

## FACULTAD DE INGENIERÍA INGENIERÍA CIVIL SEDE CONCEPCIÓN

# "CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL PERFIL DE VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE OBTENIDO MEDIANTE MÉTODOS DE ONDAS SUPERFICIALES: CASOS PRÁCTICOS EN ARENA BIOBÍO"

Tesis para optar al Título en Ingeniería Civil

Profesor tutor: M.Sc. Francisco Acuña Olate Estudiante: Eduardo Andrés Valdebenito Correa

© Eduardo Andrés Valdebenito Correa. Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento siempre y cuando se incluya cita bibliográfica del documento.

Concepción, Chile 2025

## HOJA DE CALIFICACIÓN

En	, el de	de los abajo firmantes o	lejan
constancia que e	l (la) estudiante		de la
carrera de		ha aprobado la tesis para op	tar al
título de			con
nota de			

Profesor Evaluador

Profesor Evaluador

Profesor Evaluador

#### DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia y amigos, quienes me han brindado su apoyo en cada meta que me he propuesto.

#### AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento al profesor guía, Francisco Acuña, por su compromiso y dedicación, así como por la valiosa experiencia adquirida a lo largo de este proceso, desde la constante orientación académica hasta las salidas a terreno.

A Javiera Padilla, por su apoyo y orientación brindada en esta experiencia universitaria, además por la conexión con Matías Petzold, con quien se colaboró en este trabajo.

Mención especial a mi compañera y amiga Ignacia, por el apoyo y paciencia durante todos los años de carrera.

A Fernanda, por su cariño y contención a lo largo de este proceso, brindándome su apoyo incondicional.

## TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	3
1.1. Motivación y justificación del trabajo	3
1.2. Hipótesis de trabajo	4
1.3. Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4. Metodología de trabajo	5
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	6
2.1. Ondas sísmicas	6
2.2. Métodos de ondas superficiales (MOS)	7
2.3. Curva de dispersión	10
2.3.1. Spatial auto-correlation (SPAC)	10
2.3.2. Frequency – Wavenumber (FK)	11
2.3.3. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)	12
2.4. Incertidumbre en mediciones de Vs	12
2.5. Análisis de Vs considerando incertidumbre	14
2.5.1. SWprocess (Vantassel & Cox, 2022)	15
2.5.2. SWinvert (Vantassel & Cox, 2021b)	17
CAPÍTULO III ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO E INVERSIÓN DE	<b>DATOS</b> 20
3.1. Sitio 1: San Pedro de la Paz	21
3.1.1. Antecedentes geotécnicos	21
3.1.2. Trabajo en terreno	22
3.1.3 Procesamiento e inversión convencional	24
3.1.4 Procesamiento e inversión considerando incertidumbre	32
3.1.4.1 SWprocess, Vantassel & Cox (2022)	32
3.1.4.2 SWinvert, Vantassel & Cox (2021b)	37
3.2 Sitio 2: Coronel	42

3.2.1. Adquisición de datos	42
3.2.2. Procesamiento e inversión convencional	43
3.2.3. Procesamiento e inversión considerando incertidumbre	44
3.3 Sitio 3: Talcahuano	47
3.3.1. Adquisición de datos	47
3.3.2. Procesamiento e inversión convencional	48
3.3.3. Procesamiento e inversión considerando incertidumbre	50
CAPÍTULO IV RESULTADOS	53
4.1. Sitio 1: San Pedro de la Paz	53
4.2. Sitio 2: Coronel	55
4.2. Sitio 3: Talcahuano	57
CAPÍTULO V Conclusiones	59
5.1. Conclusiones	59
5.2. Trabajos futuros	61
REFERENCIAS	62
ANEXO 1: Antecedentes FUCHIGE	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Deformaciones producidas por ondas superficiales	6
Figura 2: Etapas de aplicación MOS	7
Figura 3: Esquema flujo de trabajo SWprocess	15
Figura 4: Esquema flujo de trabajo SWinvert	17
Figura 5: Esquema de análsis de datos	20
Figura 6: Sitios de medición	20
Figura 7: Microzonificación sísmica San Pedro de la Paz	22
Figura 8: Ensayos geofíscos	23
Figura 9: Esquema de trabajo procesamiento convencional	24
Figura 10: Dispersión de 6 registros activos	25
Figura 11: Apilamiento en frecuencia	26
Figura 12: Apliamiento en tiempo	26
Figura 13: Resultado apilamiento en tiempo	27
Figura 14: Filtrado registro pasivo	27
Figura 15: Curva de dispersión pasiva	28
Figura 16: Tendencia perfil según $λ/3$ y $λ/2$	29
Figura 17: Esquema trabajo de inverisón convencional	29
Figura 18: Perfiles de Vs	30
Figura 19: Comparación sitio 1	31
Figura 20: Esquema procesamiento pasivo con SWprocess	32
Figura 21: Procesamiento registros activos con fuente a 6 m	33
Figura 22: Procesamiento registros activos con fuente a 9 m	34
Figura 23: Procesamiento pasivo con uso de transformada FDBF	34
Figura 24: Procesamiento pasivo con uso de transformada FK	35

Figura 25: Esquema resumen procesamiento pasivos en SWprocess	35
Figura 26: Dipsersión pasiva	36
Figura 27: Esquema resumen SWprocess	36
Figura 28: Dispersión sitio 1	36
Figura 29: Recorte interactivo en frecuencia	37
Figura 30: Cálculo dispersión experimental	37
Figura 31: Curva de dispersión con incertdiumbre	38
Figura 32: Dispersión de misfit por parametrización	39
Figura 33: Ajuste de cada curva de dispersión	39
Figura 34: Relación entre perfiles de Vs	40
Figura 35: Relación entre perfiles de Vs no rechazados y su incertidumbre	41
Figura 36: Perfiles de Vs	43
Figura 37: Apilado de señales activas con fuente a 9 m	44
Figura 38:Dispersión de datos pasivos	45
Figura 39: Cálculo dispersión experimental	45
Figura 40: Relación entre perfiles de Vs y su incertidumbre	46
Figura 41: Relación entre perfiles no rechazados de Vs y su incertidumbre	47
Figura 42: Recorte de Mapa Geológico de Chile	48
Figura 43: Perfiles de Vs	49
Figura 44: Apilado de señales activas con fuente a 6 m	50
Figura 45: Dispersión de datos pasivos	50
Figura 46: Cálculo dispersión experimental	51
Figura 47: Relación entre perfiles de Vs y su incertidumbre	51
Figura 48: Relación entre perfiles no rechazados de Vs y su incertidumbre	52
Figura 49: Comparación entre sondaje, perfiles de Vs e incertidumbre	53
Figura 50: Incertidumbre en perfil de Vs y mejores 100 perfiles	54

Figura 51: Comparación entre sondaje, perfiles de Vs e incertidumbre	.55
Figura 52: Incertidumbre en perfil de Vs y mejores 100 perfiles	.56
Figura 53: Relación entre perfiles de Vs e incertidumbre	.57
Figura 54: Incertidumbre en perfil de Vs y mejores 100 perfiles	.58
Figura 55: Ubicación sitio 1 y mediciones FUCHIGE	.66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación sísmica del terreno de fundación	8
Tabla 2: Valores referenciales de la velocidad de la onda de corte	9
Tabla 3: Estratigrafía sondaje 30 m	21
Tabla 4: Rango de frecuencia y longitud de onda	28
Tabla 5: Parámetros de inversión	30
Tabla 6: Información parametrizaciones	31
Tabla 7: Información de perfil de Vs seleccionado	32
Tabla 8: Vs30 de parametrizaciones LN y LR	40
Tabla 9: Parametrizaciones seleccionadas de SWinvert	41
Tabla 10: Estratigrafía sondaje	42
Tabla 11: Información perfil de Vs seleccionado	44
Tabla 12: Parametrizaciones seleccionadas de SWinvert	46
Tabla 13: Información perfil de Vs seleccionado	49
Tabla 14: Parametrizaciones seleccionadas de SWinvert	52
Tabla 15: Velocidad de onda de corte ubicación n°38	66
Tabla 16: Velocidad de onda de corte ubicación nº42	66

#### RESUMEN

En el último tiempo los métodos de ondas superficiales (MOS) se han implementado cada vez más para la obtención del perfil de velocidad de onda de corte (Vs), parámetro que está relacionado con las propiedades dinámicas del suelo y su promedio armónico en los 30 primeros metros (Vs<sub>30</sub>) se usa en diversas normas para la clasificación sísmica de sitio. Dado que múltiples curvas teóricas se adaptan a la curva de dispersión experimental, existen infinitas soluciones de perfiles de velocidad de onda de corte posible para un determinado sitio. Generalmente, al realizar mediciones de ondas superficiales, se entrega un único perfil de Vs y un valor de Vs<sub>30</sub> junto con su misfit (parámetro que refleja la adaptación a la curva de dispersión experimental) pero no se informa su incertidumbre en relación con lo demás perfiles de Vs que también se adaptan a la curva experimental.

Este trabajo se desarrolló en base al análisis de 3 mediciones de ondas superficiales en terrenos que están caracterizados por la presencia de arena Biobío. Las mediciones corresponden a sitios en las comunas de San Pedro de la Paz, Coronel y Talcahuano.

El análisis de las mediciones se limitó a dos metodologías para la obtención de Vs, una que no consideró la incertidumbre (convencional) y otra que sí la incluyó. En el análisis convencional, se empleó una metodología basada en las recomendaciones de la Guía de Caracterización Dinámica de Sitios publicada en Chile en 2024, la cual culmina en la selección de un único perfil de velocidad de ondas de corte. Por otra parte, la metodología que incorpora la incertidumbre sigue las recomendaciones de Vantassel & Cox (2022, 2021b), considerando la incertidumbre desde el procesamiento de los datos y manteniéndola hasta la obtención de los perfiles de Vs.

Los resultados obtenidos muestran poca variabilidad en el perfil de suelo, convirtiéndose mayormente en tonos de aumento de rigidez del material, lo cual es consistente con la información geotécnica de base. Lo anterior refuerza la necesidad de considerar la incertidumbre en los análisis de ondas superficiales, debido a que permiten evaluar con mayor detalle la variabilidad del perfil de ondas de corte y del parámetro Vs<sub>30</sub>, entregando al profesional geotécnico la posibilidad de incorporar esta variabilidad en sus análisis, ya que es de especial relevancia para casos de suelos complejos, con capas blandas, suelos potencialmente licuables y en estudios de respuesta de sitio.

Palabras clave: MOS, Vs, incertidumbre, FK, SPAC.

#### ABSTRACT

In recent years, surface wave methods (SWM) have been increasingly implemented to obtain the shear wave velocity (Vs) profile, a parameter related to the dynamic properties of the soil. The harmonic mean of Vs in the top 30 meters (Vs30) is widely used in various standards for site seismic classification. Given that multiple theoretical curves can fit the experimental dispersion curve, there are infinitely many possible shear wave velocity profiles for a given site. Typically, when performing surface wave measurements, a single Vs profile and a Vs30 value are provided along with the misfit (a parameter reflecting the fit to the experimental dispersion curve). However, the uncertainty associated with other Vs profiles that also fit the experimental curve is not reported.

This study was based on the analysis of three surface wave measurements in sites characterized by the presence of Biobío sand. The measurements were conducted in the municipalities of San Pedro de la Paz, Coronel, and Talcahuano.

The analysis was limited to two methodologies for obtaining Vs: one that did not consider uncertainty (conventional) and another that incorporated it. In the conventional analysis, a methodology based on the recommendations of the Dynamic Site Characterization Guide, published in Chile in 2024, was employed, culminating in the selection of a single shear wave velocity profile. On the other hand, the methodology that accounts for uncertainty follows the recommendations of Vantassel & Cox (2022, 2021b), incorporating uncertainty from data processing through to the derivation of Vs profiles.

The results obtained show low variability in the soil profile, mainly reflecting trends of increasing material stiffness, which is consistent with the underlying geotechnical information. This highlights the importance of considering uncertainty in surface wave analyses, as it allows for a more detailed assessment of the variability of the shear wave velocity profile and the Vs30 parameter. This, in turn, provides geotechnical professionals with the ability to incorporate this variability into their analyses, which is particularly relevant for complex soils, soft layers, potentially liquefiable soils, and site response studies.

Keywords: SWM, Vs, uncertainty, FK, SPAC.

#### **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN**

#### 1.1. Motivación y justificación del trabajo

Caracterizar adecuadamente el subsuelo es fundamental para la ingeniería geotécnica, pues es la base para el diseño de las fundaciones de todo tipo de obras civiles.

En este sentido, los métodos basados en el análisis de ondas superficiales (MOS) son una alternativa que se utilizan cada vez más, ya que son no invasivos, más económicos, rápidos y tienen la capacidad de desplegarse en zonas adversas en comparación a técnicas tradicionales de exploración (Vantassel & Cox, 2022). Mediante la medición de ondas superficiales, se obtiene el perfil de velocidad de onda de corte (Vs), un parámetro que permite caracterizar propiedades dinámicas del sitio, como el módulo de corte (G), módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson ( $\mu$ ). Estas propiedades son fundamentales para evaluar la respuesta sísmica del terreno y su comportamiento ante cargas dinámicas. Por ello, incursionar en metodologías que incorporen la incertidumbre en el perfil de velocidad de ondas de corte permitiendo analizar su variabilidad se vuelve un tema de relevancia e importancia.

La incertidumbre en Vs podría afectar la clasificación sísmica del terreno y la estimación de la respuesta sísmica del suelo, impactando en consecuencia el diseño estructural. Incorporar la incertidumbre permite una evaluación más realista y confiable de las condiciones del sitio, evitando subestimar o sobrestimar los efectos sísmicos.

En el ámbito nacional, el primer esfuerzo de masificación del empleo de los MOS data del año 2015, cuando se editó, bajo el alero del Instituto de la Construcción, el "Manual de Aplicación de Técnicas Geofísicas basadas en Ondas de Superficie para la determinación del parámetro Vs<sub>30</sub>" (Humire et al., 2015). Sin embargo, actualmente no existe una normativa con lineamentos estándar sobre como medir Vs ni como incorporar la variabilidad en las mediciones, lo que representa un desafío. No obstante, se encuentran en desarrollo iniciativas como el proyecto de norma prNCh3793 (INN, 2024), que establece requisitos para técnicas basadas en ondas de superficie. Además, recientemente se publicó la Guía de Caracterización Dinámica de

Sitios (Sáez et al.,2024b), que proporciona lineamientos sobre estas metodologías y representa un avance en la estandarización del análisis dinámico del suelo.

Existen diversos enfoques para abordar la incertidumbre en mediciones de ondas superficiales, sin embargo, este trabajo se centra en dos metodologías específicas, basadas en los enfoques propuestos por Joseph Vantassel y Brady Cox (2022, 2021b) para la obtención de incertidumbre en el perfil de Vs, estudiando su aplicación práctica a sitios con presencia de arena Biobío.

#### 1.2. Hipótesis de trabajo

La cuantificación de la incertidumbre asociada a la obtención del perfil de Vs mediante técnicas basadas en ondas superficiales (MOS) permite mejorar la confiabilidad de los resultados obtenidos y posterior análisis dinámicos basados en Vs. La incertidumbre está presente tanto en el procesamiento como en la inversión de los datos, lo que impacta en la caracterización del perfil de Vs. Incluir la incertidumbre en estos procesos no solo permite una evaluación más realista de la variabilidad entre los posibles perfiles del sitio, sino que también reduce el riesgo de subestimar o sobrestimar la velocidad de onda de corte y por ende la rigidez del suelo.

#### 1.3. Objetivos

Los objetivos de esta investigación son los siguientes:

#### 1.3.1 Objetivo general

Evaluar y cuantificar la incorporación de incertidumbre en perfiles de Vs asociados a ensayos de métodos de ondas superficiales (MOS).

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Generar un perfil de velocidad de ondas de corte (Vs) mediante la aplicación de la Guía de Caracterización Dinámica de Sitios (Sáez et al., 2024b).
- Obtener perfiles de Vs con incertidumbre, utilizando las metodologías Swprocess (Vantassel & Cox, 2022) y Swinvert (Vantassel & Cox, 2021b).
- Analizar el impacto de la incorporación de incertidumbre, siguiendo las propuestas de Vantassel & Cox (2022, 2021b) para caracterizar el perfil de velocidad de ondas de corte.

#### 1.4. Metodología de trabajo

Esta tesis emplea una metodología mixta que combina la adquisición de datos en terreno con el análisis en gabinete de perfiles de velocidad de onda de corte en 3 sitios en la región del Biobío. Los datos se obtuvieron en terreno mediante mediciones de ondas superficiales utilizando arreglos de geófonos verticales para adquisición activa y pasiva.

El procesamiento e inversión de los datos se realiza inicialmente mediante un enfoque convencional utilizando Geopsy, siguiendo recomendaciones del estado del arte y la Guía de Caracterización Dinámica de Sitios (Sáez et al., 2024b). Este enfoque permite obtener 1 perfil de velocidad de ondas, donde su definición, generalmente es en base al mejor ajuste matemático.

Luego, se aplica el enfoque SWprocess para el procesamiento de datos y SWinvert para la inversión, siguiendo la metodología de Vantassel & Cox (2021b, 2022), que incorpora la incertidumbre en el perfil de Vs.

Finalmente, los resultados se comparan entre sí y con la información geotécnica de base para cada sitio, permitiendo así evaluar las ventajas de la incorporación de incertidumbre y su impacto en análisis posteriores de diseño.

#### **CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO**

Este capítulo presenta la revisión bibliográfica sobre los métodos de ondas superficiales, incluyendo sus aplicaciones y los parámetros asociados. Se describen los métodos empleados en el procesamiento de señales para la obtención de la curva de dispersión e inversión del perfil y se proporciona la información necesaria para comprender la dispersión en el análisis de ondas superficiales. Además, se expone la metodología utilizada en este trabajo, comenzando con en análisis la convencional y luego con el análisis que cuantifica la incertidumbre.

#### 2.1. Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas se propagan a través medios elásticos y son generadas por perturbaciones, estas se pueden clasificar en ondas de cuerpo y en ondas superficiales. Las ondas de cuerpo incluyen a las ondas primarias (P), caracterizadas por generar compresión y dilatación en la dirección de propagación, y las ondas secundarias (S) producen esfuerzos de corte dirección perpendicular a su propagación. Por otro lado, las ondas superficiales tienen una velocidad menor de propagación y pueden ser generadas por fuentes naturales o artificiales (al igual que las ondas de cuerpo), existen 2 tipos fundamentales de ondas superficiales u ondas de superficie: ondas Love que generan un movimiento de corte horizontal y ondas Rayleigh que generan un movimiento elíptico retrógrado en el plano de propagación (Humire, 2013).



Figura 1: Deformaciones producidas por ondas superficiales (Kramer & Stewart, 2024).

#### 2.2. Métodos de ondas superficiales (MOS)

Los métodos geofísicos que utilizan ondas superficiales han ganado popularidad en las últimas décadas debido a su flexibilidad y menor costo en comparación con técnicas invasivas. De hecho, varios códigos de diseño sísmico (ASCE 7, NBCC Eurocódigo, Código Japonés, etc.) recomiendan su uso para la estimación de parámetros clave en la clasificación de sitios sísmicos, como el Vs<sub>30</sub>. En Chile, la aplicación rutinaria de estos métodos se intensificó tras el terremoto de Mw 8,8 ocurrido en el Maule en 2010 (Sáez et al., 2024a),

Los métodos de ondas superficiales se desarrollan en 3 etapas: la primera consta de la adquisición de datos en terreno mediante el registro de ondas, la segunda parte es el procesamiento de los registros para la obtención de una curva de dispersión representativa del medio y por último se realiza la inversión de los datos para determinar un perfil de velocidad de onda de corte (Vs) que se ajuste a los resultados de la segunda etapa (Foti et al., 2014).



Figura 2: Etapas de aplicación MOS (Sáez et al., 2024b).

En las últimas 2 décadas el análisis de ondas de superficie se ha convertido en una técnica muy común para estimar el perfil de velocidad de ondas de corte (Foti et al., 2018). La velocidad de onda de corte está directamente relacionada con la rigidez al corte a baja deformación. Dado que la rigidez depende de la densidad del suelo, la ecuación que describe esta relación es  $G = \rho V_s^2$ , dónde  $\rho$  representa la densidad, G el módulo de corte y Vs la velocidad de onda de corte. Este último parámetro es clave en análisis de amenaza sísmica, como lo es el estudio de respuesta del suelo (Vantassel & Cox, 2021a).

Las ondas superficiales toman su nombre debido a que su amplitud decae exponencialmente con la profundidad. Las ondas Rayleigh son de importancia debido a su simplicidad y a que su velocidad no difiere en más de 10% con la velocidad de ondas de corte (Sáez et al., 2024b).

El parámetro Vs<sub>30</sub> corresponde a la velocidad promedio de las ondas de corte en los primeros 30 metros, el cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Vs_{30} = \frac{\sum_{i=1}^{n} h_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{h_i}{V_{s-i}}}$$
 Ec.1

En dónde V<sub>s-i</sub> corresponde a la velocidad de ondas de corte del estrato i (m/s), h<sub>i</sub> al espesor del estrato i (m), y n corresponde al número de estratos en los primeros 30 metros superiores del terreno. Este parámetro (Vs<sub>30</sub>) se utiliza para la clasificación sísmica de sitios en diversas normas, entre ellas la norma chilena NCh 433.Of1996, la cual entrega los siguientes rangos de valores para la clasificación:

	Suelo Tipo	V <sub>s30</sub> (m/s)	RQD	q <sub>u</sub> (MPa)	(N <sub>1</sub> ) (golpes/pie)	S <sub>u</sub> (MPa)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	≥ 50%	≥10 (ε <sub>qu</sub> ≤2%)		
в	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		≥ 0,40 (ε <sub>qu</sub> ≤2%)	≥ 50	
с	Suelo denso o firme	≥ 350		≥ 0,30 (ε <sub>qu</sub> ≤2%)	≥ 40	
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180			≥ 30	≥0,05
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180			≥ 20	<0,05
F	Suelos Especiales	*	*	*	*	*

Tabla 1: Clasificación sísmica del terreno de fundación (Fuente: DS 61, 2011).

El Decreto Supremo N° 61 exige evaluar las propiedades del suelo hasta 30 metros de profundidad o hasta la roca para clasificar el suelo de fundación en conjuntos habitacionales mayores a 8.000 m<sup>2</sup>, edificaciones de 5 o más pisos o de categoría III y IV.

La variación de Vs al pasar de estratos más rígidos a más blandos (contraste de impedancia) explica la amplificación de las ondas sísmicas para conservar el flujo de energía, lo que provoca una mayor respuesta sísmica en suelos blandos (Chávez-

García & Montalva, 2014). Valores típicos de Vs según el tipo de suelo se muestran en la Tabla 2:

Geomaterial	V <sub>S</sub> (m/s)
Soft clay	80–200
Stiff clay	200–600
Loose sand	80–250
Dense sand	200–500
Gravel	300–900
Weathered rock	600-1000
Competent rock	1200-2500

Tabla 2: Valores referenciales de la velocidad de la onda de corte para suelos y rocas (Foti et al., 2018).

La geología local y la variabilidad de Vs no solo afectan la clasificación sísmica de sitios, sino que también tienen relación con fenómenos como la licuación. Este fenómeno es inducido por terremotos y se da mayormente en suelos granulares, frecuentemente en arenas saturadas de compacidad suelta a media. En esta línea, en Concepción a consecuencia del terremoto del 2010, se reportaron evidencias superficiales de licuación en varios puntos de la ciudad. Según Núñez Jara (2024) en el condominio "Los Presidentes", se realizaron múltiples mediciones de ondas superficiales, revelando que las propiedades mecánicas del suelo junto con la intensidad del sismo son los factores principales para determinar si se desencadena o no la licuación. La variabilidad espacial de Vs influye en la licuación cuando ya está en curso.

Además de la licuación, Vs tiene relación con el movimiento fuerte (terremotos). En esta línea, un estudio reciente (Leyton, 2024a) exploró la estimación del peligro sísmico considerando Vs<sub>30</sub> para evaluar el efecto de sitio, indicando que en general, para suelos tipo A y suelos tipo B la estimación del efecto de sitio usando Vs<sub>30</sub> es conservadora. Sin embargo, para suelos tipo C y suelos tipo D, el uso de Vs<sub>30</sub> hace que la estimación del efecto de sitio no sea conservadora en periodos bajos, de ahí su importancia en mejorar mediciones.

A nivel nacional también se ha explorado la incertidumbre asociada Vs<sub>30</sub>. Según Oliveras (2024), el coeficiente de variación de este parámetro se mantuvo bajo el 8 % en distintas mediciones de Vs. En esta línea, otro estudio en cuatro ciudades concluye que las mayores variaciones en mediciones de ondas superficiales se dan en

frecuencias bajas, mientras que en frecuencias altas los resultados son más consistentes, confirmando que Vs<sub>30</sub> es un estimador robusto (Leyton et al., 2024b).

En la sección 2.4, se aborda con mayor detalle la incertidumbre asociada a las ondas superficiales, profundizando en cómo esta influye a lo largo del proceso de análisis de las mediciones.

#### 2.3. Curva de dispersión

Una curva de dispersión es un diagrama que muestra la relación entre la frecuencia de una onda y su velocidad. Estos diagramas son fundamentales para caracterizar las propiedades dispersivas de las ondas, es decir, cómo la velocidad de las ondas cambia con la frecuencia. En teoría, la curva de dispersión de un perfil de suelo conformado por capas homogéneas y horizontales se describe mediante cuatro parámetros que caracterizan cada estrato: la velocidad de onda de corte (Vs), el espesor, la velocidad de onda primaria o de compresión (Vp) y la densidad ( $\rho$ ). Cada parámetro aporta de manera diferente a la estimación de la curva de dispersión, la mayor dependencia es de *Vs*, mientras que variaciones de la densidad, no tienen mayor impacto en el resultado final. Por otro lado, existe una menor dependencia de los espesores y la velocidad de onda P (*Vp*). Además, valores de Vs y Vp están relacionados por el coeficiente de Poisson (Sáez et al., 2024b).

La relación entre la curva de dispersión experimental y la curva de dispersión teórica está dada por el misfit, el cual está en función de las distancias entre ambas curvas (Wathelet, 2005).

En este trabajo para la obtención de la curva de dispersión experimental y estimar el modo fundamental de la onda Rayleigh se utilizan los siguientes métodos:

#### 2.3.1. Spatial auto-correlation (SPAC) (Aki, 1957).

Este método se basa en el supuesto de que las vibraciones ambientales constituyen un proceso estocástico y estacionario en el tiempo y el espacio. Este método analiza la relación entre las señales registradas por sensores dispuestos en un arreglo semicircular con un sensor central, permitiendo correlacionar el movimiento observado en los receptores a través de un coeficiente de autocorrelación. La técnica se basa en el hecho de que la media azimutal de la función de autocorrelación espacial tiene la forma de una función de Bessel, cuyo argumento depende de la frecuencia de velocidad de fase y de la distancia de separación del receptor. Entre las ventajas de este método está que proporciona una curva de dispersión que puede combinarse con curvas de dispersión de otras técnicas (Foti et al., 2018).

Como los arreglos semicirculares con muchos sensores son difíciles de realizar, el método MSPAC adapta la formulación de Aki (1957) para su aplicación en arreglos irregulares (Bettig et al., 2001).

#### 2.3.2. Frequency – wavenumber (FK) (Lacoss et al., 1969).

El método FK supone que un arreglo de sensores es atravesado por ondas planas horizontales. Para una onda con frecuencia, dirección y velocidad conocidas, se calculan los tiempos de llegada a cada sensor. Luego, al corregir las fases con los retardos correspondientes y apilar señales en el dominio de la frecuencia, se obtiene la respuesta del arreglo. Si la onda viaja con las características asumidas, la suma será constructiva, maximizando la respuesta. La razón entre esta respuesta y la potencia espectral se denomina semblanza, la cual permite estimar la velocidad y dirección de propagación de las ondas.

La vía directa para obtener un espectro f-k es la aplicación de la transformada de Fourier tanto en el tiempo como en el espacio sobre los datos de campo. La principal limitación de utilizar la transformada de Fourier 2D para obtener directamente el espectro f-k es que las trazas tienen que estar espaciadas uniformemente. El espectro f-k para matrices no espaciadas puede evaluarse utilizando otras técnicas de estimación espectral (Foti et al., 2015).

El método FK convencional tiene una variante que mejora su resolución, denominada FK de alta resolución. Ambos métodos consideran las vibraciones ambientales como un proceso aleatorio estacionario, descrito mediante una función espectral que relaciona frecuencia y número de onda. Sin embargo, esta variante, introduce factores de ponderación para enfatizar la contribución de una única onda plana predominante, reduciendo la interferencia de otras componentes y permitiendo distinguir ondas con números de ondas cercanos, lo que mejora su precisión (Sáez et al., 2024b).

#### 2.3.3. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) (Park et al., 1999).

Este método es una técnica que se utiliza para analizar ondas superficiales generadas de manera activa. Consiste en disponer una serie de sensores a lo largo de un perfil lineal y usar una fuente controlada para generar ondas superficiales que serán captadas por estos sensores.

Para generar ondas Rayleigh, se utiliza generalmente una fuente de impacto vertical, que crea ondas con un contenido predominante de este tipo. Estas ondas son detectadas por los sensores distribuidos a lo largo del arreglo.

Es importante que la fuente esté alineada de forma colineal con los sensores para obtener mediciones precisas. Lo ideal es usar varias posiciones de la fuente, preferentemente en ambos lados del conjunto de sensores, con el fin de minimizar efectos no deseados relacionados con el campo cercano y así obtener una mejor estimación de la dispersión de las ondas.

Con cada impacto de la fuente, se registra una señal en cada sensor, lo que da lugar a una forma de onda por sensor. Estos registros, almacenados en el dominio del tiempo, se procesan luego para estudiar cómo se dispersan las ondas superficiales y así obtener información sobre las características del subsuelo (Vantassel & Cox, 2022).

Para la obtención de la curva de dispersión, este trabajo aplica el método FK y SPAC en análisis convencional, mientras que en el método MASW y FK en el análisis con incertidumbre.

#### 2.4. Incertidumbre en mediciones de Vs

Los perfiles de velocidad de onda de corte (Vs) pueden obtenerse mediante técnicas invasivas o no invasivas, pero en ambos casos existe una incertidumbre asociada a

la estimación del resultado final. Esta incertidumbre se clasifica en dos tipos principales: la incertidumbre aleatoria, que proviene de la variabilidad inherente en la estratificación del subsuelo y rigidez del sitio, y la incertidumbre epistémica, que resulta de la incertidumbre de los datos y/o la falta de conocimiento (Griffiths et al., 2016). Sin embargo, en la práctica, ambas categorías no son siempre fáciles de distinguir y su separación depende del modelo utilizado (Toro, 2022).

La incertidumbre en Vs puede estar influenciada por diversos factores durante la adquisición y el procesamiento de datos. Por ejemplo, la variabilidad debido a diferentes configuraciones fuente-receptor es una combinación de ambas incertidumbres; sin embargo, la incertidumbre epistémica es más predominante en casos de heterogeneidad lateral del suelo (Foti et al., 2018).

Durante el procesamiento de datos de dispersión, esta incertidumbre surge de las numerosas decisiones que se toman en el proceso, como la elección del método de transformación del campo de ondas, filtrado de señales o el número de registros apilados (Vantassel & Cox 2022). Además, la no unicidad de la solución es otro factor que contribuye a la incertidumbre total, ya que distintos modelos de la inversión pueden ajustar con los datos registrados (Toro, 2022). Dado que los datos experimentales de dispersión contienen cierto grado de incertidumbre, es esencial que el analista intente cuantificar la incertidumbre total en cada sitio y propague esta incertidumbre a lo largo del proceso de inversión para obtener perfiles de Vs con su incertidumbre asociada (Vantassel & Cox, 2021a).

Asimismo, la elección del modelo de capas en la inversión de ondas superficiales representa una fuente clara de incertidumbre epistémica, ya que depende de las decisiones del analista (Foti et al., 2018). Para abordar este problema, se recomienda considerar múltiples parametrizaciones en la inversión, ya que la incertidumbre derivada de considerar múltiples modelos de capas (interparametrización) es significativamente mayor que repetir la misma parametrización (intraparametrización) (Vantassel & Cox, 2021b).

A pesar de la dificultad de separar la incertidumbre en sus componentes aleatoria y epistémica, la forma en que se divida la incertidumbre no afecta el resultado final, siempre que se mantenga la incertidumbre total. Sin embargo, la forma en que se representa la incertidumbre en Vs también tiene un impacto directo en la estimación

de la respuesta sísmica del sitio. Un perfil de Vs excesivamente complejo (muchos estratos) puede llevar a predecir una respuesta subestimada, mientras que un perfil demasiado sencillo (pocos estratos) puede sobrestimar la respuesta (Toro, 2022).

Existen diversas metodologías para abordar la incertidumbre en métodos de ondas superficiales. Toro (2022) analizó tres enfoques estocásticos para caracterizar dicha incertidumbre en la velocidad de ondas de corte (Vs). El modelo de Toro (1995) se basa en un proceso de aleatorización con perfiles tanto genéricos como específicos de cada sitio, utilizando distribuciones lognormales para modelar la variabilidad de Vs y una estructura de correlación vertical. El modelo de Shi y Asimaki (2018), desarrollado a partir de una amplia base de datos de perfiles de California, clasifica los sitios según el valor de Vs30 y ajusta la variabilidad de Vs mediante leyes de potencia. Por su parte, el modelo de Passeri (2019) toma un enfoque diferente, aleatorizando los tiempos de viaje de las ondas en lugar de las velocidades, lo que reduce la influencia de incertidumbre vinculada a los límites de las capas y mejora la representación de la respuesta dinámica de los sitios.

Sin embargo, el presente estudio se centra en las propuestas de Joseph Vantassel y Brady Cox (2021b, 2022), destacando entre sus ventajas que se incorpora la incertidumbre desde el procesamiento hasta la inversión de los datos, además de la disponibilidad de sus metodologías en código abierto que permiten un uso directo con los datos medidos en terreno.

#### 2.5. Análisis de Vs considerando incertidumbre

Este análisis sigue los flujos de trabajo SWprocess (Vantassel & Cox, 2022) y SWinvert (Vantassel & Cox, 2021b), los cuales buscan mejorar la caracterización de suelos a partir de mediciones de ondas superficiales, incorporando la incertidumbre en el análisis. El primer flujo se enfoca en el tratamiento de los datos de dispersión, generando curvas de dispersión con estimaciones sólidas de incertidumbre mediante herramientas estadísticas que reducen sesgos. En complemento, el segundo flujo de trabajo aborda la inversión de estas curvas de dispersión, permitiendo cuantificar la incertidumbre en los perfiles de velocidad de onda de corte (Vs) y obteniendo un conjunto de modelos posibles para la solución.

#### 2.5.1. SWprocess (Vantassel & Cox, 2022)

La figura 3 muestra un esquema resumen de este flujo de trabajo, en el cual se trabajan los registros activos y pasivos para la obtención de la curva de dispersión con incertidumbre.



Figura 3: Esquema flujo de trabajo SWprocess (elaboración propia).

Para los registros activos, el procesamiento MASW, transforma los registros en el dominio del tiempo de la fuente activa desde el dominio del desplazamiento temporal al dominio de la velocidad de fase-frecuencia.

Se recomiendan múltiples impactos en cada ubicación de la fuente para aumentar la relación señal-ruido. Es importante apilar múltiples registros en el dominio temporal para obtener datos de dispersión de la máxima calidad antes de estimar las estadísticas de dispersión, además las técnicas de preprocesamiento tienen un efecto más significativo en un emplazamiento ruidoso que en un emplazamiento tranquilo.

Luego del preprocesamiento, el campo de ondas se transforma al dominio de velocidad de fase-frecuencia. La transformación del conformador de haz en el dominio de la frecuencia (FDBF, por su sigla en inglés) (Zywicki y Rix 2005) con vector de dirección de onda plana y sin ponderación de amplitud es equivalente a la transformada de frecuencia-número de onda (FK), además está la opción de la transformada de desplazamiento de fase y, por último, FDBF con un vector de dirección de onda cilíndrica y ponderación de distancia de raíz cuadrada. La elección del campo de ondas es una fuente de incertidumbre epistémica en los datos de dispersión.

Otros factores que tienen un impacto significativo en los datos de dispersión son las consideraciones en la longitud del arreglo, espaciado entre sensores, tipo de fuente y el desplazamiento de la fuente. Los arreglos más cortos y con menor espaciado entre sensores permitirán la adquisición de longitudes de ondas más cortas (frecuencias más altas), lo que implica una mejor resolución en los metros superficiales.

La profundidad mínima y máxima de caracterización suelen cuantificarse mediante los límites de onda. El límite de longitud de onda mínima ( $\lambda_{min}$ ) gobierna la resolución cercana a la superficie y está controlado por el potencial de aliasing espacial de longitudes de onda corta. Se puede demostrar que el doble de distancia entre sensores es equivalente  $\lambda_{min}$ , sin embargo, se puede relajar este criterio si los datos de dispersión parecen fiables. Por otra parte, la longitud de onda máxima ( $\lambda_{max}$ ) gobierna la resolución en profundidad, y aunque no hay acuerdo en la literatura, los límites de  $\lambda_{min}$  van desde la longitud del arreglo, hasta 3 veces esta longitud. Si  $\lambda_{max}$  es demasiado restrictivo, se descartarán datos de buena calidad, en cambio si  $\lambda_{max}$  es una subestimación significativa de la rigidez del sitio en profundidad.

La ubicación de la fuente se debe seleccionar teniendo en consideración los efectos de campo cercano y los efectos de campo lejano. El desplazamiento de la fuente también forma parte de la incertidumbre epistémica y hasta cierto punto aleatoria en los datos de dispersión.

En los datos de dispersión, el recorte interactivo en SWprocess tiene como objetivo eliminar los puntos de datos que son valores atípicos obvios y dejar datos de dispersión como un medio para cuantificar incertidumbre realista. Sin embargo, la penalización asociada al intento de resolver datos de frecuencias altas es el aumento de la incertidumbre.

De este modo los cálculos estadísticos para los datos de dispersión MASW requiere un proceso de 3 pasos, el primero tratar como observaciones independientes la distancia de golpeo y la transformación del campo de ondas. En segundo lugar, interpolar los datos de dispersión para una matriz uniforme. En tercer lugar, el cálculo de representación estadística, los cuales implican la media y desviación estándar de los datos de dispersión encada punto estadístico. Es común que los datos de dispersión tengan coeficiente de variación (COV) del orden del 5 al 10%.

Para el procesamiento pasivo, se centra en la transformada clásica de frecuencianúmero de onda, transformada de frecuencia-número de onda de alta resolución y formación de frentes de ondas de tres componentes Rayleigh (RTBF).

Vantassel & Cox (2022) recomiendan menos de 30 a 60 minutos de datos de campo de ondas pasivas para conjuntos MAM con aperturas pequeñas (30-50 m) y no menos

de 120 minutos para aperturas más grandes (200-500 m). Luego de la selección de bloques y conjunto de bloques, se decide cuántos peaks por conjunto de bloque exportar, se recomienda no dejar de lado la consideración de múltiples peaks para garantizar resolución de los modos y mitigación de peaks de velocidad espurios.

Al combinar datos de registro de fuente activa y campo de ondas pasivo en la parte de Stats del flujo de trabajo, se debe favorecer el solapamiento de datos de dispersión experimentales adquiridos. Para evitar sesgar estos datos hacia velocidades altas, se debe eliminar los datos en frecuencia por debajo del límite de resolución máxima del arreglo ( $\lambda_{max}$ ). Finalmente, antes de que se calculen las representaciones estadísticas, en el recorte interactivo se deben eliminar los peaks duplicados de los datos de dispersión MAM. De este modo se obtienen los datos estadísticos a lo largo de los datos de dispersión recortados.

La implementación de este flujo de trabajo de procesamiento de datos se lleva a cabo con el paquete Phyton SWprocess (Vantassel, 2021c).

#### 2.5.2. SWinvert (Vantassel & Cox, 2021b)

La figura 4 muestra un esquema resumen de este flujo de trabajo, en el cual se definen las configuraciones para la inversión obteniéndose un conjunto de perfiles de Vs con su gráfica de incertidumbre.



Figura 4: Esquema flujo de trabajo SWinvert (elaboración propia).

Para la inversión, la presentación de datos de dispersión en términos de frecuencia lineal no es ideal para el proceso, ya que sesga los resultados hacia un ajuste predominante de la estructura cercana a la superficie (alta frecuencia), por lo que se recomienda remuestrear los datos en escala logarítmica en función de la longitud de onda ya que tiende a cambiar menos repentinamente que en términos de frecuencia.

Posteriormente, se debe definir el espacio de parámetros, para esto, se debe utilizar en lo posible información geotécnica adicional siempre que esté disponible, sin embargo, hay que tener cuidado de no restringir demasiado la parametrización en función de una sola fuente de información. Esto debido a que ninguna fuente de información debe aceptarse con certeza en términos de parametrización de la inversión, ya que el objetivo de la información adicional es evitar la aparición de modelos de velocidad poco realistas, pero debe ser permisiva, para no restringir demasiado y no sesgar resultados.

El flujo de trabajo tiene 2 opciones para esquemas de capas: Layering by Number (LN) y Layering Ratio (LR). Estas parametrizaciones existen para abordar diferentes escenarios de modelización del subsuelo, dependiendo del nivel de conocimiento previo y la complejidad del sitio. LN requiere que el número de capas coincida con el número conocido o sospechado de capas subterráneas del sitio. El espesor mínimo de cualquier capa está definido por  $\lambda_{min}/3$ , mientras que la profundidad máxima del fondo de cualquier capa está definida por  $\lambda_{max}/df$ , donde df es el factor de profundidad (generalmente 2 o 3). LN es ventajoso cuando se tiene un buen conocimiento del número de capas, ya que permite modelar directamente la estructura conocida del subsuelo. Por otro lado, LR define las capas en función de una relación de profundidad entre ellas, lo que resulta útil cuando el conocimiento sobre la estructura del subsuelo es limitado. En LR, el rango de profundidades del fondo para cada capa subsiguiente se define por  $\lambda_{min}/2$  multiplicado por LR elevada al número de capa. Un LR pequeño resulta en un mayor número de capas en la parametrización, permitiendo una de diferentes modelos del exploración más amplia subsuelo. Con las parametrizaciones LN y LR definidas, se parámetros y sus intervalos, como Vs, Vp, coeficiente de Poisson, densidad y factor de profundidad.

Luego de la selección de las parametrizaciones y parámetros mencionados, se deben seleccionar los parámetros de ajustes para el algoritmo de inversión. El algoritmo utilizado es el Neighborhood Algorithm (NA), un método de búsqueda global que explora el espacio de parámetros de manera eficiente. El NA no requiere un modelo inicial único, sino que selecciona modelos candidatos dentro del espacio de parámetros definido y los refina iterativamente para minimizar el error entre los datos observados y los simulados.

Para configurar el NA, se deben definir parámetros como el número de modelos iniciales (Ns0), el número de iteraciones del algoritmo (It), el número de modelos por iteración (Ns), y el número de modelos para remuestrear (Nr). Es importante considerar que una inversión con más modelos no garantiza un mejor resultado. Valores bajos de Nr pueden converger más rápido, pero también pueden quedar atrapados en mínimos locales, lo que puede llevar a inversiones que no convergen en un buen modelo. Además, Ns0 tiene poca importancia siempre que se haya considerado un número suficiente de It\*Ns, ya que este producto es el más significativo. La recomendación general es Nr=100 e ItNs=50.000.

Los resultados de una parametrización de prueba pueden rechazarse si tienen un desajuste relativamente alto en comparación con las otras parametrizaciones y/o si sus perfiles de Vs son verdaderos valores atípicos en relación con los demás.

La concordancia entre perfiles invertidos y la solución verdadera tiende a disminuir en profundidad, esto debido a la naturaleza mixta del problema inverso. Al considerar múltiples parametrizaciones, los perfiles resultantes generalmente unen a la solución verdadera.

El desajuste de inversión representa la distancia en números de desviaciones estándar de la media, un valor de desajuste inferior a 1, significa que la curva de dispersión teórica se encuentra dentro de los límites de desviación estándar ±1 de los datos experimentales. El rango de valores mínimos de desajuste puede variar significativamente, por lo que es importante considerar múltiples ensayos para cada parametrización, además las parametrizaciones que tienen un número de capas coherentes con el modelo verdadero tienen a valores más bajos de desajuste. Además, no todas las parametrizaciones producen modelos de igual calidad.

La implementación de este flujo de trabajo de inversión de datos se lleva a cabo con el paquete Phyton SWprepost (Vantassel, 2020). Sin embargo, para mayor practicidad, la obtención de resultados con este flujo se referirá como SWinvert.

#### CAPÍTULO III ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO E INVERSIÓN DE DATOS

Este capítulo aborda el proceso de métodos de ondas superficiales, aplicando los enfoques mencionados anteriormente: el enfoque convencional (sin incertidumbre) y el enfoque que incorpora la incertidumbre, los cuales están resumidos en el esquema de la figura 5.



Figura 5: Esquema de análsis de datos (elaboración propia).

La adquisición de datos se desarrolló en 3 sitios dentro de la región del Biobío: San pedro de la Paz, Coronel y Talcahuano. La figura 6 muestra la ubicación referencial y en ellos se proyecta la construcción de viviendas y edificios sociales (San Pedro de la Paz y Coronel) y un proyecto industrial (Talcahuano).



Figura 6: Sitios de medición (Google Earth) (elaboración propia).

#### 3.1. Sitio 1: San Pedro de la Paz

En el sitio se proyecta la construcción de edificios habitacionales de hasta 5 niveles. Para la geofísica no invasiva, se llevaron a cabo mediciones de ondas superficiales junto con el equipo de Geotres Consultores Geotécnicos, mientras que respecto a la caracterización geotécnica se analizaron los resultados de ensayos mostrados en el informe de mecánica de suelos (Sanzana, 2024).

#### 3.1.1. Antecedentes geotécnicos

El informe de mecánica de suelos E.P CODES: Proyecto C.N.T Plaza Sur, San Pedro de la Paz (Sanzana, 2024) indica campaña de exploración que incluyó la realización de calicatas de 3 m de profundidad, un sondaje SPT hasta 30 m y un ensayo CPTu con una penetración de 7 m.

De acuerdo con la información proporcionada por el sondaje, el modelo estratigráfico del sitio explorado se resume en la tabla 3:

Desde (m)	Hasta (m)	Matriz	Color	Compacidad	Humedad	Observaciones
0,00	0,48	Arena de grano fino	Marrón claro	Baja	Baja	Bajo porcentaje de raíces
0,48	4,35	Arena de grano medio	Gris oscuro	Media	Media	_
4,35	11,84	Arena de grano grueso	_	Alta	Media	Micas en mediano porcentaje
11,84	23,45	Arena de grano fino	Gris oscuro	Alta	Alta	Micas y particulas de cuarzo en mediano porcentaje
23,45	30,09	Arena de grano fino y limosa en bajo pocertanje	Gris oscuro	Alta	Media	Micas en bajo pocertanje

Tabla 3: Estratigrafía	sondaje 30 m
------------------------	--------------

Fuente: Adaptado de Sanzana (2024).

Los resultados obtenidos en los ensayos de terreno son consistentes con los antecedentes geológicos del sitio. Según el mapa de Microzonificación sísmica de la ciudad de San Pedro de la Paz, Región del Biobío (Sernageomin, 2012), el proyecto se encuentra dentro de la unidad PIHI, caracterizada por arenas de grano medio a fino, color gris oscuro, con bajo contenido de limos, con presencias de cuarzo y micas de compacidad suelta a media, a menos de 10 m de profundidad y compacta a muy compacta, bajo los 10 metros tal como detalla la figura 7:



Figura 7: Microzonificación sísmica San Pedro de la Paz (Sernageomin, 2012).

#### 3.1.2. Trabajo en terreno

El trabajo en terreno se realizó junto al equipo de Geotres y consistió en la medición de ondas superficiales. Para la adquisición activa de datos, se utilizó una geometría lineal 1D, en la cual los 24 geófonos espaciados cada 3 metros (d), con un largo total de 69 metros (D) y con una frecuencia de muestro de 1000 Hz (Fs). Se realizaron golpes con el martillo a una distancia de 6 metros (2d) y 9 metros (3d), en dónde para cada distancia de golpeo, se realizaron 10 registros de 2 segundos cada uno. Este arreglo se muestra en la figura 8, el cual está de color azul.

Por la otra parte, para la adquisición pasiva de datos se usó una geometría 2D en forma de L, en dónde el lado corto es 1/3 del arreglo y el lado largo es de 2/3 del arreglo. También se utilizaron los 24 geófonos espaciados cada 3 metros (d), con una frecuencia de muestro de 200 Hz (Fs), con 12 registros en ventanas de 150 segundos, acumulando una grabación total de 1800 segundos de grabación. Este arreglo también se muestra en la figura 8, el cual está de color amarillo.



Figura 8: Ensayos geofíscos (Google Earth) (Elaboración propia).

Para realizar la adquisición de datos, se utilizó un conjunto de equipos compuesto por:

- Sismógrafo marca Sara, que tiene como función registrar las señales obtenidas durante el proceso de medición.
- 24 geófonos de la misma marca, que trabajan captando las ondas sísmicas mediante diferencias de voltaje. Además, uno de los geófonos se utilizó como trigger, ayudando a sincronizar el tiempo de registro.
- Martillo de 20 libras, para generar los impactos en una placa metálica y así obtener los datos en modo activo.
- Además de todo el cableado necesario para conectar y completar el circuito.

El informe de medición de ondas superficiales "Proyecto Plaza Sur, San Pedro de la Paz" elaborado por el equipo de Geotres (2024a) informa un Vs<sub>30</sub> de 292 m/s, siendo sus valores consistentes con el tipo de suelo observado en sondaje y las referencias geológicas del sector.

#### 3.1.3 Procesamiento e inversión convencional

Se analizaron las mediciones de terreno siguiendo la Guía de Caracterización Dinámica de Sitios (Sáez et al.,2024b), cumpliendo las siguientes recomendaciones en la adquisición de datos:

- Utilización de 24 geófonos.
- Incorporación de sistema de disparo (trigger).
- Uso de martillo de al menos 5 kg.
- Ventanas de grabación de 2 segundos en registros activos.

El resumen del procesamiento convencional de datos se muestra en esquema de la figura 9:



Figura 9: Esquema de trabajo procesamiento convencional (Elaboración propia).

#### A) Análisis de registros activos

La guía indica que existen varios métodos y que el más utilizado corresponde al método de FK en el cuál la onda se transforma en una imagen de densidad de energía como función de la frecuencia y número de onda. Al realizar este método en Geopsy, se comienza por analizar qué geófonos excluir del análisis, esto depende del nivel de contaminación de ruido, que en este caso era baja, por lo que se contemplan todos registros de cada geófono.

Para el análisis de datos activos, se considera la duración total de cada registro, que corresponden a 2 segundos. En cuanto a la normalización, se opta por máxima amplitud ya que en este caso hay poca variación al cambiar la normalización.

El rango de frecuencia para el análisis se define considerando la frecuencia natural de los geófonos, correspondiente a 4.5 Hz, estableciendo este valor como el límite inferior en el análisis de frecuencia. Finalmente, se define un rango de velocidades a considerar desde 100 m/s a 1000 m/s, a partir de los antecedentes considerados del terreno y área de estudio (anexo 1).

En primera instancia, se analizan en el dominio de frecuencia, teniendo como resultados los gráficos de dispersión de la figura 10:



Figura 10: Dispersión de 6 registros activos, a) Fuente a 6m, b) Fuente a 9 m (Geopsy).

Los 6 gráficos de dispersión a la izquierda (Figura 10.a) corresponden a los registros obtenidos con el golpe a 6 metros del primer geófono, mientras que los 6 registros a la derecha (Figura 10.b) corresponden a los registros obtenidos con el golpe a 9 metros. En los gráficos de dispersión la concentración del color es proporcional a la energía, en este caso lo indican los colores azul y verde. El color azul define el modo fundamental de la curva de dispersión.

Tras obtener los registros en el dominio de frecuencia, se procede a realizar el apilamiento o "stacking" en frecuencia, el cual se muestra en la figura 11.a.


Figura 11: Apilamiento en frecuencia, a) Dispersión, b) Curva de dispersión (Geopsy).

Del análisis de la figura anterior, se observa que la curva de dispersión es visible desde los 7 Hz hasta los 40 Hz aproximadamente, por lo que se procede a seleccionarla con la opción automática del programa, resultado la curva de dispersión de la figura 11.b. Por otra parte, también se procede a realizar el análisis de los datos en el dominio del tiempo, para esto se agrupan dependiendo de la distancia de golpeo:



Figura 12: Apliamiento en tiempo, a) Fuente a 6 metros, b) Fuente a 9 metros (Geopsy).

En la figura 12.a están apilados en el tiempo los registros con una distancia de golpeo de 6 metros y en la figura 12.b los registros con golpes a 9 metros. Posteriormente estos registros apilados en el tiempo se pasan al dominio de frecuencia, obteniendo 2 gráficos de dispersión, los cuales se apilan, dejando como resultado el siguiente gráfico de dispersión, el cual se observa en la figura 13.a, y la figura 13.b muestra curva de dispersión obtenida de manera automática:



Figura 13: Resultado apilamiento en tiempo, a) Dispersión, b) Curva de dispersión (Geopsy).

En este caso, al igual que el anterior la curva de dispersión está comprendida entre los 7 Hz y 41 Hz. Visualmente se observa que las curvas de dispersión no varían significativamente entre los dominios analizados en este caso, lo que implica que hay buena calidad en los registros y que los resultados son confiables.

B) Análisis de registros pasivos

Se realiza el procesamiento de los datos por un método de fase, el MSPAC. Para este procesamiento se cuenta con ventanas de 150 segundos que en total suman una duración de 30 minutos, en primera instancia se procede a dividir en registros de 50 segundos, de tal forma de excluir del registro señales artificiales a lo largo del arreglo, tal como se ve en la siguiente figura:



Figura 14: Filtrado registro pasivo (Geopsy).

En la figura 14 se observa que esta opción de ventaneo de 50 segundos deja fuera señales consideradas como ruido o segmentos que no aportan para el análisis.

El siguiente paso se realiza usando el módulo SPAC2DIP para realizar la correlación entre pares de geófonos, mediante anillos. En este caso cada anillo incluyó poco más de 20 pares geófonos debido a las características de la gráfica de dispersión. Con esta parte del procedimiento pasivo realizada, se procede a trazar la curva inferior y superior de la curva de dispersión, de tal manera de utilizar el promedio de estas como la curva de dispersión del registro pasivo, tal como se muestra en la figura 15:



Figura 15: Curva de dispersión pasiva (Geopsy).

Concluyendo así el procesamiento de datos siguiendo recomendaciones de la guía de caracterización dinámica de sitios (Sáez et al., 2024b), obteniendo frecuencias y longitudes de onda mostradas en la tabla 4:

		Longitud de onda (m)		
Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	
7	41	4	38,5	
1,4 13		20,8	301	
	Mínima 7 1,4	Mínima Máxima   7 41   1,4 13	Mínima Máxima Mínima   7 41 4   1,4 13 20,8	

Tabla 4: Rango de frecuencia y longitud de onda

Fuente: Elaboración propia.

De esta forma se obtienen 4 curvas para la inversión, del método FK activo la curva de dispersión apilando en frecuencia y la segunda obtenida por apilamiento en el tiempo, la tercera y cuarta curva son las curvas superior e inferior de la concentración de calor identificada en el análisis de SPAC.

Siguiendo la recomendación señala que la profundidad del perfil de velocidad de ondas de corte es confiable entre  $\lambda_{max}/3$  a  $\lambda_{max}/2$  (Foti et al., 2014), en este caso, dicho rango corresponde a entre 100 y 150 metros. Por lo tanto, la caracterización de los 30 metros superiores cumple con este criterio de confiabilidad. Además, siguiendo esta línea se puede graficar  $\lambda/3$  y  $\lambda/2$  a modo de ver la tendencia en profundidad de las

longitudes de onda y revisar los posibles cambios de estratos. Este gráfico se observa en la figura 16:



Figura 16: Tendencia perfil según  $\lambda/3$  y  $\lambda/2$  (elaboración propia).

De este gráfico se puede analizar ambas tendencias de  $\lambda$ , en dónde se observa un aumento de velocidad a medida que aumenta la profundidad y potenciales cambios de estratos.

El resumen de la inversión convencional de la curva de dispersión se muestra a continuación en esquema de la figura 17:



Figura 17: Esquema trabajo de inverisón convencional (Elaboración propia).

Antes de iniciar la inversión convencional se define la cantidad estratos para cada parametrización, en este caso se definen desde 3 a 10 estratos ya que la guía recomienda partir por 3. Luego definir los rangos de los parámetros de coeficiente de Poisson y la densidad, el coeficiente de Poisson se le fija un rango entre 0.2 y 0.35, tomando así en consideración los valores que entrega el volumen 3 del Manual de

Carreteras (Ministerio de Obras Públicas, 2024). Mientras que la densidad, dado a los antecedentes recopilados se fija en un rango de 800 a 2000 kg/m<sup>3</sup>. El resumen de los parámetros para la inversión se resume en la tabla 5:

Parámetro	Rango
Vs	80 - 2000 m/s
Vp	100 - 5000 m/s
ρ	800 - 2000 kg/m3
μ	0,25 - 0,35

Tabla 5: Parámetros de inversión

Fuente: Elaboración propia.

Y finalmente antes de correr la inversión en el módulo Dinver de Geopsy, se fijan los parámetros de ajuste, se deja en 50.000 los modelos iniciales (Ns0), los modelos que pasan el criterio de selección en cada generación (Ns) se deja en 2500 y finalmente el número de modelos recalculados por iteración (Nr) en 100. Cada parametrización se realiza 3 veces, resultando los perfiles de Vs que se observan en la figura 18:



Figura 18: Perfiles de Vs, a) Parametrizaciones de 3 a 6 estratos, b) Parametrizaciones de 7 a 10 estratos (elaboración propia).

De estas parametrizaciones se pueden obtener los distintos Vs<sub>30</sub> (según la ecuación 1) para cada opción, los cuales están con su misfit en la tabla 6:

N°capas	Misfit (%)	Vs30 (m/s)
3	4,2%	286
4	3,2%	277
5	3,3%	277
6	3,3%	275
7	3,1%	277
8	3,4%	272
9	3,1%	277
10	3,0%	280

Tabla 6: Información parametrizaciones

Fuente: Elaboración propia.

De esta tabla se obtiene un Vs<sub>30</sub> mínimo de 272 m/s y un valor máximo de 286 m/s, significando una variación de 5%, reflejando concordancia entre los distintos perfiles. Finalmente, luego de una comparación entre estos, además de tomar en consideración la tendencia de  $\lambda/3$  y  $\lambda/2$ , se define como perfil de Vs a la parametrización de 7 estratos:



Figura 19: Comparación sitio 1, a) Registro sondaje y b) Perfil seleccionado metodología convencional (elaboración propia).

Considerando que la estratigrafía del sondaje indica la presencia de arena limosa, el perfil seleccionado es coherente, ya que sus velocidades se encuentran dentro del rango esperado para este tipo de suelo. El perfil hasta 30 metros de profundidad se detalla en la tabla 7.

Capa	Desde (m)	Hasta (m)	Espesor (m)	Vs (m/s)	Vs <sub>30</sub> (m/s)
1	0,0	2,2	2,2	172	
2	2,2	7,9	5,7	235	
3	7,9	15,3	7,4	267	277
4	15,3	18,8	3,6	329	
5	18,8	30,0	11,2	339	

Tabla 7: Información de perfil de Vs seleccionado (elaboración propia)

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la tabla 7, de los valores de velocidad de onda de corte se infiere la presencia de materiales de compacidad suelta a media a partir del segundo estrato, esto conforme a lo detallado en la estratigrafía del sondaje. Las velocidades de Vs de la parametrización seleccionada concuerda con la información de la mecánica de suelos. Además, también existe concordancia con valores de Vs<sub>30</sub> calculados en lugares cercanos, los cuales están en el anexo 1.

### 3.1.4 Procesamiento e inversión considerando incertidumbre.

El procesamiento e inversión con incertidumbre comienza con el procesamiento de los registros en el flujo de trabajo SWprocess para la obtención de la curva de dispersión, para luego importar esta al flujo de trabajo SWinvert para la obtención de distintos perfiles de Vs con su gráfica de incertidumbre, Vantassel & Cox (2022, 2021b).

## 3.1.4.1 SWprocess, Vantassel & Cox (2022)

El esquema resumen del procesamiento considerando incertidumbre se encuentra en la figura 3 en la sección 2.5.1. Este flujo de trabajo comienza con el análisis de datos activos, tal como se muestra el esquema la figura 20:



Figura 20: Esquema procesamiento pasivo con SWprocess (elaboración propia).

Los pasos del análsis son los siguientes:

Paso 1: Se agrupan las señales registradas (stacking) según la distancia de golpeo, que tal como se mencionó anteriormente, se registraron 10 señales a una distancia de 6 metros y 10 señales a 9 metros.

Paso 2: Se define como flujo de trabajo MASW en el dominio del tiempo, que es lo recomendado para este análisis. Luego, se establece la duración de cada registro para el procesamiento, fijando en este caso, los 2 segundos de cada registro.

Paso 3: Se define el análisis del campo de ondas, que para este caso se selecciona la transformación FDBF con un vector de dirección de onda cilíndrica y ponderación de distancia de raíz cuadrada, con una frecuencia de interés mínima de 3 Hz y una velocidad máxima de 500 m/s. Además, también se define la relación señal/ruido (SNR) en un valor de 3.2 (equivalente a 10 dB), siguiendo así la recomendación.

Paso 4: se aplica la normalización de valores de amplitud, utilizando el método de máxima frecuencia, conforme a la recomendación. Como resultado de este procedimiento, se obtienen las siguientes curvas de dispersión:



Figura 21: Procesamiento registros activos con fuente a 6 m (SWprocess).



Figura 22: Procesamiento registros activos con fuente a 9 m (SWprocess).

De los gráficos obtenidos en las figuras 21 y 22, los sismogramas ilustran la señal del golpe en los 24 geófonos en ambas distancias de golpeo. Por otra parte, en los gráficos de dispersión (Vf v/s f) se observan claramente los modos fundamentales y superiores. El modo fundamental presenta confiabilidad según el gráfico de SNR v/s frecuencia, al superar el umbral definido anteriormente (10 dB).



Figura 23: Procesamiento pasivo con uso de transformada FDBF (SWprocess).





Figura 24: Procesamiento pasivo con uso de transformada FK (SWprocess).

Para finalizar el procesamiento de datos activos, se guardan las curvas de modos identificados en los gráficos observados en las figuras 23 y 24.

La segunda parte del flujo de trabajo de SWprocess corresponde al procesamiento de los registros pasivos, tal como se muestra en el esquema de la figura 25:



Figura 25: Esquema resumen procesamiento pasivos en SWprocess (Elaboración propia).

El primer paso es analizar el registro en Geopsy, utilizando la transformada f-k. Este procesamiento se realiza en 2 configuraciones, denominadas "C1" y "C2", las cuales tienen 2 enfoques: resolución convencional y alta resolución (HR). La diferencia entre ambas configuraciones radica en que en la herramienta FK Gridding (para configurar la grilla), "C1" tiene valores más bajos que "C2". Los valores utilizados en cada configuración siguen las recomendaciones establecidas en el flujo de trabajo. Además, se estableció la frecuencia de interés con un mínimo de 1 Hz y una velocidad mínima de interés de 150 m/s.

Luego de completar el procesamiento bajo estas configuraciones, los 4 archivos .max generados en Geopsy se importan al flujo de trabajo para graficar la curva de dispersión con los archivos obtenidos, tal como se observa en la figura 26:



Figura 26: Dipsersión pasiva, a) Variación en frecuencia, b) Variación en longitud de onda (SWprocess).

La tercera y última parte del flujo de trabajo de SWprocess es la combinación del procesamiento activo y pasivo, tal como se muestra en el esquema de la figura 27:



Figura 27: Esquema resumen SWprocess (elaboración propia).

Esta última parte, inicia importando los archivos procesados anteriormente, de tal forma de unir con la contribución activa y pasiva de los registros en un mismo gráfico, tal como se observa en la figura 28:



Figura 28: Dispersión sitio 1 en frecuencia (a) y en longitud de onda (b) (SWprocess).

Luego, se procede a realizar el recorte interactivo, estableciendo un límite de velocidad de interés de 450 m/s. Este valor se define en función de la caracterización del suelo obtenida a partir de la estratigrafía, la cual indica la presencia de arena limosa tipi Bio bío hasta 30 metros. Dicho límite permite eliminar datos atípicos y

facilitar la identificación del modo fundamental de la curva de dispersión, obteniendo como resultado lo mostrado en la figura 29:



Figura 29: Recorte interactivo en frecuencia (a) y en longitud de onda (b) en sitio 1 (SWprocess).

De esta forma, el flujo de trabajo calcula la dispersión experimental, lo que se traduce en barras de error, las cuales se observan en la figura 30:



Figura 30: Cálculo dispersión experimental en frecuencia (a) y en longitud de onda (b) (SWprocess).

Como se mencionó anteriormente, los datos de dispersión suelen presentar un coeficiente de variación (COV) entre 5% y 10%. Para evitar sesgos en los datos, se establece un COV mínimo de 5%. En este caso, dicho mínimo se aplicará en la zona de alta frecuencia o baja longitud de onda, donde la dispersión experimental es baja y no supera el 5%. Con esto, se finaliza el flujo de trabajo de SWprocess.

#### 3.1.4.2 SWinvert, Vantassel & Cox (2021b)

El esquema resumen de la inversión considerando incertidumbre se encuentra en la figura 4 en la sección 2.5.2.

Este flujo de trabajo inicia por importar la curva de dispersión al código, curva cuyo rango de frecuencias inicia en 2,7 Hz y finaliza en 39,5 Hz, y cuya longitud de onda va desde los 4,2 metros a los 110 metros.



Figura 31: Curva de dispersión con incertdiumbre en frecuencia (a) y en longiutd de onda (b) (SWinvert).

Luego de importar la curva de dispersión, el siguiente paso es definir los parámetros de inversión, los cuales se detallan en la tabla 5 (coeficiente de Poisson, rango de densidad y velocidades). Se realizan configuraciones de capas en el flujo de trabajo, las cuales son parametrizaciones de 3, 4, 5, 7, 9, 14 capas y parametrizaciones de relación entre capas de 10, 5, 3, 2, 1.5, 1.2. De esta forma, con la definición de parametrizaciones y la curva de dispersión se procede a correr la inversión en SWbatch (Vantassel et al., 2020), en dónde se realizan 10 iteraciones por cada parametrización, con 10000 modelos iniciales y 100 modelos finales.

Con la inversión realizada, la primera información entregada en el flujo de trabajo es un gráfico con los misfit de cada iteración de todas las parametrizaciones. Para este caso las distintas parametrizaciones presentan un misfit bastante similar entre las 10 iteraciones de cada una y entre las distintas parametrizaciones LN y LR, tal como se observa en la figura 32:



Luego, el flujo de trabajo entrega la variación de cada curva de dispersión teórica a lo largo de la curva de dispersión experimental, esto se observa en la figura 33:



Figura 33: Ajuste de cada curva de dispersión en frecuencia (a) y en longiutd de onda (b) en sitio 1 (SWinvert).

Finalmente, el flujo de trabajo entrega los perfiles con menor error de cada parametrización junto con la variación de la desviación estándar logarítmica en función de la profundidad, tal como se observa en la figura 34.



Figura 34: Relación entre perfiles de Vs (a) y su incertidumbre (b) (SWinvert).

De la figura 34 se observan 2 peaks de incertidumbre entre los perfiles, los cuales llegan a un valor de entre 0.15 y 0.20. Y los valores de Vs30 para cada parametrización se observan en la tabla 8:

a)	LN	Misfit (%)	Vs30 (m/s)	b)	LR	Misfit (%)	Vs30 (m/s)
	3	32,1%	285		1,2	29,7%	276
	4	29,0%	274		1,5	29,2%	274
	5	29,0%	275		2,0	29,0%	275
	7	29,3%	278		3,0	29,0%	273
	9	29,6%	275		5,0	29,0%	272
	14	30,2%	279		10,0	30,9%	272

Tabla 8: Vs30 de parametrizaciones LN (a) y LR (b).

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, al analizar los perfiles de Vs, se opta por eliminar las parametrizaciones en que el primer estrato de suelo tenga menor espesor, fijando un mínimo de 1.5 metros, esto dado que a esta profundidad el sondaje indica un cambio en la cantidad de golpes (lo que supone un aumento de rigidez del suelo) y también se opta por eliminar las parametrizaciones con mayor misifit. Con la modificación mencionada, los perfiles y variación de la incertidumbre se observan en la figura 35:



Figura 35: Relación entre perfiles de Vs no rechazados (a) y su incertidumbre (b) (SWinvert).

De esta forma, ahora sólo se consideran las parametrizaciones de número de capas 4,5 y 7, mientras que de relación entre capas de 1.5, 2.0, 3.0. Con esto, el gráfico de incertidumbre mantiene ambos peaks mencionados anteriormente, pero es más estable y de menor valor entre los peaks.

Los valores de Vs<sub>30</sub> asociados a los perfiles son los mostrados en la tabla 9:

Parametrización	Misfit (%)	Vs <sub>30</sub> (m/s)
LN 4	29,0%	274
LN 5	29,0%	275
LN 7	29,3%	278
LR 1,5	29,2%	274
LR 2,0	29,0%	275
LR 3.0	29.0%	273

Tabla 9: Parametrizaciones seleccionadas de SWinvert

Fuente: Elaboración propia.

De esta tabla se obtiene un Vs<sub>30</sub> variación de 2%, lo cual es una diferencia menor y también refleja una concordancia entre los distintos perfiles ya que el valor es estable, lo que se relaciona con un suelo homogéneo y una medición correctamente ejecutada.

### 3.2 Sitio 2: Coronel

Este sitio se ubica entre calle Las Tocas y la ruta 160 en la comuna de Coronel. Las mediciones de ondas superficiales fueron realizadas por Geotres Consultores Geotécnicos, mientras que la información del sondaje de 30 metros fue proporcionada por el Ingeniero Civil Pablo Sanzana (2024).

## 3.2.1. Adquisición de datos

La campaña de medición de ondas superficiales es similar con la campaña del sitio 1, la configuración de ensayos para la adquisición activa y pasiva son idénticos, al igual que los equipos utilizados. El informe de medición de ondas superficiales "Terreno By Pass, Coronel" elaborado por el equipo de Geotres (2024b) informa un Vs<sub>30</sub> de 253 m/s.

Por otra parte, se utilizó como referencia geotécnica la información de sondajes de 30 metros para el proyecto Hospital de Coronel (Aragón Ingeniería de suelos, 2022), terreno que se encuentra unos 300 metros del sitio de estudio. Este proyecto informa la estratigrafía presentada en la tabla 10:

Desde (m)	Hasta (m)	Matriz	Color	Compacidad	Humedad	Observaciones
0,0	0,8	Arena limosa	Gris oscuro	Suelta	Media	_
0,8	20,5	Arena limosa de grano medio grueso	Gris	Muy densa	Alta a saturada	Precencia de finos no plásticos
20,5	22,5	Limo con algo de arena fina	Gris claro	—	Media	Mediana cantidad de conchuelas
22,5	29,4	Arena fina limosa	Gris oscuro	Compacta	Alta	_
29,4	31,6	Arcilla de alta plasticidad con arena	Gris claro	Compacta	Media	Sin precencia de materia orgánica

Tabla 10	Estratigrafía sondaje
----------	-----------------------

Fuente: Adaptado de Aragón Ingeniería de suelos (2022).

### 3.2.2. Procesamiento e inversión convencional

Antes de iniciar el procesamiento de los datos activos, se rechazaron cuatro registros debido a un alto nivel de ruido. Como resultado, se procesan seis registros con la fuente a 9 metros y diez registros con la fuente a 6 metros.

El procesamiento de datos activos, para este sitio, se desarrolló en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo, obteniendo una curva definida entre los 10 a 40 Hz. Mientras que del procesamiento pasivo se obtiene una curva comprendida entre los 2 a 15 Hz.

Al unir la contribución pasiva y activa, se obtiene que la frecuencia de la curva de dispersión objetivo va desde los 2,2 hasta los 40 Hz, mientras que la longitud de onda va desde los 5,6 hasta 194 m.

Antes de iniciar la inversión se definen las mismas parametrizaciones de número de estratos que el sitio anterior, de 3 a 10 estratos. Los rangos de parámetros de inversión y parámetros de ajuste de inversión también son los mismos utilizados anteriormente. Al correr la inversión, se obtienen los siguientes perfiles de velocidad, los cuales se comparan con la inversión manual basada en las longitudes de onda.



Figura 36: Perfiles de Vs, a) Parametrizaciones de 3 a 6 estratos, b) Parametrizaciones de 7 a 10 estratos (Elaboración propia).

Para este sitio el porcentaje de variación de Vs<sub>30</sub> es de 5%, lo que habla de una consistencia entre los perfiles. Considerando también la tendencia de  $\lambda/3$  y  $\lambda/2$ , se define como perfil de Vs<sub>30</sub> a la parametrización de 9 estratos, la cual tiene un Vs<sub>30</sub> de 277 m/s y el detalle del perfil se muestra en la tabla 11:

Capa	Desde (m)	Hasta (m)	Espesor (m)	Vs (m/s)	Vs <sub>30</sub> (m/s)
1	0,0	2,7	2,7	237	
2	2,7	5,1	2,3	247	
3	5,1	8,8	3,8	254	277
4	8,8	25,1	16,3	278	
5	25,1	30,0	4,9	356	

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la tabla 11, las velocidades de Vs de la parametrización seleccionada también concuerda con la información de la mecánica de suelos.

## 3.2.3. Procesamiento e inversión considerando incertidumbre

En el procesamiento de registros activos, se observó que para este caso las transformadas del campo de ondas que obtienen mejor rendimiento son la de velocidad de fase y transformada FDBF. En la figura 37 se observan los registros apilados que tienen la fuente de golpeo a 9 metros:



Figura 37: Apilado de señales activas con fuente a 9 m con transformada de velocidad de fase (a) y transofmrada FDBF (b) (SWprocess).

En el procesamiento de registros pasivos, igualmente se aplicaron las configuraciones "C1" y "C2" de forma normal y de alta resolución, obteniendo los gráficos de dispersión de la figura 38:



Figura 38:Dispersión de datos pasivos en frecuencia (a) y en longitud de onda (b) (SWprocess).

Luego se procede a importar el procesamiento pasivo y activo para la realización del recorte de datos no coherentes en la curva de dispersión, resultado en la curva de dispersión de la figura 39.a, mientras que la dispersión de datos de esta curva se observa en la figura 39.b:



Figura 39: Cálculo dispersión experimental en frecuencia (a) y en longitud de onda (b), sitio 2 (SWprocess).

Con la obtención de la curva de dispersión, se procede a realizar la inversión, de la cual se obtienen perfiles de Vs bastante similares hasta los 24 metros en dónde la incertidumbre no supera el 5%, pero desde esa profundidad la incertidumbre sube hasta casi 18%, por ende, varía cambia la rigidez del suelo. Esta información se ve en la figura 40:



Figura 40: Relación entre perfiles de Vs (a) y su incertidumbre (b) (SWinvert).

El criterio para rechazar parametrizaciones además de aparatar aquellas que tienen mayor misft, se observa que las parametrizaciones LR tienen una tendencia más clara que LN en relación con la estratigrafía informada en el informe, por lo que se decide por dejar las parametrizaciones indicadas en la tabla 12:

Parametrización	Misfit (%)	Vs <sub>30</sub> (m/s)
LN 7	10,9%	273
LN 14	10,9%	275
LR 2,0	10,7%	270
LR 3,0	10,6%	274
LR 5,0	10,9%	272
LR 10	11,0%	267

Tabla 12: Parametrizaciones seleccionadas de SWinvert

Fuente: Elaboración propia.

Este filtro de parametrizaciones deja de la siguiente forma la comparación de perfiles de Vs y gráfico de incertidumbre:



Figura 41: Relación entre perfiles no rechazados de Vs (a) y su incertidumbre (b) (SWinvert).

Observando que el mayor peak de incertidumbre se da entre 25 y 30 metros, lo que concuerda con el cambio de estrato, lo que concuerda con la estratigrafía informada, ya que en esta zona la matriz de suelo pasa a compacidad más compacta.

#### 3.3 Sitio 3: Talcahuano

Este sitio se ubica entre calle Jaime Repullo, en la comuna de Talcahuano. Las mediciones de ondas superficiales fueron realizadas por Geotres Consultores Geotécnicos (2023).

#### 3.3.1. Adquisición de datos

La campaña de medición de ondas superficiales en este sitio fue similar a la realizada en los sitios 1 y 2, utilizando los mismos equipos y configuraciones de ensayo para la adquisición activa y pasiva. La única diferencia radica en la separación entre geófonos, que en este caso fue de 2 metros, mientras que las distancias de golpeo fueron de 4 y 6m. Según el informe de medición de ondas superficiales "Ampliación

Aceros Regionales Talcahuano, región del Biobío", elaborado por el equipo de Geotres (2023), el valor de Vs30 obtenido fue de 229 m/s.

Por otra parte, se utilizó como referencia geotécnica se considera el mapa geológico de Chile (SERNAGEOMIN, 2004), el cual indica que el sitio de estudio se encuentra en una unidad geológica correspondiente al Pleistoceno-Holoceno, caracterizada por depósitos litorales compuestos principalmente por arenas y gravas de playas actuales, tal como se indica en la figura 42:



Figura 42: Recorte de Mapa Geológico de Chile (SERNAGEOMIN, 2004).

## 3.3.2. Procesamiento e inversión convencional

Para procesamiento de datos activos, se analizaron 10 registros con la fuente de golpeo a 4 metros y 10 registros a 6 metros. Este procesamiento se desarrolló en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo, obteniendo una curva definida entre los 11 a 44 Hz. Mientras que del procesamiento pasivo se obtiene una curva comprendida entre los 2 a 16 Hz.

Al unir la contribución pasiva y activa, se obtiene que la frecuencia de la curva de dispersión objetivo va desde los 2 hasta los 44 Hz, mientras que la longitud de onda va desde los 4,8 hasta 216 m.

Antes de iniciar la inversión se definen las mismas parametrizaciones de número de estratos que los sitios anteriores, de 3 a 10 estratos. Los rangos de parámetros de inversión y parámetros de ajuste de inversión también son los mismos utilizados anteriormente. Al correr la inversión, se obtienen los siguientes perfiles de velocidad, los cuales se comparan con la inversión manual basada en las longitudes de onda.



Figura 43: Perfiles de Vs a) Parametrizaciones de 3 a 6 estratos, b) Parametrizaciones de 7 a 10 estratos (Elaboración propia).

Para este sitio el porcentaje de variación de Vs<sub>30</sub> es de 9%, lo que no es mayor, considerando que los perfiles de Vs visualmente discrepan. Por otra parte, al analizar la tendencia de  $\lambda/3$  y  $\lambda/2$ , se define como perfil de Vs<sub>30</sub> a la parametrización de 8 estratos, la cual tiene un Vs<sub>30</sub> de 235 m/s, el detalle del perfil se muestra en la tabla 13:

Capa	Desde (m)	Hasta (m)	Espesor (m)	Vs (m/s)	Vs30 (m/s)
1	0,0	1,3	1,3	196	
2	1,3	11,0	9,7	200	225
3	11,0	18,7	7,6	228	235
4	18,7	30,0	11,3	289	

Tabla 13: Información perfil de Vs seleccionado

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la tabla 13, las velocidades de Vs de la parametrización seleccionada también concuerda con la información geotécnica de la zona, ya que es un valor característico de arena suelta.

#### 3.3.3. Procesamiento e inversión considerando incertidumbre

En el procesamiento de registros activos, se observó que para este caso las transformadas del campo de ondas que obtienen mejor rendimiento son la de velocidad de fase y transformada FDBF. En la figura 44 se observan los registros apilados que tienen la fuente de golpeo a 9 metros:



Figura 44: Apilado de señales activas con fuente a 6 m utilizando transformada FK (a) y transformada FDBF (b) (SWprocess).

En el procesamiento de registros pasivos, igualmente se aplicaron las configuraciones "C1" y "C2" de forma normal y de alta resolución, obteniendo los gráficos de dispersión de la figura 45:



Figura 45: Dispersión de datos pasivos en frecuencia (a) y en longitud de onda (b) (SWprocess).

Luego se procede a importar el procesamiento pasivo y activo para la realización del recorte de datos no coherentes en la curva de dispersión, resultado en la curva de

dispersión de la figura 46.a, mientras que la dispersión de datos de esta curva se observa en la figura 46.b:



Figura 46: Cálculo dispersión experimental en frecuencia (a) y en longitud de onda (b) (SWprocess).

Con la obtención de la curva de dispersión, se procede a realizar la inversión, de la cual se obtienen perfiles de Vs bastante similares hasta los 20 metros en dónde la incertidumbre no supera el 4%, salvo un peak en los 7 metros que tiene un valor de 8%. Luego la incertidumbre sube hasta el 15% y 20% al llegar a los 30 metros, tal como se observa en la figura 47:



Figura 47: Relación entre perfiles de Vs (a) y su incertidumbre (b) (SWinvert).

El criterio para rechazar parametrizaciones además de aparatar aquellas que tienen mayor misft, se observa que las parametrizaciones LR tienen una tendencia más clara que LN en relación con la estratigrafía informada en el informe, por lo que se decide por dejar las parametrizaciones indicadas en la tabla 14:

Misfit (%)	Vs30 (m/s)
16,3%	244
16,3%	244
16,4%	242
16,5%	238
16,5%	245
16,5%	241
	Misfit (%) 16,3% 16,4% 16,5% 16,5% 16,5%

Tabla 14: Parametrizaciones seleccionadas de SWinvert

Este filtro de parametrizaciones deja de la siguiente forma la comparación de perfiles de Vs y gráfico de incertidumbre:



Figura 48: Relación entre perfiles no rechazados de Vs (a) y su incertidumbre (b) (SWinvert).

Observando que la mayor de incertidumbre se da entre 20 y 30 metros, variando entre valores de 6% a 15%.

Fuente: Elaboración propia.

# **CAPÍTULO IV RESULTADOS**

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en relación con los antecedentes geotécnicos de los sitios, los perfiles de velocidad de onda medidos y la propagación de incertidumbre para los 3 sitios analizados.

#### 4.1. Sitio 1: San Pedro de la Paz

Los perfiles de Vs hasta 30 m junto a su desviación estándar logarítmica se muestran en comparación al registro SPT de sondaje en la figura 49:



Figura 49: Comparación entre sondaje (a), perfiles de Vs (b) e incertidumbre (c) (elaboración porpia).

De la información del sondaje, se observa que a partir de 1,5 metros hay un aumento en los golpes registrados que indica un aumento en la compacidad del suelo y esto se refleja en los perfiles de Vs al mostrar el cambio del primer estrato al segundo.

Si bien la comparación entre SPT y Vs no es directa (ya que miden rangos de deformación distinto), sirve como guía para analizar cambios estratigráficos. La estratigrafía correspondiente a arena Biobío muestra que los valores de los golpes siguen aproximadamente una tendencia de 60 golpes. Su variación puede explicarse

por los diferentes niveles de compactación de las arenas. Por otro lado, la velocidad de ondas de corte (Vs) refleja el incremento en la rigidez del suelo, la cual aumenta de manera monótona con la profundidad.

De la metodología convencional, el perfil seleccionado de 7 estratos (en color celeste) tiene un  $Vs_{30}$  de 277 m/s, mientras que en rango de  $Vs_{30}$  de los perfiles resultantes de la metodología con incertidumbre (en negro) van desde 273 m/s a 278 m/s. Estos resultados no varían más de 7% respecto al  $Vs_{30}$  de 292 m/s informado por Geotres (2024a), mientras que respecto al sitio n° 42 del informe de FUCHIGE (2015) no varían más de 21%.

La incertidumbre presenta dos peaks entre 15% y el 20%, ubicados en los límites de las capas, mientras que en las capas más homogéneas la incertidumbre es menor.

Utilizando la incertidumbre obtenida se puede escoger un perfil de Vs para propagar esta incertidumbre en profundidad. La figura 50.a presenta el perfil de velocidad a través de 5 estratos, incorporando la incertidumbre asociada mediante los límites superior e inferior para una y dos desviaciones estándar ( $\sigma$ ), mientras que la parte b muestra los 100 mejores perfiles obtenidos.



(elaboración propia).

La propagación de la incertidumbre en las capas de suelo permite al profesional, según su criterio, utilizarla en análisis específicos.

#### 4.2. Sitio 2: Coronel

Los perfiles Vs hasta 30 m junto a su desviación estándar logarítmica se muestran en comparación al registro SPT de sondaje en la figura 51:



Figura 51: Comparación entre sondaje (a), perfiles de Vs (b) e incertidumbre (c) (elaboración propia).

En este caso la variabilidad del sondaje es mayor, indicando una alta variabilidad en la compacidad en el punto que fue realizado. Sin embargo embargo hasta los 24 metros perfiles de Vs presentan estabilidad y por ende, baja incertidumbre.

De la metodología convencional, el perfil seleccionado para este sitio fue de 9 estratos (color celeste) tiene un Vs<sub>30</sub> de 277 m/s, mientras que en rango de Vs<sub>30</sub> de los perfiles resultantes de la metodología con incertidumbre (en negro) van desde 267 m/s a 275 m/s. Estos resultados no varían más de 10% respecto al Vs<sub>30</sub> de 253 m/s informado por Geotres (2024b). Estos valores y la tendencia de los perfiles de Vs son representativos de arena Biobío con las caracterizas de cementación caracterizada en este sitio.

En cuanto a la incertidumbre, es relativamente estable entre 3 y 24 metros, de hecho, no superan el 3%, salvo un pequeño aumento en los 12 metros que llega al 6%, habiendo homogeneidad y confiabilidad de Vs en ese rango. Sin embargo, desde los

24 a 30 metros la incertidumbre aumenta alcanzando un peak de 20%, en este rango todas las parametrizaciones registran un cambio de estrato, discrepando en su velocidad.

La figura 52.a muestra el perfil de Vs de siete estratos, incluyendo la incertidumbre obtenida para este sitio mediante los límites superior e inferior para una y dos desviaciones estándar ( $\sigma$ ), mientras que la parte b muestra los 100 mejores perfiles obtenidos.



Figura 52: Incertidumbre en perfil de Vs (a) y mejores 100 perfiles (b) (elaboración propia).

## 4.2. Sitio 3: Talcahuano

Los perfiles de Vs hasta 30 m junto a su desviación estándar logarítmica se muestran en la figura 53:



Figura 53: Relación entre perfiles de Vs (a) e incertidumbre (b) (elaboración propia).

De la metodología convencional, el perfil seleccionado para este sitio fue de 8 estratos (en color celeste) tiene un Vs<sub>30</sub> de 235 m/s, mientras que en rango de Vs<sub>30</sub> de los perfiles resultantes de la metodología con incertidumbre (en negro) van desde 238 m/s a 245 m/s. Estos resultados no varían más de 7% respecto al Vs<sub>30</sub> de 229 m/s informado por Geotres (2023). Estos valores y la tendencia de los perfiles de Vs son representativos de arena Biobío suelta.

En cuanto a la incertidumbre, es relativamente estable hasta los 18 metros no superando el 3%, salvo un peak de casi 10% a los 8 metros dado que todas las parametrizaciones concuerdan en un cambio de rigidez del suelo en esa profundidad. Desde los 18 m la incertidumbre es variable entre valores de 15% a 7% debido a que los perfiles de Vs tienen un rango variable de velocidad desde esa profundidad.

La figura 54.a muestra el perfil de Vs de cinco estratos, incluyendo la incertidumbre obtenida para este sitio mediante los límites superior e inferior para una y dos desviaciones estándar ( $\sigma$ ).



(elaboración propia).

La figura 54.b muestra los mejores 100 perfiles obtenidos, cuyas diferencias son coherentes con la incertidumbre estimada.

# **CAPÍTULO V Conclusiones**

En este capítulo se presentan las principales conclusiones del estudio, abordando la caracterización de los perfiles de velocidad de onda de corte (Vs). Se discute la influencia de la incorporación de incertidumbre en la inversión de ondas superficiales, analizando su impacto en la variabilidad de Vs. Finalmente, se destaca la contribución de este trabajo a la caracterización dinámica de la arena Biobío y su relevancia para futuros estudios.

# 5.1. Conclusiones

En este trabajo, los resultados de perfiles de velocidad de onda de corte en los 3 sitios de estudio ubicados en San Pedro de la Paz, Coronel y Talcahuano que están caracterizados por la presencia de arena Biobío, obtuvieron valores coherentes de Vs en relación con la geología local y estratigrafía correspondiente.

Siguiendo la Guía de Caracterización Dinámica de Sitios (Sáez et al, 2024b) considerando parametrizaciones desde 3 a 10 capas, se obtuvieron perfiles de Vs en su mayoría consistentes con la información geotécnica disponible para cada sitio. Por otro lado, bajo esta metodología y parametrizaciones, los valores de Vs<sub>30</sub> mostraron una variación de hasta 5% en los sitios 1 y 2 y de hasta 9% en el sitio 3.

De acuerdo con las metodologías Swprocess y SWinvert (Vantassel & Cox,2022, 2021b) también resultaron con Vs en su mayoría coherentes con la información geotécnica, esto a pesar de que el rango de adaptación de la curva de dispersión teórica a la curva de dispersión experimental fuera mayor que en la metodología que no incluye incertidumbre. En cuanto a Vs<sub>30</sub>, en esta metodología la variabilidad de este parámetro fue menor, alcanzando rangos de 2% a 3% luego de rechazar las parametrizaciones de menor adaptación para cada sitio.

La variación de Vs<sub>30</sub> es baja en un perfil de suelo homogéneo y es consistente con lo indicado por Leyton et al. (2024b), quienes señalan que este parámetro es robusto en términos de estabilidad independientemente del método de estimación.

Sin embargo, reforzar que Vs<sub>30</sub> es un parámetro robusto, no significa que los distintos perfiles de Vs también presenten poca variabilidad, esto se puede observar en los gráficos de incertidumbre de los 3 sitios, en dónde a pesar de que las distintas parametrizaciones tengan una tendencia clara, los valores de Vs difieren en distintas profundidades y valores.

El análisis de la incorporación de incertidumbre en los casos de estudio muestra estabilidad en rangos de hasta aproximadamente 6 metros, con valores bajos de incertidumbre (<3%). Sin embargo, se identifican peaks que alcanzan un máximo del 20% entre los perfiles de Vs obtenidos mediante las metodologías de Vantassel & Cox (2022, 2021b). Estos resultados resaltan la importancia de considerar la incertidumbre en los análisis de ondas superficiales, ya que permite caracterizar de manera más precisa la variabilidad inherente en la estimación del perfil de velocidades de ondas de corte. Su omisión podría llevar a la subestimación o sobreestimación de los valores de Vs, lo que afectaría la correcta evaluación de la rigidez del terreno y, en consecuencia, la interpretación de su comportamiento dinámico.

La incorporación de incertidumbre en los análisis geotécnicos permite realizar evaluaciones más robustas y representativas del comportamiento dinámico del terreno. Esto es relevante en casos de suelos con capas blandas de espesor variable, suelos susceptibles a la licuación y condiciones de estratificación compleja. En estos escenarios, una caracterización más detallada del perfil de velocidades resulta esencial para la estimación precisa de la respuesta de sitio y la clasificación sísmica del suelo, siendo un desafío importante cómo traducir dicha incertidumbre en un parámetro útil para ambos fines.

Un ejemplo consiste en incorporar la incertidumbre del perfil de velocidad de ondas de corte en el cálculo del parámetro Vs<sub>30</sub>, lo que podría generar cambios en la clasificación sísmica de sitio. Asimismo, los análisis respuesta de sitio podrían beneficiarse al evaluar la rigidez del suelo hasta la roca considerando los mejores 100 o 1000 perfiles que presentan mejor ajuste teórico o introduciendo variaciones en el perfil en función del valor de la incertidumbre y de acuerdo con el criterio del especialista.

60

Este trabajo contribuye a la caracterización de la arena Biobío, enfocándose en su comportamiento dinámico a través del análisis de la variabilidad en los perfiles de velocidad de onda de corte. Los resultados obtenidos servirán como base para futuros estudios de fenómenos y parámetros relacionados con Vs, como la susceptibilidad a la licuación y el efecto de sitio.

# 5.2. Trabajos futuros

Para ampliar y profundizar el trabajo realizado, a futuro se planea emplear estas metodologías en suelos con mayor variabilidad espacial a modo de evaluar la aplicabilidad de los enfoques realizados en este estudio.

En segundo lugar, se planea estudiar la propagación de incertidumbre en perfiles profundos de Vs hasta la roca, permitiendo analizar como esta influye en la respuesta de sitio en superficie.
## REFERENCIAS

- Aki, K. (1957). Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors.
- Aragón Ingeniería de Suelos. (2022). *Estudio de mecánica de suelos Hospital de Coronel, Región del Biobío*.
- Chávez-García, Francisco J, & Montalva, Gonzalo A. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. Obras y proyectos, (16), 6-30. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132014000200001
- Fundación Chilena de Investigación Geotécnica. (2015). Resumen: Caracterización geotécnica.
- Foti, S., Hollender, F., Garofalo, F., Albarello, D., Asten, M., Bard, P.-Y., Comina, C., Cornou, C., Cox, B., Di Giulio, G., Forbriger, T., Hayashi, K., Lunedei, E., Martin, A., Mercerat, D., Ohrnberger, M., Poggi, V., Renalier, F., Sicilia, D., & Socco, V. (2018). Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project. Bulletin of Earthquake Engineering, 16(6), 2367– 2420. https://doi.org/10.1007/s10518-017-0206-7
- Foti, S., Lai, C. G., Rix, G. J., & Strobbia, C. (2014). Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization. In Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization. <u>https://doi.org/10.1201/b17268</u>
- Geotres Consultores Geotécnicos. (2023). Informe medición de ondas superficiales "Ampliación Aceros Regionales Talcahuano, región del Biobío ".
- Geotres Consultores Geotécnicos. (2024a). Informe medición de ondas superficiales " Proyecto Plaza Sur, San Pedro de la Paz".
- Geotres Consultores Geotécnicos. (2024b). Informe medición de ondas superficiales "By Pass, Coronel".
- 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. Repositorio de la UC. https://repositorio.uc.cl/handle/11534/2877

- Humire, F., Sáez, E., & Leyton, F. (2015). *Manual de aplicación técnicas geofísicas* basadas en ondas de superficie para la determinación del parámetro Vs30.
- Instituto Nacional de Normalización. (2024). Anteproyecto de norma prNCh3793: Técnicas geofísicas sísmicas para la caracterización dinámica de sitios (en proceso).
- Joseph Vantassel. (2020). jpvantassel/swprepost: latest (Concept). Zenodo. http://doi.org/10.5281/zenodo.3839998
- Kramer, S. L., & Stewart, J. P. (2024). *Geotechnical earthquake engineering* (2nd ed.). CRC Press. <u>https://doi.org/10.1201/9781003512011</u>
- Lacoss, R. T., Kelly, E. J., & Toksöz, M. N. (1969). *Estimation of seismic noise structure using arrays. Geophysics*, 34(1). <u>https://doi.org/10.1190/1.1439995</u>
- Leyton, F. (2024a). Limitaciones del parámetro Vs30 para la predicción del movimiento fuerte. Obras y Proyectos 35, 6-14 <u>https://doi.org/10.21703/0718-</u> 2813.2024.35.2794
- Leyton, F., Montalva, G., Pastén, C., Ruz, F., Sáez, E., Taiba, O. y Tiznado, J. (2024b). Variabilidad de resultados de la exploración geofísica de sitios usando métodos de ondas superficiales. Obras y Proyectos 35, 22-30 https://doi.org/10.21703/0718-2813.2024.35.2796

Ministerio de Obras Públicas. (2024). Manual de carreteras: Volumen 3

- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2011). *Decreto Supremo No. 61: Reglamento de la Ley General de Urbanismo y Construcciones*. Diario Oficial. Recuperado de <u>https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1034101</u>
- Núñez-Jara, S., Montalva, G., Pilz, M., Miller, M., Saldaña, H., Olivar-Castaño, A., & Araya, R. (2024). Spatial variability of shear wave velocity: Implications for the liquefaction response of a case study from the 2010 Maule Mw 8.8 Earthquake, Chile. Frontiers in Earth Science, 12. <a href="https://doi.org/10.3389/feart.2024.1354058">https://doi.org/10.3389/feart.2024.1354058</a>
- Oliveras, F. (2024) Avances en la definición de indicadores de incertidumbre en el cálculo del Vs30 basado en métodos de ondas superficiales. <u>https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/200220</u>

- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). *Multichannel analysis of surface waves*. Geophysics, 64(3), 800–808. <u>https://doi.org/10.1190/1.1444590</u>
- Ramírez C., P., Vivallos C., J., Cáceres A., D., & Fonseca H., A. (2012). *Mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de San Pedro de la Paz, Región del Biobío* [Mapa]. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Sáez, E., Hernández, F., Vega, R., Tiznado, J. C., Gallardo, R., Leyton, F., Montalva, G., & Pastén, C. (2024a). Uncertainty estimation on active surface-waves based tests. <u>https://doi.org/10.23967/isc.2024.164</u>
- Sáez, E., Leyton, F., Pastén, C., Montalva, G., & Tiznado, J.C. (2024b). *Guía de Caracterización Dinámica de Sitios* Proyecto Fondef ID22I10032.
- Sanzana Jara, P. (2024). E.P CODES: Proyecto C.N.T Plaza Sur, San Pedro de la Paz
- Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN). (2004). *Mapa geológico de Chile: Versión digital* (Publicación Geológica Digital N.º 007) [CD-ROM]. SERNAGEOMIN.
- Toro, G. R. (2022). *Uncertainty in shear-wave velocity profiles*. Journal of Seismology, 26, 939–955. <u>https://doi.org/10.1007/s10950-022-10084-x</u>
- Vantassel, J.P., Gurram, H., and Cox, B.R., (2020). jpvantassel/swbatch: latest (Concept). Zenodo. <u>https://doi.org/10.5281/zenodo.3840546</u>
- Vantassel, J. P., & Cox, B. R. (2021a). A procedure for developing uncertaintyconsistent Vs profiles from inversion of surface wave dispersion data. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 150, 106622. <u>https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106622</u>
- Vantassel, J. P., & Cox, B. R. (2021b). *SWinvert: A workflow for performing rigorous 1-D surface wave inversions*. Geophysical Journal International, 225(1), 166–189. <u>https://doi.org/10.1093/gji/ggaa426</u>
- Vantassel, J. P. (2021c). jpvantassel/swprocess: latest (Concept). Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.4584128

- Vantassel, J. P., & Cox, B. R. (2022). SWprocess: A workflow for developing robust estimates of surface wave dispersion uncertainty. Journal of Seismology, 26, 79–102. <u>https://doi.org/10.1007/s10950-021-10035-y</u>
- Wathelet, M. (2005). Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion. PhD Thesis, Université de Liège, Belgium.

## ANEXO 1: Antecedentes FUCHIGE

Como datos adicionales se utilizó el informe resumen de caracterización geotécnica de FUCHIGE (2015), la cual está a disposición libre.

En este informe hay mediciones de Vs<sub>30</sub> en San Pedro, las cuales tienen el siguiente perfil de velocidad de ondas de corte, primero para la ubicación n°38 del informe hay 2 perfiles de velocidades, y su ubicación respecto al sitio 1 se ve en la figura 55.

Perfil 1		Perfil 2		
Profundidad (m )	Vs (m/s)	(m/s) Profundidad (m )		
0,0 - 3,36	270	0,0 - 3,36	270	
3,36 - 10,62	358	3,36 - 10,62	358	
10,62 - 16,73	418	10,62 - 16,73	418	
16,73 - 27,18	480	16,73 - 27,18	478	
27,18 - 40,68	541	27,18 - 40,68	883	
40,68 - 50	1134	40,68 - 50	1194	
Vs30	404	Vs30	414	

Tabla 15:	Velocidad	de	onda	de	corte	ubicación	n°38

Para la ubicación n°42 del informe también hay 2 perfiles de velocidades, y su ubicación respecto al proyecto sitio 1 se ve en la figura 55.

Tabla 16: velocidad de onda de corte ubicación n 42						
Perfil 1		Perfil 2				
Profundidad (m )	Vs (m/s)	Profundidad (m )	Vs (m/s)			
0,0 - 4,25	162	0,0 - 4,25	168			
4,25 - 9,25	187	4,25 - 9,25	247			
9,25 - 13,25	269	9,25 - 14,75	264			
13,25 - 17,25	876	14,75 - 27,5	423			
17,25 - 50	915	27,5 - 50	707			
Vs30	347,1	Vs30	300,4			

Tabla 16: Velocidad de onda de corte ubicación n°42

Fuente: FUCHIGE ,2015.

En la figura 55 se observan las ubicaciones 38 y 42 junto al sitio 1 en la comuna de San Pedro de la Paz:



Figura 55: Ubicación sitio 1 y mediciones FUCHIGE (Google Earth).

Fuente: FUCHIGE ,2015.