



Parametrización y validación del perfil V_s mediante la comparación entre periodos fundamentales teóricos y experimental del suelo

J. Pavez Troncoso¹, R. Ponce Abarca², E. Maldonado Ortiz³, J. Montenegro Cooper⁴,

RESUMEN

El objetivo principal de este estudio es definir perfiles de velocidades de onda de corte (V_s) basados en el periodo fundamental del suelo. Este periodo se determinó empleando dos enfoques diferentes: experimentalmente mediante el método de Nakamura H/V apoyado en registros de microtremores, y teóricamente utilizando diversas ecuaciones y métodos. Los periodos experimentales y la estimación de profundidad al basamento rocoso posibilitaron la calibración de modelos de perfiles de velocidad de ondas de corte por medio de ecuaciones exponenciales decrecientes. La primera validez de estas estimaciones se corroboró mediante la aplicación de tres métodos teóricos distintos. Además, se orientó un enfoque numérico como validación final, a través de la estimación de espectros de respuesta de aceleración basados en un método no lineal, con un registro sísmico conocido en roca, del cual se consideró como referencia el Terremoto del 2010 adquirido en la estación sismográfica del cerro El Roble, RM. Lo anterior, con el propósito de establecer una relación entre el periodo experimental y el periodo predominante de la aceleración máxima del espectro, y de esta manera validar el modelo de velocidad de ondas de corte. Finalmente, con la información y los parámetros derivados de este estudio, se procedió a la clasificación específica del tipo de suelo conforme a la Tabla N°5 de la norma NCh2369. Of 2023, que actualmente se encuentra en revisión y pendiente de publicación en el Diario Oficial.

PALABRAS CLAVES: Estimación Perfiles V_s , Periodo fundamental del suelo, Espectro de aceleración.

ABSTRACT

The main objective of this study is to define shear wave velocity (V_s) profiles based on the fundamental period of the soil. This period was determined using two different approaches: experimentally through the Nakamura H/V method supported by microtremor recordings, and theoretically using various equations and methods. The experimental periods and the estimation of depth to the bedrock enabled the calibration of shear wave velocity profile models using decreasing exponential equations. The initial validity of these estimates was corroborated by applying three different theoretical methods. Additionally, a numerical approach was used as the final validation through the estimation of acceleration response spectra based on a nonlinear method, using a known seismic record on rock, specifically the 2010 earthquake recorded at the El Roble Hill seismographic station in the Metropolitan Region. The purpose was to establish a relationship between the experimental period and the predominant period of the maximum acceleration of the spectrum, thereby validating the shear wave velocity model. Finally, with the information and parameters derived from this study, the specific classification of the soil type was carried out according to Table No. 5 of the NCh2369 standard. Of 2023, which is currently under review and pending publication in the Official Journal.

KEYWORDS: Estimation of VS Profiles, Fundamental Soil Period, Acceleration Spectrum.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jpavez@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rponce@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, emaldonado@ucsc.cl

⁴ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jmontenegro@ucsc.cl



1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la sismología y la ingeniería civil, la comprensión profunda de las propiedades del suelo y su respuesta ante movimientos sísmicos es crucial para garantizar estructuras seguras y resilientes. En este contexto, la determinación de los espectros de respuesta, la estimación de los periodos y del perfil de velocidad de ondas de corte emergen como aspectos fundamentales. Con estos puntos en consideración, se define el enfoque del estudio, que tiene como idea principal establecer perfiles V_S hasta el basamento rocoso de la zona en estudio, a través de la calibración de métodos numéricos.

El área de investigación para el estudio se centró en dos zonas específicas de la comuna de Talcahuano, siendo la zona 1 el sector del Canal Ifarle y la zona 2 el sector de Brisas del Sol.

En las zonas de estudio mencionadas, se realizaron mediciones del periodo fundamental a través del método Nakamura, con el objetivo de obtener información del terreno y calibrar los modelos. Por otro lado, se utilizó información gravimétrica del área Concepción-Talcahuano del SERNAGEOMIN (Donoso & Velásquez, 2022), para la estimación de la profundidad al basamento rocoso en las áreas descritas.

Luego, la calibración del perfil de velocidad de ondas de corte se llevó a cabo a través de diversos métodos numéricos (Madera, 1970; Dobry, Oweis & Urzua, 1976; Hadjian, 2002; Vijayendra, Prasad, & Nayak, 2010) y datos experimentales medidos en terreno, específicamente los periodos fundamentales del suelo.

La combinación de información medida en terreno y una buena revisión bibliográfica sobre datos existentes de la profundidad al basamento rocoso, permitieron la estimación de un modelo V_S en profundidad.

Una vez calibrado el modelo de perfil de velocidad de ondas de corte, conocida la profundidad al basamento rocoso y teniendo como dato de entrada el registro sísmico del terremoto del 2010 en roca, se buscará validar la información estimada, a través de la simulación numérica de modelamiento no lineal en el comportamiento roca-sismo-suelo, de esta manera estimar el periodo de amplitud máxima de aceleración, debiendo ser muy similar al medido al periodo fundamental medido en terreno.

Por último, como objetivo secundario, los resultados concluyentes del estudio facilitan la clasificación del tipo de suelo conforme a los parámetros establecidos por la norma NCh2369. Of 2023, la cual se encuentra en revisión y es relativa al diseño sísmico industrial, para estructuras livianas y pesadas. Es imperativo subrayar que las áreas objeto de estudio no fueron deliberadamente seleccionadas con la finalidad expresa de cumplir dicha normativa, ya que el verdadero énfasis y propósito primordial de este radica en la meticulosa estimación de perfiles V_S mediante el periodo fundamental del suelo y diversos métodos que lo justifican.

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se expondrán los métodos experimentales, teóricos y computacionales utilizados para estimar las propiedades dinámicas del suelo, cuyos resultados fundamentarán la determinación de los perfiles V_S



2.1 Método experimental para la obtención del periodo fundamental del suelo.

En este apartado se presenta el método experimental empleado para la estimación del periodo fundamental del suelo, destacando su procedimiento asociado y criterios empíricos.

2.1.1 Método de Nakamura H/V

La determinación experimental de los periodos fundamentales del suelo se realiza empleando el método propuesto por Nakamura (1989). Este se utiliza para evaluar las características de atenuación sísmica del suelo por medio de análisis de espectro de microtremores o ruido sísmico ambiental, para estimar una respuesta de sitio en el punto de estudio.

El método de Nakamura emplea sensores de aceleración para registrar microtremores en tres direcciones: dos horizontales y una vertical. Tras registrar estas señales, se aplican al dominio frecuencial mediante la transformada de Fourier, permitiendo así descomponer la señal en sus componentes de frecuencia. Esta técnica es crucial para identificar la relación H/V, que compara los espectros horizontales y verticales. A partir de esto, se obtiene la información clave para determinar la frecuencia fundamental, momento en el que el suelo manifiesta su máxima respuesta dinámica. Posteriormente, esta frecuencia se transforma en el periodo fundamental del suelo. Diversos estudios respaldan la validez de este enfoque (Lermo & Chávez-García, 1993; Lachet et al., 1996; Konno & Ohmachi, 1998; Bonnefoy-Claudet et al., 2008).

Esta técnica es una expansión del método propuesto por Nogoshi y Igarashi (1970;1971), quienes fueron pioneros en demostrar la relación entre las curvas H/V como una herramienta para la caracterización del subsuelo, complementándolas con varias otras técnicas geofísicas, como la sismología de refracción, reflexión y la gravedad.

Por su parte, Nakamura (1989) en el desarrollo de su método, empleo la relación entre los efectos de sitio (S_E) y de la onda de Rayleigh (A_S). Esto le permitió relacionar las amplitudes de las ondas sísmicas de la superficie y la profundidad del basamento rocoso por medio de los componentes horizontales y verticales del espectro de Fourier.

Entonces, la relación entre el efecto de sitio (S_E) y la onda de Rayleigh (A_S) es la siguiente.

$$S_E = \frac{H_s}{H_b} \quad A_S = \frac{V_s}{V_b}$$

Donde:

- H_s es la amplitud del espectro de Fourier de la componente horizontal de la onda sísmica en la superficie.
- H_b es la amplitud del espectro de Fourier de la componente horizontal de la onda sísmica en la base de la capa sedimentaria.
- V_s es la amplitud del espectro de Fourier de la componente vertical de la onda sísmica en la superficie.
- V_b es la amplitud del espectro de Fourier de la componente vertical de la onda sísmica en la base de la capa sedimentaria.



Cuando se relacionan ambos efectos, se elimina el impacto de las ondas de Rayleigh, obteniendo una función de transferencia que no considera la fuente sísmica, por lo que nos permitirá obtener una estimación más precisa. A este concepto se le llama modificación del efecto de sitio (S_M).

$$S_M = \frac{S_E}{A_S}$$

Nakamura (1989) en sus observaciones, demuestra que, para suelos rocosos incluyendo bases de sustrato firme, el espectro H_B/V_B tiende a 1, ya que las amplitudes de las componentes vertical y horizontal son similares. Por lo que la ecuación de la modificada queda de la siguiente forma.

$$S_M = \frac{H_S}{V_S}$$

Este descubrimiento de Nakamura (1989) fue crucial, ya que demostró que el efecto provocado por microtemores superficiales es representativa a las causadas en el manto rocoso. Debido a este hallazgo, se formuló una estimación más precisa del período fundamental del suelo (T_S) al relacionar su ecuación modificada (S_M) con dicho efecto en estudios posteriores (Lachet & Bard, 1994; Lermo & Chávez-García, 1994).

2.1.2 Criterios SESAME

Los criterios SESAME (2004) son reglas empíricas, desarrolladas para verificar y dar validez a las frecuencias y periodos fundamentales del suelo, medidos por el método de Nakamura. En este contexto, SESAME ha establecido criterios y condiciones específicas para determinar la confiabilidad de la curva y la presencia de un peak claro con respecto a la relación H/V.

- Curva H/V confiable

Tabla 1: Criterios SESAME para curva confiable.

Nº	Criterio en ecuación
i.	$f_0 > \frac{10}{l_w}$
ii.	$n_c(f_0) > 200$
iii.	$\sigma_A(f) < 2$ para $0,5 * f_0 < f < 2 * f_0$ si $f_0 > 0,5$ Hz o $\sigma_A(f) < 3$ para $0,5 * f_0 < f < 2 * f_0$ si $f_0 < 0,5$ Hz

- Peak H/V claro (por lo menos 5 de los 6 criterios cumplidos)

Tabla 2: Criterios SESAME para peak claro.

Nº	Criterio en ecuación
i.	$\exists f^- \in \left[\frac{f_0}{4}, f_0\right] \mid A_H(f^-) < \frac{A_0}{2}$
ii.	$\exists f^+ \in [f_0, 4 * f_0] \mid A_H(f^+) < \frac{A_0}{2}$
iii.	$A_0 > 2$
iv.	$f_{pico} * \left[A_H(f) \pm \sigma_A(f) \right] = f_0 \pm 5\%$
v.	$\sigma_f < \epsilon(f_0)$
vi.	$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$



Donde:

Tabla 3: Nomenclatura y descripción de criterios SESAME.

Nomenclatura	Descripción
l_w	Longitud de ventana.
n_w	Número de ventanas seleccionadas para la curva media H/V.
n_c	$l_w * n_w * f_0 =$ Número de ciclos significativos.
f	Frecuencia actual.
f_0	Frecuencia peak de H/V.
σ_f	Desviación estándar de la frecuencia de la curva H/V.
$\epsilon(f_0)$	Valor umbral para la condición de estabilidad $\sigma_f < \epsilon(f_0)$.
A_0	Amplitud peak de la curva H/V. Se asocia a la frecuencia f_0 .
$\frac{A_H(f)}{v}$	Amplitud de la curva H/V de una frecuencia f .
f^-	Frecuencia entre $f_0/4$ y f_0 para que $\frac{A_H(f^-)}{v} < A_0/2$.
f^+	Frecuencia entre f_0 y $4f_0$ para que $\frac{A_H(f^+)}{v} < A_0/2$.
$\sigma_A(f)$	Desviación estándar de $\frac{A_H(f)}{v}$.
$\theta(f_0)$	Valor umbral para la condición de estabilidad $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$.

Según SESAME (2004), para obtener un peak claro, se establece que, si las curvas H/V para un sitio determinado cumplen al menos 5 de estos 6 criterios, entonces el valor de la frecuencia peak puede considerarse como una estimación muy confiable con respecto a la frecuencia fundamental del suelo. Por otro lado, para obtener una curva confiable, se deben cumplir con todos los criterios para considerar que dicha curva es representativa a los valores extraídos en terreno. Sin embargo, si no se llega al mínimo de criterios no implica que los resultados sean erróneos, ya que el objetivo de estos es reducir al máximo la posibilidad de errores. Teniendo en cuenta que puede haber muchos tipos de alteraciones que influyan en el resultado final, por ende, es importante comparar la información con resultados similares en zonas aledañas y contrarrestarla con la geología del sector, haciendo un análisis más profundo a los resultados para ver si se puede considerar confiable los valores H/V o si se necesita una nueva recopilación de datos.

SESAME (2004), también establece recomendaciones con respecto a la duración de la extracción de datos en terreno con relación a las frecuencias esperadas en zona.

Tabla 4: Recomendación de SESAME sobre la duración de extracción de datos.

Duración de Medición/Grabación	Frecuencia Esperada [Hz]	Duración de Grabación Recomendada [Min]
	0,2	30
0,5	20	
1	10	
2	5	
5	3	
10	2	



2.2 Métodos teóricos para la obtención del periodo fundamental del suelo.

En esta sección se exponen métodos alternativos al procedimiento experimental para determinar los periodos fundamentales del suelo y velocidades de onda de corte, enfocándose primordialmente en formulaciones matemáticas.

2.2.1 Velocidades de onda de corte promedio hasta la roca

Según estudios realizados por Lachet y Bard (1994), así como por Lermo y Chávez-García (1994) posteriores al método de Nakamura (1989) permitieron relacionar la frecuencia fundamental del suelo con la profundidad del basamento rocoso y las velocidades de las ondas de corte por medio de la siguiente ecuación.

$$f_0 = \frac{V_s}{4 * H} \quad (1)$$

- H es la profundidad del basamento rocoso, en metros.
- V_s es la velocidad de ondas de corte, en m/s.
- f_0 es la frecuencia fundamental del suelo, en Hz.

Por otro lado, usando la relación $T = 1/f_0$ en la ecuación (1) y despejándola en función del V_s , se obtiene lo siguiente.

$$V_s = \frac{4 * H}{T_s} \quad (2)$$

Donde:

- T_s es el periodo fundamental del suelo, en segundos.

Estas ecuaciones están definidas principalmente para depósitos de suelos homogéneos superpuestos sobre un suelo rígido y con perfiles de velocidad de onda de corte constante en toda su profundidad hasta la superficie. (Vijayendra, Prasad, & Nayak, 2010)

2.2.2 Periodo fundamental por medio del periodo ponderado.

Cuando se posee distintos tipos de capas en un depósito, el periodo del depósito completo se suele calcular usando un promedio de las velocidades de onda de corte de cada capa individual en función a su espesor (Lachet & Bard, 1994; Lermo & Chávez-García, 1994).

$$T_s = 4 \left(\sum_{i=1}^m \frac{h_i}{(V_s)_i} \right) \quad (3)$$

Donde:

- i es una capa cualquiera.
- m es la cantidad total de capas.
- h_i es el espesor de la capa i , en metros.
- $(V_s)_i$ es la velocidad de onda de corte de la capa i , en m/s.

2.2.3 Período fundamental por medio de forma modal de distintas capas.

El procedimiento de Madera (1970) es otro método para determinar el periodo fundamental del suelo cuando se poseen capas diferentes en un depósito. Este se encuentra validado por Dorby et al. (1976) y es más completo si se compara con la ponderación simple; sin embargo, involucra más factores determinantes en la ecuación, como la densidad de la capa, su espesor y periodo individual. Cada capa se relaciona, por cada capa superpuesta, con la continua debajo de ella, y así sucesivamente. Se obtienen periodos distintos cada vez, los cuales van aumentando o disminuyendo hasta llegar a la profundidad que se desea analizar. Hadjian (2002) por su parte, simplifico este método haciéndolo dependiente de 3 condicionantes en función a su espesor y periodos individuales de capas.

Tabla 5: Ecuaciones para determinar periodo por método de forma modal de distintas capas.

Ecuación	Condición
$\frac{T_{1-2}}{T_1} = \sqrt{\frac{\pi^2}{8} \left[0,75 + \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 \left(1 + 2 \frac{h_1 \rho_1}{h_2 \rho_2} \right) \right]}$ (4)	$\frac{h_1}{h_2} > 1$
$\frac{T_{1-2}}{T_1} = \left[1 + \beta \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^n \left(1 + \frac{h_1 \rho_1}{h_2 \rho_2} \right)^n \right]^{1/n}$ (5) Con $\beta = 1 - 0,2 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^2$ y $n = 4 - 1,8 \frac{h_2}{h_1}$	$\frac{h_1}{h_2} \leq 1$
$\frac{T_{1-2}}{T_1} = 1 + \frac{h_1 \rho_1}{h_2 \rho_2} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2$ (6)	$\frac{T_2}{T_1} \leq 0,1, para\ todo\ \frac{h_1}{h_2}$

2.2.4 Periodo fundamental por medio de un sistema agrupado.

Vijayendra, Prasad, y Nayak, (2010) optaron por emplear un método de sistema de múltiples grados de libertad, considerando parámetros agrupados para caracterizar cada capa, con el propósito de realizar una comparativa con los métodos ya existentes para calcular el periodo fundamental del suelo. Dicho método genera una ecuación característica que da como resultado frecuencias y formas modales correspondientes por medio de matrices de masa y rigidez.

Con ese fin, se define de primeras una matriz de masa compuesta únicamente de elementos diagonales usando los espesores (h) y densidades (ρ) de las respectivas capas, la cual está dado inicialmente por $m_{11} = 0,5\rho_1 h_1$ y continuado con la relación de $m_{ij} = 0,5(\rho_{i-1} h_{i-1} + \rho_i h_i)$, quedando la siguiente distribución.

$$[M]_{n \times n} = \begin{bmatrix} m_{11} & & & \\ & m_{22} & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (7)$$

La matriz de rigidez por su parte se obtiene a partir de la relación de $k_i = G_i/h_i$, donde G es el módulo de corte de baja deformación de la capa obtenido mediante el despeje de $V_s = \sqrt{G/\rho}$.



Dicho modelo se resume en 4 puntos.

- A) Obtención de una muestra de acelerogramas compatibles con el espectro básico de partida.
- B) Elaboración de un modelo discreto del suelo de comportamiento no lineal.
- C) Determinación de la respuesta dinámica del suelo para cada uno de los acelerogramas de la muestra.
- D) Obtención de los espectros de respuesta en la superficie del suelo, espectro promedio y relaciones espectrales.

La obtención de cada uno de los valores se determina por medio de un modelo no lineal y ecuaciones discretas, dando paso a una aplicación numérica.

2.3 Clasificación sísmica del suelo a través de códigos de diseño.

Para regular los estudios y diseños sísmicos, existen diversas normativas chilenas para la clasificación sísmica del suelo. Aquí se hará hincapié en las que están principalmente ligadas con el estudio.

2.3.1 NCh433. Of 96 mod 2009, complementada por DS61 MINVU 2011.

Esta norma regula el diseño sísmico de edificios, equipos y elementos secundarios. Abarca evaluación de daños y reparaciones, excluyendo obras civiles como puentes, presas y edificios industriales. La última modificación enfatiza la clasificación sísmica del terreno basada en V_{S30} , definido por la siguiente relación.

$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s-i}}} \quad (10)$$

Donde:

- h_i espesor de la capa i , en metros.
- V_{s-i} es la velocidad de ondas de corte de la capa i , en m/s.
- n es el número de capas en los 30 metros superiores del terreno.

La norma específica procedimientos para determinar el V_{S30} y clasifica suelos por medio de ensayos RQD, SU, N-SPT y qu. Estas clasificaciones varían desde tipo A (roca) hasta tipo E (consistencia mediana), incluyendo de tipo F, considerados especiales y que requieren un tratamiento distinto.

2.3.2 NCh2369. Of 2023

Esta norma, en actual revisión, se centra en el diseño sísmico de estructuras industriales y sistemas asociados, y que permite clasificar el suelo según el V_{S30} y el periodo fundamental T_g .

Tabla 6: Definición de los tipos de suelos en zonas industriales.

	Suelo Tipo	V_{S30} [m/s]	T_g
A	Roca, suelo cementado.	≥ 900	$< 0,15$ (o H/V plano)
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o firme	≥ 500	$< 0,30$ (o H/V plano)
C	Suelo denso o firme	≥ 350	$< 0,40$ (o H/V plano)
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180	< 1
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180	-

La norma estipula que el periodo fundamental del suelo debe medido por el método H/V (Nakamura) el cual requiere como mínimo 5 mediciones de al menos 30 minutos cada una, y se debe seleccionar la que conduzca la clasificación sísmica más conservadora. Además, en caso de no cumplir el rango de periodos predominantes, la clasificación debe ser por medio de V_{s30} y degradada en un nivel.

Estos criterios, meticulosamente delineados por la normativa, aseguran una evaluación exhaustiva y precisa de la respuesta sísmica del suelo, proporcionando fundamentos sólidos para la toma de decisiones en materia de diseño y seguridad estructural.

3. METODOLOGÍA

3.1 Datos experimentales en terreno.

En el proceso de delimitación de áreas de estudio de para la obtención experimental de los parámetros de zonificación necesarios para la estimación de los perfiles V_s , se establecieron dos áreas considerando accesibilidad, factibilidad, seguridad y escasez de datos: Canal Ifarle y Brisas del Sol, ubicadas en la comuna de Talcahuano.



Figura 2: Área definida para la zona de estudio en Canal Ifarle, Talcahuano.

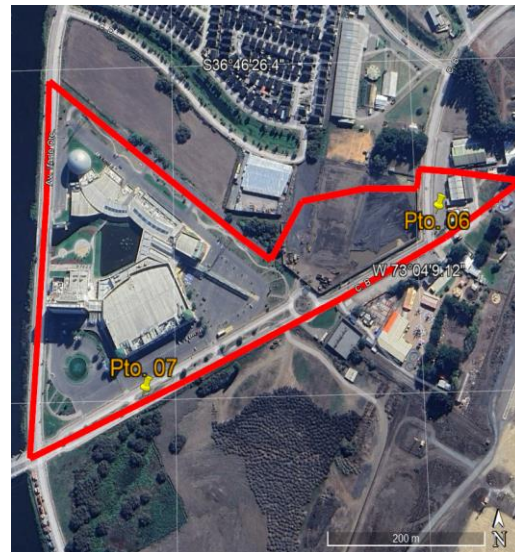


Figura 3: Área definida para la zona de estudio en Brisas del Sol, Talcahuano.

Se registraron 7 mediciones de campo, las cuales fueron posicionadas en función de la mejor representatividad de las zonas estudiadas. Estas mediciones se llevaron a cabo en salidas a terreno entre los periodos de abril y agosto de 2023.

En las zonas de estudio, se empleó un sismómetro triaxial Geobox SR04 de SARA como grabador de vibraciones ambientales para la adquisición de las curvas H/V.



Figura 4: Sismógrafo digital triaxial para monitoreo temporal o permanente HVSR.

3.2 Estimación de profundidad de basamento rocoso

La profundidad del basamento rocoso es uno de los principales datos de entrada para estimar los perfiles V_S del estudio. Este dato se estimó a partir de los perfiles gravimétricos proporcionados por el informe de Caracterización Gravimétrica del área Concepción-Talcahuano, llevado a cabo por el SERNAGEOMIN (Donoso & Velásquez, 2022), en el cual se desarrolló tres perfiles gravimétricos representativos para la región del Gran Concepción.

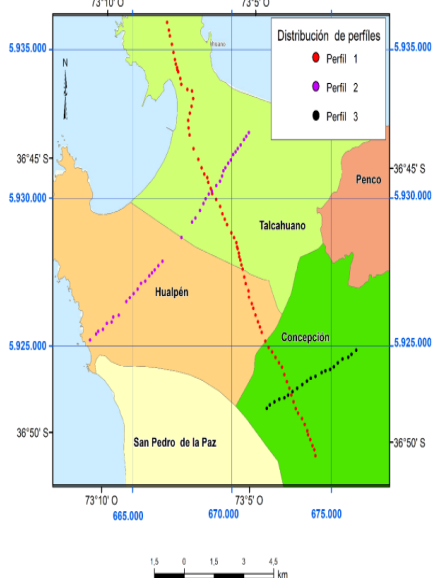


Figura 5: Ubicación de los perfiles gravimétricos levantados en el estudio.

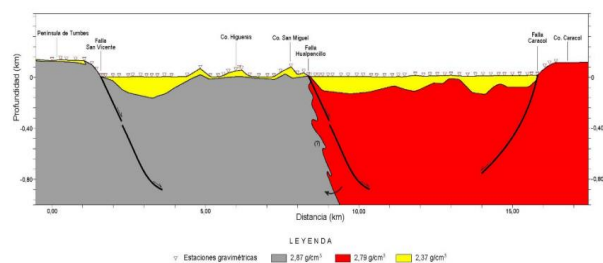


Figura 6: Perfil Gravimétrico N°1.

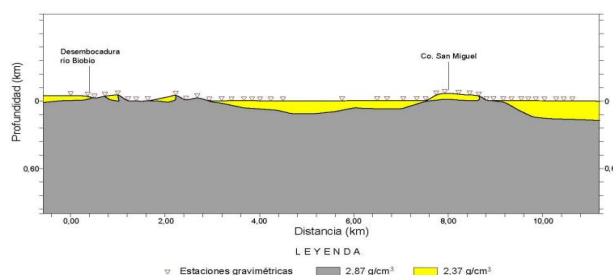


Figura 7: Perfil Gravimétrico N°2.

En calidad de primera conjetura, para determinar la profundidad del basamento rocoso, se selecciona el perfil 2 (Figura 7), situado en las proximidades de la zona 1, como representación del perfil gravimétrico de dicha área. Este perfil se considera hasta la intersección con el perfil 1 (Figura 6). En ese contexto, se estima una profundidad del basamento rocoso entre los 9,8 y 11 km del perfil, reflejando una pendiente visualmente uniforme entre rangos de 142,7 y 163,2 metros de profundidad. y se calculó el promedio de esta pendiente, obteniendo 152,95 metros.

3.3 Calibración del modelo de perfil V_S

Primero, según el informe de Caracterización Gravimétrica del área Concepción-Talcahuano del SERNAGEOMIN (Donoso & Velásquez, 2022), se identifica una sola capa clasificada como arenisca, con una densidad promedio de $2,37 \text{ g/cm}^3$. Además, se formula una hipótesis adicional: los perfiles V_S de las áreas analizadas se representarán mediante una función exponencial decreciente hasta alcanzar el basamento rocoso estimado. Esta suposición se justifica en la premisa de que, al tratarse de una única capa, no deberían existir fluctuaciones significativas en las velocidades de onda de corte. Sin embargo, es preciso justificar adecuadamente esta conjetura. Por ello, se recurre a los métodos detallados en la sección teórica, que incluyen el cálculo de los periodos fundamentales para suelos.

Con base a estos cálculos, se busca estimar los perfiles V_s mediante la relación del promedio de velocidades de dichos perfiles y las velocidades de onda de corte promedio obtenida por el periodo fundamental del suelo in situ y la profundidad del basamento rocoso estimado. De igual forma, se establece como condición para la validación que los periodos fundamentales calculados por medio de los perfiles V_s estimados presenten una discrepancia del $\pm 5\%$ con respecto a los periodos fundamentales experimentales obtenidos en terreno para confirmar su representatividad. Por otro lado, se adopta un criterio para la estimación, basado primordialmente en el Modelo dinámico del subsuelo de Concepción (Poblete & Dobry, 1968) y la Microzonificación sísmica de la ciudad de Concepción (Vivallos et al., 2010), debido a sus similitudes geológicas y de cercanías con las zonas de estudio. Según dicha información, los perfiles V_s de los sectores estudiados en Concepción presentan inicialmente velocidades de onda de corte de 200 m/s . Esta premisa se integra en el modelo propuesto, asegurando que los perfiles no puedan mostrar velocidades iniciales inferiores a las observadas en Concepción.

A continuación, se detalla paso a paso el procedimiento para la generación y validación de los perfiles V_s , que incluye demostraciones de cálculo en cada caso. Se emplea el punto de estudio 1 como referencia en dichas demostraciones.

3.3.1 Obtención del V_s promedio mediante el método del periodo fundamental en suelos homogéneos.

A partir de estimar la profundidad del basamento rocoso y los periodos fundamentales obtenidos en terrenos, se obtiene el V_s promedio mediante la ecuación (2) en toda su profundidad hasta la roca considerándolo como una sola capa.

- Demostración:

Tabla 7: Datos de entrada del punto 1.

Punto de Estudio	Frecuencia Fundamental (Hz)	Periodo Fundamental (seg)	Profundidad del basamento rocoso estimado [H] (m)
1	0,841	1,189	152,95

Se reemplaza los valores de profundidad del basamento rocoso estimado y el periodo fundamental obtenido mediante el método de Nakamura H/V en la ecuación (2). Obteniendo lo siguiente.

$$V_s = \frac{4 * 152,95}{1,189} = 514,52 \text{ m/s}$$

Finalmente se obtiene $514,52 \text{ m/s}$ que es considerado el V_s promedio hasta la roca.

3.3.2 Creación de Perfiles V_s mediante función exponencial decreciente.

Para crear los perfiles V_s , se considera los promedios por cada cantidad de capas definida, por el cual se establece una función exponencial decreciente para realizar dicha labor.

$$y = a \cdot e^{b \cdot x}$$

Donde:

- y es el espesor de la capa i , en metros.
- x es la velocidad promedio de la onda de corte de la capa i , en m/s .
- a y b son los coeficientes de la ecuación.

Para establecer los espesores de la capa, se dividió la profundidad hasta el basamento en intervalos de 5 metros hasta los 10 metros. Posteriormente, se subdividió en segmentos de 10 metros hasta los 150 metros. El último espesor, de 2,95 metros, se ajustó para alcanzar los 152,95 metros propuestos. Por otro lado, como V_s es una variable dependiente del espesor de la capa, se debe despejar el x , obteniendo la siguiente ecuación.

$$x = \frac{\text{Ln}\left(\frac{y}{a}\right)}{b} \quad (11)$$

Considerando que el tramo inicial del perfil V_s debe ser mayor a 200 m/s , se definieron los perfiles asignando valores a los coeficientes. Estos valores se ajustaron inicialmente para que las velocidades promedio de los perfiles estimados con respecto al espesor de las capas fueran similares a las velocidades promedio obtenidas en el apartado 3.3.1.

3.3.3 Modelación numérica para la validación de los parámetros iniciales.

La validación de los parámetros (V_s , Profundidad basamento rocoso y densidad) mediante simulación numérica se realiza a través del software DeepSoil (Hashash et al., 2020). Para ello, necesita algunos datos de entrada, dentro de los que se encuentra, los perfiles V_s , profundidad de cada capa, la densidad del suelo, el coeficiente de amortiguamiento y el registro sísmico con el cual se quiere realizar dicho espectro.

Como se ha descrito con anterioridad, las 3 primeras variables esenciales para la ejecución del software han sido adquiridas en este punto (perfiles V_s , profundidad de cada capa y densidad del suelo). En este contexto, queda pendiente la estimación del coeficiente de amortiguamiento (ξ), el cual, según la mayoría de las normativas sísmicas internacionales y chilenas, se fija en un 5%.

Para el análisis sísmico, se empleó el registro del Terremoto de Chile de 2010 en la Región del Maule ($M_w = 8,8$), obtenido de la estación MT07 ubicada en el Cerro el Roble, perteneciente al Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile (CSN, 2010). La componente del registro utilizada fue la Norte-Sur del acelerógrafo.

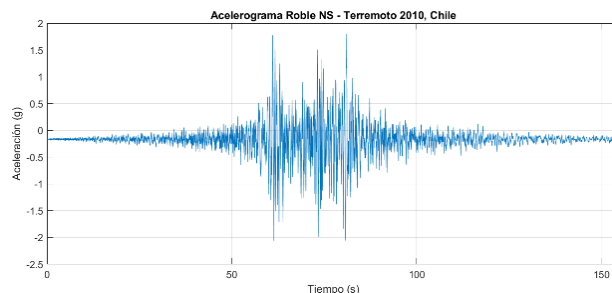


Figura 8: Registro Acelerograma Roble NS del Terremoto 2010, Chile.

Se debe establecer una relación significativa entre el espectro de respuesta generado y el periodo experimental correspondiente al punto de estudio. Con este propósito, se elabora una gráfica que vincule ambos elementos. La finalidad de esta modelación numérica es validar los parámetros obtenidos, buscando concordancia con los periodos medidos in situ con los periodos de la amplitud máxima de aceleración del espectro. Esta validación proporcionará conclusiones fundamentales sobre la coherencia de los supuestos previamente formulados.

3.4 Clasificación del Suelo por medio de la NCh2369 of 2023

Posterior a la validación del modelo de los perfiles V_s , se clasifica el suelo mediante la normativa NCh2369 del año 2023, la cual se encuentra actualmente en revisión y esta específicamente diseñada para proyectos de ingeniería sísmica en entornos industriales. La elección y pertinencia de la normativa a aplicar, se basa en el uso y destino de la estructura, permitiendo realizar la clasificación a través de los parámetros de V_{S30} y el periodo fundamental del suelo, y no por un criterio de mera ubicación en una zona de estudio destinada netamente a actividades industriales, considerando esto como un supuesto para la factibilidad del estudio.

Para realizar las estimaciones precisas, se sugiere desglosar la zona en sectores habitacionales e industriales, aplicando la normativa correspondiente.

La determinación del V_{S30} se realiza mediante la aplicación de la ecuación (10), la cual también es aplicable en el marco de esta normativa. Adicionalmente, el periodo fundamental del suelo se determina de manera experimental mediante ensayos in situ, como el método de Nakamura.

La clasificación del suelo se realiza de manera individual en cada punto de estudio, dado que existen variaciones significativas en las distancias entre ellos. Por lo tanto, no se debe considerar como una única zona homogénea.

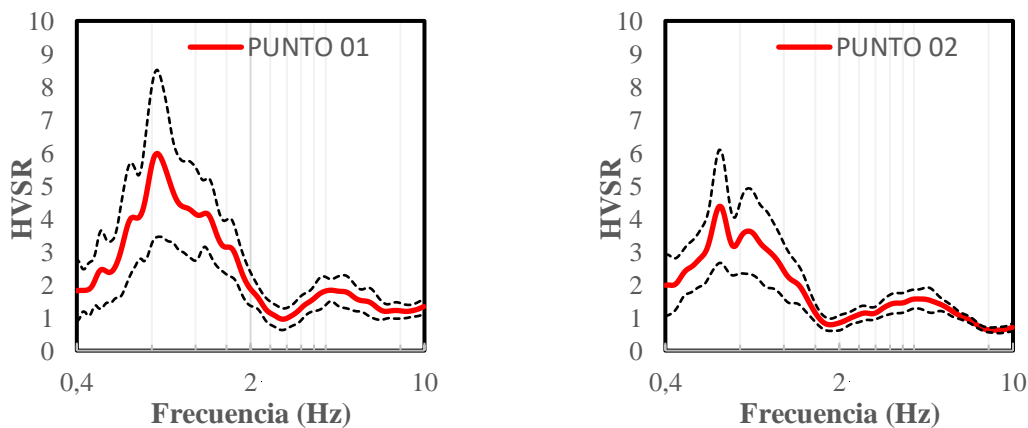
La normativa utilizada en el presente estudio establece la exigencia para todos los ensayos que sean llevados a cabo en el terreno. En ese contexto, es esencial tener presente que uno de ellos fue estimado (V_{S30}), por ende, se debe considerar que la clasificación del suelo puede variar en función a los supuestos establecidos para crear los perfiles V_s .

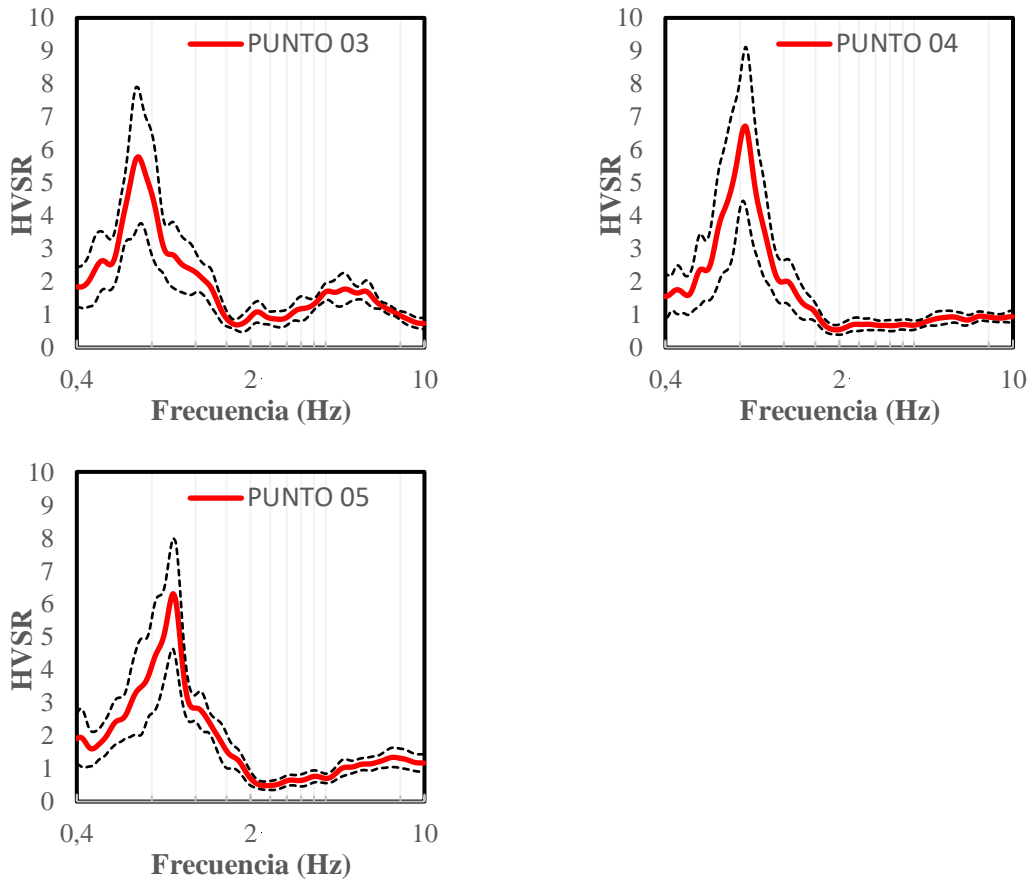
4. REVISIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES

En esta sección, se expondrán los gráficos de las curvas H/V o HVSR, así como las verificaciones según los criterios SESAME (2004) y sus peaks asociados. Todo esto divididos en las zonas previamente definidas, en donde además se incluirán observaciones relevantes relacionadas con cada uno de estos elementos.

- Zona 1 (Canal Ifarle – Talcahuano)

Las gráficas de las curvas H/V obtenidas en esta zona se muestran a continuación.





Figuras 9: Gráficas HVSR vs Frecuencia (Curvas H/V) de los puntos estudiados de la zona 1.

El criterio SESAME (2004) de cada uno de los gráficos es el siguiente.

Tabla 8: Frecuencia Fundamental y Criterios SESAME para Curva y Peak H/V de la zona 1.

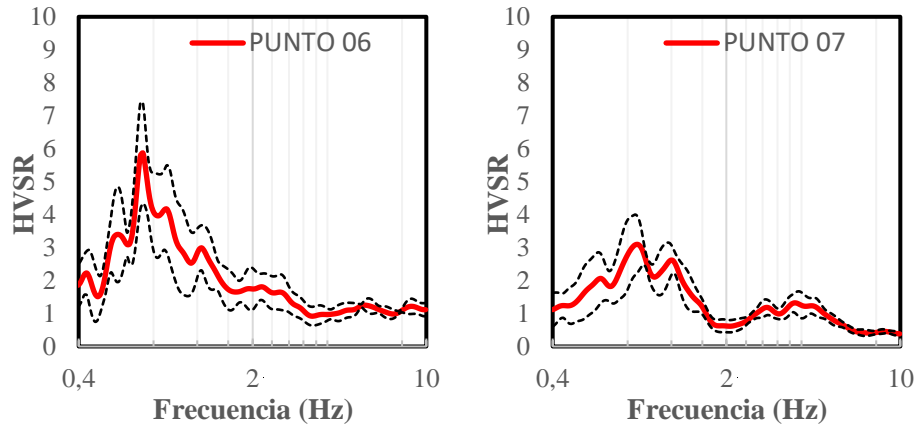
Punto	Frecuencia Fundamental (Hz)	Curva H/V Confiable			Peak H/V Claro					
		i	ii	iii	i	ii	iii	iv	v	vi
1	0,841	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
2	0,657	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	0,708	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	0,842	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
5	0,976	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓

De esta zona, se destaca principalmente los *peaks* claros con alta amplitud que oscilan entre 0,66 a 0,98 Hz, esperable, dada la composición en el punto de estudio, caracterizada por suelos blandos, principalmente Barro – Relleno y Arenas volcánicas (PUC, 1977). Cabe mencionar que las arenas volcánicas pueden tener un amplio rango de propiedades, como, por ejemplo, diferentes tamaños de grano y distribución granulométrica, y densidades que varían tanto en planta como en profundidad, por lo que su respuesta de onda sísmica podría variar.

De los criterios SESAME (2004) de la Tabla 8, se puede inferir que todos cumplen con el criterio de curva deseada, y al menos 5 de 6 de los criterios de peak claro, por los que demuestra que los datos son óptimos y representativos para un análisis de estudio.

- Zona 2 (Brisas del Sol – Talcahuano)

Las gráficas de las curvas H/V obtenidas en esta zona se muestran a continuación.



Figuras 10: Gráficas HVSR vs Frecuencia (Curvas H/V) de los puntos estudiados de la zona 2.

El criterio SESAME (2004) de cada uno de los gráficos es el siguiente.

Tabla 9: Frecuencia Fundamental y Criterios SESAME para Curva y Peak H/V de la zona 2.

Punto	Frecuencia Fundamental (Hz)	Curva H/V Confiable			Peak H/V Claro					
		i	ii	iii	i	ii	iii	iv	v	vi
6	0,725	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓
7	0,884	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓

De esta zona, se puede apreciar de primera mano una oscilación de frecuencia de 0,73 a 0,88 Hz. Donde no ocurre un gran cambio de frecuencia entre localidades.

De los criterios SESAME (2004) de la Tabla 9, se puede inferir que ambos puntos cumplen con los criterios mínimos establecidos para ser considerados como curvas confiable y peaks claros.

5. PARAMETRIZACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE PERFIL VS

En esta sección, se presentarán los perfiles V_s elaborados y ajustados mediante los tres enfoques teóricos, considerando el periodo fundamental medido en terreno como parámetro de entrada.

5.1 Estimación del perfil V_s

Los promedios V_s obtenidos de manera cuasiexperimental usando la ecuación (2) son los siguientes para suelo.

Tabla 10: V_s promedios hasta la roca obtenidos mediante la ecuación (2).

Zona	Punto Analizado	Coordenada UTM		Periodo Fundamental (s)	Profundidad de Basamento Rocoso (m)	V_s hasta la roca (m/s)
		Norte	Este			
1	1	671236,07	5931800,38	1,189	152,95	514,52
	2	671116,69	5931364,65	1,522	152,95	402,07
	3	671208,61	5931036,58	1,413	152,95	432,99
	4	670633,35	5930574,20	1,188	152,95	515,14
	5	671084,15	5930108,60	1,025	152,95	596,88
2	6	672334,34	5928269,84	1,379	152,95	443,81
	7	671939,62	5928072,46	1,131	152,95	540,74



En la Tabla 11 se presentan los coeficientes para estimar el modelo de perfil V_s .

Tabla 11: Coeficientes Propuestos para obtener el perfil V_s .

Zona	Punto Analizado	Coefficientes Propuestos para la Ec. Exponencial (X)
1	1	$a = 0,0032465 ; b = 0,02$
	2	$a = 0,0027585 ; b = 0,026$
	3	$a = 0,0019058 ; b = 0,025$
	4	$a = 0,0032065 ; b = 0,02$
	5	$a = 0,0008459 ; b = 0,0195$
2	6	$a = 0,0014551 ; b = 0,025$
	7	$a = 0,0033 ; b = 0,019$

Usando estos coeficientes en la ecuación (11) para cada uno de los puntos establecidos y su respectiva distribución de capas, se obtiene la siguiente tabla.

Tabla 12: Distribución propuesta para perfiles V_s .

Profundidad (m)	Espesor de capa (m)	Zona 1					Zona 2	
		$V_s 1$ (m/s)	$V_s 2$ (m/s)	$V_s 3$ (m/s)	$V_s 4$ (m/s)	$V_s 5$ (m/s)	$V_s 6$ (m/s)	$V_s 7$ (m/s)
5	5	366,98	288,56	314,89	367,60	445,36	325,68	385,44
10	5	401,64	315,22	342,62	402,26	480,91	353,41	421,92
20	10	436,30	341,88	370,34	436,92	516,45	381,14	458,40
30	10	456,57	357,47	386,56	457,19	537,25	397,36	479,74
40	10	470,95	368,54	398,07	471,57	552,00	408,86	494,88
50	10	482,11	377,12	407,00	482,73	563,44	417,79	506,62
60	10	491,23	384,13	414,29	491,85	572,79	425,08	516,22
70	10	498,93	390,06	420,45	499,55	580,70	431,25	524,33
80	10	505,61	395,20	425,80	506,23	587,55	436,59	531,36
90	10	511,50	399,73	430,51	512,12	593,59	441,30	537,56
100	10	516,77	403,78	434,72	517,39	598,99	445,51	543,11
110	10	521,53	407,44	438,53	522,15	603,88	449,33	548,12
120	10	525,88	410,79	442,01	526,50	608,34	452,81	552,70
130	10	529,89	413,87	445,22	530,51	612,44	456,01	556,91
140	10	533,59	416,72	448,18	534,21	616,24	458,97	560,81
150	10	537,04	419,37	450,94	537,66	619,78	461,73	564,45
152,95	2,95	538,01	420,12	451,72	538,63	620,78	462,51	565,47

Lo anteriormente expuesto, corresponden a los perfiles de velocidad de onda de corte teóricos, estimados a través del periodo fundamental del suelo y profundidad al basamento rocoso.

5.2 Validación de perfiles V_s a través de los métodos teóricos

A continuación, se presentan las validaciones de los perfiles V_s obtenidos en la sección anterior, por medio de la comparación entre los periodos experimentales obtenidos en terreno y los periodos fundamentales teóricos obtenidos de las formulaciones expuestas en sección 2.

5.2.1 Periodo fundamental a través de periodos ponderados.

Usando la ecuación (3), se procede a validar el perfil V_s estimado por medio del periodo fundamental obtenido de manera teórica por el método de periodo ponderado.



Tabla 13: Periodos obtenidos por medio ponderado con los perfiles V_s estimados.

Profundidad (m)	Espesor de capa (m)	Zona 1					Zona 2	
		T ₁ (s)	T ₂ (s)	T ₃ (s)	T ₄ (s)	T ₅ (s)	T ₆ (s)	T ₇ (s)
5	5	0,054	0,069	0,064	0,054	0,045	0,061	0,052
10	5	0,050	0,063	0,058	0,050	0,042	0,057	0,047
20	10	0,092	0,117	0,108	0,092	0,077	0,105	0,087
30	10	0,088	0,112	0,103	0,087	0,074	0,101	0,083
40	10	0,085	0,109	0,100	0,085	0,072	0,098	0,081
50	10	0,083	0,106	0,098	0,083	0,071	0,096	0,079
60	10	0,081	0,104	0,097	0,081	0,070	0,094	0,077
70	10	0,080	0,103	0,095	0,080	0,069	0,093	0,076
80	10	0,079	0,101	0,094	0,079	0,068	0,092	0,075
90	10	0,078	0,100	0,093	0,078	0,067	0,091	0,074
100	10	0,077	0,099	0,092	0,077	0,067	0,090	0,074
110	10	0,077	0,098	0,091	0,077	0,066	0,089	0,073
120	10	0,076	0,097	0,090	0,076	0,066	0,088	0,072
130	10	0,075	0,097	0,090	0,075	0,065	0,088	0,072
140	10	0,075	0,096	0,089	0,075	0,065	0,087	0,071
150	10	0,074	0,095	0,089	0,074	0,065	0,087	0,071
152,95	2,95	0,022	0,028	0,026	0,022	0,019	0,026	0,021
Sumatoria Periodo (s)		1,247	1,595	1,478	1,246	1,069	1,440	1,187
Periodo Experimental (s)		1,189	1,522	1,413	1,188	1,025	1,379	1,131
Diferencia (%)		-4,9	-4,8	-4,6	-4,9	-4,3	-4,5	-4,9

Como se observa, el porcentaje de diferencia entre los periodos ponderados, calculados a través de los perfiles V_s estimados, es inferior al $\pm 5\%$ respecto al periodo experimental obtenido en terreno. Por lo tanto, mediante el método de medio ponderado, los perfiles V_s estimados se consideran válidos.

5.2.2 Periodo fundamental a través de forma modal en distintas capas.

Usando las ecuaciones (4)(5)(6), se procede a validar el perfil V_s estimado por medio del periodo fundamental obtenido de manera teórica por el método de forma modal de perfiles de suelo en capas.

Tabla 14: Periodos obtenidos por forma modal con los perfiles V_s estimados.

Profundidad (m)	Espesor de capa (m)	Zona 1					Zona 2	
		T ₁₋₂ [1] (s)	T ₁₋₂ [2] (s)	T ₁₋₂ [3] (s)	T ₁₋₂ [4] (s)	T ₁₋₂ [5] (s)	T ₁₋₂ [6] (s)	T ₁₋₂ [7] (s)
5	5	0,054	0,069	0,064	0,054	0,045	0,061	0,052
10	5	0,103	0,131	0,12	0,102	0,085	0,116	0,098
20	10	0,190	0,243	0,224	0,190	0,160	0,218	0,181
30	10	0,288	0,367	0,339	0,287	0,243	0,329	0,274
40	10	0,370	0,472	0,436	0,369	0,313	0,424	0,352
50	10	0,450	0,574	0,530	0,449	0,381	0,516	0,428
60	10	0,528	0,674	0,623	0,527	0,448	0,606	0,502
70	10	0,605	0,773	0,715	0,604	0,515	0,696	0,576
80	10	0,681	0,870	0,805	0,680	0,580	0,784	0,648
90	10	0,756	0,966	0,894	0,755	0,645	0,871	0,719
100	10	0,830	1,061	0,983	0,829	0,709	0,957	0,790
110	10	0,917	1,172	1,086	0,916	0,784	1,057	0,873
120	10	0,993	1,270	1,176	0,992	0,849	1,146	0,945
130	10	1,069	1,366	1,266	1,068	0,915	1,233	1,017
140	10	1,144	1,463	1,356	1,142	0,980	1,321	1,089
150	10	1,218	1,558	1,444	1,217	1,044	1,407	1,160
152,95	2,95	1,245	1,592	1,476	1,244	1,067	1,438	1,185



Periodo Equivalente (s)	1,245	1,592	1,476	1,244	1,067	1,438	1,185
Periodo Experimental (s)	1,189	1,522	1,413	1,188	1,025	1,379	1,131
Diferencia (%)	-4,7	-4,7	-4,5	-4,7	-4,1	-4,3	-4,8

Como se puede apreciar, al igual que el primer método, el porcentaje de diferencia entre el periodo equivalente determinado por la forma modal y el periodo experimental obtenido en terreno, es inferior a $\pm 5\%$. Por lo tanto, mediante este método, los perfiles V_s estimados se consideran válidos.

5.2.3 Periodo fundamental por medio de un sistema agrupado

Usando las distribuciones (7)(8), y la ecuación (9), se procede a validar el perfil V_s estimado por medio del periodo fundamental obtenido de manera teórica por el método de sistema agrupado.

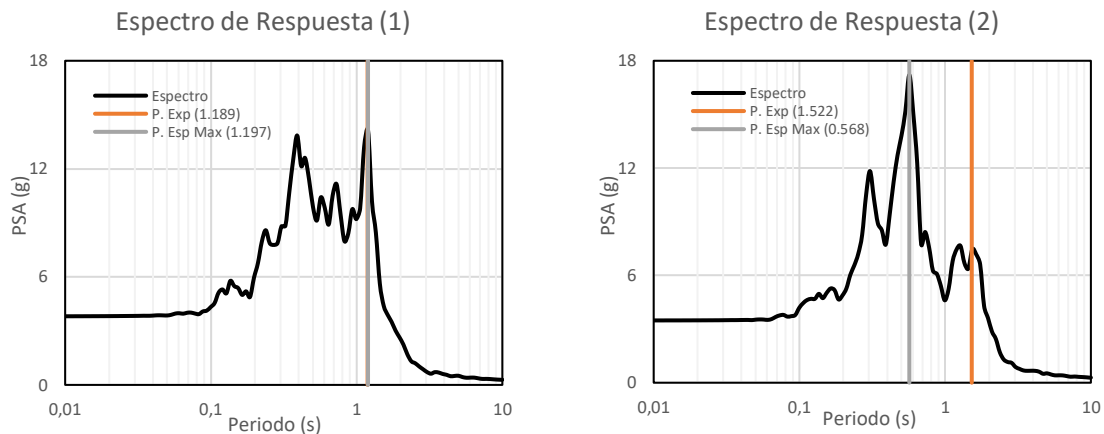
Tabla 15: Periodos obtenidos por sistema agrupado con V_s estimados.

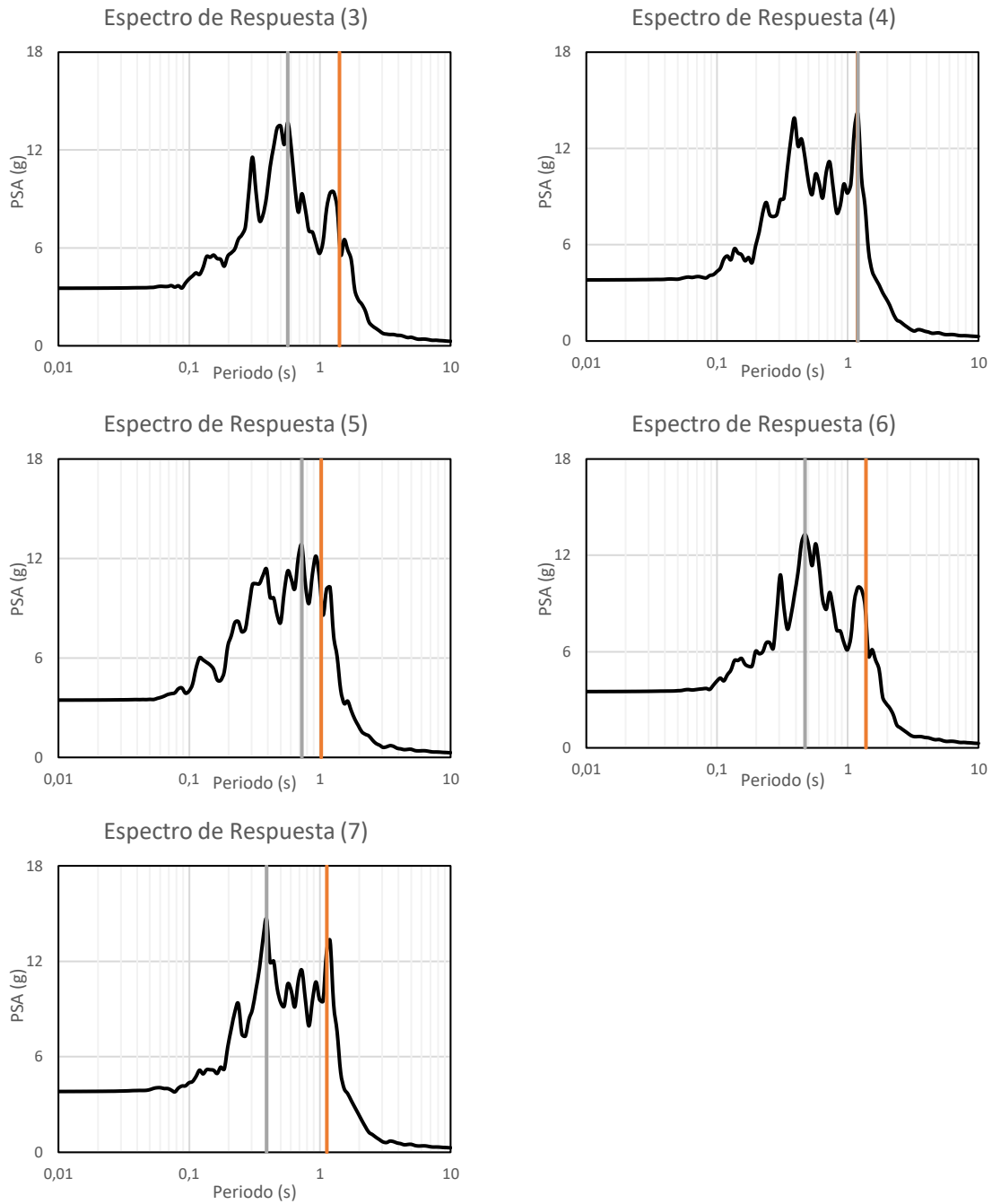
Zona	Punto Analizado	Periodo Fundamental obtenido por medio de un sistema agrupado (s)	Periodo Experimental (s)	Diferencia (%)
1	1	1,180	1,189	0,8
	2	1,510	1,522	0,8
	3	1,402	1,413	0,8
	4	1,178	1,188	0,8
	5	1,018	1,025	0,7
2	6	1,368	1,379	0,7
	7	1,122	1,131	0,8

Al igual que los métodos anteriores, se puede observar un porcentaje de diferencia inferior a $\pm 5\%$ con respecto al periodo experimental obtenido en terreno. Por lo tanto, mediante el método de sistema agrupado, los perfiles V_s estimados se consideran válidos.

5.3.3 Validación del perfil V_s a través de modelos no lineales.

Con los perfiles V_s establecidos, procedemos a generar los espectros de respuesta de aceleración por medio del software DeepSoil (Hashash et al., 2020) para la primera capa de 5 metros (superficial). Además, se grafica junto a ello, los periodos experimentales obtenidos en terreno y el periodo de la aceleración máxima del espectro para ver si existen similitudes o no, puesto que ambos peak tienen relación al producirse en un punto crucial en donde puede ocurrir amplificación sísmica.





Figuras 11: Gráficas de Espectros de Respuesta de aceleración con el Periodo Experimental obtenido en terreno.



6. CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE SUELO

La clasificación del suelo se hace por medio de la NCh2369. Of 2023, actualmente en revisión y que es para diseño sísmicos de carácter industrial, el cual requiere 2 parámetros, V_{S30} y periodo fundamental del suelo.

Para realizar la clasificación, se comparan los valores obtenidos en la presente investigación con los criterios definidos en Tabla 6.

Tabla 16: Clasificación del suelo según la NCh2369. Of 2023.

Zona	Punto	Periodo medido en terreno (s)	Tipo de Suelo	Definición
1	1	1,180	D	Suelo medianamente denso, o firme
	2	1,510	E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana
	3	1,402	D	Suelo medianamente denso, o firme
	4	1,178	D	Suelo medianamente denso, o firme
	5	1,018	C	Suelo denso o firme
2	6	1,368	D	Suelo medianamente denso, o firme
	7	1,122	D	Suelo medianamente denso, o firme



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del estudio, se pueden concluir y recomendar lo siguiente.

- Uno de los propósitos del estudio se centra en la clasificación del suelo según la norma NCh2369. Of 2023, actualmente en revisión, mediante un único tipo ensayo de medición en terreno, específicamente obteniendo directamente el periodo fundamental del suelo mediante el método de Nakamura, estimando los valores de V_{S30} mediante perfiles V_S obtenidos de ecuaciones exponenciales decrecientes. Lo anterior, implica la necesidad de realizar ciertos supuestos que podrían afectar la exactitud de los valores estimados, los cuales podrían discrepar en un rango relevante con los eventualmente obtenidos directamente mediante un ensayo conforme a la norma en aplicación. Se recomienda validar las estimaciones realizadas en el presente estudio con mediciones directas mediante ensayos geofísicos idóneos que entreguen valores de V_S en profundidad.
- Según el Plan Regulador de Talcahuano (IMT, 2016), la zona 1 es de carácter residencial e industrial denominadas ZH-9 y ZI-5 respectivamente, mientras que la zona 2 no posee denominación oficial. Por tanto, la clasificación sísmica del tipo de suelo se debe realizar mediante la aplicación de la norma idónea, dependiendo el uso y destino de la estructura a proyectar, y no de la denominación de uso del suelo.
- La NCh2369. Of 2023 recomienda ejecutar 5 mediciones para obtener el periodo fundamental del suelo en la zona de estudio a caracterizar, con una duración mínima de 30 minutos cada uno y definir el que cumpla con la representatividad del sector y en un rango conservador. En el presente estudio, aun cuando se realizaron mediciones discretas, con distancias relativas de 400m aproximadamente entre sí, igualmente se obtienen periodos con una baja dispersión, en torno a 1,25s, debido a la homogeneidad del depósito general. En sectores con topografía irregular, relieves pronunciados y que se tengan antecedentes de baja homogeneidad en el depósito, se recomiendan mediciones cercanas, ya que se podrían obtener resultados con una alta dispersión, debido también a un eventual efecto de sitio.
- El periodo fundamental medido directamente en terreno de 1,25s es coherente con el resultado obtenido mediante la estimación de V_S ponderado, que fluctúa sobre los 500 m/s para la profundidad de la columna de suelo total (152,95m). por otro lado, los valores de V_S estimados en los espesores superiores, en promedio 300 m/s, son comparativamente mayores a los usualmente registrados mediante ensayos en terreno para suelos tipo D, que se caracterizan por valores alrededor de los 180 m/s. Por lo tanto, el método empleado podría sobreestimar los valores de V_S en el tramo superior de la columna de suelo, así como subestimar los valores a profundidades mayores.
- La profundidad del basamento rocoso, al ser estimada por medio de un promedio del perfil gravimétrico general y destinada a otro estudio, podría no representar en su totalidad las características particulares de la columna de suelo en la zona estudiada, por lo que podrían existir anomalías en el sector no estudiadas o detectadas.
- Considerando que la hipótesis inicial es un comportamiento exponencial decreciente del suelo con respecto a los perfiles V_S , este criterio podría no representar el real comportamiento de la columna de suelo, sin embargo, a través de la caracterización Gravimétrica (Donoso & Velásquez, 2022) se observa que el suelo no posee gran variación en el tipo de capas sobre el basamento rocoso. Por tanto, un comportamiento lineal o exponencial puede ser considerado válido y representativo.



- Respecto a la relación del espectro de respuesta y el periodo fundamental del suelo en cada uno de los puntos de estudios (Figuras 11), se infiere lo siguiente, en los espectros 1 y 4, se observa el mismo comportamiento, puesto que se consideró la misma distribución de perfiles de velocidades, debido a que los periodos fundamentales eran idénticos. Además, el periodo predominante de los espectros mencionados como su periodo fundamental del suelo son casi idénticos, a pesar de que se observa un fenómeno de doble peak. Entonces, los perfiles V_s propuestos para dichos puntos de estudio son aceptables, puesto que la frecuencia predominante se encuentra manifestada en la amplitud máxima de aceleración del espectro al concordar sus peak en el periodo, y es ahí en donde ocurre la máxima respuesta dinámica del suelo. Asimismo, es posible notar que conforme los periodos fundamentales aumentan, se comienza a manifestar únicamente un peak de periodo predominante en el espectro. Este fenómeno se puede apreciar con mayor detalle en el espectro 2, 3 y 6. Por otra parte, el espectro 5 exhibe el periodo fundamental más bajo de todos, y su comportamiento se caracteriza por la presencia de múltiples peaks, lo que confirma la tendencia observada. Esto sugiere que a medida que el periodo fundamental disminuye, el peak del periodo predominante del espectro se vuelve difuso. A partir de esto, se puede recomendar lo siguiente: si se desea trabajar con los espectros establecidos, es fundamental tener en cuenta que deben ser considerados como peaks, tanto el periodo predominante del espectro como el periodo fundamental del suelo. Incluso si este último presenta una baja o pequeña amplitud, se debería equiparar a la del periodo predominante y viceversa. De lo contrario, existe la posibilidad de que se produzca un aumento de amplitud máxima de aceleración no considerado por el modelo dentro del rango de los periodos mencionados.
- El tipo de suelo predominante en ambas zonas es D, categorizado como “suelo medianamente denso, o firme”. Esto se debe a que, en general, los periodos obtenidos estaban por encima del rango de clasificación establecido, lo que resulta en una degradación de la categoría del suelo.
- Al comparar los resultados estimados y obtenidos en el presente estudio con publicaciones anteriores realizadas en Concepción (Sáez, 2016), se observa cierta similitud en las clasificaciones sísmicas del suelo, predominando los tipos de suelo D, E y F, teniendo la salvedad que la clasificación de tipo de suelo obtenida anteriormente se realizó mediante la normativa NCh433. Of 96 mod 2009, complementada por DS61 MINVU 2011.

REFERENCIAS

- Bonnefoy-Claudet, S. Baize, L. Bonilla, C. Berge-Thierry, C. Pasten, J. Campos, P. Volant. & Verdugo, R.** (2008). Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements. *Geophys. J. Int.*
- Carrillo, P.** (2008). Influencia del suelo en la respuesta sísmica de estructuras. En *Seminario técnico "Dr. Eduardo Arnal"* (SIDETUR, 13 de octubre de 2008). Geolab Consultores C.A.
- Centro Sismológico Nacional.** (2010). Registro del Terremoto del 27 de febrero de estación MT07 "El Roble". Santiago, Chile.
- Dobry, R. Oweis, I. & Urzua, A.** (1976). Simplified procedures for estimating the fundamental period of a soil profile. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66.
- Donoso, C. & Velásquez, H.** (2022). *Caracterización Gravimétrica del área Concepción-Talcahuano*. SERNAGEOMIN.
- Hadjian, A. H.** (2002). Fundamental period and mode shape of layered soil profiles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9–12), pp 885-891.
- Hashash, Y.M.A. Musgrove, M.I. Harmon, J.A. Ilhan, O. Xing, G. Numanoglu, O. Groholski, D.R. Phillips, C.A. & Park, D.** (2020) *DEEPSOIL 7.0, User Manual*. Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Ilustre Municipalidad de Talcahuano.** (2016). *Plan Regulador Comunal de Talcahuano - Ordenanza Local*, Versión Referencial Integrada.
- Instituto Nacional de Normalización.** (2011). *Diseño sísmico de edificios* (NCh433. Of 96 complementada por DS61 MINVU 2011). Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización.** (2023). *Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales* (NCh2369 Of. 2023, actualmente en revisión). Santiago, Chile.
- Kanai, K.** (1957). Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground. *Univ. Tokyo. Bull. Earth. Res. Inst.*, 35.
- Konno, K. & Ohmachi, T.** (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulls. Seism. Soc. Am. Lachet, C., D.*
- Lachet, C. & Bard, Pierre-Yves.** (1994). Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique. *Journal of Physics of the Earth*.
- Lachet, C. Hatzfel, P. Bard, N. Theodulidis, C. Papaionnou. & Savvaidis, A.** (1996). "Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece) comparison of different approaches". *Bull Seism. Soc. Am.*
- Lermo, J. & Chávez-García, F.** (1993). "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station". *Bull. Seism. Soc. Am.*
- Lermo, J. & Chávez-García, F.** (1994). Site effect evaluation at Mexico City: Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Madera, G. A.** (1970). Fundamental period and amplification of peak acceleration in layered systems. *Research Report R 70-37*, June. MIT Press: Cambridge, MA.
- Miragall, C. and Samartin, A.** (1983). Respuesta sísmica de suelos estratificados en régimen no lineal. *Revista de Obras Públicas*, (mayo), 335-351.

- Nakamura, Y.** (1989). "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface". *Quarterly Report of RTRI*, 30(1), 25-33.
- Nogoshi, M. & Igarashi, T.** (1970). On the propagation characteristics of microtremors. *J. Seism. Soc. Japan*.
- Nogoshi, M. & Igarashi, T.** (1971). A study on the microtremor. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 49, 13-34.
- Poblete, M. & Dobry, R.** (1968). Modelo dinámico del subsuelo de Concepción. *Revista IDIEM*, 7(3), Pág. 111–136
- Pontificia Universidad Católica. Sede Talcahuano. Centro Interdisciplinario de Estudios Regionales.** (1977). *Carta geológica Concepción Metropolitano* [Mapa]. Talcahuano, Chile: Centro Interdisciplinario de Estudios Regionales. Impreso en Stanley.
- Saldivia, J.** (2014). *Determinación del período fundamental de vibración del suelo aplicando el criterio SESAME* (Tesis de pregrado). Universidad de Bio-Bio, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bio-Bio, Chile.
- Sáez, P.** (2016). *Actualización de la estratificación y zonificación de los suelos en la Comuna de Concepción* (Tesis de pregrado). Universidad de Bio-Bio, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bio-Bio, Chile.
- SESAME.** (2004). *Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations: Measurements, Processing and Interpretation* (pp. 1-62). SESAME European Research Project WP12.
- Vijayendra, K. V. Prasad, S. K. & Nayak, S.** (2010). Computation of Fundamental Period of Soil Deposit: A Comparative Study. *Indian Geotechnical Conference – 2010, GEOTrendz*, IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay.
- Vivallos, C. Ramírez, C. Paola & Fonseca, H.** (2010) *Microzonificación sísmica de la ciudad de Concepción*. SERNAGEOMIN. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental n°012.