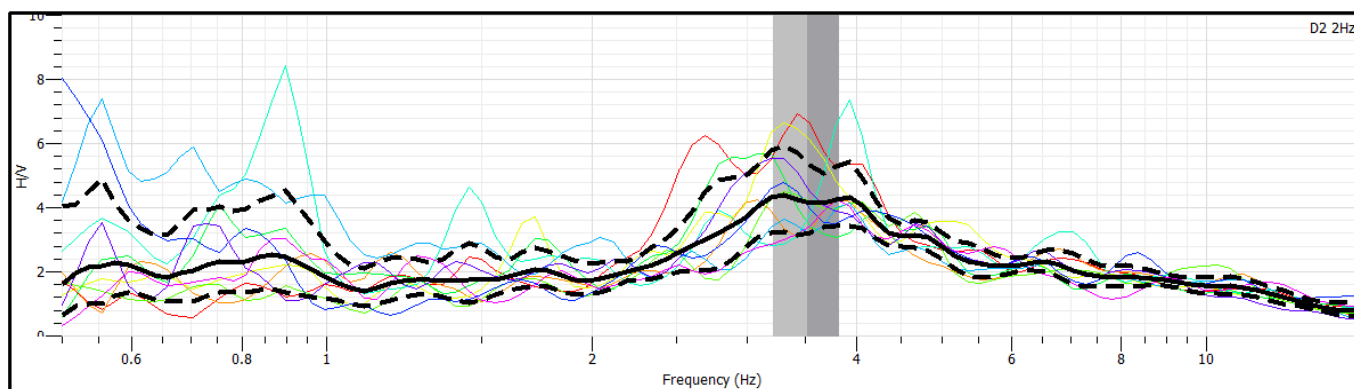
**Figura C9:** Espectro de Frecuencia H/V medición C2 con sismógrafo de 2 Hz.



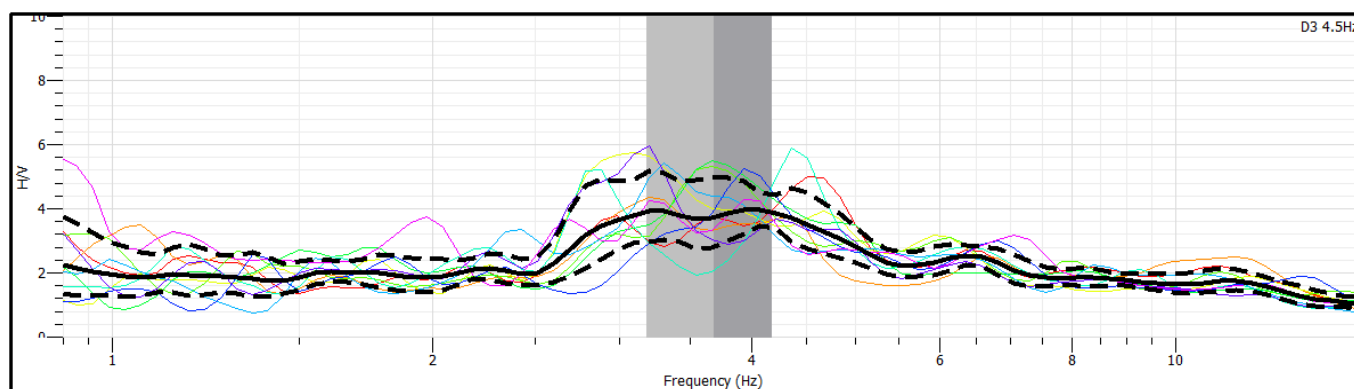
**Figura C9:** Espectro de Frecuencia H/V medición C3 con sismógrafo de 4,5 Hz.



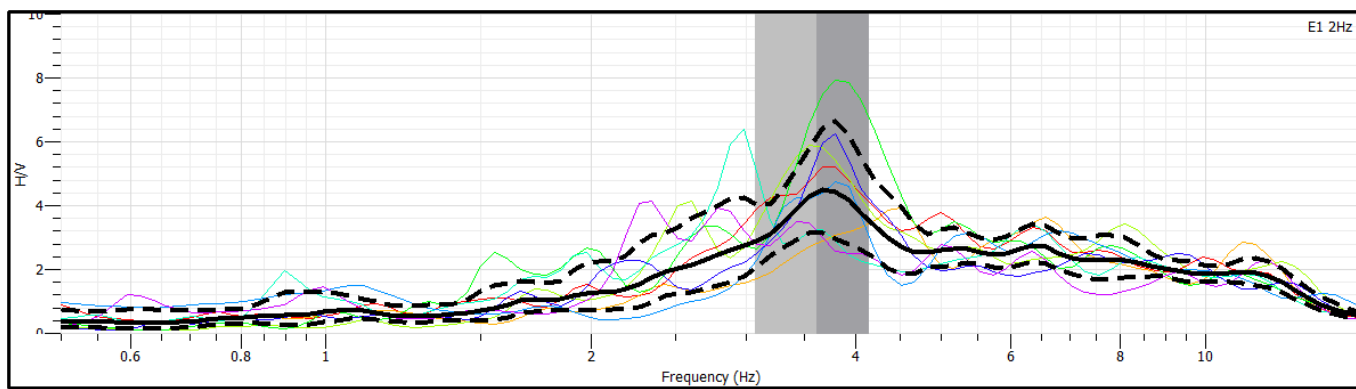
**Figura C12:** Espectro de Frecuencia H/V medición D1 con sismógrafo de 4,5 Hz.



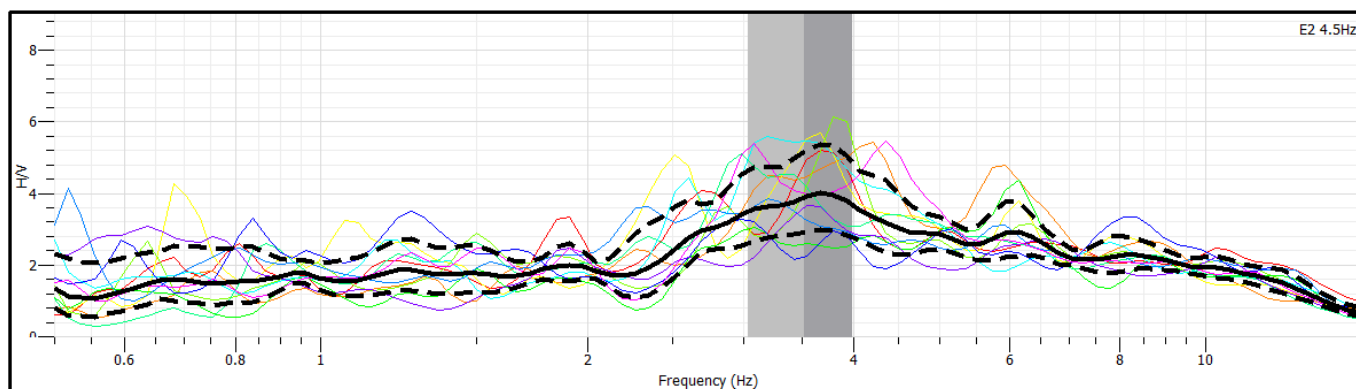
**Figura C12:** Espectro de Frecuencia H/V medición D2 con sismógrafo de 2 Hz.



**Figura C12:** Espectro de Frecuencia H/V medición D3 con sismógrafo de 4,5 Hz.



**Figura C14:** Espectro de Frecuencia H/V medición E1 con sismógrafo de 2 Hz.



**Figura C14:** Espectro de Frecuencia H/V medición E2 con sismógrafo de 4,5 Hz.