

## Método de Nakamura

**Francisco Ruz Vukasovic**  
RyV Ingenieros  
Francisco@ryv.cl

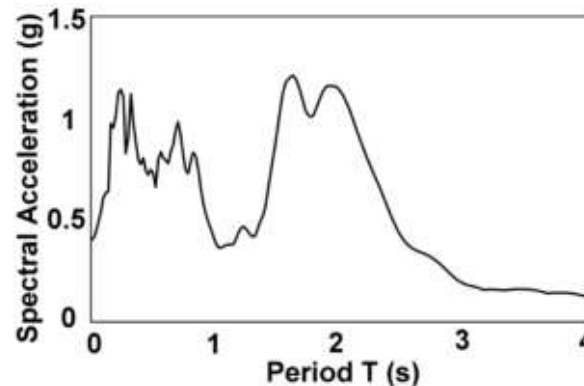
Cochabamba, Bolivia  
18 de julio de 2024



## PERIODO PREDOMINANTE DEL SUELO

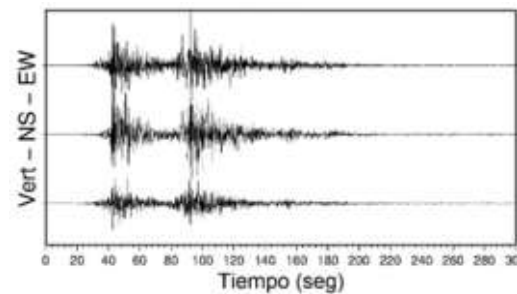
EL METODO REHV O NAKAMURA, Es un método geofísico no intrusivo, el cual permite estimar el periodo predominante de un depósito de suelo a partir de mediciones de ruido ambiental tomadas en superficie. (Nakamura, 1989; Chavez-Garcia and Cuenca, 1998).

**Esto permite detectar los suelos susceptibles a tener daño en sus edificaciones.**



## PERIODO PREDOMINANTE DEL SUELO

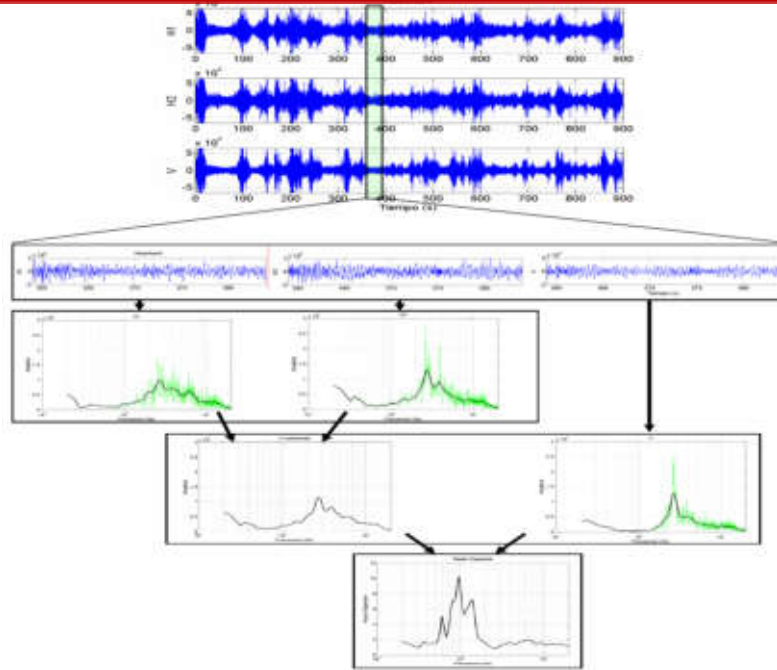
Este método geofísico, se mide a través de un geófono de 3 componentes, el cual instalado a nivel superficial, registra las vibraciones naturales inducidas por fuerzas naturales y vibraciones artificiales inducidas por actividades industriales, tránsito, peatones, etc.



Tromino: Sismógrafo de  $f_0$  4.5hz

Ref: <http://moho.world/en/tromino/>

## PERIODO PREDOMINANTE DEL SUELO



Pasten (2007).

1) Del largo total del registro tomado por el geófono de 3 componentes en superficie, se subdivide en sub ventanas.

2) Para cada ventana, se procede a calcular la transformada de Fourier por cada componente.

3) Luego las componentes horizontales son sumadas considerando el aporte de cada una.

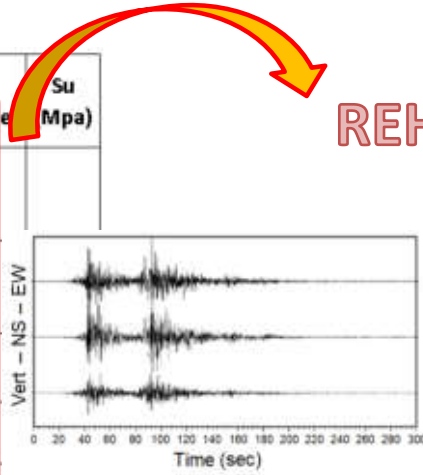
4) se calcula el cociente de los espectros horizontales y verticales medidos directamente en superficie.

Suelo Tipo	
A	Roca, Suelo cementado
B	Roca blanda o fracturada, Suelo muy denso o muy firme
C	Suelo denso o firme
D	Suelo medianamente denso, o firme
E	Suelo de compactidad, o consistencia mediana
F	Suelos Especiales

ARENAS

# CAMBIO NORMATIVO

Su		Suelo Tipo	Vs30 (m/s)	Tnak (segundos)	Su (Mpa)
A	Roca,	A Roca, Suelo cementado	≥ 900	< 0,15 (o H/V plano)	
B	R fractu den	B Roca blanda o fracturada, Suelo muy denso o muy firme	≥ 500	< 0,30 (o H/V plano)	
C	Suelo	C Suelo denso o firme	≥ 350	< 0,40 (o H/V plano)	
D	Suelo d	D Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180	< 1,0	
E	Suelo consi	E Suelo de compactación, o consistencia mediana	< 180	/	< 0,05
F	Suelo				



REHV

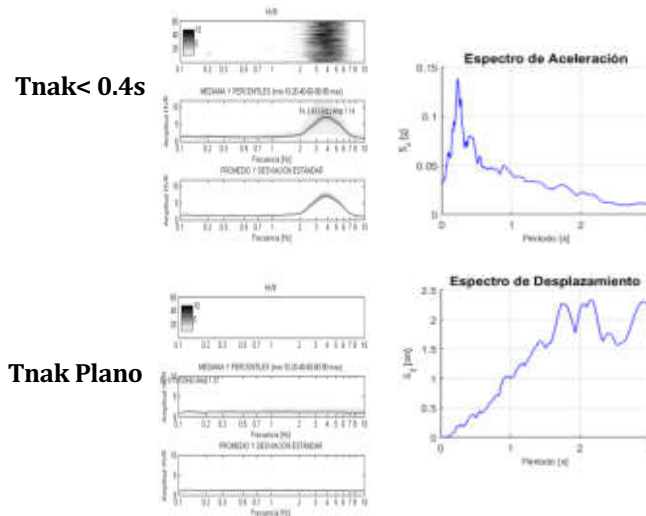
ORMA  
SAED  
SISTENCA



# PERIODO PREDOMINANTE DEL SUELO

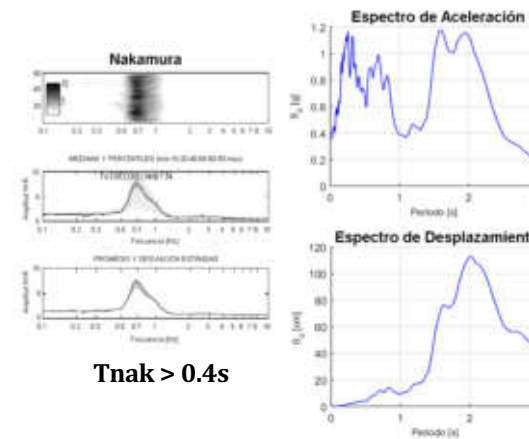


## Suelo Rígido



Periodo Nakamura < 0,4s o plano se correlaciona con un espectro de respuesta con aceleración en periodos bajos y desplazamientos menores.

## Suelo Blando



Periodo Nakamura ≥ 0,4s se correlaciona con un espectro de respuesta con aceleración en periodos altos y grandes desplazamientos.



# PERIODO PREDOMINANTE DEL SUELO



**New Chilean seismic code and the use of Nakamura period for assessing damage potential.**

Francisco Ruz  
*RyV Ingenieros, Santiago, RM, Chile*

W.D. Liam Finn  
*Department of Civil Engineering – University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada.*



**ABSTRACT:** The proposed new Chilean Building Code introduced the Nakamura site period,  $T_N$ , as a parameter for classifying sites into the Site Classes A, B, C, D and E that are used widely in current building codes. The period is based on analysis of ambient vibration data recorded by a single instrument on the surface at the site, typically for a duration of 20 minutes. The procedure for developing a site classification system based on  $T_N$ , is described in detail. Initially studies were conducted on 26 sites for which the following information was available:  $V_{s30}$ , 30m site stratigraphy, Nakamura Period, and damage patterns from past earthquakes in surrounding region. The studies were later extended to many other sites with similar data. Finally, a country wide hazard map was developed for Chile based on data from 670 widely dispersed locations in terms of the Site Classes A, B, C, D and E.

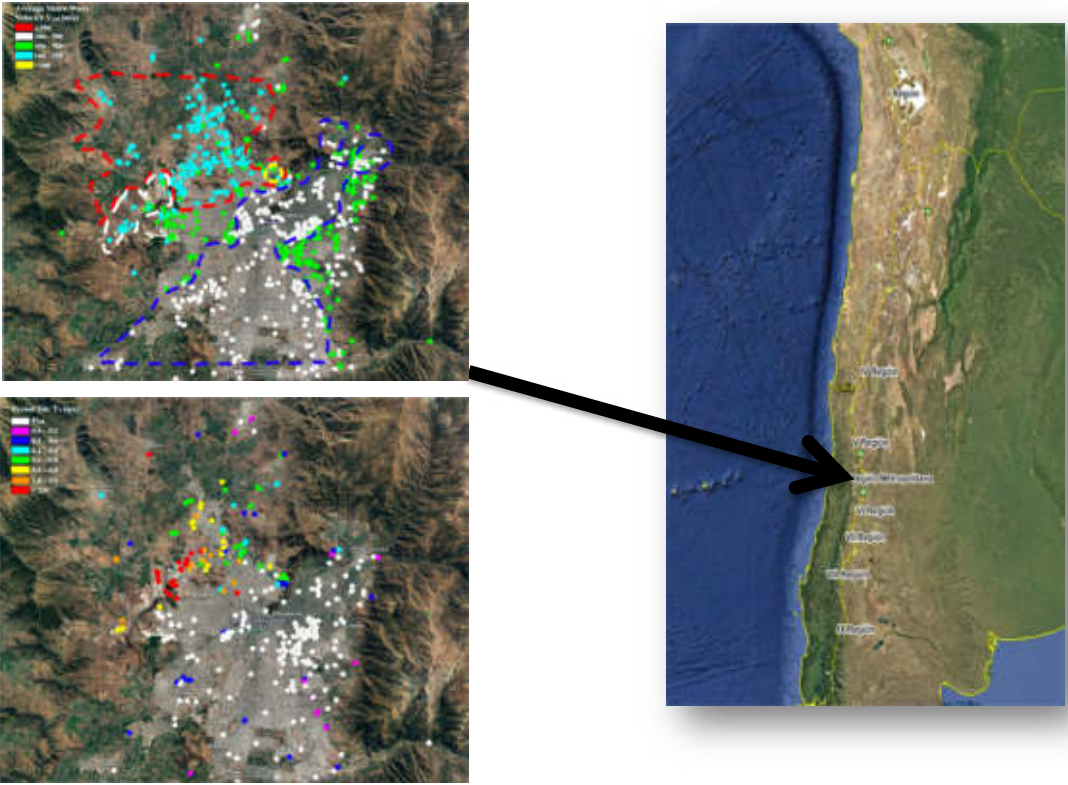


# EXPERIENCIA RYV SEGÚN BASE DE DATOS



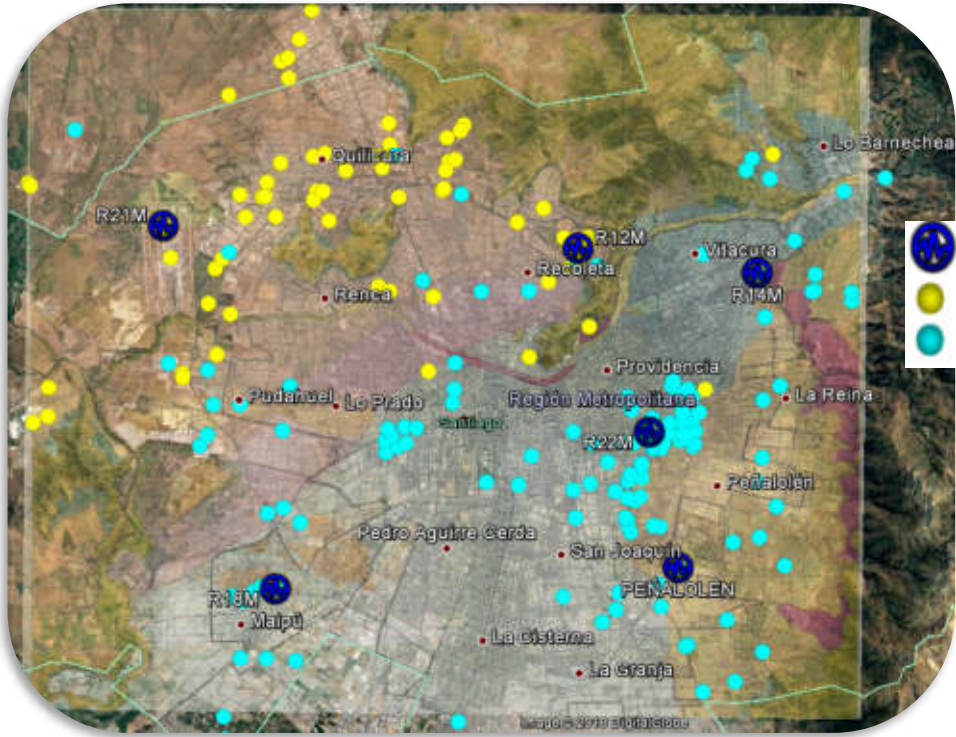
# CAMBIO NORMATIVO




## Vs y T<sub>N</sub> SANTIAGO



# CAMBIO NORMATIVO

## Región Metropolitana



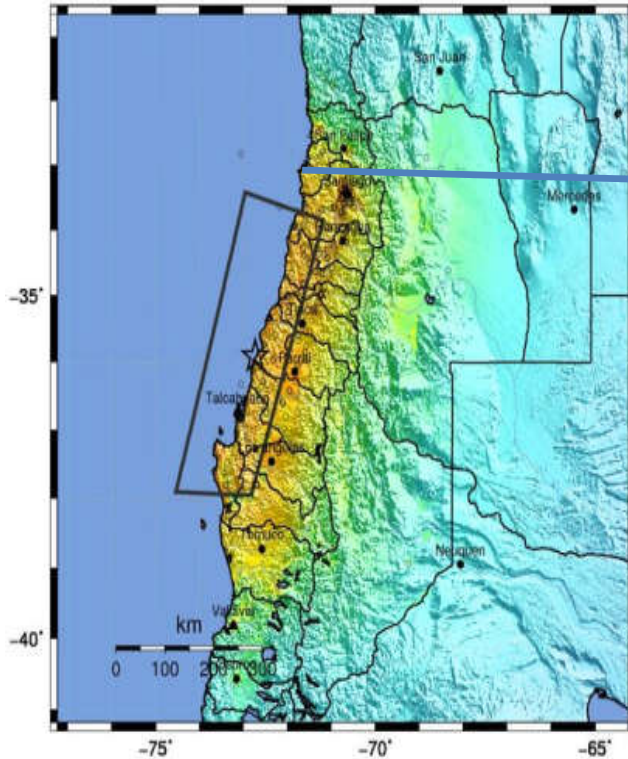
-  Estaciones Sísmicas
-  Periodo Nakamura Largo  $\geq 0.4$
-  Periodo Nakamura Corto  $< 0.4$  o Plano



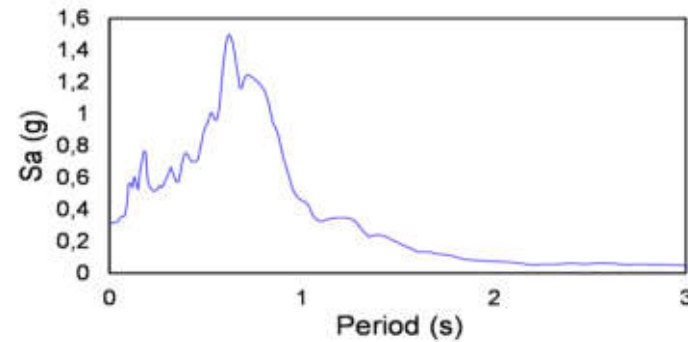
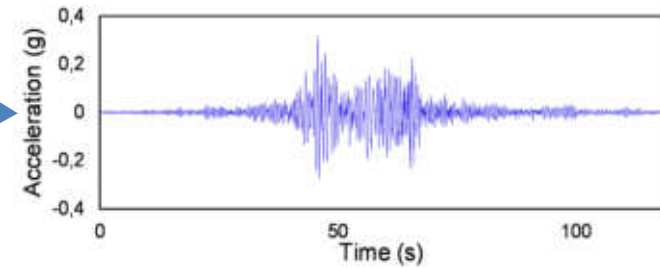
# VIÑA DEL MAR – VALPARAISO



USGS ShakeMap : Maule, Chile  
Feb 27, 2010 06:34:14 UTC M 8.8 S35.91 W72.73 Depth: 35.0km ID:20100227063414



Mw 8.8 - 2010



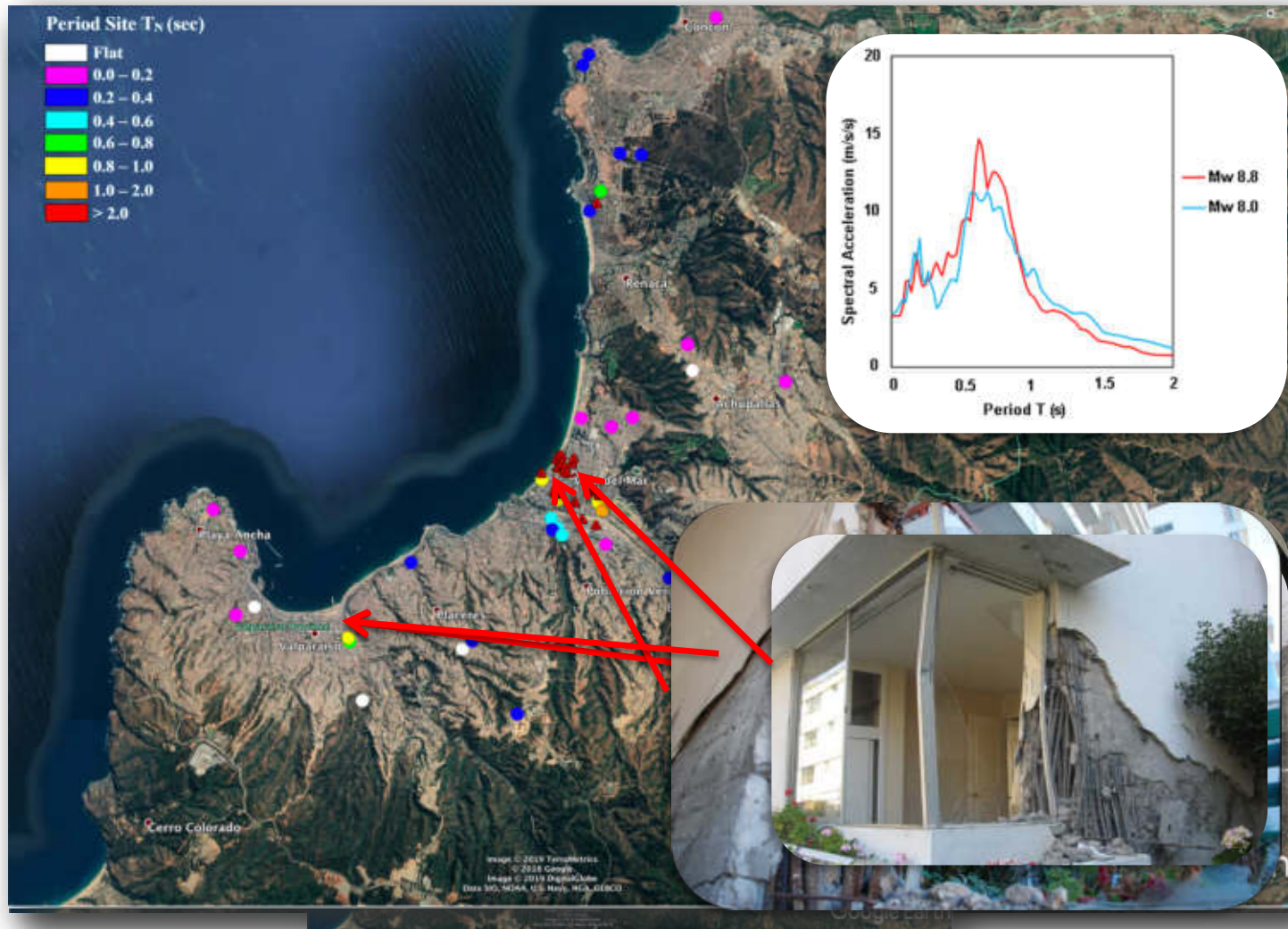
Map Version 1 Processed 2017-01-27 03:42:07 UTC

PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Mod./Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<0.05	0.3	2.8	6.2	12	22	40	75	>139
PEAK VEL.(cm/s)	<0.02	0.1	1.4	4.7	9.6	20	41	86	>178
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Scale based upon Worden et al. (2012)



# HAZARD MAPS “VIÑA DEL MAR – VALPARAISO”



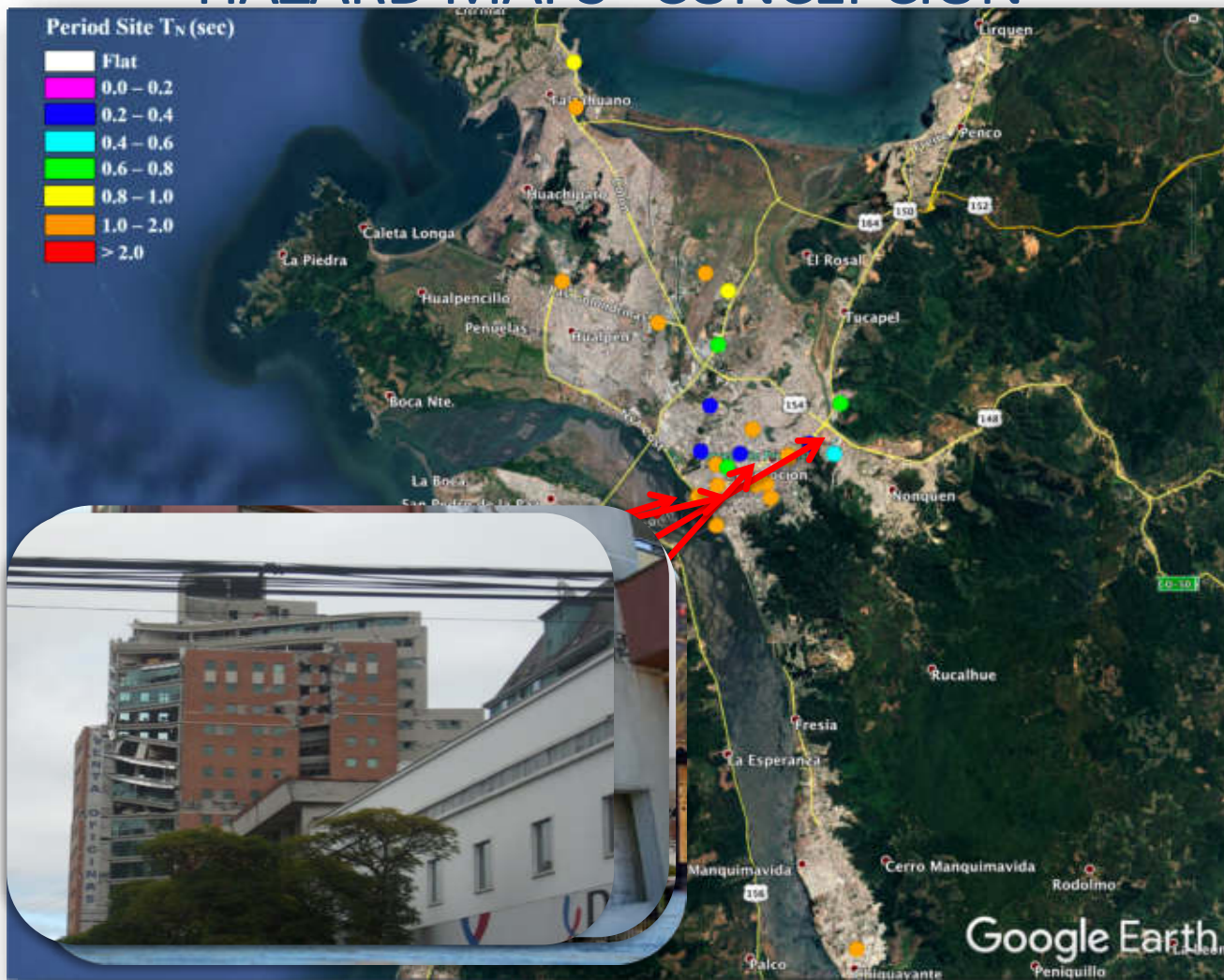




# HAZARD MAPS “PUDAHUEL – QUILICURA”



# HAZARD MAPS “CONCEPCIÓN”



# CAMBIO NORMATIVO Norma Edificios Nch 433 (en consulta publica)



## PROYECTO DE NORMA EN CONSULTA PÚBLICA – prNCh433

Tabla 2 – Clasificación sísmica del sitio

	Suelo Tipo	$V_{s30}$ [m/s]	$T_g$ [s]
A	Roca, suelo cementado	$\geq 900$	$< 0,15$ (o H/V plano)
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	$\geq 500$	$< 0,30$ (o H/V plano)
C	Suelo denso o firme	$\geq 350$	$< 0,40$ (o H/V plano)
D	Suelo medianamente denso, o firme	$\geq 180$	$< 1,00$
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	$< 180$	

NOTA:

Esta clasificación es aplicable a terrenos de topografía y estratificación aproximadamente horizontal, y para casos en que las estructuras afectadas se encuentran lejos de singularidades geomorfológicas y topográficas.

La clasificación y caracterización sísmica de suelos para el diseño estructural que se realice debe considerar los estratos de suelo que influyan en la respuesta sísmica de la estructura en estudio. Se deben definir las disposiciones de diseño adicionales a las presentadas en esta norma que sean necesarias a fin de garantizar los objetivos de desempeño establecidos.

Cuando la información sobre el suelo de fundación permita clasificarlo dentro de dos o más tipos de suelo, se debe optar por la Clasificación Sísmica que resulte en el caso más desfavorable.



**NORMA  
CHILENA**

**NCh  
2369**

Segunda edición  
2023.03.30

---

**Diseño sísmico de estructuras e instalaciones  
industriales**

*Earthquake-resistant design of industrial structures and facilities*

# CAMBIO NORMATIVO Norma Industrial Nch 2369

**Tabla 4 – Definición de los tipos de suelos de fundación (sólo para ser usada con Tabla 5)**

	Suelo Tipo	$V_{s30}$ [m/s]	$T_g$ [s]
A	Roca, suelo cementado	$\geq 900$	$< 0,15$ (o H/V plano)
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	$\geq 500$	$< 0,30$ (o H/V plano)
C	Suelo denso o firme	$\geq 350$	$< 0,40$ (o H/V plano)
D	Suelo medianamente denso, o firme	$\geq 180$	$< 1,00$
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	$< 180$	

**NOTAS**

Esta clasificación es aplicable a terrenos de topografía y estratificación aproximadamente horizontal, y para casos en que las estructuras afectadas se encuentran lejos de singularidades geomorfológicas y topográficas.

Para definiciones y lineamientos sobre la clasificación sísmica de suelos **considerar Anexo C.**

La clasificación y caracterización sísmica de suelos para el diseño estructural que se realice debe considerar los estratos de suelo que influyan en la respuesta sísmica de la estructura en estudio. **Se deben definir las disposiciones de diseño adicionales a las presentadas en esta norma que sean necesarias a fin de garantizar los objetivos de desempeño establecidos.**

Cuando la información sobre el suelo de fundación permita clasificarlo dentro de dos o más tipos de suelo, se debe optar por la Clasificación Sísmica que resulte en el caso más desfavorable.

## CAMBIO NORMATIVO Norma Industrial Nch 2369

### C.2 Exploración geotécnica y parámetros geotécnicos asociados a la clasificación sísmica de sitio

La clasificación sísmica de todo sitio requiere como elemento básico conocer la estratigrafía del subsuelo en una profundidad mínima de 30 m, medidos desde la superficie del terreno. Esto se debe llevar a cabo a través de la ejecución, como mínimo, de un sondaje a rotación de 30 m de profundidad, con toma de muestra. En el caso de terrenos con presencia de suelos arenosos, limosos, o arcillosos, se debe cumplir con la Norma Chilena NCh3364 *Geotecnia - Ensayo de penetración estándar*.

Es de suma importancia la correcta identificación del nivel freático en los primeros 30 m de profundidad, tanto en suelos arenosos, debido al potencial fenómeno de licuefacción, como en suelos finos (o con matriz fina), por el potencial cambio de rigidez de éstos con el contenido de humedad. Por lo anterior, se debe medir con un pozómetro el nivel freático al interior del sondaje. Para esto, el sondaje debe quedar debidamente habilitado en su interior con una cañería de PVC ranurada, y protegido en superficie con una tapa. El nivel freático debe ser reportado de forma regular, teniendo mediciones efectuadas al menos dos días después de haber terminado toda inyección de fluidos en el sondaje.

## CAMBIO NORMATIVO Norma Industrial Nch 2369

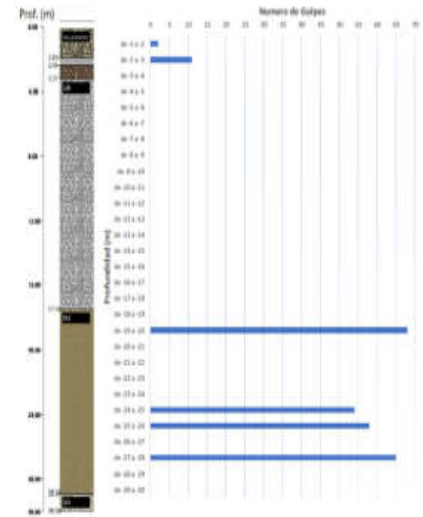
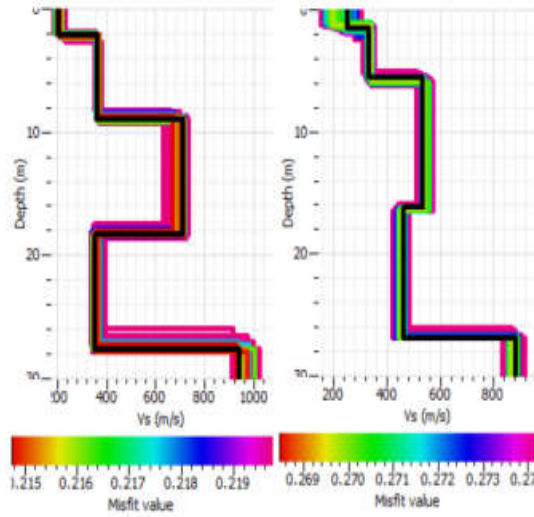
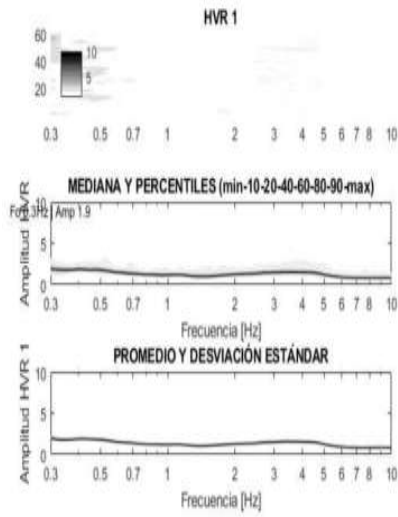
NCh2369:2023

La metodología para la Clasificación sísmica de suelos tiene presente que la amplificación sísmica de un terreno no está directamente relacionada con propiedades y/o índices que se asocian a la resistencia de los suelos. En cambio, se reconoce que los parámetros que representan las propiedades de rigidez dinámica (o deformabilidad) del sitio sí correlacionan con el fenómeno de amplificación del terreno. Adicionalmente se plantea que un parámetro importante, que proporciona información vital relativa a la amplificación sísmica, corresponde al período o frecuencia fundamental de vibración de un sitio. Por lo anterior, la Clasificación Sísmica de Sitio deja atrás parámetros como, compresión no-confinada, densidad, N-SPT y resistencia no-drenada del terreno, e incorpora los siguientes dos parámetros que deben ser debidamente evaluados por mediciones de terreno: Velocidad de propagación de ondas de corte de los 30 m superiores del terreno,  $V_{s30}$ , y el período predominante de vibración del sitio,  $T_g$ .

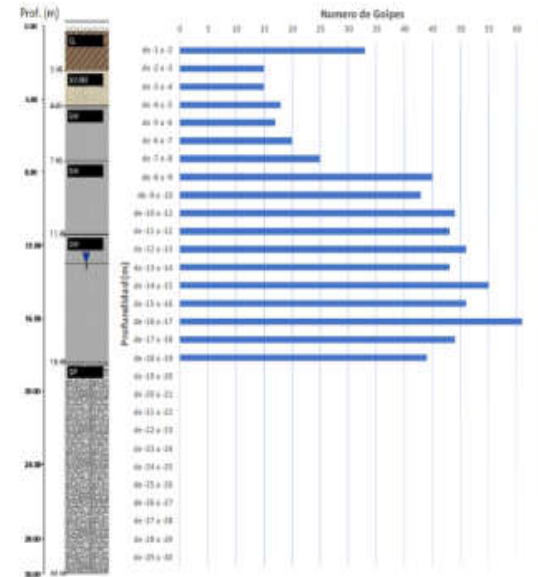
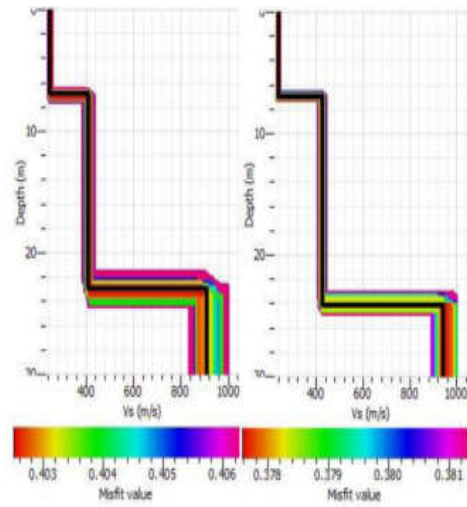
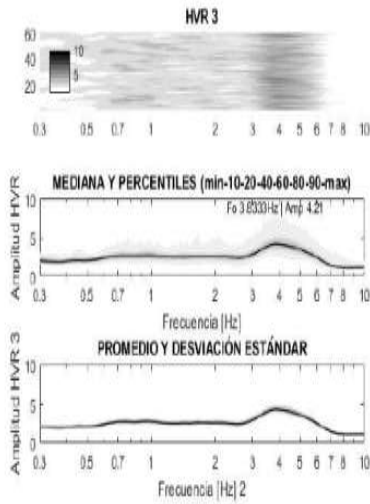
El perfil de  $V_s$  puede ser obtenido mediante ensayos down-hole, cross-hole, sonda de suspensión, u otros, utilizando sondajes. También es posible obtener el perfil de  $V_s$  a través del análisis de mediciones de ondas superficiales (por ejemplo, SPAC, SASW, MASW). En el caso de uso de ondas superficiales, las mediciones y análisis deben estar asociados a arreglos bidimensionales de los sensores, esto debido a que la ejecución de dos líneas ortogonales de medición puede sobreestimar los valores de  $V_s$ . Se deben informar las curvas de dispersión y los resultados del perfil de velocidades en profundidad. En el caso que se utilice el método ReMi, se debe incluir una medición con una fuente activa de conocida ubicación. Es importante aclarar que  $V_s$  no puede ser estimado a partir de mediciones de ondas de compresión.

El perfil de velocidad de ondas de corte que se determine para el sitio se debe contrastar y reportar en paralelo con la estratigrafía obtenida del sondaje geotécnico. De no existir compatibilidad entre ambos, se debe re-analizar la información y, de ser necesario, repetir la exploración hasta obtener consistencia entre estratigrafía directa e indirecta.

# INFORMACION NECESARIA



# INFORMACION NECESARIA



## INFORMACION NECESARIA

Conocida la estratigrafía del subsuelo y el perfil de  $V_s$  en los 30 m superiores, la velocidad de propagación de ondas de corte de los 30 m superiores del terreno,  $V_{s30}$  se evalúa a través de la siguiente expresión:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{si}}}$$

Donde "n" representa el número de estratos identificados en los 30 m superiores del depósito de suelos, "h<sub>i</sub>" corresponde al espesor de cada estrato y  $V_{si}$  es la velocidad de onda de corte de cada estrato.

En el caso que se encuentre roca, o material con  $V_s > 900$  m/s, a una profundidad,  $H_r$ , menor que 30 m medidos desde la superficie del terreno, el parámetro  $V_{s30}$  se debe calcular considerando sólo el terreno existente hasta dicha profundidad,  $H_r$ .

El período predominante de vibración del terreno,  $T_g$ , es estimado a partir de mediciones de vibraciones ambientales y la evaluación de la razón espectral H/V (método de Nakamura). En el caso de depósitos de suelos constituidos, por ejemplo, por materiales gravosos densos, que se suelen denominar suelos rígidos, la razón espectral H/V resulta ser plana (H/V plano), no mostrando un período preponderante. Se entiende como razón espectral plana aquella curva (de razón espectral H/V) en la que no se observa frecuencia, o período predominante, con amplitudes mayores a 2.

La medición de vibraciones ambientales para evaluar la razón espectral H/V requiere un mínimo de 5 mediciones de al menos 30 min de duración cada una. Se debe seleccionar aquel resultado que conduzca a la clasificación sísmica más conservadora. En el reporte se deben informar las características del sensor de medición: fabricante, modelo, ganancia y el rango de frecuencia en que el equipo responde adecuadamente. Se debe justificar técnicamente el período predominante que se reporte del sitio en cuestión.

## INFORMACION NECESARIA



La experiencia empírica y la teoría indican que el mejor comportamiento sísmico se observa en terrenos de afloramiento rocoso y, por el contrario, el mayor daño se ha observado en terrenos de suelos finos blandos. Consecuentemente, la clasificación sísmica del terreno de fundación considera cinco unidades, o niveles, que van desde aquel de mejor comportamiento (Roca: Suelo Tipo A) al de mayor exigencia sísmica (Suelo Tipo E: Suelos blandos). Adicionalmente, se definen los suelos especiales (Suelo Tipo F) que requieren un estudio para establecer el espectro de sitio. Para cada uno de los tipos de suelos, se establecen los requisitos geotécnicos.

Para clasificar un sitio se debe utilizar como primer requisito el valor de  $V_{s30}$  del sitio en cuestión. Con esto se establece una primera posible clasificación. Para ratificar esta clasificación, se debe verificar el cumplimiento del período predominante,  $T_g$ , determinado para el sitio. En el caso que no se cumpla el segundo requisito (período predominante,  $T_g$ ), la primera posible clasificación debe ser degradada en un nivel. Por ejemplo, si un sitio se caracteriza con  $V_{s30} = 520$  m/s y  $T_g = 0.51$  s, la primera posible clasificación resulta Suelo Tipo B. Sin embargo, el período predominante no se cumple (debe ser  $< 0,3$  s y es  $0,51$  s). Consecuentemente, se debe degradar en un nivel. Es decir, el sitio clasifica como Suelo Tipo C.

## INFORMACION NECESARIA

---



Cuando la estructura se apoya íntegramente en el basamento rocoso y este basamento cumple las características geotécnicas antes indicadas, independientemente de los materiales geotécnicos existentes sobre el sello de fundación, el sitio clasifica como Suelo Tipo A.

En estructuras con fundaciones profundas, para efectos de clasificación sísmica del sitio, la exigencia de un sondaje de 30 m de profundidad se mantiene, así como el procedimiento antes descrito de clasificación sísmica del terreno. Sin embargo, esto en ningún caso limita la exploración geotécnica requerida para todos los efectos de diseño de fundaciones, excavaciones, muros, etc.

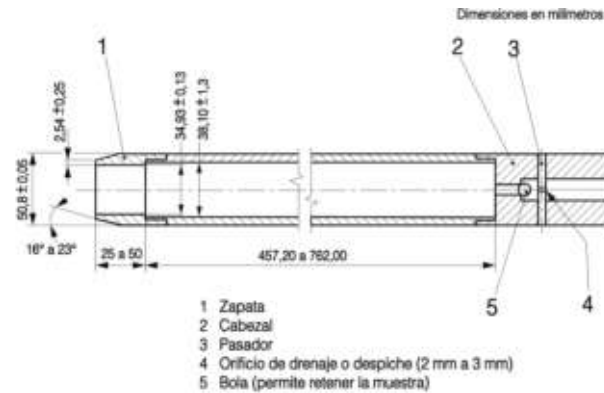
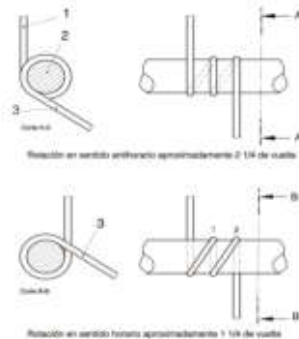


# TERCER REQUISITO : SONDAJE

## 3.- PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL TERRENO

La clasificación sísmica de todo sitio requiere como elemento básico conocer la estratigrafía del subsuelo en una profundidad mínima de 30 m, medidos desde la superficie del terreno. Esto se debe llevar cabo a través de la ejecución, como mínimo, de un sondaje a rotación de 30 m de profundidad. En el caso de terrenos con presencia de suelos arenosos, limosos, o arcillosos, se debe cumplir con la norma Chilena NCh 3364, Geotecnia — Ensayo de Penetración Estándar.

5.2 Número de vueltas de cuenta, el número de veces que la cuenta es enrollada completamente alrededor del tambor. El ensayo de resistencia a la penetración se lleva a cabo dando dos vueltas nominales alrededor del tambor. Dependiendo de la posición del operador, la dirección de rotación del tambor y el ángulo al cual la cuenta se separa del tambor, el número de vueltas varía entre 1 3/4 y 2 1/4 (ver Figura 1).



# EQUIPO SPT AUTOMATICO



# Donde NO aplica el SONDAJE



## CASOS ESPECIALES NCh433 EN PROCESO

4.2.1.3 Para efectos de clasificación sísmica del terreno se consideran como casos especiales los siguientes:

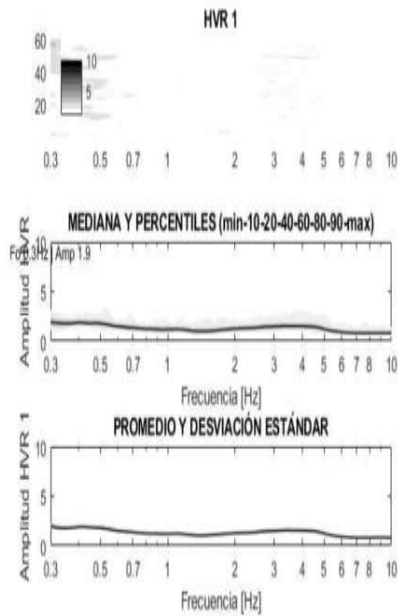
- Estructuras de menos de 500 m<sup>2</sup> construidos, de no más de 2 niveles y con una altura menor a 8 m, independiente de su clasificación de uso.
- Conjunto de viviendas en terreno de menos de 8 000 m<sup>2</sup>, donde cada unidad es de no más de 2 niveles y de menos de 200 m<sup>2</sup> construidos.

En estos casos especiales no se requiere clasificar sísmicamente el sitio (no se exige un sondeaje de 30 m), pero sí se requiere llevar a cabo el estudio geotécnico respectivo, cumpliendo como mínimo las disposiciones de NCh1508.

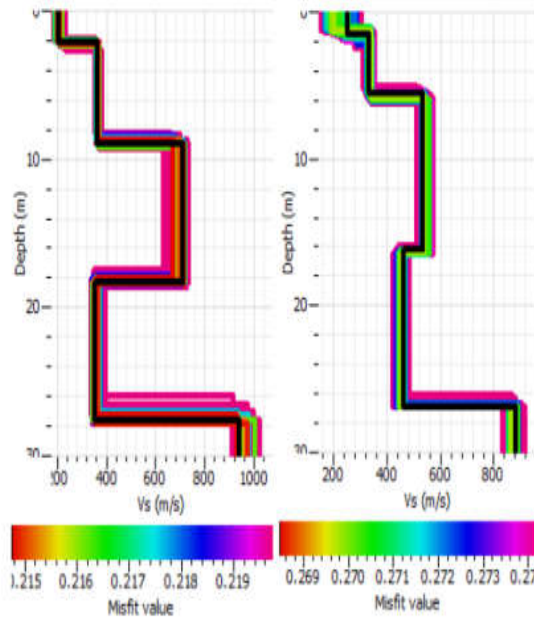
respectivo, cumpliendo como mínimo las disposiciones de NCh1508.

Si se opta por no clasificar sísmicamente el sitio (no se realiza un sondeaje de 30 m) entonces las estructuras que califiquen como casos especiales se deben calcular y diseñar sísmicamente según el método estático, aplicando en su análisis el coeficiente sísmico máximo,  $C_{max}$ , asociado a Suelo Tipo E.

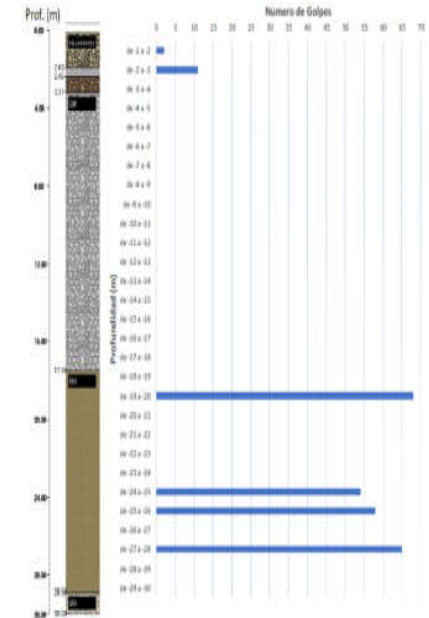
# CASO CON INVERSION



Periodo

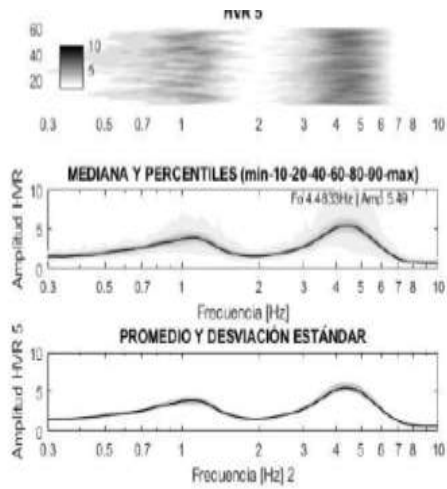


Vs

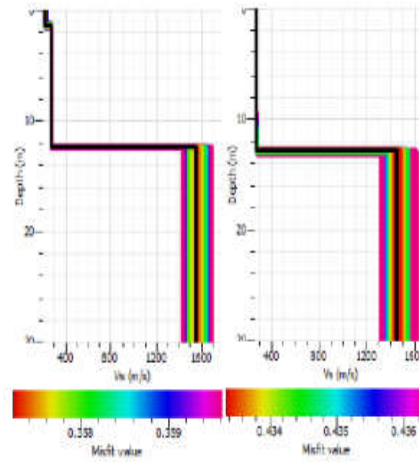


Sondaje

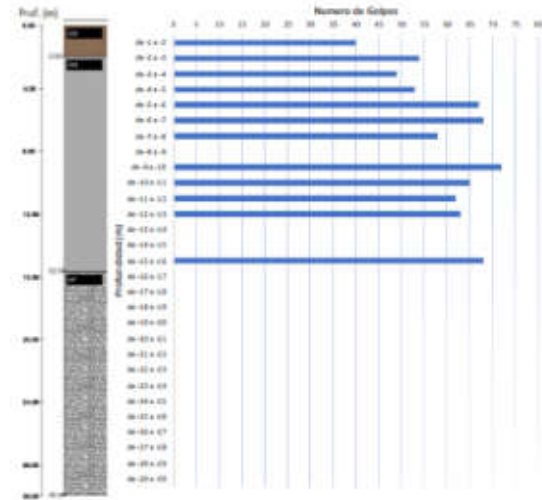
# CASO CON 2 PEAKS



**Periodo**

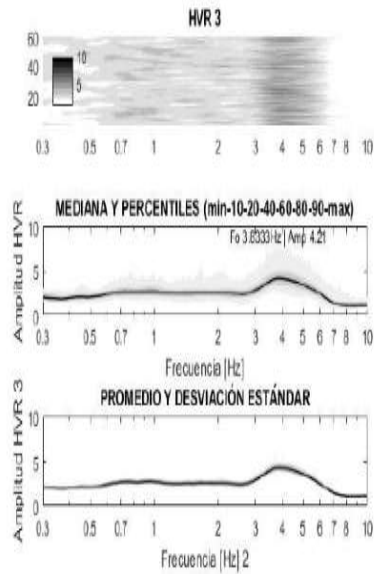


**Vs**

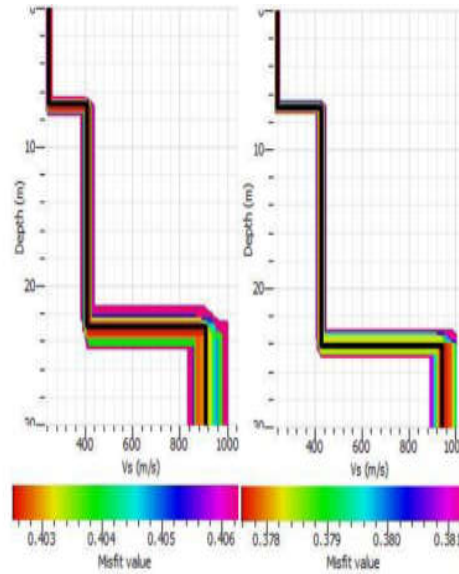


**Sondaje**

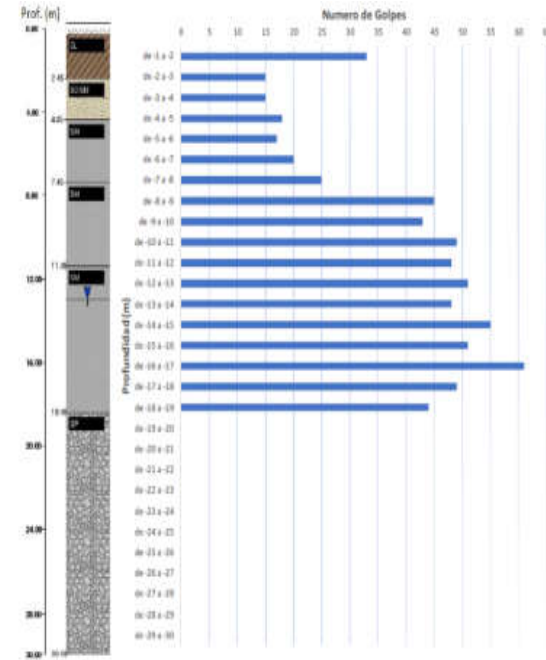
# CASO SIMPLE



**Periodo**



**Vs**

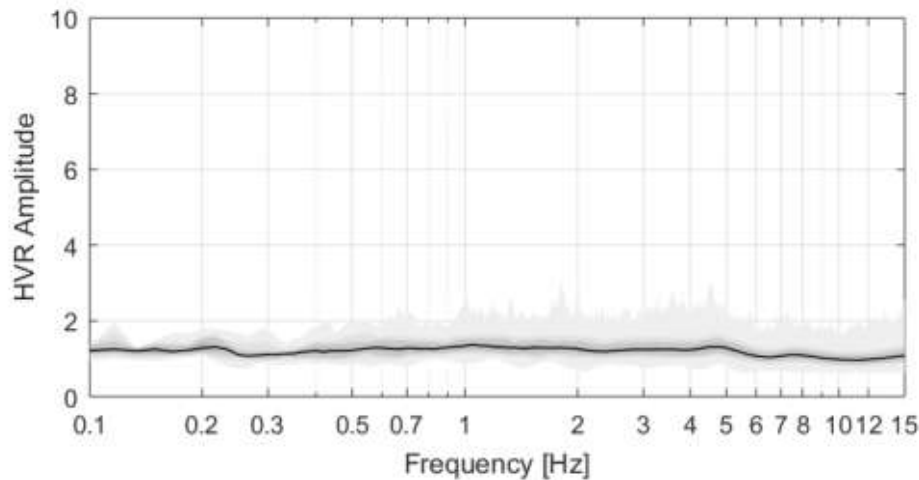


**Sondaje**

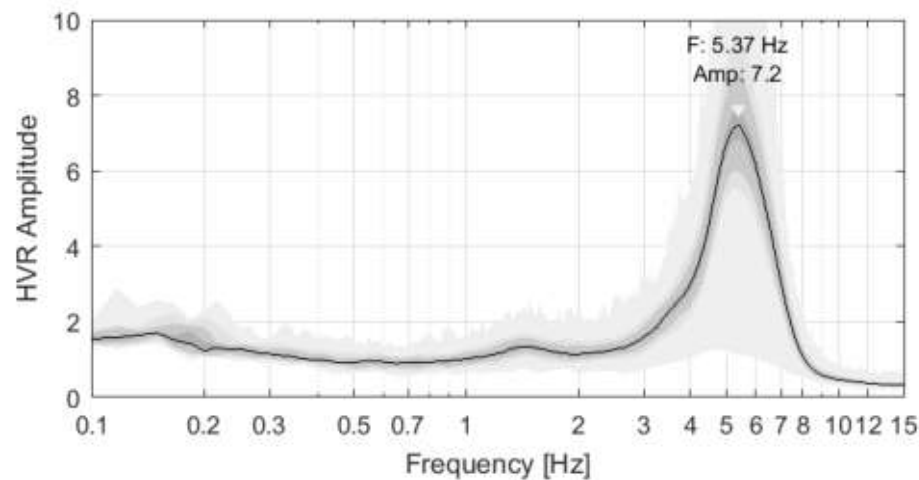
## CASOS H/V



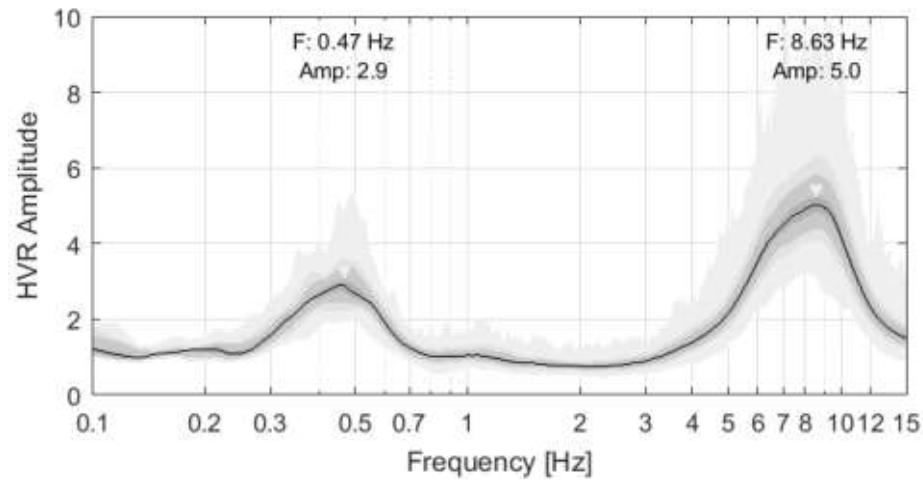
Case 1)  
Curva plana  
H/V Amplitud  $< 2$



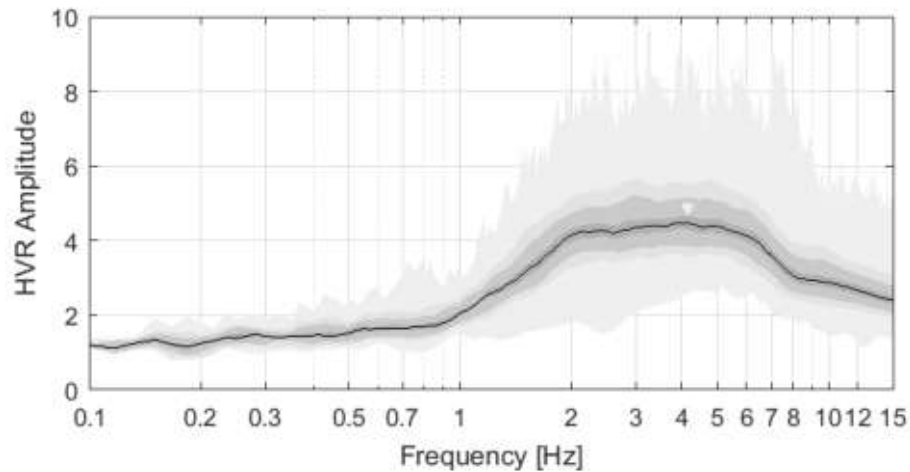
Case 2)  
frecuencia  
predominante  
H/V Amplitud  $> 2$



# CASOS H/V



Case3)  
Dos o mas frecuencias  
predominantes



Case 4)  
No es possible  
identificar una  
frecuencia  
predominante



## Equipo



Director (PUC)



Director  
alternativo (UdeC)



UCH-CSN



UCH



PUC



Profesionales



Profesionales



**Tesistas  
Ayudantes  
Ingenieros**

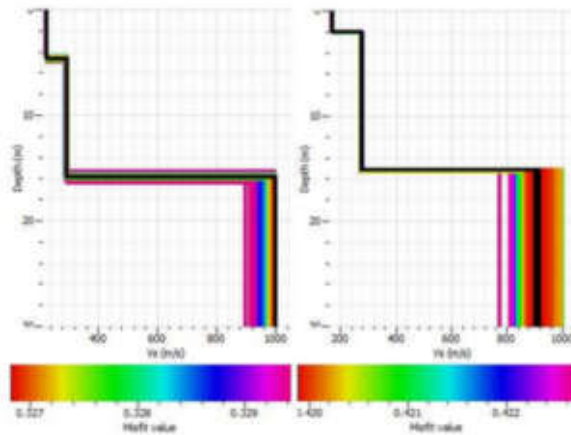
**+  
Profesionales**



# EJEMPLO PRACTICO 1



Fig. 9: Perfil de velocidades de corte ( $V_s$ ) en estratos hasta 30m de profundidad. A la izquierda Perfil N°1 y a la derecha Perfil N°2.



Desde (m.)	Hasta (m.)	Velocidad (m/s)
0.00	2.83	275.34
2.83	15.12	264.02
15.12	30.00	393.44

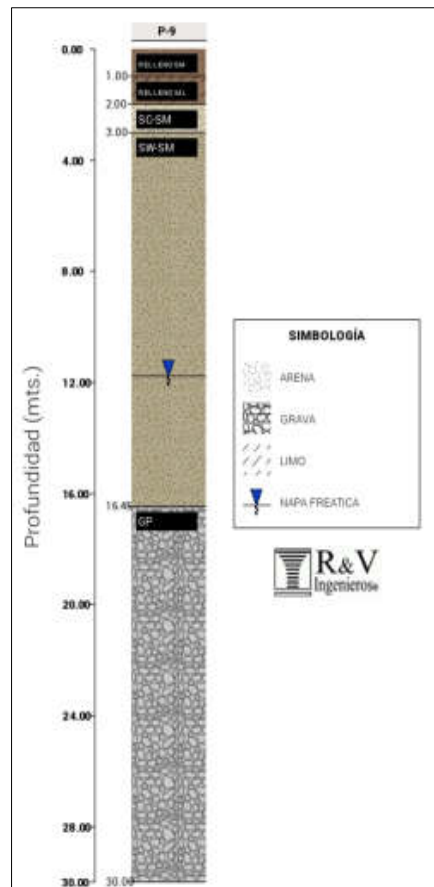
Fig. 10: Perfil de velocidad de ondas de corte  $V_s$ , Perfil N°1.

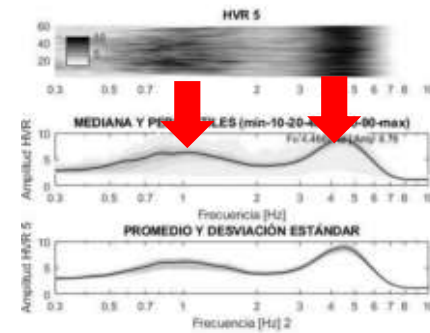
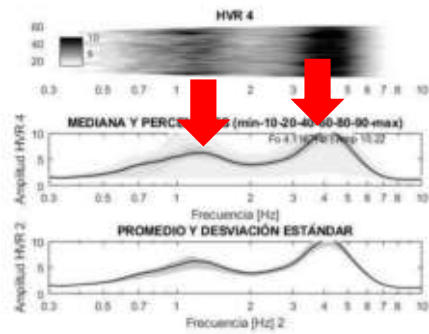
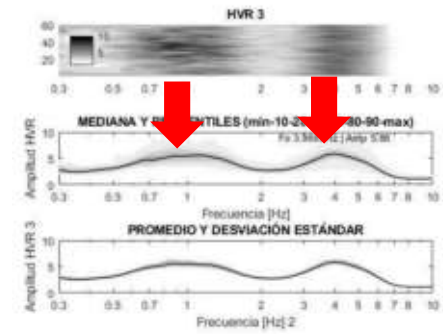
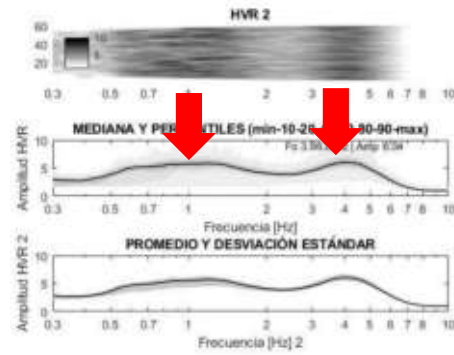
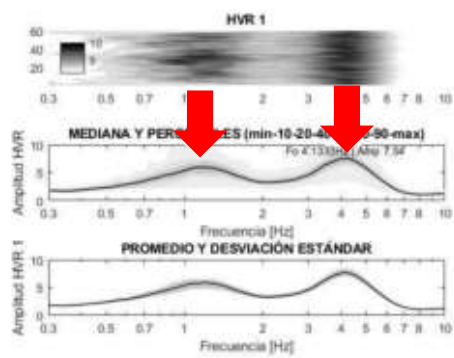
Desde (m.)	Hasta (m.)	Velocidad (m/s)
0.00	2.11	175.11
2.11	15.25	278.98
15.25	30.00	537.80

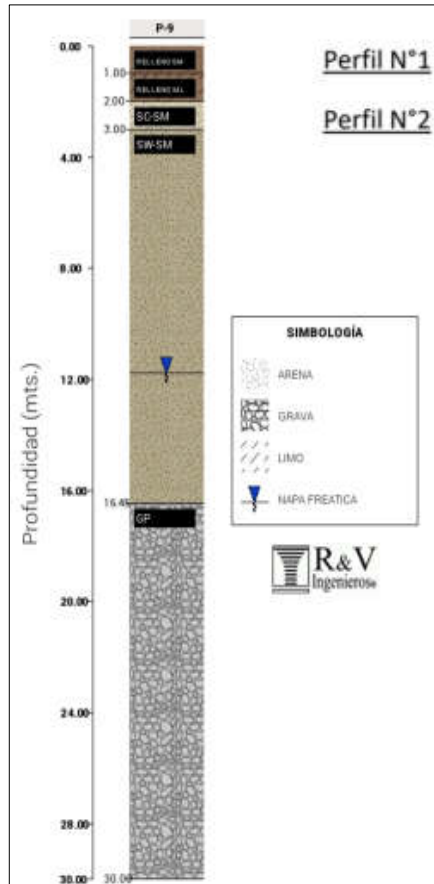
Fig. 11: Perfil de velocidad de ondas de corte  $V_s$ , Perfil N°2.

Perfil N°1  $V_{s\_30} = 403.66 \text{ m/s}$

Perfil N°2  $V_{s\_30} = 400.65 \text{ m/s}$





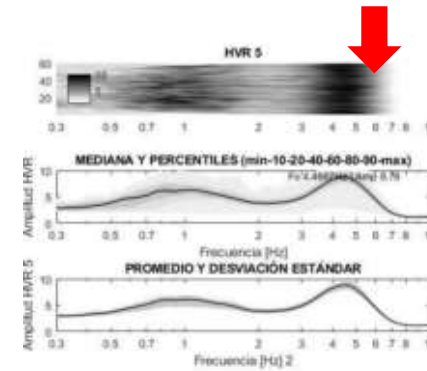


Perfil N°1  $V_{s30} = 403.66 \text{ m/s}$

Perfil N°2  $V_{s30} = 400.65 \text{ m/s}$

$$T = 4 \cdot H / V_s$$

$$T = 0,2 \text{ segundos}$$



	Suelo Tipo	$V_{s30}$ [m/s]	$T_g$ [s]
A	Roca, suelo cementado	$\geq 900$	$< 0,15$ (o H/V plano)
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	$\geq 500$	$< 0,30$ (o H/V plano)
C	Suelo denso o firme	$\geq 350$	$< 0,40$ (o H/V plano)
D	Suelo medianamente denso, o firme	$\geq 180$	$< 1,00$
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	$< 180$	

## EJEMPLO PRACTICO 2

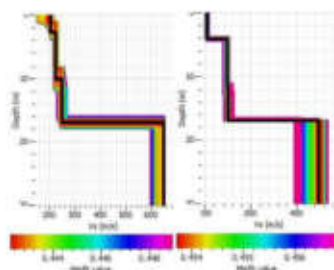


Fig. 9: Perfil de velocidades de corte ( $V_s$ ) en estratos hasta 30m de profundidad. A la izquierda Perfil N°1 y a la derecha Perfil N°2.

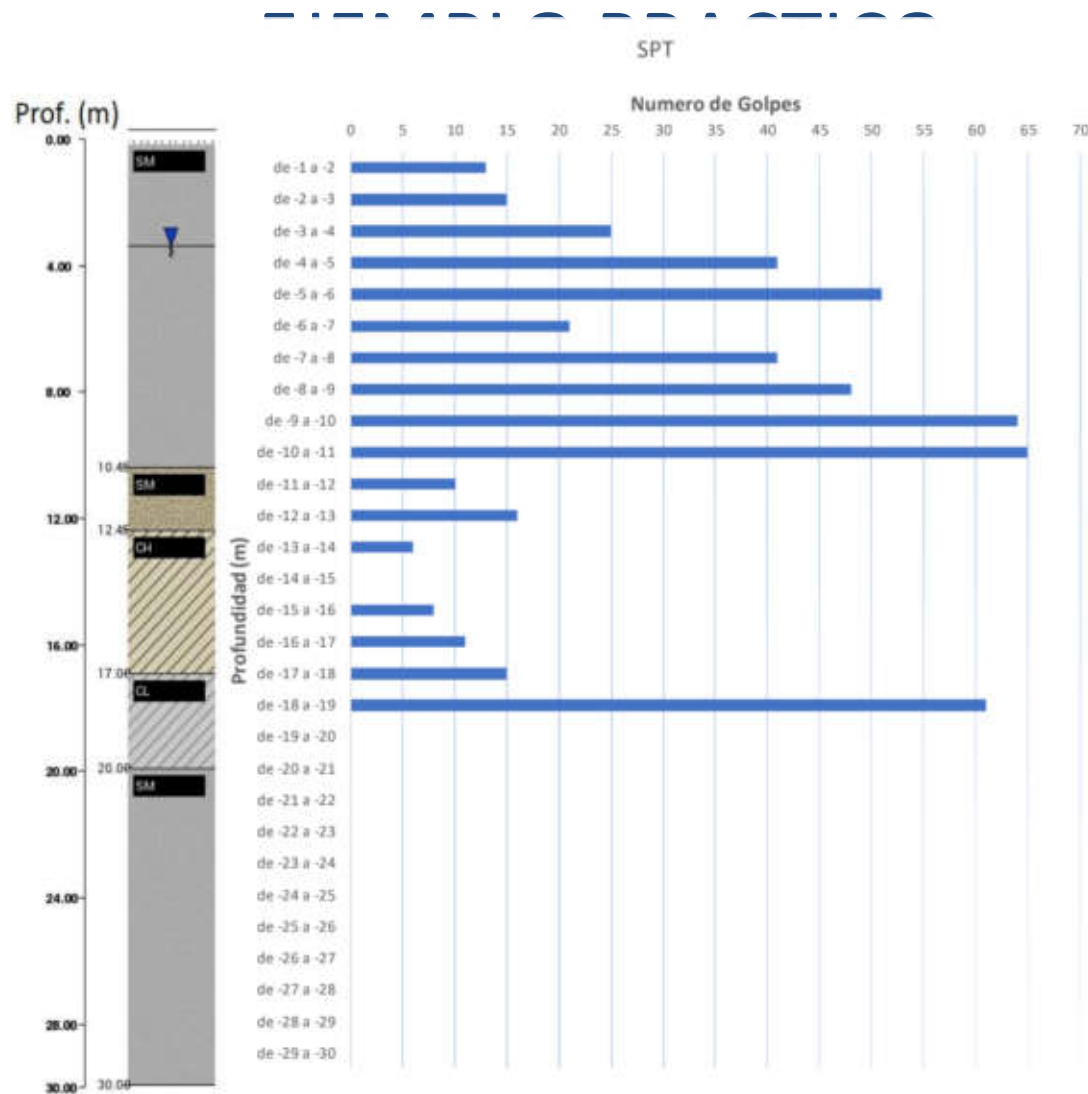
Desde (m.)	Hasta (m.)	Velocidad (m/s)
0.00	2.83	204.71
2.83	10.16	222.41
10.16	16.77	246.00
16.77	30.00	647.06

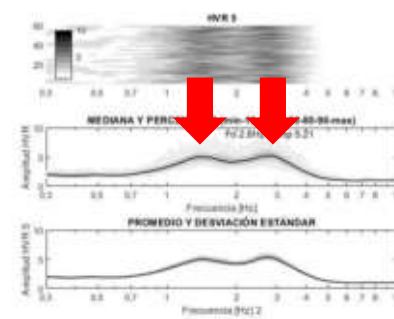
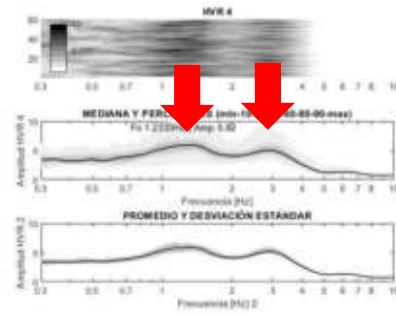
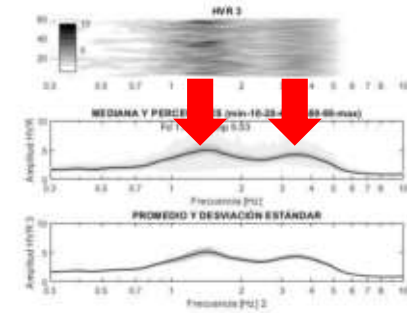
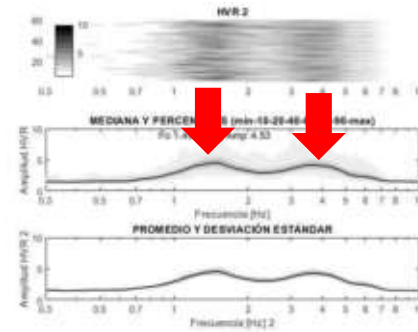
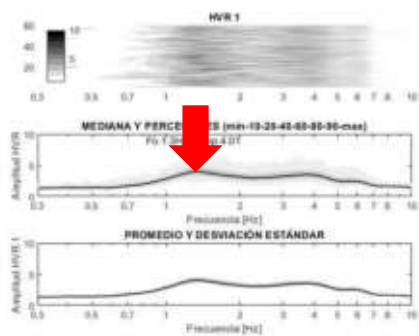
Fig. 10: Perfil de velocidad de ondas de corte  $V_s$ , Perfil N°1.

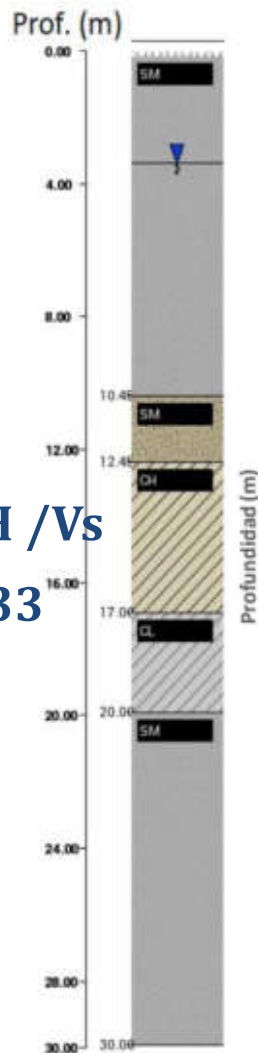
Desde (m.)	Hasta (m.)	Velocidad (m/s)
0.00	4.13	204.87
4.13	16.89	248.92
16.89	30.00	446.34

Fig. 11: Perfil de velocidad de ondas de corte  $V_s$ , Perfil N°2.





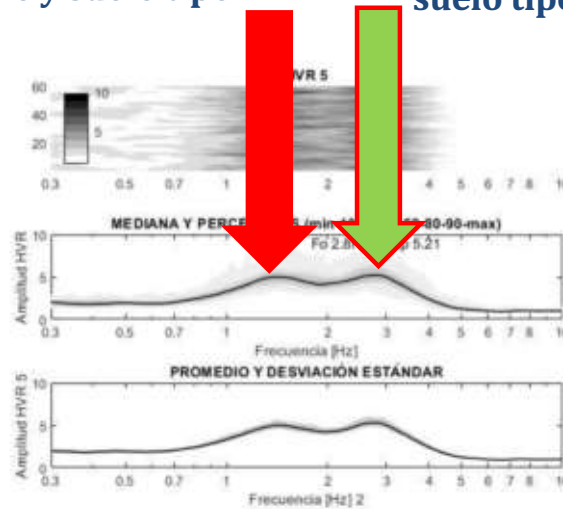




$T = 4 \cdot H / V_s$   
 $T = 0,33$

$T = 0,83$  segundos **NO** cuadra con sondaje. Seria el mas desfavorable y suelo tipo D

$T = 0,33$  segundos **OK** cuadra con sondaje. suelo tipo C



Suelo Tipo	$V_{s30}$ [m/s]	$T_g$ [s]
A	Roca, suelo cementado	$\geq 900$ < 0,15 (o H/V plano)
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	$\geq 500$ < 0,30 (o H/V plano)
C	Suelo denso o firme	$\geq 350$ < 0,40 (o H/V plano)
D	Suelo medianamente denso, o firme	$\geq 180$ < 1,00
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180



[www.codigomodelosismico.org](http://www.codigomodelosismico.org)

Gracias por su atención