

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO  
FACTULDAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Patrocinante:

Mg. Franco Paolo

Benedetti Leonelli



**OBTENCIÓN DE DEMANDAS SÍSMICAS  
SINTÉTICAS EN PROFUNDIDAD MEDIANTE  
MÉTODOS UNIDIMENSIONALES DE  
DECONVOLUCIÓN**

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

NICOLÁS ANTONIO SANHUEZA MELGAREJO

Concepción, abril 2019

**DEDICATORIA**

**ii**

*“Mi motivación y mi  
soporte, para ellos, mi  
familia.”*

**AGRADECIMIENTOS**

**iii**

*“Agradezco a Dios, mi familia, compañeros/as, amigos, profesor patrocinante, profesores y no docente que han estado en mi etapa formativa profesional”*

**NOMENCLATURA**

iv

- ✓  $A_{bot\_k}$ : Registro de aceleraciones en profundidad, iteración k.
- ✓  $A_{top\_k}$ : Registro de aceleraciones en superficie, iteración k.
- ✓  $A_{top\_0}$ : Registro de aceleración medido en superficie.
- ✓ ASCE-7-16: Código Norteamericana de cargas sísmicas para estructuras
- ✓  $A_{loop}$ : Área del loop de histéresis.
- ✓ Nch 433: Norma Chilena de diseño sísmico de edificios.
- ✓ Mw: Magnitud de momento.
- ✓ IBC: International Building Code.
- ✓  $N_{SPT}$ : Índice de penetración estándar del suelo.
- ✓  $S_u$ : Resistencia al corte no drenado del suelo.
- ✓  $N_1$ : Índice de penetración estándar normalizado por presión de confinamiento de 0,1 Mpa.
- ✓  $q_u$ : Resistencia a la compresión simple del suelo.
- ✓  $\rho$ : Peso específico de un suelo
- ✓  $\xi$ : Relación de amortiguamiento de un suelo.
- ✓ G: Módulo de corte.
- ✓  $G_{max}$ : Módulo de corte máximo.
- ✓  $G_{sec}$ : Módulo de corte secante.
- ✓  $\gamma_c$ : Deformación unitaria de corte del suelo.
- ✓  $\tau_c$ : Esfuerzo cortante del suelo.
- ✓  $W_D$ : Energía disipada en un cíclico de histerético.
- ✓  $W_S$ : Máxima energía disipada en un ciclo de histéresis.
- ✓  $\tau_{max}$ : Esfuerzo máximo de corte.
- ✓  $(H)_f$ : Función de Transferencia.
- ✓ *Input*: Señal sísmica de entrada.
- ✓ *Output*: Señal sísmica de salida.
- ✓  $T_n$ : Periodo fundamental en el modo n de vibrar de un sitio.
- ✓  $T_n'$ : Periodo fundamental en el modo n de vibrar de un sitio mediante técnica de Nakamura.
- ✓ CPT: Ensayo de penetración de cono.
- ✓ DMT: Ensayo de dinamómetro sísmico del suelo

- ✓ PMT: Ensayo presiométrico del suelo.
- ✓ NS: Dirección horizontal sentido Norte-Sur.
- ✓ EW: Dirección horizontal sentido Este-Oeste.
- ✓ Long.: Dirección horizontal sentido longitudinal.
- ✓ Transv.: Dirección horizontal sentido transversal.
- ✓ UCh: Universidad de Chile.
- ✓ kPa: Kilo-Pascales.
- ✓ Hz: Hertz.
- ✓ (f): Dominio de la frecuencia.
- ✓ (t): Dominio del tiempo.
- ✓ No: Número
- ✓ K: Numero de iteración.
- ✓  $\varepsilon$ : Valor unidimensional que disminuye errores matemáticos.
- ✓ R: Variación en amplitud en contenido de frecuencia entre dos registros sísmicos.
- ✓  $\alpha_f^{decon}$ : Amplitud de frecuencia registro sintético en superficie.
- ✓  $\alpha_f$ : Amplitud de frecuencia registro en superficie.
- ✓ PGA: Aceleración máxima del terreno.
- ✓ PGV: Velocidad máxima del terreno.
- ✓ PGD: Desplazamiento máximo del terreno.
- ✓ Tef: Duración efectiva.
- ✓ GDL: Grado de Libertad
- ✓ m: Metros.
- ✓ s: Segundos.
- ✓ cm: Centímetros.
- ✓ g: Aceleración de gravedad.

# **OBTENCIÓN DE DEMANDAS SÍSMICAS SINTÉTICAS EN PROFUNDIDAD MEDIANTE MÉTODOS UNIDIMENSIONALES DE DECONVOLUCIÓN.**

**Nicolás Sanhueza Melgarejo**

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

[nsanhue@alumnos.ubiobio.cl](mailto:nsanhue@alumnos.ubiobio.cl)

**Franco Benedetti Leonelli**

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

[fbenedett@ubiobio.cl](mailto:fbenedett@ubiobio.cl)

## **Resumen**

El efecto de sitio modifica las características de propagación las ondas sísmicas que viajan desde el manto rocoso hasta la superficie a través del subsuelo, provocando un aumento considerable de daño sísmico a nivel superficial.

Actualmente, la normativa de diseño sísmico de edificios, Nch 433, exige para suelos que clasifiquen como tipo “F”, el estudio de efecto de sitio. Estos estudios especiales de amplificación requieren de demandas sísmicas en profundidad, para lo que hoy en día, no se dispone abiertamente de este tipo de registros para la comunidad de la ingeniería sísmica-geotécnica. Dado este vacío de información, esta tesis buscó obtener demandas sintéticas en profundidad en distintos tipos de

suelos, con el fin de facilitar posteriores análisis de efectos de sitio para proyectos de ingeniería que lo requieran.

Para la estimación de demandas sísmicas en profundidad se utilizó información liberada por la Universidad de Chile, que proporciona la caracterización geofísica y registros sísmicos medidos en estaciones sismográficas chilenas durante el terremoto  $M_w = 8.8$  del 27 de febrero del 2010, aplicando análisis unidimensionales de deconvolución, con enfoques lineal, lineal-equivalente y no lineal, mediante modelación en DeepSoil y programación de rutinas de deconvolución en Matlab.

De los resultados obtenidos, no se obtiene una demanda sísmica transversal en profundidad que agrupe los casos de estudios, no obstante, éstas pueden ser utilizadas para posteriores estudios de amplificación en sitios relativamente cercanos y con perfiles geotécnicos similares a los analizados en esta tesis, recomendando siempre en primer lugar realizar una modelación con enfoque lineal-equivalente.

Palabras Claves: Efecto de sitio, deconvolución, demandas sísmicas, análisis unidimensional.

12318 Palabras Texto + 56 Figuras/Tablas\*250 + 34 Figuras/Tablas 300= 36518 Palabras Totales

# **OBTAINING SYNTHETIC DEEP SEISMIC DEMANDS BY MEANS OF ONE-DIMENSIONAL DECONVOLUTION METHODS**

**Nicolas Sanhueza Melgarejo**

**Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío**

[nsanhue@alumnos.ubiobio.cl](mailto:nsanhue@alumnos.ubiobio.cl)

**Franco Benedetti Leonelli**

**Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío**

[fbenedett@ubiobio.cl](mailto:fbenedett@ubiobio.cl)

## **ABSTRACT**

The site effect modifies the propagation characteristics of the seismic waves that travel from the rocky mantle to the surface through the subsoil, causing a considerable increase in seismic damage at the surface level.

Currently, the seismic design standard for buildings, Nch 433, requires for soils to classify as type "F", the site effect study. These special amplification studies require in-depth seismic demands, for which today, such records are not openly available to the seismic-geotechnical engineering community. Given this information gap, this thesis sought to obtain synthetic demands in depth on different types of soils, in order to facilitate subsequent analysis of site effects for engineering projects that require it.



For the estimation of seismic demands in depth was used information released by the University of Chile, which provides geophysical characterization and seismic records measured in Chilean seismic stations during the earthquake  $M_w = 8.8$  of February 27, 2010, applying one-dimensional deconvolution analysis, with linear, linear-equivalent and non-linear approaches, through DeepSoil modeling and programming of deconvolution routines in Matlab.

From the obtained results, a transverse seismic demand is not obtained in depth that groups the case studies, nevertheless, these can be used for later amplification studies in relatively close sites and with geotechnical profiles similar to those analyzed in this thesis, always recommending in the first place to carry out a modeling with linear-equivalent approach.

**Keywords:** Site effect, deconvolution, seismic demands, one-dimensional analysis.

# 1 INDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN .....	16
1.1	Objetivo general:.....	16
1.2	Objetivos específicos: .....	17
1.3	Metodología .....	17
1.4	Alcances:.....	17
2	ESTADO DEL ARTE.....	18
2.1	Efecto de sitio .....	18
2.2	Microzonificación sísmica Chile .....	19
2.3	Revisión código sísmico chileno .....	20
2.4	Revisión códigos sísmicos internacionales .....	21
2.5	Propiedades dinámicas de los suelos .....	23
2.6	Enfoques de Modelación. ....	24
2.6.1	Modelo Lineal .....	24
2.6.2	Modelo Lineal-Equivalente .....	25
2.6.3	Modelo No Lineal.....	26
2.7	Análisis unidimensional de respuesta de sitio .....	28
2.7.1	Deconvolución.....	28
2.7.2	Análisis en enfoque Lineal .....	29
2.7.3	Análisis en enfoque Lineal-Equivalente.....	29
2.7.4	Análisis en enfoque No Lineal .....	30
3	CONSTRUCCIÓN DE MODELOS .....	31
3.1	Estaciones sismográficas seleccionadas. ....	31
3.2	Caracterización de las sismográficas seleccionadas. ....	32
3.2.1	Estación Constitución.....	32
3.2.1.1	Dirección Transversal .....	33
3.2.1.2	Dirección Longitudinal .....	34
3.3	Curvas empíricas de degradación de rigidez y aumento de amortiguamiento.....	36
3.3.1	Vucetic & Dobry, 1991. (Suelos Cohesivos) .....	36

3.3.2	Seed & Idriss, 1970 (Suelos granulares) .....	37
3.4	Correlaciones geotécnicas.....	37
3.5	Modelación estaciones sismográficas .....	40
3.5.1	Modelación Lineal.....	41
3.5.2	Modelación Lineal-equivalente .....	41
3.5.3	Modelación No lineal .....	42
4	EJECUCIÓN DE DECONVOLUCIÓN .....	43
4.1	Enfoque Lineal.....	43
4.2	Enfoque Lineal-equivalente y No lineal .....	44
5	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	46
5.1	Validación de resultados .....	46
5.1.1	Registros sísmicos obtenidos en superficie .....	46
5.1.2	Espectros de frecuencia obtenidos en superficie .....	51
5.1.3	Espectros de respuestas de pseudo-aceleración y desplazamiento obtenidos en superficie .....	56
5.2	Resultados obtenidos en profundidad. ....	60
5.2.1	Registros sísmicos obtenidos en profundidad .....	60
5.2.2	Espectros de respuestas de pseudo-aceleración obtenidos en profundidad .....	65
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
7	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	70
8	ANEXOS.....	73
	Caracterización demás estaciones seleccionadas.....	74
8.1.1	Estación Angol .....	74
8.1.2	Estación Hualañé .....	76
8.1.3	Estación Maipú.....	78
8.1.4	Estación Peñalolén.....	80
8.2	Convergencia deformaciones unitarias de corte .....	82
8.3	Respuesta sísmica de sistemas lineales de 1GDL.....	85
8.3.1	Método Newmark Beta.....	85
8.3.2	Construcción de espectros de respuesta.....	86
8.4	Validación resultados no mostrados. ....	87

8.4.1	Registros sísmicos medidos en superficie .....	87
8.4.2	Espectros de frecuencias registros en superficie otra dirección .....	92
8.5	Resultados obtenidos en profundidad no mostrados.....	97
8.5.1	Registros sísmicos en profundidad .....	97
8.6	Cuantificación de respuesta sísmica en profundidad .....	100
8.6.1	Estación Angol .....	100
8.6.2	Estación Constitución.....	100
8.6.3	Estación Hualañé .....	101
8.6.4	Estación Maipú.....	101
8.6.5	Estación Peñalolén.....	102
8.7	Deformaciones máximas unitarias inducidas .....	102
8.7.1	Estación Angol .....	102
8.7.2	Estación Constitución.....	103
8.7.3	Estación Hualañé .....	104
8.7.4	Estación Maipú.....	105
8.7.5	Estación Peñalolén.....	106

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: “Esquema metodología implementada, (Elaboración propia)” .....	17
Figura 2 “Propagación de ondas dura efecto de sitio, <a href="http://www.lis.ucr.ac.cr/239">http://www.lis.ucr.ac.cr/239</a> ” .....	18
Figura 3 “Microzonificación sísmica, Nch. 433 (2012)” .....	19
Figura 4 “Propuesta de microzonificación sísmica chilena, F. Leyton (2014)” .....	20
Figura 5 “Tabla clasificación sísmica terreno de fundación, Nch433, (2012)” .....	21
Figura 6 “Parámetros sísmicos, tabla 6.3 Nch 433, (2012)” .....	21
Figura 7 “Clasificación sísmica de suelo Japón, S.C.B.J, (2010)” .....	22
Figura 8 “Comportamiento histerético del suelo, Godoy. C.A, (2013)” .....	23
Figura 9 “Curva de histéresis, Steven. L. Kramer, (1996)” .....	24
Figura 10 “Factor de reducción módulo de corte, Steven L. Kramer, (1996)” .....	25
Figura 11 Curva de histéresis, comportamiento No Lineal, Steven L. Kramer, (1996)” .....	27
Figura 12 “Ciclos de carga-descarga suelo, Steven L. Kramer, (1996)” .....	27
Figura 13 “Función de transferencia, Steven L. Kramer, (1996)” .....	29
Figura 14 “Convergencia deformación de corte, Steven L. Kramer, (1996)” .....	30
Figura 15 “Bases de información para análisis, (Elaboración Propia)” .....	31
Figura 16 “Registro de aceleraciones, Estación Constitución-Transv. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.” .....	33
Figura 17 “Registro de velocidades, Estación Constitución-Transv. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.” .....	33
Figura 18 “Registro de desplazamientos, dirección transv., Estación Constitución. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.” .....	33
Figura 19 “Espectro de pseudo-aceleraciones, Estación Constitución-Transv. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.” .....	33
Figura 20 “Registro de aceleraciones, Estación Constitución-Long. Informe geotécnico, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.” .....	34
Figura 21 “Registro de velocidades, Estación Constitución-Long. Informe geotécnico, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.” .....	34
Figura 22 “Registro de desplazamientos, Estación Constitución-Long. Informe geotécnico, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.” .....	34
Figura 23 “Espectro de pseudo-aceleraciones, Estación Constitución-Long. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.” .....	34

Figura 24 “Set de propiedades geotécnicas, estación Constitución, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.” .....	35
Figura 25 “Curvas empíricas de amortiguamiento y módulo de corte, Vucetic & Dobry 1991” .	37
Figura 26 “Curvas empíricas de módulo de corte y amortiguamiento, Seed & Idriss, (1970)” ....	37
Figura 27 “Modelo Lineal, estación de Constitución, (Elaboración Propia)” .....	41
Figura 28 “Modelación Lineal-Equivalente, estación Constitución, (Elaboración Propia)” .....	41
Figura 29 “Modelación No Lineal, Estación Constitución, (Elaboración Propia)” .....	42
Figura 30 “Esquema deconvolución no lineal, (Elaboración Propia)” .....	45
Figura 31 “Set registros sísmicos de aceleración en superficie, estación Angol, (Elaboración propia)” .....	46
Figura 32 “Set registros sísmicos de aceleración en superficie, estación Constitución, (Elaboración propia)” .....	47
Figura 33 “Set registros sísmicos de aceleración en superficie, estación Hualañé, (Elaboración propia)” .....	48
Figura 34 “Set registros sísmicos de aceleración en superficie, estación Maipú, (Elaboración propia)” .....	49
Figura 35 “Set registros sísmicos de aceleración en superficie, estación Peñalolén, (Elaboración propia)” .....	50
Figura 36 “Set espectros de frecuencias registros en superficie, estación Angol, (Elaboración propia)” .....	51
Figura 37 “Set espectros de frecuencias registros en superficie, estación Constitución, (Elaboración propia)” .....	52
Figura 38 “Set espectros de frecuencias registros en superficie, estación Hualañé, (Elaboración propia)” .....	53
Figura 39 “Set espectros de frecuencias registros en superficie, estación Maipú, (Elaboración propia)” .....	54
Figura 40 “Set espectros de frecuencias registros en superficie, estación Peñalolén, (Elaboración propia)” .....	55
Figura 41 “Espectros de respuestas en superficie, estación Angol, (Elaboración propia)” .....	56
Figura 42 “Espectros de respuestas en superficie, estación Constitución, (Elaboración propia)”	57
Figura 43 “Espectros de respuestas en superficie, estación Hualañé, (Elaboración propia)” .....	57
Figura 44 “Espectros de respuestas en superficie, estación Maipú, (Elaboración propia)” .....	58
Figura 45 “Espectros de respuestas en superficie, estación Peñalolén, (Elaboración propia)” .....	58

Figura 46 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en profundidad, estación Angol, (Elaboración propia)” .....	60
Figura 47 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en profundidad, estación Const., (Elaboración propia)” .....	61
Figura 48 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en profundidad, estación Hualañé, (Elaboración propia)” .....	62
Figura 49 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en profundidad, estación Maipú, (Elaboración propia)” .....	63
Figura 50 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en profundidad, estación Peñalolén, (Elaboración propia)” .....	64
Figura 51 “Espectro de pseudo-aceleración en profundidad, estación Angol, (Elaboración propia)” .....	65
Figura 52 “Espectro de pseudo-aceleración en profundidad, estación Constitución, (Elaboración propia)” .....	65
Figura 53 “Espectro de pseudo-aceleración en profundidad, estación Hualañé, (Elaboración propia)” .....	66
Figura 54 “Espectro de pseudo-aceleración en profundidad, estación Maipú, (Elaboración propia)” .....	66
Figura 55 “Espectro de pseudo-aceleración en profundidad, estación Peñalolén, (Elaboración propia)” .....	66

## 1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, la normativa de diseño sísmico de edificios, Nch433, describe que se requieren estudios “especiales de amplificación” en proyectos cuya clasificación sísmica de suelo sea “Tipo F”. Los estudios de amplificación corresponden a análisis de efecto de sitio, que estudian el comportamiento en la propagación de las ondas sísmicas que viajan a través del subsuelo hasta la superficie, con el objetivo de estimar demandas sísmicas en superficie.

Para realizar un estudio de amplificación local, se requiere una caracterización geotécnica y una demanda sísmica en profundidad en el sitio en cuestión, siendo en éste último requerimiento en el que no existen demandas liberadas para la comunidad de la ingeniería sísmica chilena, dificultando la obtención de resultados.

Dado que el tipo de suelo define la respuesta sísmica de un sitio, es primordial conocer demandas sísmicas en superficie para la elaboración de espectros de diseños. Esta tesis aborda la obtención de demandas sísmicas en profundidad para diferentes perfiles de suelos, para proyectos en los cuales la demanda sísmica en superficie sea desconocida, facilitando el desarrollo y obtención de resultados en el análisis de respuestas de sitio.

Para el desarrollo de esta labor investigativa, se utilizaron perfiles geotécnicos y registros sísmicos medidos en superficie durante el terremoto del 27 de febrero en el Maule el año 2010 por parte de las estaciones sismográficas de Angol, Constitución, Hualañé, Peñalolén y Maipú, para ser modeladas en un análisis unidimensional en DeepSoil, mediante enfoques de modelación lineal, lineal-equivalente y no lineal, mientras que para la obtención de registros demandas sísmicas sintéticas en profundidad, se aplicaron procesos de convolución y deconvolución mediante programación de rutinas en matlab.

### 1.1 Objetivo general:

“Obtener demandas sísmicas sintéticas en profundidad, para diferentes estaciones sismográficas, mediante métodos unidimensionales de deconvolución, con análisis lineal, lineal-equivalente y no lineal.”



## 1.2 Objetivos específicos:

- Definir fenómeno de respuesta sísmica local y su incorporación en códigos de diseño sísmico.
- Elaborar modelos estratigráficos con enfoques lineal, lineal-equivalente y no lineal para las estaciones sismográficas seleccionadas.
- Ejecutar procesos de deconvolución para cada uno de los enfoques y estaciones seleccionadas obteniéndose respuestas sísmicas en roca.
- Analizar y comprar demandas sísmicas generadas en profundidad para las estaciones seleccionadas.

## 1.3 Metodología

La metodología propuesta para cumplir con el objetivo general, se resume en el diagrama mostrado en la siguiente imagen:

### 3. METODOLOGÍA

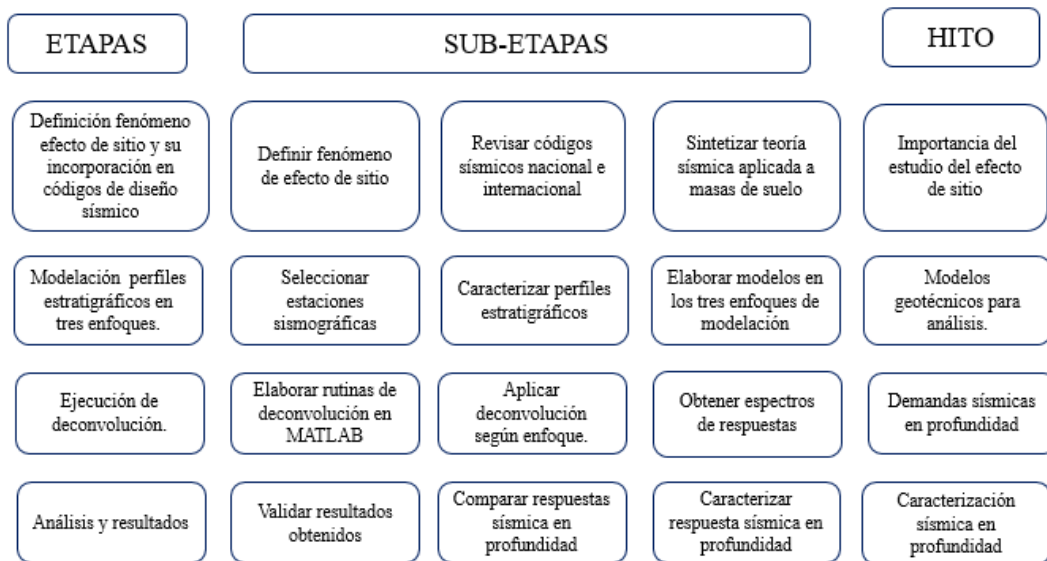


Figura 1: “Esquema metodología implementada, (Elaboración propia)”

## 1.4 Alcances:

- Se limita a resultados obtenidos para análisis unidimensionales de respuesta de sitio.
- Las propiedades mecánicas y dinámicas de los suelos se conservan en todas las direcciones de análisis.
- No se consideran efectos del nivel freático ni presiones de poro.
- Se estudia el comportamiento sísmico solo en sus componentes horizontales.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Efecto de sitio

La influencia de las condiciones locales del suelo en la naturaleza de los daños causados por los terremotos ha sido reconocida durante muchos años y por ello, los sismólogos y, más recientemente, los ingenieros geotécnicos han trabajado en el desarrollo de métodos cuantitativos para predecir la influencia de las condiciones locales sobre el movimiento del suelo y así disminuir el riesgo sísmico.

Efectos topográficos y/o geológicos inducen a que las ondas que se propagan desde el lecho rocoso sean amplificadas, variando el contenido de frecuencias y duración de la señal sísmica, generando un aumento considerable al daño sísmico a nivel de superficie, este fenómeno de amplificación es conocido como “efecto de sitio” (Pitilakis, 2004). La respuesta y la magnitud de esa amplificación de la señal sísmica, está controlado principalmente por las propiedades geotécnicas de los materiales geológicos, especialmente por las características dinámicas del sitio, también tiene influencia el espesor de las capas y la profundidad a la que se encuentra el sustrato rocoso, (Aki, 1988; Borchardt, 1994; Seed et al., 1997).

La presencia de terrenos, considerados geotécnicamente como blandos, son quienes poseen propiedades dinámicas desfavorables en la mitigación de efectos de amplificación de ondas y pudiendo incluso generar fenómenos de licuefacción. Un suelo blando, es considerado como un suelo no consolidado, generalmente depósitos recientes de suelo de origen fluvial o eólico como arenas, limos y arcillas sueltos.

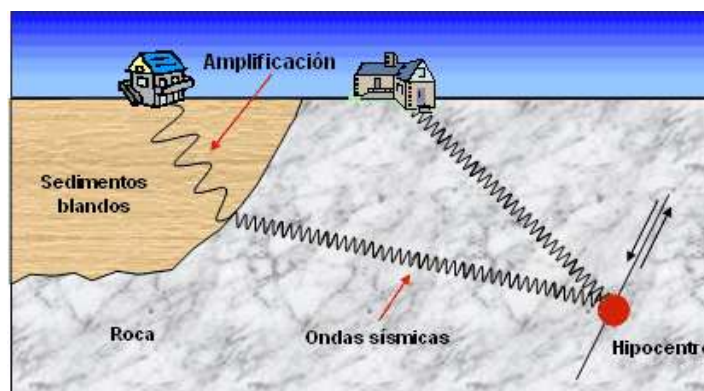


Figura 2 “Propagación de ondas dura efecto de sitio, <http://www.lis.ucr.ac.cr/239>”

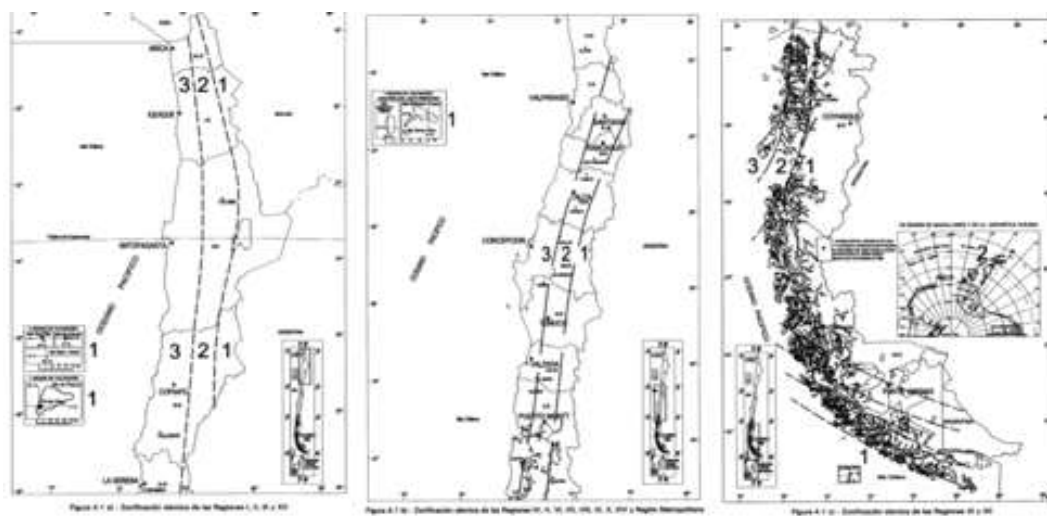
Por otro lado, los suelos rígidos tienden a tener un mejor comportamiento sísmico, ya que su acentuación de señales sísmicas tiende a ser más irrelevante respecto a suelos más blandos.

Dado la complejidad de este fenómeno, la ingeniería sísmica realiza análisis de respuesta de sitio con el fin para predecir de manera estimativa la respuesta sísmica del terreno, comúnmente estos estudios se ejecutan mediante de modelaciones numéricas y análisis unidimensionales, utilizando propiedades geofísicas del sitio y un señal sísmica de entrada.

## 2.2 Microzonificación sísmica Chile

Los mapas de zonificación sísmica, son una guía que indica qué zonas están más susceptibles a sufrir una mayor sollicitación sísmica y, dependiendo de la vulnerabilidad de las estructuras, una gran cantidad de daño puede estar asociada a este fenómeno. Se trata de una herramienta útil para los ingenieros civiles, quienes a través de ella pueden conocer de forma general las variaciones del peligro sísmico en nuestro país, esta información es de suma importancia al momento de proyectar y construir edificios e infraestructura.

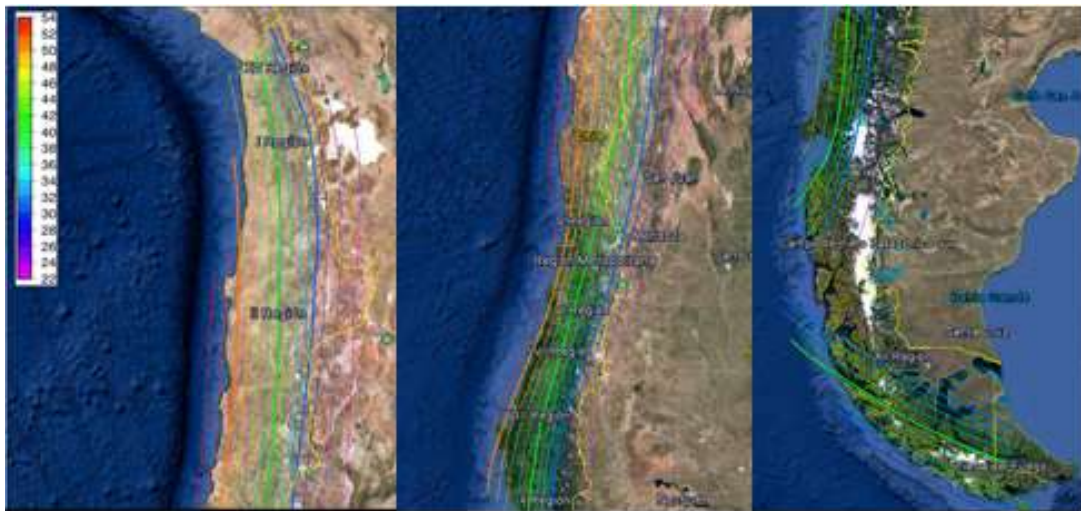
Actualmente, se establece zonificaciones sísmicas I, II y III a lo largo del país, en función a qué tan cercanos a la zona de subducción se encuentran los sitios a proyectar, estimándose los valores de aceleración efectiva  $A_0$  que se asumirían para el diseño de edificios Nch 433,2012.



**Figura 3 “Microzonificación sísmica, Nch. 433 (2012)”**

Felipe Leyton, Jefe de Innovación y Transferencia Tecnológica del Centro Sismológico Nacional, propuso un mapa de peligro sísmico en el año 2014, como parte de una propuesta a la modificación de la Norma Chilena de Espectros (actualmente contenida en la Norma de Diseño Sísmico Nch433), cuya actualización sigue pendiente. La zonificación propuesta, está orientada a

estructuras con una vida útil de alrededor de 50 años, proyectando la demanda sísmica a la que se verían expuestas con un 90% de probabilidad de no exceder un cierto nivel de aceleración, por lo que no debería sufrir fallas.



**Figura 4 “Propuesta de microzonificación sísmica chilena, F. Leyton (2014)”**

La interpretación del mapa, se define que en las áreas en que hay un mayor valor (color rojo o naranja) es esperable que las estructuras sean sometidas a mayores solicitaciones sísmicas en el rango de tiempo dado. Estudios afirman que es mucho más probable que las estructuras sufran el impacto de un terremoto costero, ya que en esas zonas es donde se encuentran la interacción entre las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, es por ello que se generan gran parte de los sismos más significativos.

La zonificación de peligro sísmico, se realizó considerando tres factores: en primer lugar la posición geográfica del sitio de interés, en segundo lugar que tan productiva es esta fuente en el sentido de generación de terremotos de importante consideración dentro de un rango de 50 años y en último lugar, el impacto que éste generaría en el sitio en cuestión. Sin embargo, para el diseño de una obra que requiere un periodo de vida mucho mayor a 50 años, aumenta la probabilidad de sufrir terremotos corticales, esto hace que el peligro aumente hacia la cordillera y/o valle central.

### **2.3 Revisión código sísmico chileno**

La normativa sísmica chilena de diseño de edificios, Nch 433. Of 1996 modificada en 2012, dispone que la clasificación sísmica de los suelos depende principalmente de la velocidad de las ondas de corte promedio de los 30 metros superiores del terreno,  $V_{s30}$ .

La clasificación sísmica del terreno de fundación establece tipos de Suelos A, B, C, D, E, F, definidas según las propiedades mecánicas ( $N_1, q_u, S_u$ ) de los perfiles de suelos siendo ordenadas de mejor a peor comportamiento sísmico.

Suelo Tipo		$V_{s30}$ (m/s)	RQD	$q_u$ (MPa)	$(N_1)$ (golpes/pie)	$S_u$ (MPa)
A	Roca, suelo cementado	$\geq 900$	$\geq 50\%$	$\geq 10$ ( $\varepsilon_{qu} \leq 2\%$ )		
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	$\geq 500$		$\geq 0,40$ ( $\varepsilon_{qu} \leq 2\%$ )	$\geq 50$	
C	Suelo denso o firme	$\geq 350$		$\geq 0,30$ ( $\varepsilon_{qu} \leq 2\%$ )	$\geq 40$	
D	Suelo medianamente denso, o firme	$\geq 180$			$\geq 30$	$\geq 0,05$
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	$< 180$			$\geq 20$	$< 0,05$
F	Suelos Especiales	*	*	*	*	*

Figura 5 “Tabla clasificación sísmica terreno de fundación, Nch433, (2012)”

Se visualiza para suelos que clasifiquen sísmicamente como “F” dado las singularidades en su comportamiento mecánico requirieren estudios especiales de amplificación. Producto que se requieren estudios de análisis de respuesta de sitio para estos tipos de suelo, la normativa no entrega parámetros de diseño sísmico en esta categoría.

Tipo de Suelo	$S$	$T_0$ (s)	$T^*$ (s)	$\alpha$	$P$
A	0.90	0.15	0.20	1.00	2.0
B	1.00	0.30	0.35	1.33	1.5
C	1.05	0.40	0.45	1.40	1.6
D	1.20	0.75	0.85	1.80	1.0
E	1.30	1.20	1.35	1.80	1.0
F	*	*	*	*	*

Figura 6 “Parámetros sísmicos, tabla 6.3 Nch 433, (2012)”

## 2.4 Revisión códigos sísmicos internacionales

Dentro de los principales exponentes internacionales en el desarrollo de normativas de diseño sismorresistente de edificios, se encuentra el International Building Code que rige en conformidad con lo establecido por el ASCE-7-16 en Estados Unidos y el Euro-Código el cual está vigente para los países que integren la Unión Europea. Se realiza una comparación en la clasificación sísmica de suelo para ambas normativas:

Clasificación del sitio	IBC-2013 (E.E.U.U)			Euro-código 8-2011		
	$V_{S30}$ [m/s]	$N_{SPT}$ [golpes/pie]	Su [kPa]	$V_{S30}$ [m/s]	$N_{SPT}$ [golpes/pie]	Su [kPa]
A	>1500	-	-	>800	-	-
B	760-1500	-	-	360-800	>50	>250
C	360-760	>50	>95.8	180-360	15-50	70-250
D	180-360	15-50	47.9-95.8	<180	<15	<70
E	<180	<15	<47.9			
F	Suelo Especial	Requieren análisis de respuesta de sitio.	$S_1$	<100		10-20
			$S_2$			

**Tabla 1 “Clasificación sísmica de suelo códigos sísmicos internacionales, (Elaboración propia)”**

El Euro-código, ante suelos tipo F los sub-clasifica como S1 y S2, suelos para los cuales se señala dentro del mismo código (fuera de la tabla mostrada) que para estos tipos de suelo se requieren estudios especiales de amplificación sísmica, de igual manera como lo establece el IBC.

Para clasificación sísmica de un suelo mediante Vs30, ambas normativas difieren en los valores límites de aceptación, siendo más rigurosa la clasificación propuesta por el IBC, quien tiene límites superiores de clasificación respecto al Euro-código.

Otro gran exponente de diseño sismorresistente lo es código sísmico de Japón, país altamente sísmico, el “Seismic Code for Building in Japan”, ha desarrollado un particular procedimiento para el diseño sísmico de estructuras, en donde la clasificación sísmica de los suelos se establece de la siguiente manera:

Table 2.8: Classification of soil

Soil Profile	Ground Characteristics	$T_c$ (s)
Type 1 (Hard soil)	Ground consisting of rock, hard sandy gravel, etc., classified as tertiary or older, or Ground whose period, estimated by calculation or by other investigation, is equivalent to that of the above.	0.4
Type 2 (Medium soil)	Other than Type 1 or 2.	0.6
Type 3 (Soft soil)	Alluvium consisting of soft delta deposits, topsoil, mud, or the like (including fills, if any), whose depth is 30 m or more, land obtained by reclamation of marsh, muddy sea bottom, etc., where the depth of the reclaimed ground is 3 m or more and where 30 years have not yet elapsed since the time of reclamation, or Ground whose period, estimated by calculation or by other investigation, is equivalent to that of the above.	0.8

**Figura 7 “Clasificación sísmica de suelo Japón, S.C.B.J, (2010)”**

La clasificación sísmica de suelo japonesa, se basa en el periodo fundamental de vibración del depósito, observándose que para suelos blandos Tipo 3, suelo con peor comportamiento sísmico,



no queda implícito la solicitud de estudios especiales de sitio, en donde un análisis comparativo respecto a otros códigos mundiales se realiza en un estudio elaborado por Yuji Ishiyama, 2011.

## 2.5 Propiedades dinámicas de los suelos

La ingeniería sísmica geotécnica, estudia el comportamiento e influencia de una masa de suelo en sus mecanismos de falla ante diferentes problemas que involucraran cargas sobre masas de suelo. Esta investigación se enfoca en cargas dinámicas cíclicas que inducen bajos niveles de deformación generado por la propagación de ondas sísmicas y sus efectos en una columna de suelo.

Las propiedades del suelo que influyen en los efectos de propagación de ondas, corresponden a la rigidez, amortiguación, relación de Poisson y densidad que posee cada uno de los estratos que componen el sitio en cuestión, siendo las primeras dos propiedades las más importantes. Es necesario, enfatizar en que los daños generados por los terremotos están directamente relacionados e influenciados por la respuesta de los suelos ante cargas cíclicas, por ello el análisis sísmico de una masa de suelo, se enfoca en el estudio del comportamiento esfuerzo-deformación que éste presenta ante una señal sísmica de entrada.

Para una carga cíclica, que puede ser perfectamente un registro sísmico, se produce un proceso de histéresis, es decir, un proceso de carga y descarga del suelo.

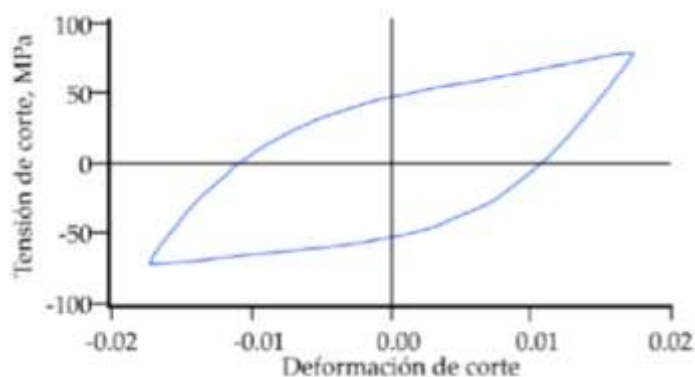


Figura 8 “Comportamiento histerético del suelo, Godoy. C.A, (2013)”

El área formada por la curva en el proceso de carga-descarga, describirá el comportamiento que el tendrá el suelo ante la carga cíclica, en términos de capacidad de disipación de energía y rigidez. La razón de amortiguamiento expresa la capacidad del material para la disipación de energía y gráficamente corresponde al área del bucle de histéresis. El módulo de corte ( $G$ ) está relacionado con la inclinación del lazo de histéresis (Figura 8) y es una medida de la dureza del material.

Esta investigación aborda el análisis de respuesta de sitio en diferentes enfoques unidimensionales, en donde cada enfoque de análisis se denomina, según la forma en cómo se establecen ante cargas cíclicas las propiedades dinámicas del suelo, por lo tanto, tanto la rigidez como el amortiguamiento de un suelo variarán según modelo idealizado.

## 2.6 Enfoques de Modelación.

### 2.6.1 Modelo Lineal

Los modelos lineales utilizan una metodología más simplificada en la definición de las propiedades dinámicas del sitio. Analizando la curva vertebral de tensión-deformación ante cargas cíclicas, se observa que para deformaciones unitarias de corte muy pequeñas, la curva de histéresis presenta un comportamiento lineal, caracterizándose las propiedades dinámicas de un suelo en este tramo:

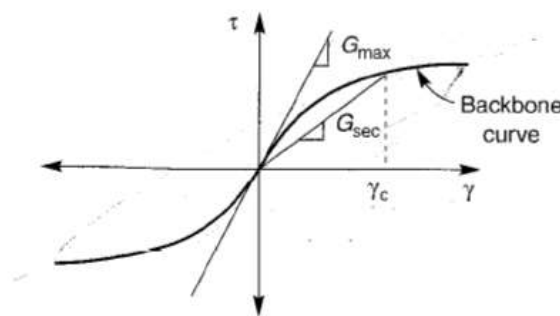


Figura 9 “Curva de histéresis, Steven. L. Kramer, (1996)”

Dado este comportamiento lineal, la rigidez del suelo quedará determinada por el módulo de corte tangente  $G_{max}$  (Steven L. Kramer, 1996) y producto de que los ensayos de medición de velocidad de ondas de cortes generan deformaciones de corte inferiores al 0,0003%, lo que corresponden igualmente a deformaciones muy bajas,  $G_{max}$  puede estimarse mediante la siguiente expresión (Roesler, 1979; Stokoe et al., 1985; Yan and Byrne, 1991)

$$G_{max} = \rho * v_s^2$$

“Ecuación N°1”

Existen correlaciones entre  $G_{max}$  y propiedades mecánicas del suelo, como también correlaciones con valores obtenidos ensayos en terreno como en el SPT, CPT, DMT y PMT.

Para el amortiguamiento, teóricamente no se produce ninguna disipación histórica de energía en las deformaciones por debajo de los umbrales cíclicos lineales de la deformación por corte. La evidencia experimental sin embargo, muestra que cierta energía se disipa incluso a niveles de



deformación muy bajos, por lo que la relación de amortiguación nunca es cero (Steven L. Kramer, 1996). Para una modelación lineal, la razón de amortiguamiento en algún estrato debe asumirse un valor inicial, asumiéndose si el suelo se fijará o no con capacidad de disipación de energía.

### 2.6.2 Modelo Lineal-Equivalente

Este enfoque intenta replicar la respuesta no lineal del suelo mediante la definición de propiedades lineales-equivalentes para la capacidad disipación de energía y rigidez del suelo.

Para la estimación de la rigidez del suelo, el módulo de corte pasa a ser denominado como  $G_{sec}$ , en donde este parámetro corresponderá al valor medio de rigidez para cada punto del lazo de histéresis.

Para la figura 9, puede visualizarse gráficamente la definición de  $G_{sec}$ , el cual puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c}$$

“Ecuación N°2”

En donde  $\tau_c$  y  $\gamma_c$  corresponden a la tensión y deformación de corte respectivamente

El módulo de corte secante de un elemento del suelo varía con la amplitud de la tensión de corte, en donde a bajas amplitudes de deformación, el módulo de corte secante es alto, pero disminuye a medida que aumenta la amplitud de deformación, por ello, dado que para la modelación lineal, se define para bajas deformaciones la rigidez ésta dada por  $G_{max}$ , debemos pasar a una condición de  $G_{max}$  a  $G_{sec}$  o  $G$  mediante factores de reducción.

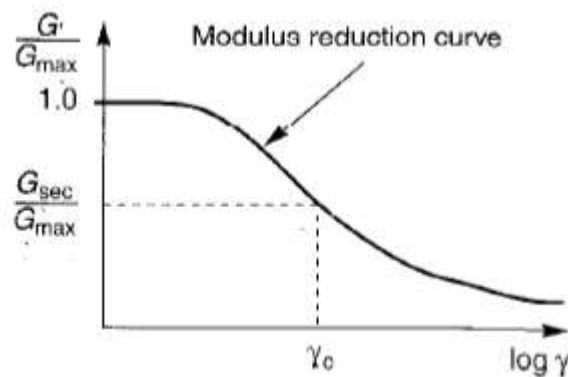


Figura 10 “Factor de reducción módulo de corte, Steven L. Kramer, (1996)”

La rigidez del suelo está influenciada no solo por la amplitud de la deformación cíclica, sino que también por la relación de vacío, tensión efectiva, índice de plasticidad, grado de sobre-consolidación y el número de ciclos de carga (Seed and Idriss, 1970; Vucetic and Dobry 1991, Anderson and Stokoe, 1978; Isenhowe Stokoe, 1981).

Respecto a la relación de amortiguamiento, se ha mencionado en la modelación lineal que para bajos niveles de deformación existe una pequeña relación de amortiguamiento, mientras que para deformaciones más altas, la anchura del lazo de histéresis aumenta, provocando consecuentemente que se acrecientan los niveles de capacidad de disipación de energía del suelo.

La razón de amortiguamiento lineal equivalente puede estimarse de la siguiente manera

$$\xi = \frac{W_D}{4 * \pi * W_s} = \frac{1}{2 * \pi} * \frac{A_{loop}}{G_{sec} * \gamma_c^2}$$

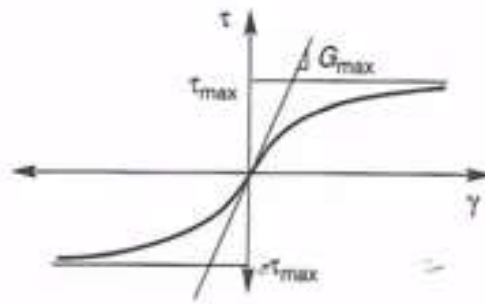
“Ecuación N°3”

En donde  $W_D$  corresponde a la energía disipada,  $W_s$  la máxima energía de disipación,  $A_{loop}$  corresponde al área del loop de histéresis,  $G_{sec}$  al módulo de corte secante y  $\gamma_c$  deformación por corte.

La capacidad de amortiguamiento, al igual que el módulo de corte, está influenciado por otras propiedades mecánicas del suelo, entre ellas el índice de plasticidad, tensiones de confinamiento y grado de sobre-consolidación principalmente (Kokushu et al, 1982; Dobry y Vucetic, 1987; Sun et al., 1988). Por ello se proponen curvas empíricas que definen las propiedades dinámicas de los suelos que se muestran en 3.3.

### 2.6.3 *Modelo No Lineal*

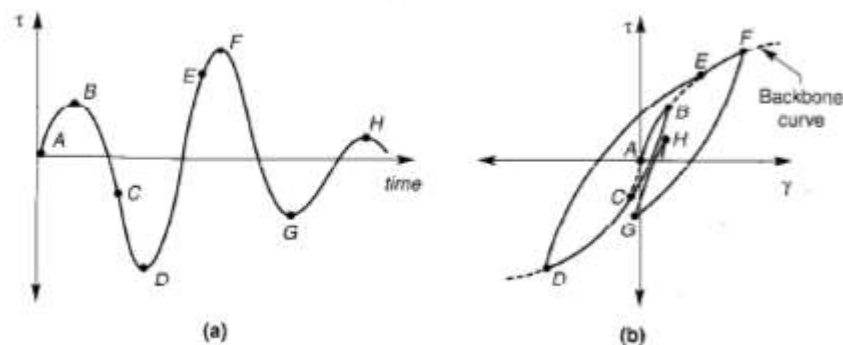
El comportamiento no lineal en la curva tensión-deformación de los suelos, es más representativo en modelos cíclicos no lineales, los cual siguen la trayectoria real del proceso de histéresis. Un modelo no lineal, analiza para varios niveles de deformación los valores que toma el módulo de corte, siendo la suma de todas las variaciones de módulos de rigidez el indicador del comportamiento no lineal del suelo (Steven L. Kramer, 1996).



**Figura 11 Curva de histéresis, comportamiento No Lineal, Steven L. Kramer, (1996)”**

La modelación no lineal muestra la dependencia en el módulo de corte máximo  $G_{max}$  y el esfuerzo de corte máximo  $\tau_{max}$  debido a los cambios en los esfuerzos efectivos, que a su vez son consecuencias de la variación en la presión de poros en el suelo ante el actuar de una carga cíclica. Si la presión de poros aumenta, los esfuerzos efectivos disminuyen, consecuentemente también lo harán la rigidez y el esfuerzo de corte, por lo que se concluye que la “columna vertebral” se degrada por el aumento de la presión de poros (Steven L. Kramer, 1996).

Para modelar no linealmente las propiedades dinámicas de una columna de suelo, existen varios modelos cíclicos no lineales que incorporan una serie de reglas en la estimación de curvas de histéresis, en procesos de carga-descarga del suelo. Existen modelos básicos que tienen curvas de “columna vertebral” relativamente simples y otras pocas reglas básicas, mientras que, otros modelos más complejos integran efectos de densificaciones y generación de presiones de poros. Uno de los modelos propuestos más conocidos, es del Modelo de Masing (1926) y Masing extendido, que tienen reglas bastante básicas para la formulación de curvas de histéresis.



**Figura 12 “Ciclos de carga-descarga suelo, Steven L. Kramer, (1996)”**

Los modelos propuestos por Masing, son bastante simples de emplear, pero no tienen la capacidad de calcular los cambios en la presión de poros, por lo tanto tampoco los cambios en la tensión efectiva en el suelo durante carga cíclica, lo que es una ventaja bastante significativa que tienen los modelos cíclicos no lineales sobre los modelos lineales-equivalentes (Steven L. Kramer, 1996). A menudo se idealiza que los modelos Masing, sobreestiman la amortiguación histerética de los suelos, por lo que algunos softwares proponen modelos “Non Masing”, que tienden a disminuir el tamaño de los bucles de histéresis y así capturar mejor el comportamiento de disipación de energía.

La rigidez en un modelo tensión-deformación no dependerá solo de la amplitud de la deformación cíclica, como se establece en el modelo lineal-equivalente, sino que también de la historia de esfuerzos a la que ha estado sometido el suelo (Steven L. Kramer, 1996).

## **2.7 Análisis unidimensional de respuesta de sitio**

El análisis de respuesta de sitio estudia la propagación de ondas sísmicas y sus efectos en superficie, teniendo como propósito encontrar la respuesta superficial de un terreno ante un movimiento telúrico y con ello establecer parámetros sísmicos para un diseño sismorresistente de algún proyecto de ingeniería. Estos análisis pueden realizarse tanto de manera probabilística como determinística, en donde éste último requiere una caracterización geofísica del sitio en cuestión, además de demandas sísmicas en profundidad.

El análisis unidimensional define la propagación ondas horizontales exclusivamente de forma vertical, las cuales viajan desde manto rocoso hasta la superficie a través de una columna estratificada de suelo. Este análisis, considera a los estratos que componen un depósito perfectamente horizontales y de extensión infinita, analizándose en el dominio del tiempo o de la frecuencia, según sea el enfoque de modelación utilizado, la respuesta del suelo ante una señal sísmica, siendo un análisis limitado pero ampliamente utilizado en la ingeniería.

### *2.7.1 Deconvolución*

Ante la ausencia de registros sísmicos en profundidad, el análisis de respuesta de sitio utiliza caracterización de perfiles geotécnicos y registros sísmicos medidos en superficie para la estimación de la respuesta a niveles tan profundos como se encuentre el basamento rocoso, este proceso de obtención de respuestas sísmica en profundidad a partir de un movimiento en superficie es conocido como “deconvolución” (Steven L. Kramer, 1996).

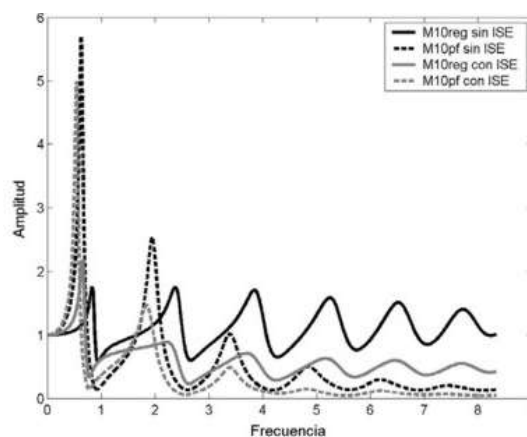
### 2.7.2 Análisis en enfoque Lineal

Este enfoque a través de métodos numéricos estima la respuesta de una masa de suelo ante un evento sísmico, ejecutándose en el dominio de la frecuencia. Para estimar la respuesta sísmica de un sitio basta con conocer la función de transferencia que caracteriza al depósito, ya que éste parámetro es quien relaciona una respuesta sísmica a nivel de superficie con una a cierto nivel de profundidad, para estimar alguna de ellas.

$$(H)_f = \frac{|Input|}{|Output|}$$

“Ecuación N°4”

La función de transferencia está determinada por las propiedades físicas del depósito, espesor de los estratos, como también por propiedades mecánicas del sitio, como lo es el amortiguamiento, perfil de velocidad de ondas de corte y/o rigidez (Steven L. Kramer, 1996).



**Figura 13 “Función de transferencia, Steven L. Kramer, (1996)”**

En enfoque lineal, es importante tener en consideración que la función de transferencia es independiente de la excitación sísmica, por lo tanto, ante cualquier input sísmico la masa de suelo presentará los mismos parámetros de respuesta en desplazamiento, velocidad y aceleración en superficie que están controlados por las propiedades mecánicas anteriormente mencionadas.

### 2.7.3 Análisis en enfoque Lineal-Equivalente

El enfoque lineal-equivalente en el dominio de la frecuencia, intenta replicar la respuesta histerética no lineal del suelo y consecuentemente con ello la función de transferencia deja de ser constante ante cualquier señal de entrada, si no que ahora ésta variará según la amplitud del contenido de frecuencias del input en conjunto con las propiedades dinámicas del depósito.

En un análisis de respuesta de sitio, es común que la señal sísmica de entrada sea desconocida, por lo que se requieren procesos iterativos sobre la función de transferencia para estimar la respuesta sísmica del suelo a niveles profundos, esto se logra utilizando algún espectro en superficie objetivo para validar la convergencia.

Dado que una modelación con enfoque lineal-equivalente utiliza curvas empíricas de degradación de módulo de corte y aumento de amortiguamiento, es necesario recurrir a iteraciones para que ambos valores optados de las propiedades dinámicas, estén asociados a un mismo nivel de deformación.

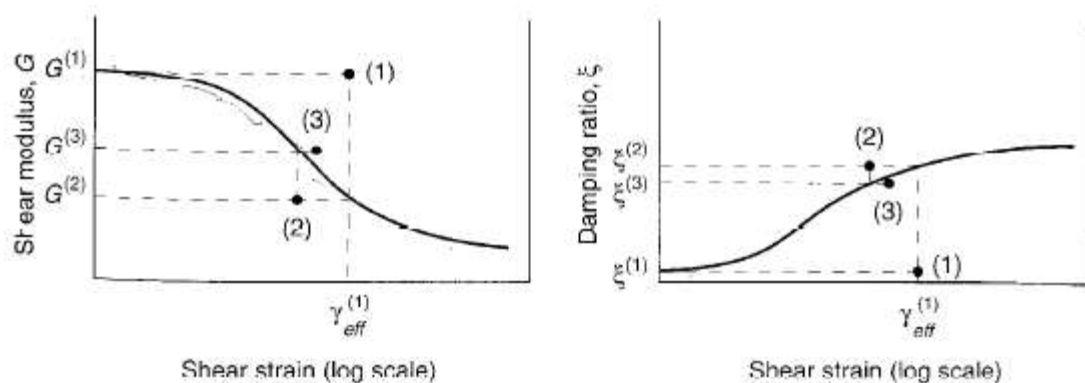


Figura 14 “Convergencia deformación de corte, Steven L. Kramer, (1996)”

Aunque el proceso de iteración permite aproximar el comportamiento no lineal del suelo, es importante recordar que el método de respuesta sigue siendo un método lineal de análisis.

#### 2.7.4 Análisis en enfoque No Lineal

La estimación de demandas sísmicas en profundidad requiere de procesos iterativos sobre la función de transferencia, esto se logra utilizando algún espectro objetivo para validar convergencia. Este tipo de análisis a diferencia de los dos mencionados anteriormente se realiza en el dominio del tiempo.

Producto que una modelación no lineal de las propiedades dinámicas del suelo utiliza la curva de real de histéresis, no se requieren adicionalmente iteraciones para que tanto el módulo de corte como la rigidez del suelo estén asociados a un mismo nivel de deformación de corte.

### 3 CONSTRUCCIÓN DE MODELOS

Actualmente a lo largo de todo Chile, existen más de 150 estaciones sismográficas registrando actividad sísmica a nivel superficial, estas estaciones de medición han sido caracterizadas geofísicamente desde el año 2017 financiado por la Universidad de Chile, (CSN UDECHILE), entregando un gran aporte para el desarrollo de estudios de efectos de sitio en el país.

El informe geotécnico “Caracterización Geotécnica Estaciones de Acelerógrafos de la Universidad de Chile” tiene la información geofísica necesaria para modelación de los perfiles estratigráficos y al igual que los registros sísmicos medidos por las estaciones tras el terremoto Mw=8.8 del 27 de febrero del año 2010, estos se encuentran publicados y ofrecidos libremente para la comunidad de la ingeniería sísmica geotécnica de parte de la Universidad de Chile en la página web <http://terremotos.ing.uchile.cl>.



Figura 15 “Bases de información para análisis, (Elaboración Propia)”

Para la elaboración de modelos en esta investigación, se utilizaron registros sísmicos del “27F” y las caracterizaciones geotécnicas pertenecientes a 5 estaciones sismográficas chilenas. En la modelación de los perfiles, se implementó el uso de DeepSoil con enfoques de modelación lineal, lineal-equivalente y no lineal de las propiedades dinámicas de los sitios seleccionados.

#### 3.1 Estaciones sismográficas seleccionadas.

Para la elección de las estaciones sismográficas se filtra la selección sujeto a la disponibilidad de registros sísmicos superficiales medidos, la calidad de la información del estudio geofísico de las estaciones liberado por la UCh., y que entre algunas de ellas tengan características en común, en

términos de ubicación o tipo de suelo para visualizar existencia de tendencias en los resultados obtenidos. Las estaciones sismográficas seleccionadas para esta investigación son:

- Estación sismológica de Angol, región de la Araucanía
- Estación sismológica de Constitución, región del Maule.
- Estación sismológica de Hualañé, región del Maule.
- Estación sismológica de Maipú, región Metropolitana.
- Estación sismológica de Peñalolén, región Metropolitana.

### 3.2 Caracterización de las sismográficas seleccionadas.

De las estaciones sismográficas chilenas seleccionadas, se extrae el registro en el tiempo de aceleraciones para ambos sentidos horizontales de medición N-S (Longitudinal) y E-W (Transversal) y características geofísicas relevantes para la modelación de las estaciones.

#### 3.2.1 Estación Constitución

Estación sismográfica está ubicada en la comuna de Constitución, Región del Maule en donde sus principales resultados de medición son los siguientes

Dirección	Aceleración Máxima [g]
Longitudinal	0,552
Vertical	0,352
Transversal	0,640

**Tabla 2 “Resultados obtenidos, medición estación Constitución, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.”**

Para el análisis de efecto de sitio se consideran los siguientes historiales de mediciones horizontales en superficie realizadas por la estación sismográfica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. (2012).



### 3.2.1.1 Dirección Transversal

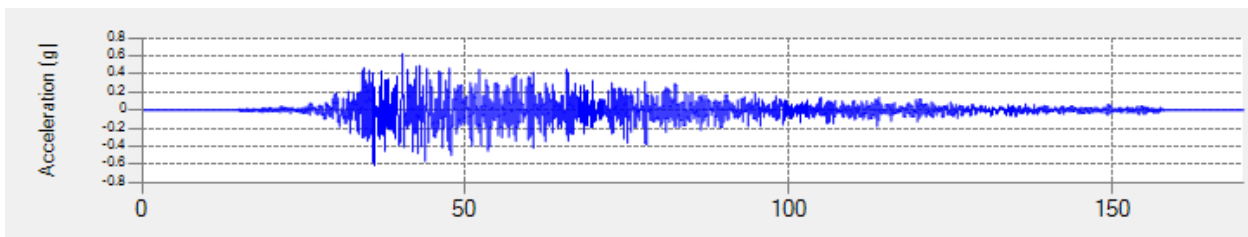


Figura 16 “Registro de aceleraciones, Estación Constitución-Transv. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.”

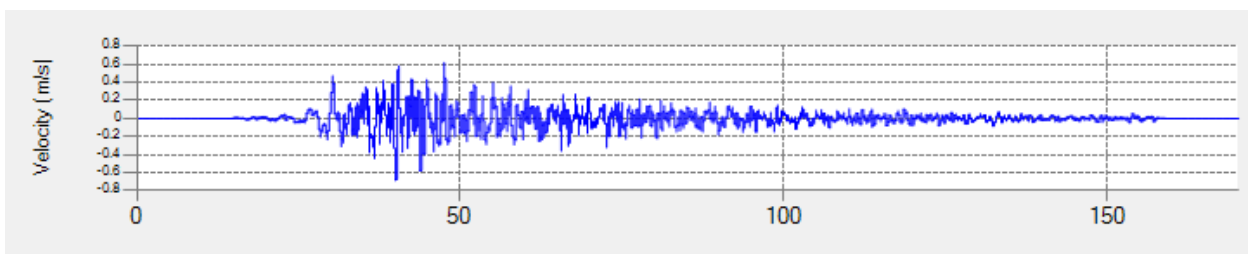


Figura 17 “Registro de velocidades, Estación Constitución-Transv. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.”

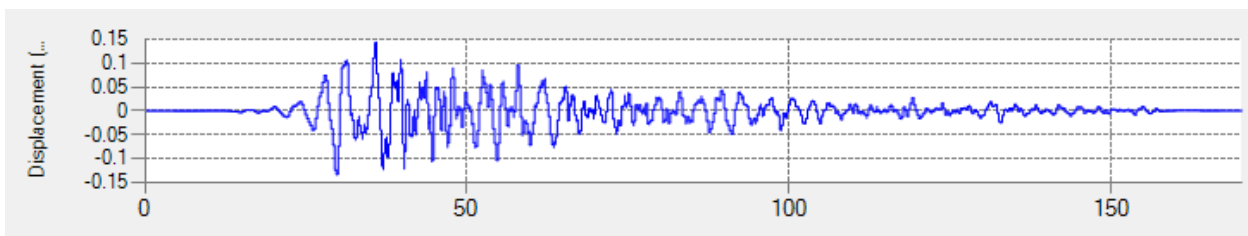


Figura 18 “Registro de desplazamientos, dirección transv., Estación Constitución. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.”

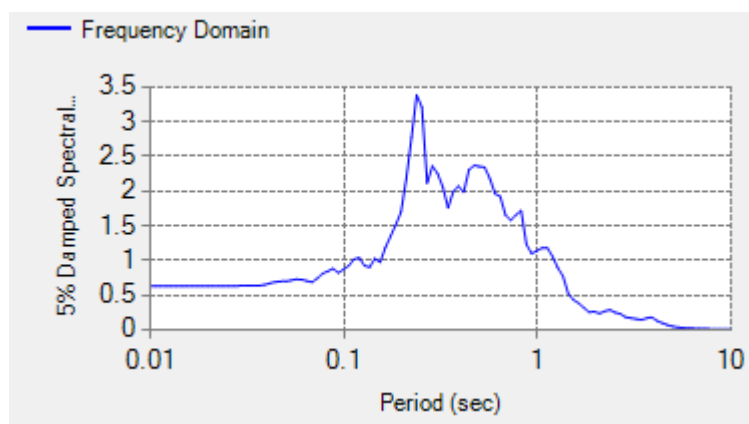
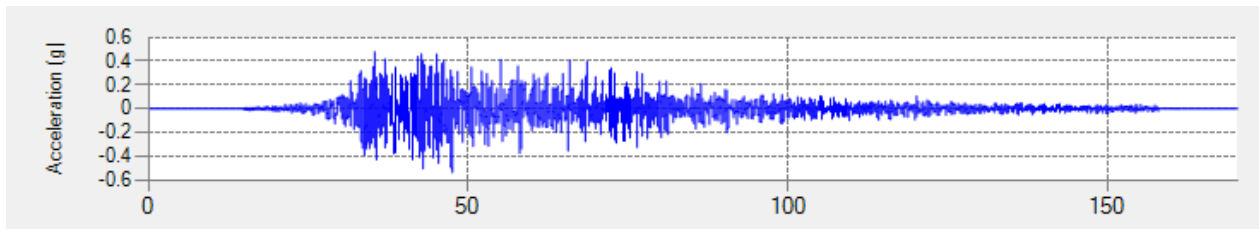
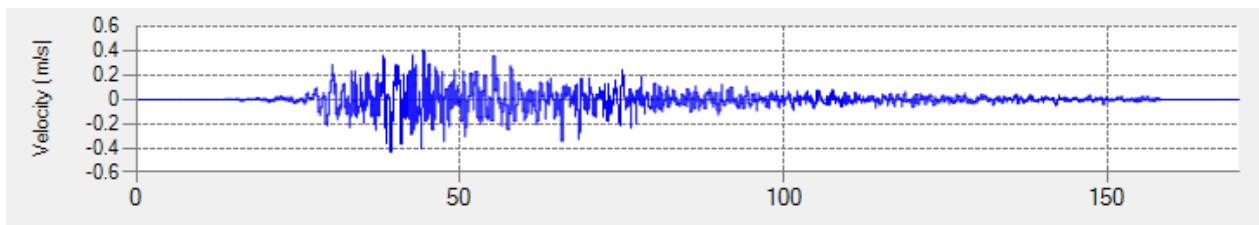


Figura 19 “Espectro de pseudo-aceleraciones, Estación Constitución-Transv. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.”

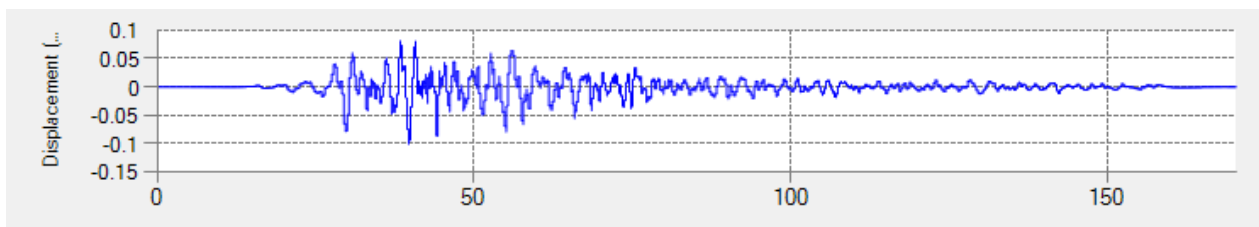
### 3.2.1.2 Dirección Longitudinal



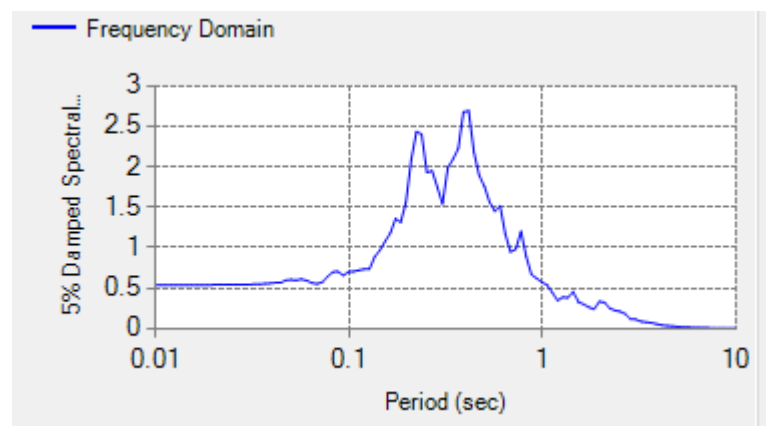
**Figura 20** “Registro de aceleraciones, Estación Constitución-Long. Informe geotécnico, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.”



**Figura 21** “Registro de velocidades, Estación Constitución-Long. Informe geotécnico, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.”



**Figura 22** “Registro de desplazamientos, Estación Constitución-Long. Informe geotécnico, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.”



**Figura 23** “Espectro de pseudo-aceleraciones, Estación Constitución-Long. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.”

Las principales propiedades geofísicas medidas en terreno y laboratorio que permitieron caracterizar a los perfiles estratigráficos de las estaciones y realizar la modelación en DeepSoil, son las figuradas en el siguiente log resumen:

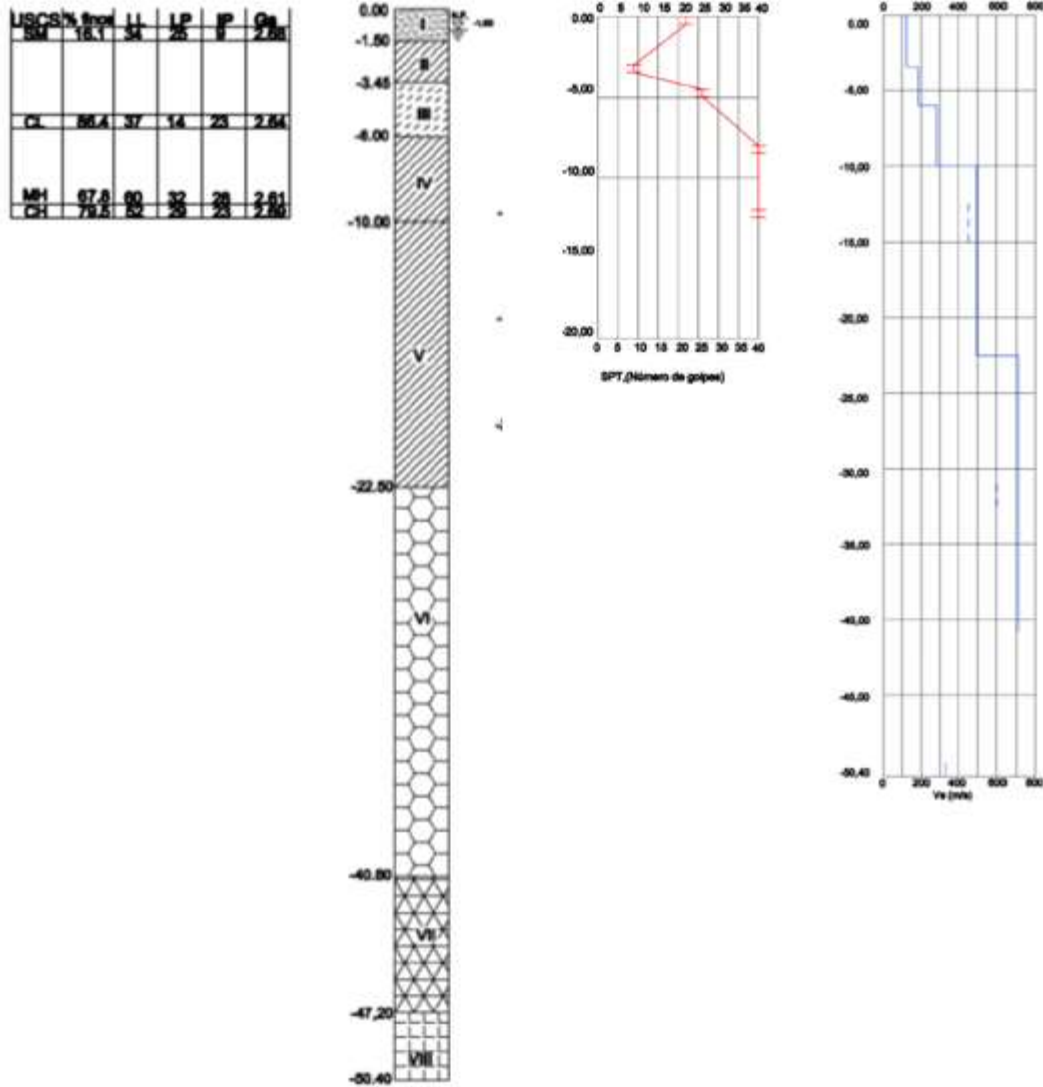


Figura 24 “Set de propiedades geotécnicas, estación Constitución, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2012.”

Para el resto de las estaciones sismográficas, se extrae el mismo tipo de información del informe geotécnico y se procede a caracterizar cada estación de medición, obteniéndose los siguientes resultados:

Estación	Región	$V_{s30}$ [m/s]	Clasificación sísmica de suelo	$T_n$ [s]	$T_n'$ [s]
Angol	Araucanía	354	C	0.2	0.19
Constitución	Maule	347	C	0.24	0.42
Hualañé	Maule	560	B	0.18	0.4
Maipú	Metropolitana	450	C	0.26	0.5
Peñalolén	Metropolitana	281	D	0.41	0.45

**Tabla 3 “Caracterización geofísica estaciones sismográficas, (Elaboración Propia)”**

De las estaciones seleccionadas, se tiene dos relativamente cercanas en la región metropolitana y otras dos en la región del Maule y tres estaciones sismográficas con suelos cuya clasificación sísmica es tipo B.

### 3.3 Curvas empíricas de degradación de rigidez y aumento de amortiguamiento

Se ha realizado gran variedad de estudios para determinar las propiedades dinámicas del suelo y los factores que en ellas influyen. Varios investigadores han desarrollado estos trabajos en suelos cohesivos y no cohesivos, proponiendo curvas genéricas de aumento de amortiguamiento y degradación de módulo de corte para la modelación de respuestas sísmica lineales-equivalentes.

Se presenta a continuación, los resultados de investigación de dos autores de gran prestigio y amplia utilización, las cuales fueron acogidas para definir las curvas empíricas necesarias en la modelación lineal-equivalente de los perfiles estratigráficos en análisis.

#### 3.3.1 *Vucetic & Dobry, 1991. (Suelos Cohesivos)*

Las curvas de degradación de rigidez y aumento de amortiguamiento propuesto por Vucetic & Dobry (1991), definen la influencia de la plasticidad de los suelos en ensayos cíclicos.

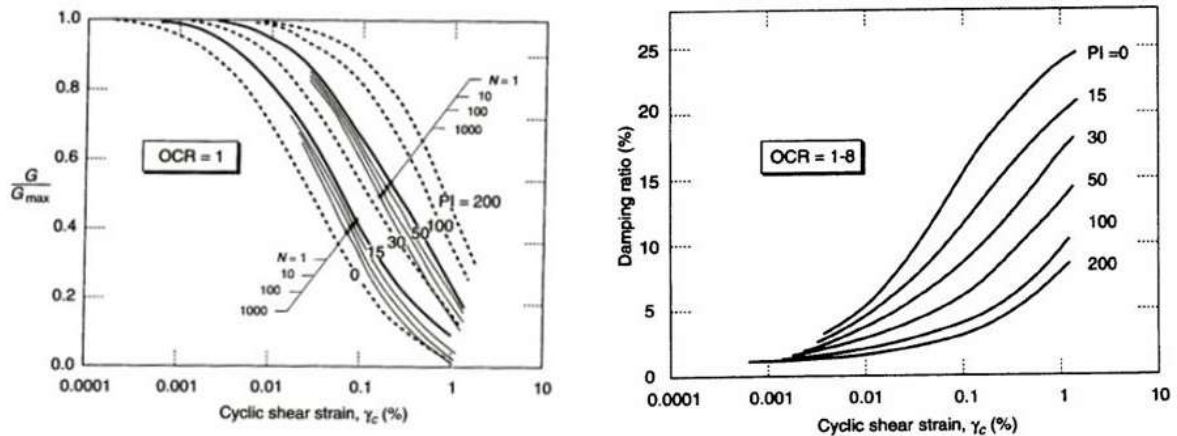


Figura 25 “Curvas empíricas de amortiguamiento y módulo de corte, Vucetic & Dobry 1991”

A mayores niveles de plasticidad, para un mismo nivel de deformación de corte, los suelos granulares poseen una mayor capacidad de disipación de energía, pero un menor factor de reducción de módulo de corte.

### 3.3.2 Seed & Idriss, 1970 (Suelos granulares)

La investigación desarrollada por estos autores es quizás la de mayor difusión en la ingeniería geotécnica. Las curvas desarrolladas indican la influencia de la presión de confinamiento dado el comportamiento cíclico de gravas y arenas, para presiones de confinamiento inferiores a 400 kPa.

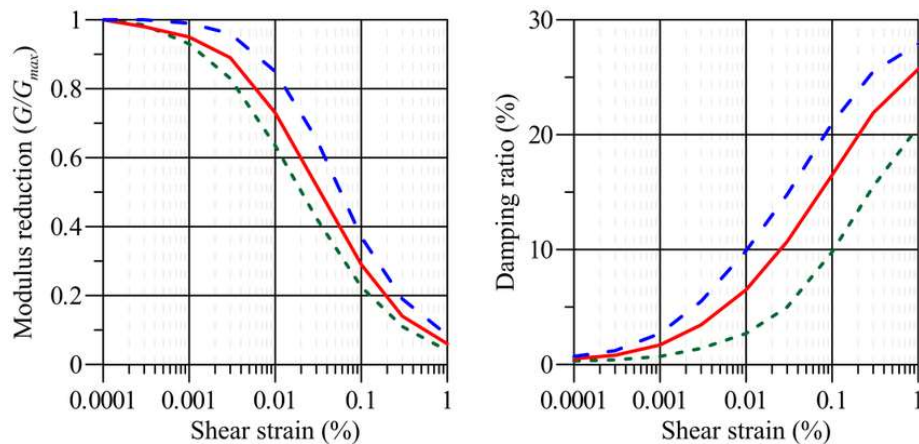


Figura 26 “Curvas empíricas de módulo de corte y amortiguamiento, Seed & Idriss, (1970)”

### 3.4 Correlaciones geotécnicas

Producto del alto grado de dificultad, tanto en terreno como en laboratorio, de obtener mediciones representativas en profundidad que describan las propiedades geotécnicas de un sitio, se desarrollaron diversos estudios que permitieron definir correlaciones empíricas entre propiedades

de un suelo, de tal manera que sus resultados permiten suplir aquella falta fidedigna de obtención de datos.

Entre las correlaciones geotécnicas utilizadas en esta investigación destacan las siguientes:

- Corrección  $N_{SPT}$ , Skempton, 1986.

$$N_{70} = C_b * C_r * N * \left(\frac{E_m}{70}\right)$$

“Ecuación N°5”

En donde  $N_{70}$  corresponde al valor estándar de penetración estándar N corregido por procedimiento del ensayo en terreno;  $C_b$ , es un factor de corrección según el diámetro de la perforación;  $C_r$ , corresponde a un factor de corrección asociado al largo de la varilla del sondaje; N, es el valor medido del número de penetración estándar del ensayo;  $E_m$ , corresponde a la eficiencia del martillo en términos de porcentaje.

$$(N_1)_{60} = C_n * N_{70} * \left(\frac{100}{\sigma'_{vo}}\right)^{0.5} * N_{70}$$

“Ecuación N°6”

En donde  $(N_1)_{60}$ , corresponde al valor del ensayo de penetración estándar N corregido tanto para los procedimientos del ensayo en terreno como para la presión de sobrecarga;  $C_n$ , está asociado a un factor de corrección para tener en cuenta la presión de la sobrecarga;  $\sigma'_{vo}$ , corresponde al esfuerzo vertical efectivo.

- $N_{SPT}$ , Bowles, 1996:

Descripción		Muy blanda	Blanda	Media	Densa	Muy Densa
Densidad relativa, Dr.		0	0,15	0,35	0,65	0,85
$N'_{70}$	Fina	1-2	3-6	7-15	16-30	¿?
	Media	2-3	4-7	8-20	21-40	>40
	Gruesa	3-6	5-9	10-25	26-45	>45

**Tabla 4 “Correlaciones NSPT- Suelos Granulares, (Elaboración Propia)”**

Se correlaciona el índice de SPT  $N'_{70}$  con la densidad relativa del suelo granular. La información acerca de la clasificación de suelo granular como fino, medio o grueso, es extraído del informe geotécnico de las estaciones sismográficas.

Consistencia	$N'_{70}$
Muy Blanda	0-2
Blanda	3-5
Media	6-9
Dura	10-16
Muy Dura	17-30
Rígida	>30

**Tabla 5 “Correlación NSPT-Consistencia, (Elaboración Propia)”**

Se correlaciona el índice de SPT  $N'_{70}$  con el grado de consistencia del suelo plástico.

- Pesos específicos de suelos, website de OpenSees, ND COMAND:

<b>SUELO PLÁSTICO</b>			
Consistencia	Blanda	Media	Dura
Peso específico [Ton/m <sup>3</sup> ]	1.30	1.50	1.80

**Tabla 6 “Correlación Consistencia-Peso específico, (Elaboración Propia)”**

<b>SUELO NO PLÁSTICO</b>				
Compacidad [%]	15-35	35-65	65-85	85-100
Peso específico [Ton/m <sup>3</sup> ]	1.70	1.90	2.00	2.10

**Tabla 7 “Correlación Compacidad-Peso específico, (Elaboración Propia)”**

Establecida la consistencia o compacidad según sea el tipo de suelo, ésta se correlaciona con el posible valor de peso específico que presentaría el estrato.

- Periodo fundamental de vibración de un depósito, Steven L. Kramer:

$$T_S = \frac{2\pi}{w_0} = \frac{4H}{v_S}$$

“Ecuación N°7”

Una vez conocido el perfil de velocidad de ondas de corte que un sitio propaga a través de los estratos que lo componen, puede estimarse el posible periodo fundamental de vibración que caracteriza a aquella masa de suelo.

### 3.5 Modelación estaciones sismográficas

Se utilizó el software de elementos finitos, DeepSoil, para la modelación con enfoques lineal, lineal-equivalente y no lineal de los perfiles de suelo seleccionados para el estudio. En la modelación se utilizaron las correlaciones, curvas empíricas anteriormente descritas, además de la caracterización geofísica de las estaciones sismográficas en análisis.

A modo de simplificación, se modelan los perfiles estratigráficos con las siguientes consideraciones generales:

- No se considera presencia del nivel freático.
- No se considera efectos de presión de poros.
- Manto rocoso rígido.

La presencia del nivel freático y capacidad de disipación de presión de poros, toma relevancia en modelos cíclicos no lineales, en los cuales se establece la influencia de estos elementos en las propiedades dinámicas del suelo. Producto de que no existe información completa de la presencia y posibles fluctuaciones de la napa freática, para las estaciones sismográficas seleccionadas, se omite la presencia de ésta.

Para la consideración del tipo de manto rocoso como rígido o elástico, DeepSoil establece que para mediciones sismográficas realizadas fuera del afloramiento rocoso, se define este semi-espacio como rígido, mientras que elástico para el caso contrario.

A modo de ejemplo, se muestra los tres enfoques de modelaciones aplicados para la estación sismográfica de Constitución, enfatizando que el procedimiento para la elaboración de modelos es el mismo para la demás estaciones.



### 3.5.1 Modelación Lineal

Para la modelación lineal, se dota capacidad de disipación de energía a los estratos que componen el perfil de suelo, considerando una relación de amortiguamiento de 5% a estratos con velocidades de ondas de corte inferiores a 700 m/s, mientras que un 2% para quienes superen aquel límite, mientras que el módulo de corte, que para enfoques lineales alcanza su valor máximo, el software lo estima mediante la “Ecuación N°1”

Propiedades del modelo elaborado para la estación a través DeepSoil:

Layer #	Layer Name	Thickness (m)	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Shear Velocity (m/s)	Damping Ratio (%)
1	E1	1.5	19.6	120	5
2	E2	1.95	15.7	180	5
3	E3	2.55	16.7	180	5
4	E4	4	17.7	290	5
5	E5	12.5	17.7	490	5
6	E6	18.3	24.5	700	2
7	E7	6.4	24.5	700	2
8	E8	3.2	24.5	700	2

Figura 27 “Modelo Lineal, estación de Constitución, (Elaboración Propia)”

### 3.5.2 Modelación Lineal-equivalente

En los modelos con enfoques lineales-equivalentes se utilizan curvas de degradación de módulo de corte y aumento amortiguamiento según sea el tipo de suelo que compone el estrato, para definir la rigidez y capacidad de disipación de energía del suelo.

Layer #	Layer Name	Thickness (m)	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Shear Velocity (m/s)
1	E1	1.5	19.6	120
2	E2	1.95	15.7	180
3	E3	2.55	16.7	180
4	E4	4	17.7	290
5	E5	12.5	17.7	490
6	E6	18.3	24.5	700
7	E7	6.4	24.5	700
8	E8	3.2	24.5	700

Figura 28 “Modelación Lineal-Equivalente, estación Constitución, (Elaboración Propia)”

En suelos cohesivos, es necesario establecer el nivel de plasticidad que contiene el estrato, debido a que de éste parámetro varía la relación entre el esfuerzo y deformaciones de corte del suelo. En

suelos granulares la caracterización de las propiedades dinámicas del estrato en DeepSoil, se limita a una selección de una curva empírica de referencia para este tipo de suelo. Revisar lo descrito anteriormente en 3.3.

### 3.5.3 Modelación No lineal

Inicialmente se definió la curva “columna vertebral” según características del depósito y luego también el modelo histerético que para todos los casos de estudio serán del tipo “Non-Masing”. Para obtener una referencia de los modelos “Non Masing”, revisar 2.6.3.

En los modelos no lineales, se requiere que los estratos que componen al perfil de suelo propaguen frecuencias de por lo mínimo 30 Hz, transmitiendo las principales longitudes de onda que provienen de la señal sísmica de entrada. Producto de que existe una relación inversa, entre el espesor del estrato y la frecuencia máxima que puede propagar éste, es necesario disminuir el espesor de cada estrato sub-dividiendo la estratigrafía original.

$$f_{max} = \frac{v_s}{4H}$$

“Ecuación N°9”



Figura 29 “Modelación No Lineal, Estación Constitución, (Elaboración Propia)”

Este enfoque utiliza curvas empíricas de referencia, para lo cual DeepSoil permite seleccionarlas, éstas definen las propiedades dinámicas de cada estrato que compone el depósito y como consecuencia de la selección, el software se estima otros parámetros que describen la naturaleza no lineal en la respuesta del depósito.

## 4 EJECUCIÓN DE DECONVOLUCIÓN

Se realiza análisis de respuesta de sitio con el objetivo de estimar demandas sísmicas sintéticas en profundidad validadas con respuestas en superficie, para aquello, se ejecutan procesos de deconvolución.

Para la obtención de resultados, a través de DeepSoil se generó la respuesta sísmica en superficie, mientras que la respuesta en profundidad se consigue tras la programación de una rutina de deconvolución en MATLAB.

La deconvolución programada en cada enfoque de modelación considera lo demostrado por estudios experimentales desarrollados en este tema, los cuales descubrieron que alrededor del 75% de la potencia en un movimiento de superficie libre podría atribuirse a las ondas de corte que se propagan verticalmente a frecuencias entre 15-20 Hz, Silva, 1998. Producto de las conclusiones obtenidas por Silva, se considera un pre-filtrado de ondas sísmicas en el rango de 0-20 Hz en la obtención de resultados y buscar con ello lograr que la respuesta sísmica pueda ser calculada con mayor precisión.

### 4.1 Enfoque Lineal

Para realizar el proceso de deconvolución en un sistema lineal, dado que la respuesta sísmica superficial del depósito en este enfoque es independiente de la señal de entrada, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se carga una señal sísmica de aceleraciones a un modelo estratigráfico en DeepSoil.
2. De los resultados obtenidos, de DeepSoil se extrae la función de transferencia del depósito.
3. Se elabora una rutina en MATLAB que permita transformar al dominio de la frecuencia el registro medido en superficie por la estación sismográfica, mediante aplicación de transformadas de Fourier.
4. Se elabora una rutina en MATLAB que efectúe la operación de deconvolución:

$$|input(f)| = |output(f)| * H(f)$$

“Ecuación N°10”

5. Se elabora una rutina en MATLAB que transforme al dominio del tiempo el registro obtenido en el paso anterior, aplicando la inversa de la transformada de Fourier.

## 4.2 Enfoque Lineal-equivalente y No lineal

Dado que el enfoque lineal-equivalente intenta modelar la respuesta no lineal del suelo, se desarrolla una deconvolución no lineal para la estimación de demandas sísmicas en profundidad.

Para el proceso de deconvolución, se adapta la metodología propuesta por S. H. Ju, 2013, quien establece un proceso iterativo que consta de los siguientes 5 pasos:

1. Para cada iteración  $k$ , se aplica un input sísmico en la manto rocoso  $a_{bot\_k}(t)$  en DeepSoil. Como en la primera iteración ( $k=1$ ),  $a_{bot\_k}(t)$ , es desconocido puede asumirse como la aceleración real medida por la estación sismográfica  $a_{top\_0}(t)$ .
2. Ejecutar análisis en DeepSoil, para obtener la respuesta en superficie  $a_{top\_k+1}(t)$ . Con ella, se estima la función de transferencia:

$$H(f) = a_{bot\_k} / (a_{top\_k+1}(f)) + \varepsilon$$

“Ecuación N°11”

Donde,  $a_{bot\_k}(f)$  y  $a_{top\_k+1}(f)$  corresponden al resultado de la Transformada rápida de Fourier (FFT) para  $a_{bot\_k}(t)$  y  $a_{top\_k+1}(t)$ ,  $f$  a la frecuencia y  $\varepsilon = 1.0 \times 10^{-7}$  corresponde a un valor muy pequeño que disuade errores numéricos.

3. Encontrar las aceleraciones en el manto rocoso en el dominio de la frecuencia, mediante:

$$a_{bot\_k+1} = H(f) * a_{top\_0}(f)$$

“Ecuación N°12”

En donde  $a_{top\_0}(f)$  corresponde al resultado de la transformada de Fourier de  $a_{top\_0}(t)$ .

4. Aplicar la inversa de FFT para  $a_{bot\_k+1}(f)$ , para obtener en el dominio del tiempo  $a_{bot\_k+1}(t)$ .
5. Si  $a_{bot\_k+1}(f)$  es similar a  $a_{bot\_k}(f)$ , la iteración a convergido y  $a_{bot\_k+1}(f)$  es el registro en aceleración que se aplica en el manto rocoso. De lo contrario,  $k=k+1$  y volver al paso número 1.

Como el término “semejante” es ambiguo, se aplica un factor de convergencia que replica la diferencia en amplitud de frecuencias entre ambos registros obtenidos en superficie:

$$R = \frac{\sum_{f \leq 20 \text{ Hz}} |a_f - a_f^{decon}|}{\sum_{f \geq 0.1 \text{ Hz}} |a_f|}$$

“Ecuación N°13”

En donde  $\alpha_f$  y  $\alpha_f^{decon}$  corresponden a la amplitud de frecuencias del registro en superficie medido y el sintético obtenido en el proceso iterativo, respectivamente.

Esquemáticamente, el proceso iterativo se resume mediante el siguiente esquema:

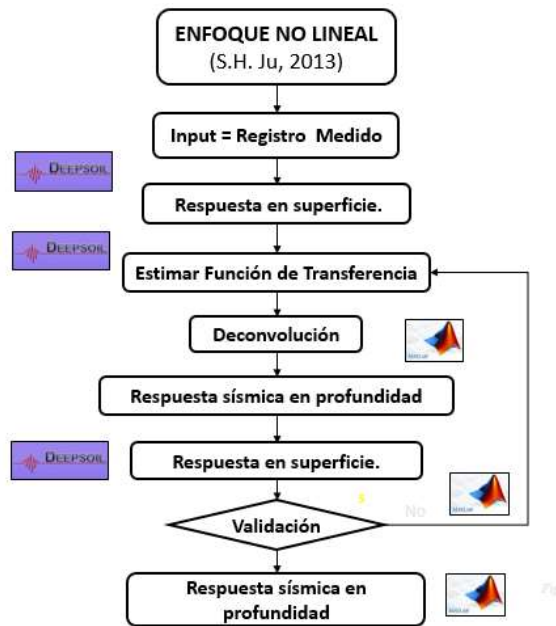


Figura 30 “Esquema deconvolución no lineal, (Elaboración Propia)”

Mediante programación en MATLAB, se codificó una rutina que plasma la deconvolución descrita por S. H. Ju, que arroja como resultados la demanda y señal sísmica en la profundidad del lecho rocoso.

## 5 ANÁLISIS Y RESULTADOS

Se muestran a continuación los registros sísmicos medidos en superficie por las estaciones sismográficas y los registros sintéticos obtenidos en profundidad, con sus respectivas validaciones y caracterizaciones. Los resultados graficados sólo representan una dirección horizontal de análisis, mientras que la otra se encuentra en los anexos.

### 5.1 Validación de resultados

La convergencia de los resultados se valida comparando de los resultados sintéticos obtenidos en superficie versus los medidos por las estaciones sismográficas durante el 27F. La validación se ejecuta en el dominio del tiempo, de la frecuencia y con los espectros de respuesta.

#### 5.1.1 Registros sísmicos obtenidos en superficie

Desde la figura N°31, hasta la N°35, se muestra el registro temporal de aceleraciones medido por cada una de las estaciones sismográficas en estudio, figurando en orden descendente los registros: el medido por la estación, el obtenido mediante modelación lineal, lineal-equivalente y no lineal respectivamente.

a) Estación Angol, dirección EW.

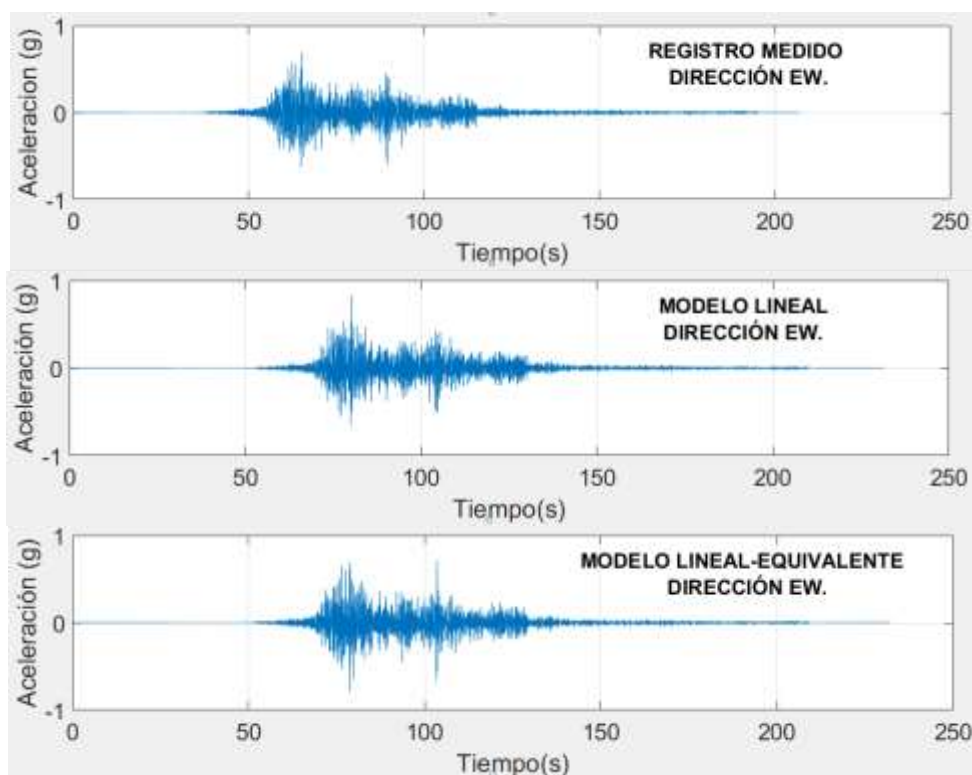


Figura 31 “Set registros sísmicos de aceleración en superficie, estación Angol, (Elaboración propia)”

Registro	PGD [cm]	PGV [cm/s]	PGA [g]	Tef. [s]
Medido	7.3	37.58	0.698	49.75
Lineal	7.09	33.19	0.831	49.99
Lineal-equivalente	6.17	34.24	0.79	49.77
No Lineal	-	-	-	-

Tabla 8 “Caracterización registros sísmicos en superficie, estación Angol, (Elaboración propia)”

b) Estación Constitución, dirección Longitudinal:

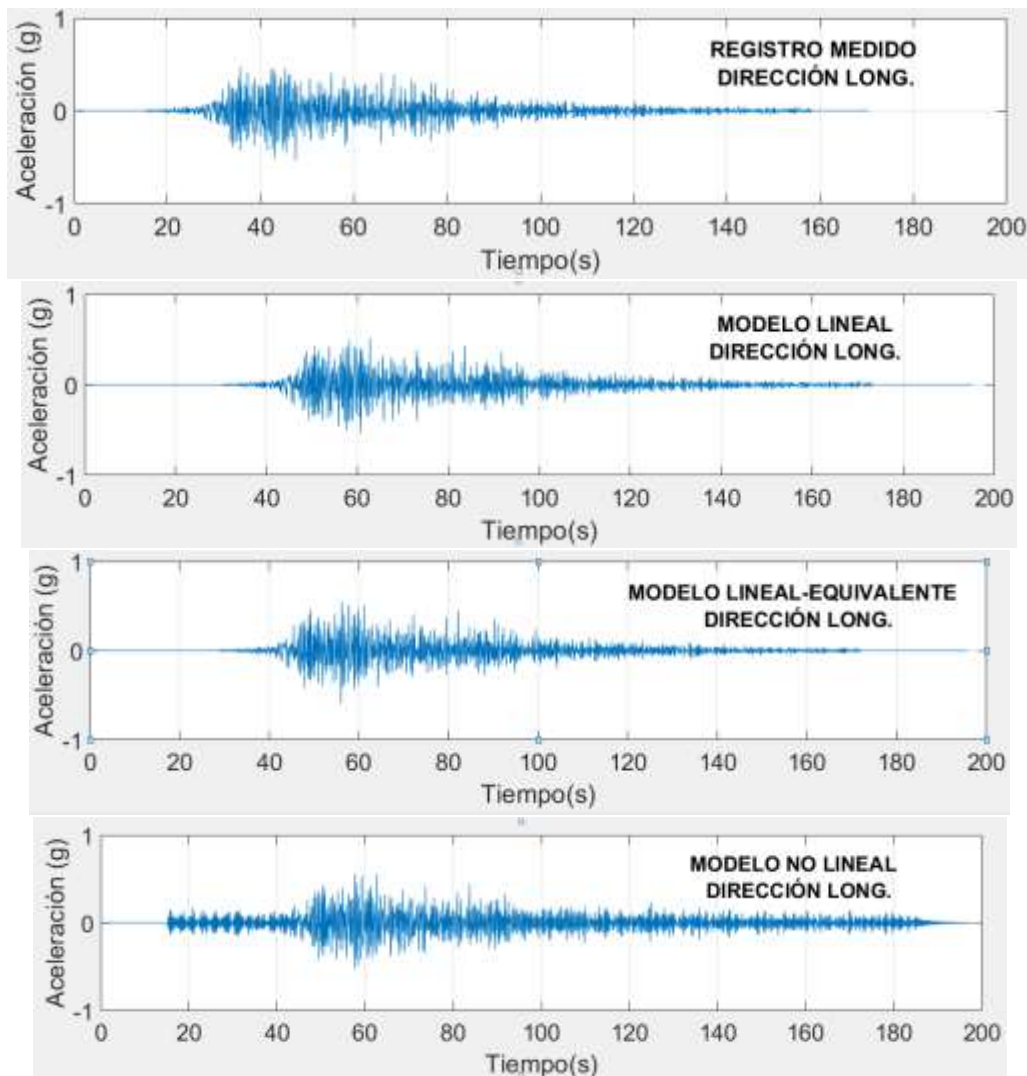


Figura 32 “Set registros sísmicos de aceleración en superficie, estación Constitución, (Elaboración propia)”

Registro	PGD [cm]	PGV [cm/s]	PGA [g]	Tef. [s]
Medido	10.08	43.28	0.538	59.79
Lineal	9.99	41.98	0.538	59.06
Lineal-equivalente	9.18	42.27	0.601	59.49
No Lineal	9.35	46.68	0.559	96.61

Tabla 9 “Caracterización registros sísmicos en superficie, estación Constitución”



c) Estación Hualañé, dirección Transversal:

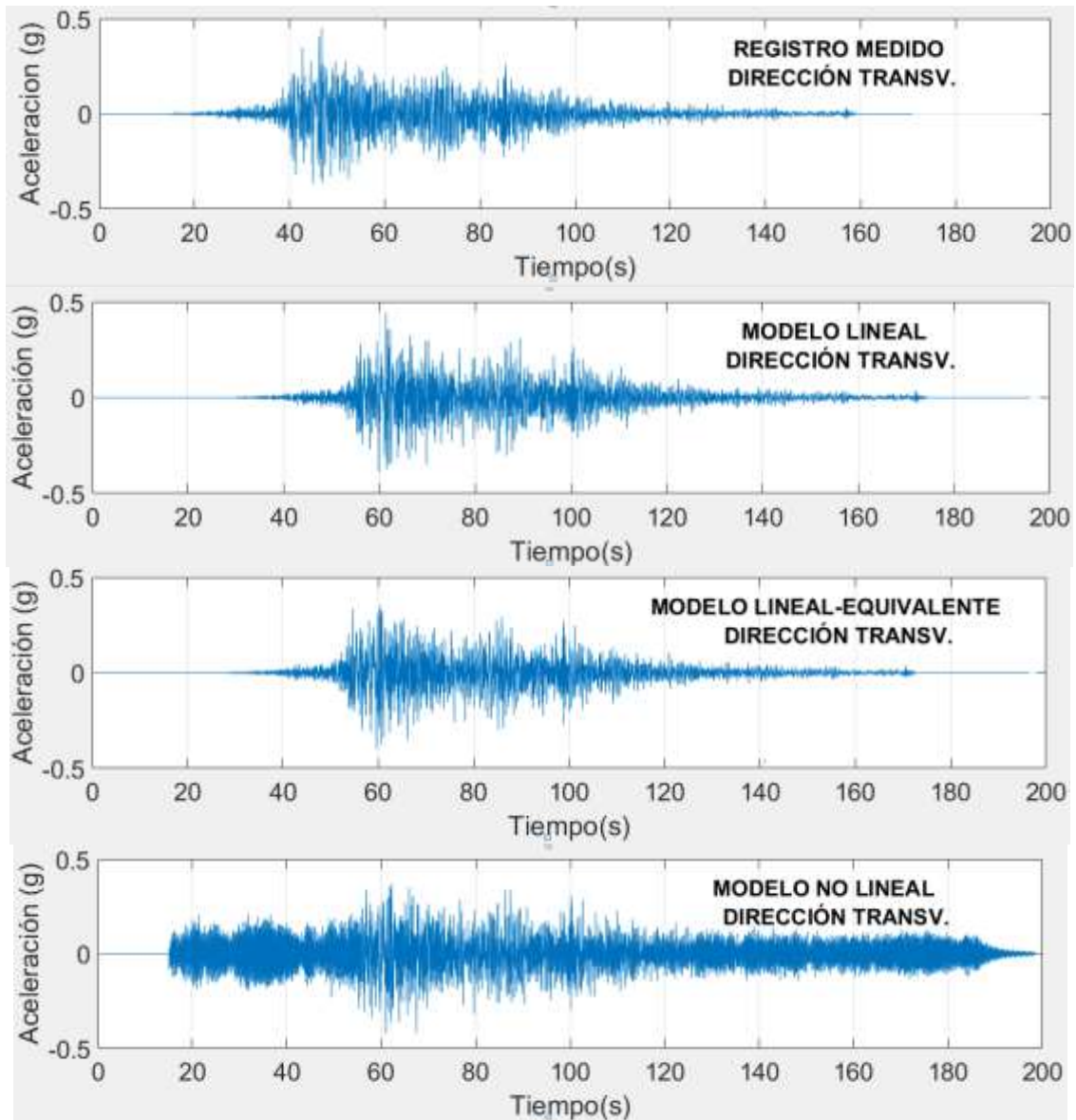


Figura 33 “Set registros sísmicos de aceleración en superficie, estación Hualañé, (Elaboración propia)”

Registro	PGD [cm]	PGV [cm/s]	PGA [g]	Tef. [s]
Medido	6.71	34.91	0.452	56.03
Lineal	6.65	32.41	0.446	55.76
Lineal-equivalente	7.48	32.36	0.401	55.78
No Lineal	8.01	32.96	0.424	119.2

Tabla 10 “Caracterización registros sísmicos en superficie, estación Hualañé, (Elaboración propia)”



d) Estación Maipú, dirección EW:

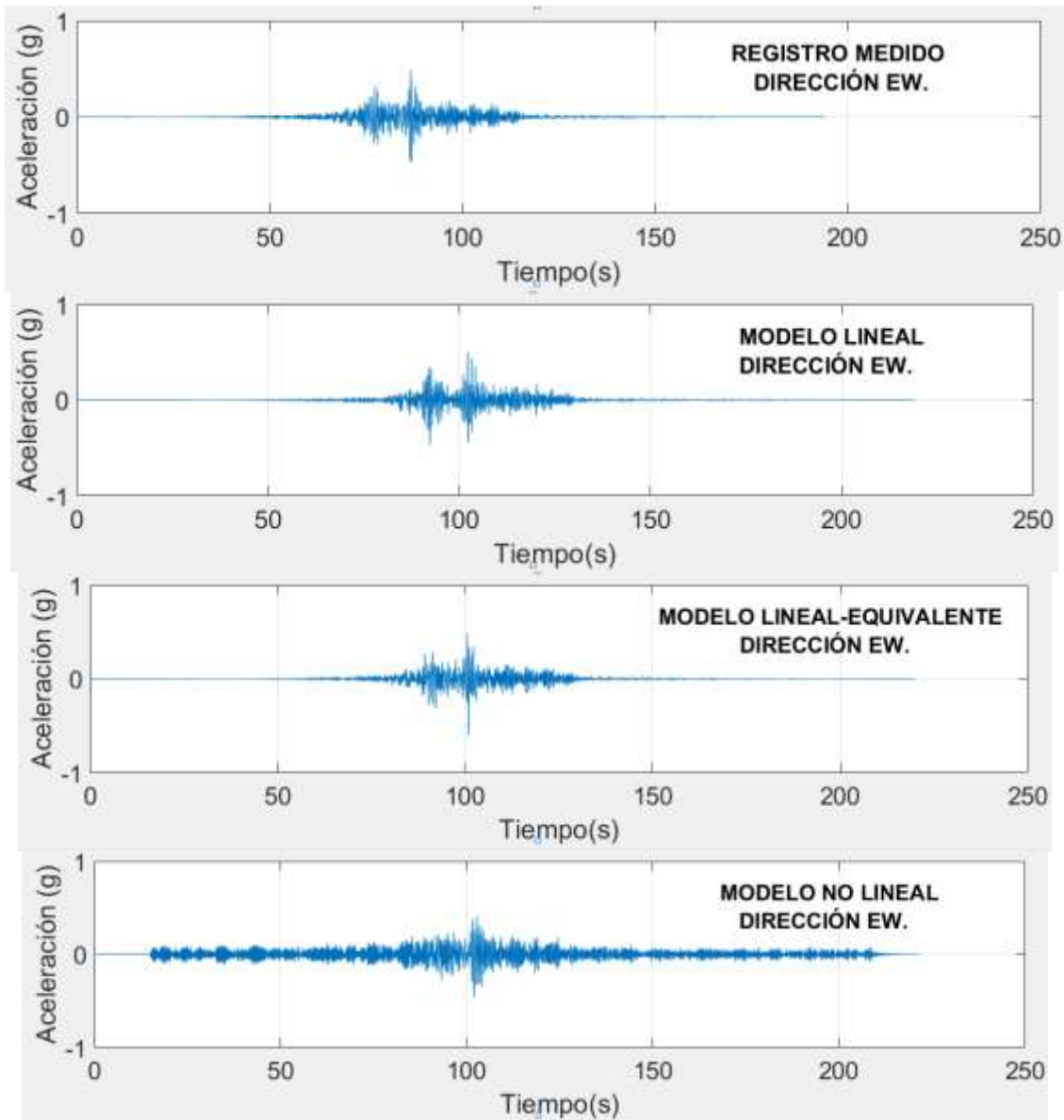
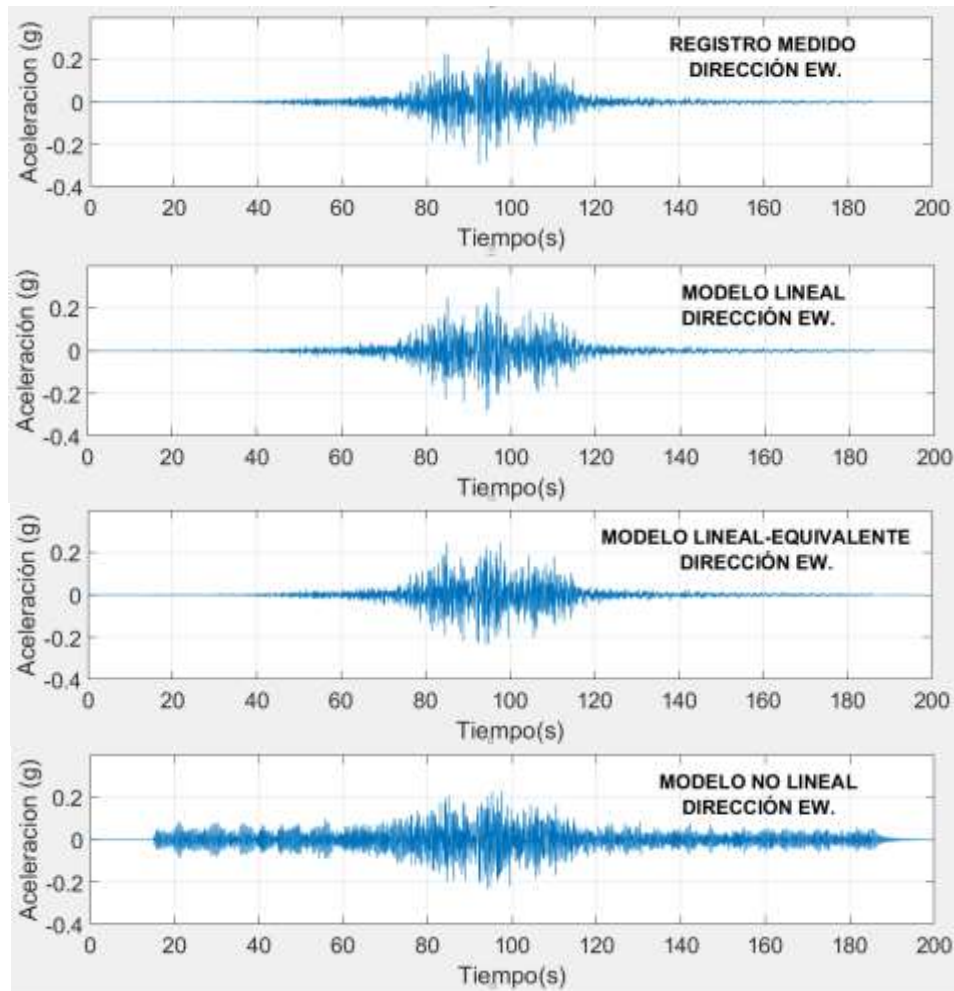


Figura 34 “Set registros sísmicos de aceleración en superficie, estación Maipú, (Elaboración propia)”

Registro	PGD [cm]	PGV [cm/s]	PGA [g]	Tef. [s]
Medido	7.26	38.99	0.488	33.77
Lineal	7.17	42.16	0.675	34.08
Lineal-equivalente	8.09	40.83	0.609	33.26
No Lineal	13.24	35.81	0.467	135.6

Tabla 11 “Caracterización registros sísmicos en superficie, estación Maipú, (Elaboración propia)”

e) Estación Peñalolén, dirección EW:



**Figura 35 “Set registros sísmicos de aceleración en superficie, estación Peñalolén, (Elaboración propia)”**

Registro	PGD [cm]	PGV [cm/s]	PGA [g]	Tef. [s]
Medido	5.66	22.74	0.293	34.18
Lineal	5.58	24.62	0.297	34.1
Lineal-equivalente	4.13	25.81	0.25	34.22
No Lineal	3.91	25.51	0.232	119.5

**Tabla 12 “Caracterización registros sísmicos en superficie, estación Peñalolén, (Elaboración propia)”**

De los registros sintéticos obtenidos en superficie, los correspondientes al análisis lineal y lineal-equivalente, se asemejan en forma y caracterización al registro sísmico objetivo, con leves variaciones en términos de PGA, PGV, PGD y duración efectiva como pudo visualizarse en las tablas N°8, N°9, N°10, N°11 y N°12, generándose una aceptable convergencia. Por otro lado, los registros sintéticos de aceleraciones obtenidos en superficie mediante un enfoque de análisis no lineal, manifiestan notorias sobre-amplificaciones de amplitud de aceleración, que tiene como consecuencia un aumento en la duración efectiva del movimiento sísmico.

### 5.1.2 Espectros de frecuencia obtenidos en superficie

Este tipo de validación explica a las diferencias observadas en los registros temporales de aceleración en los análisis realizados. Se muestra la amplitud del contenido de frecuencias para los registros sísmicos superficiales desde la figura N°36 hasta la N°41.

a) Estación Angol, dirección EW:

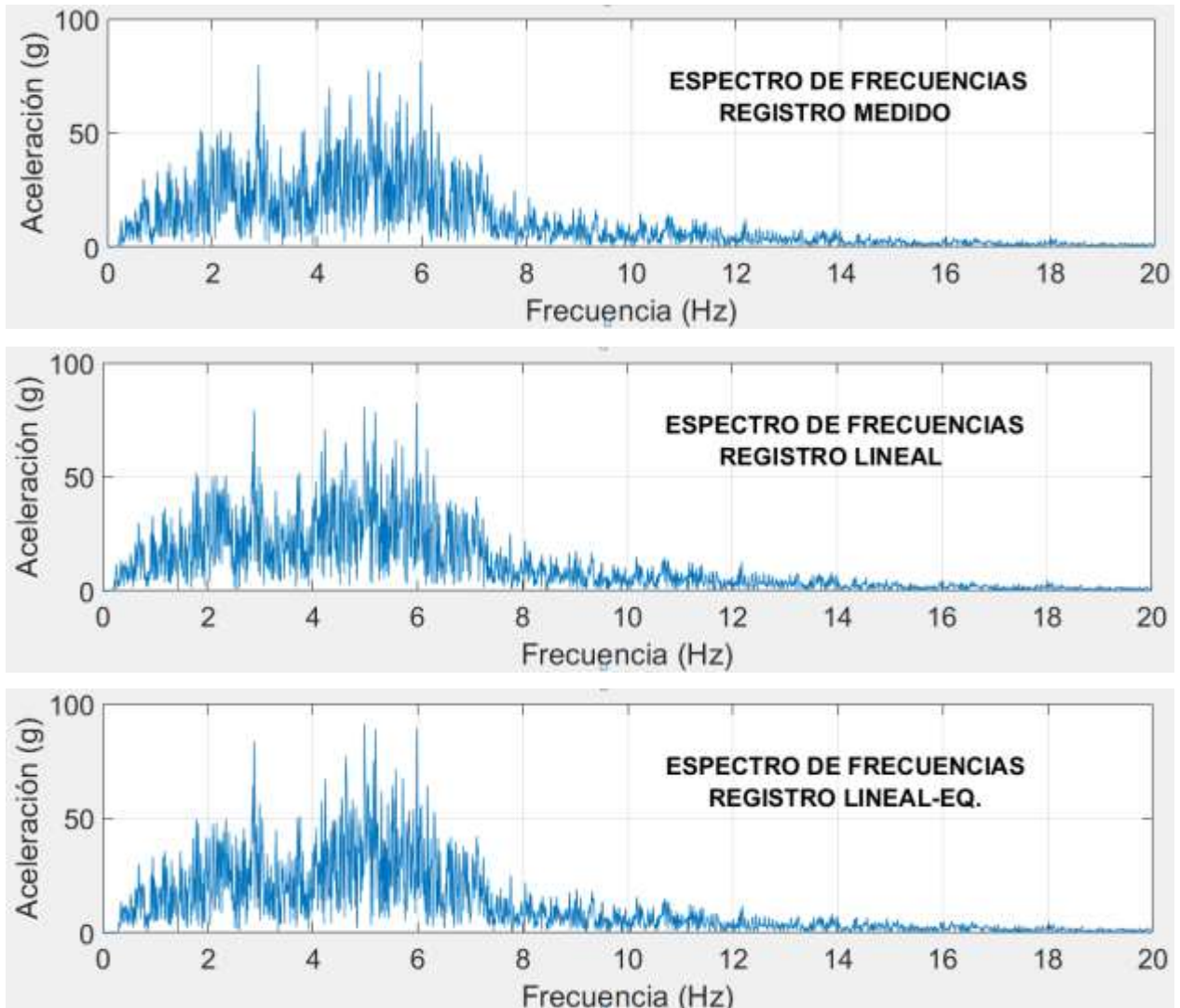


Figura 36 “Set espectros de frecuencias registros en superficie, estación Angol, (Elaboración propia)”

b) Estación Constitución, dirección Longitudinal:

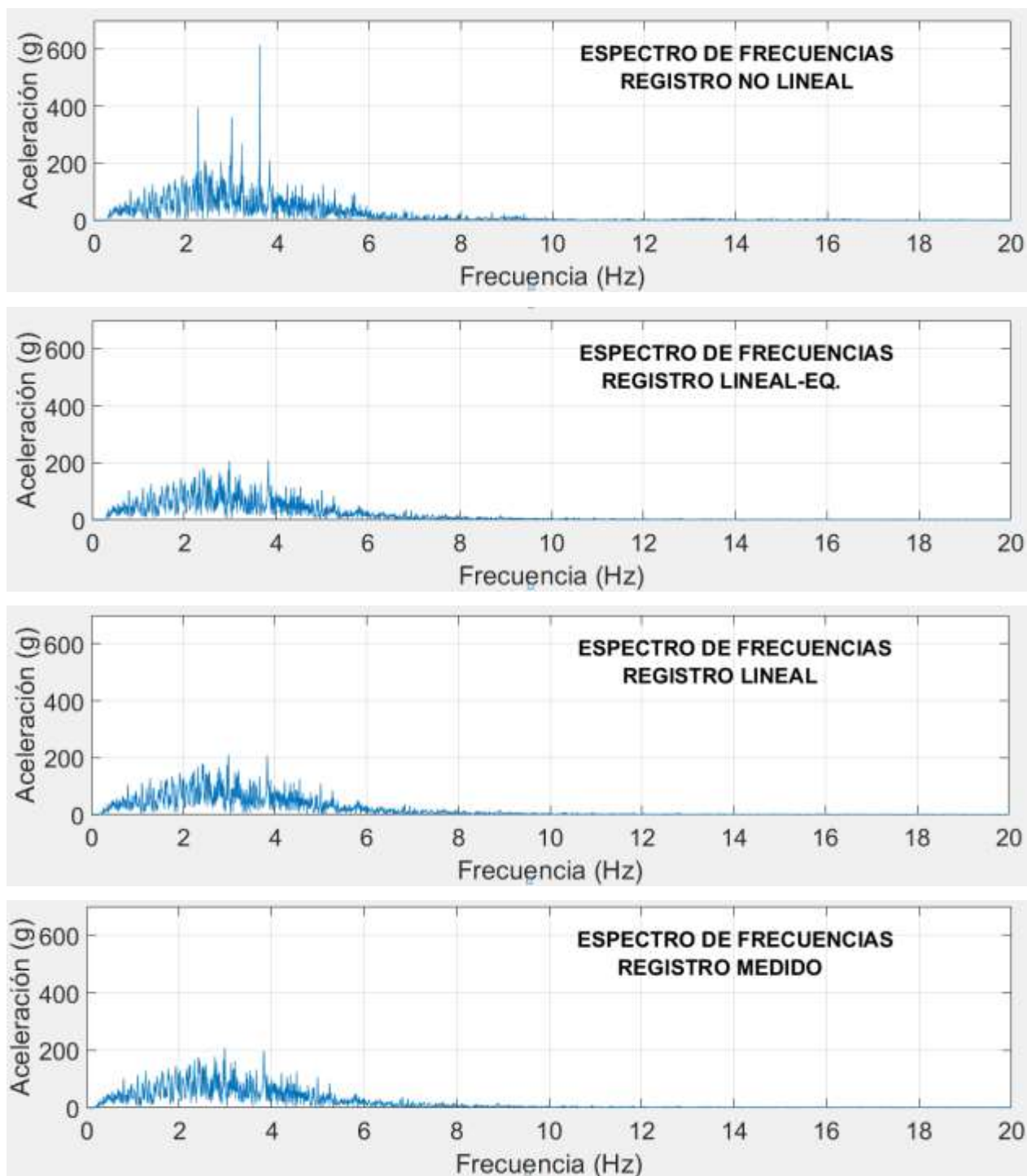


Figura 37 “Set espectros de frecuencias registros en superficie, estación Constitución, (Elaboración propia)”

c) Estación Hualañé, dirección Transversal:

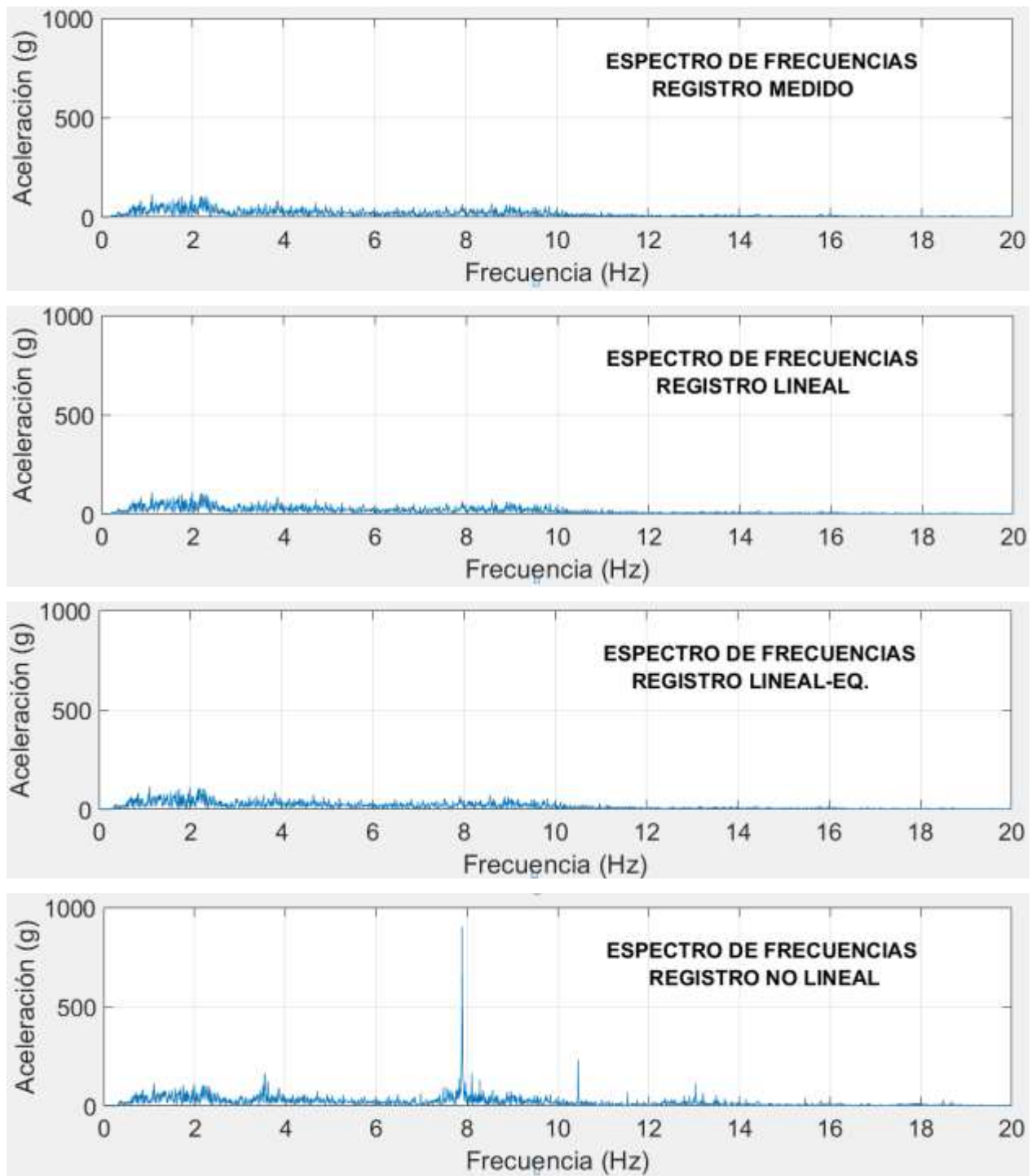


Figura 38 “Set espectros de frecuencias registros en superficie, estación Hualañé, (Elaboración propia)”



d) Estación Maipú, dirección EW:

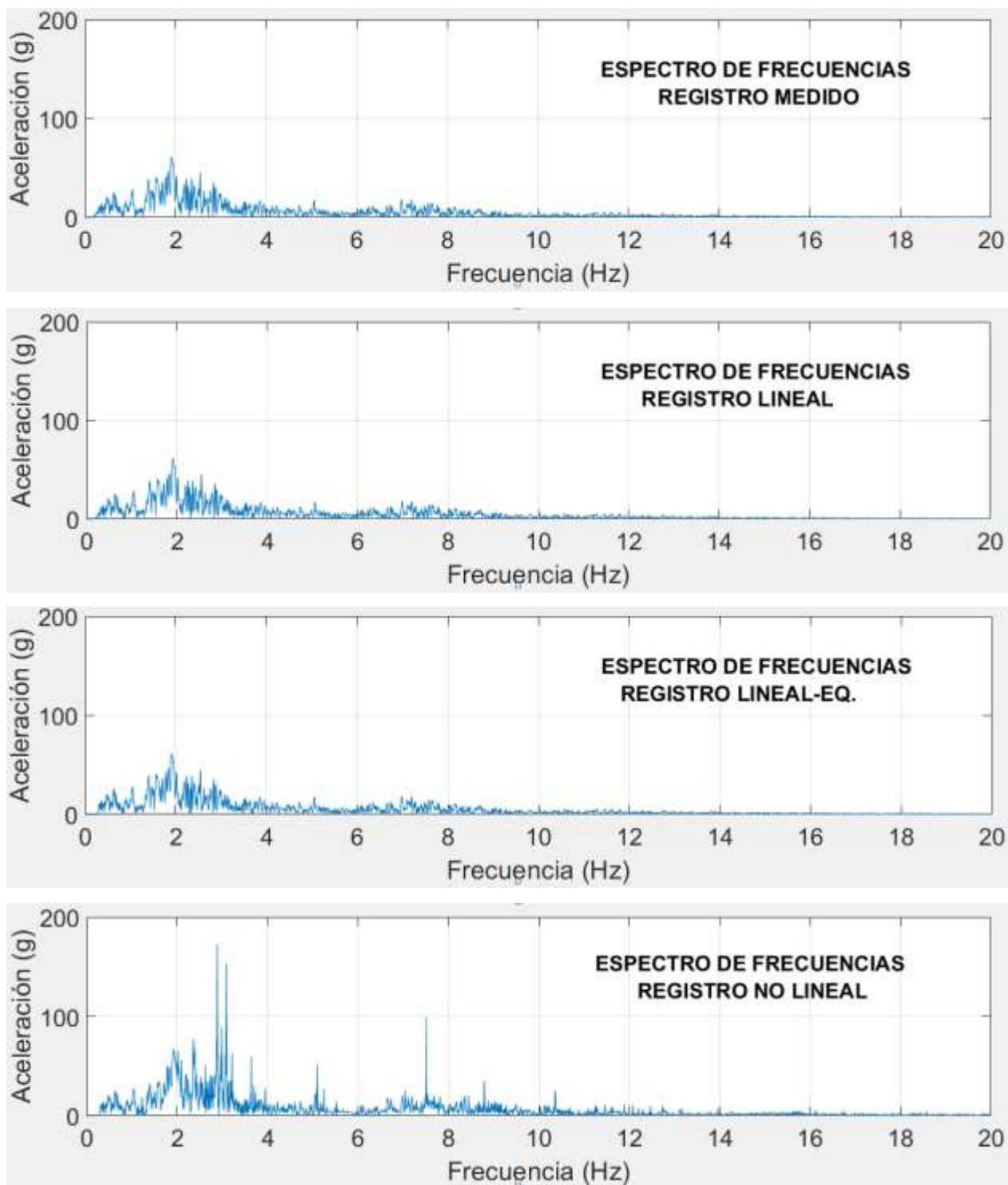


Figura 39 “Set espectros de frecuencias registros en superficie, estación Maipú, (Elaboración propia)”

e) Estación de Peñalolén, dirección EW:

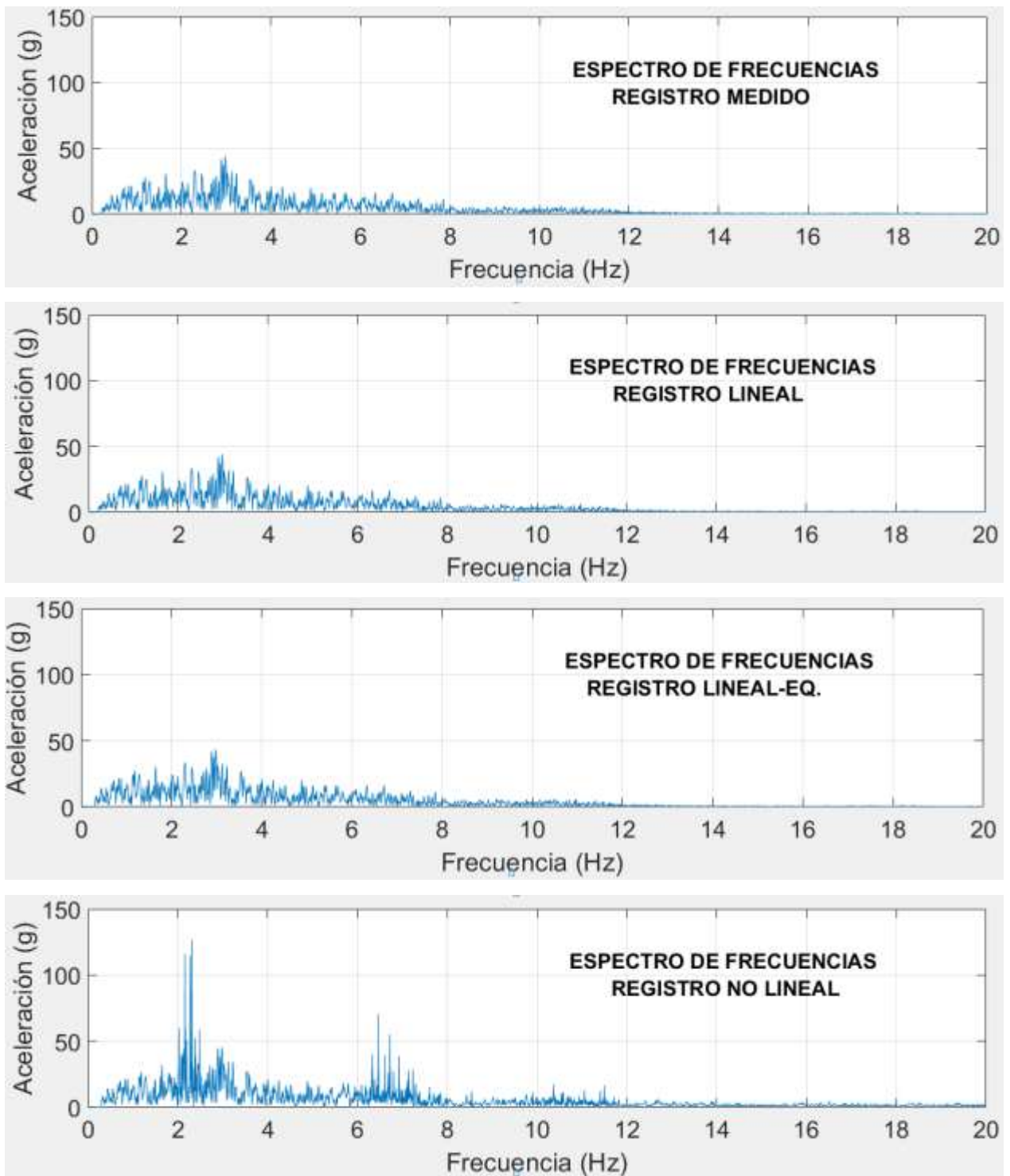


Figura 40 “Set espectros de frecuencias registros en superficie, estación Peñalolén, (Elaboración propia)”

Visualizando los espectros de frecuencias pertenecientes a los registros de aceleración obtenidos en superficie en los set de figuras mostradas anteriormente y particularmente los pertenecientes a registros sísmicos tras modelaciones no lineales, permite que se justifiquen las amplificaciones y

por ende los desajustes obtenidos en los registros temporales mostradas en las figuras N°31 a la N°35, ya que los espectros de frecuencias correspondientes a estos análisis, manifiestan aumentos bastante considerables en amplitud en frecuencias cercanas a las frecuencias predominantes de cada sitio donde se asienta cada estación sismográfica, estas sobre-amplificaciones son las que generan que se dispare la duración efectiva de los registros temporales obtenidos. En cambio, para los enfoques de análisis lineal y lineal-equivalente, los espectros de frecuencias son semejantes al espectro correspondiente al registro de aceleraciones objetivo, esto ocurre en cada una de las estaciones sismográficas analizadas, respondiéndose el aceptable ajuste en el dominio del tiempo que tienen estos enfoques.

### 5.1.3 Espectros de respuestas de pseudo-aceleración y desplazamiento obtenidos en superficie

Se estiman los espectros de respuesta de pseudo-aceleración y pseudo-desplazamiento para las estaciones y enfoques seleccionado, siendo esta representación la principal utilizada para la definición de convergencia en los resultados. Los espectros de respuestas se grafican mediante el método Newmark Beta con 5% amortiguamiento y corresponden a ilustraciones mostradas desde la figura N°41 a la N°45

a) Estación Angol.

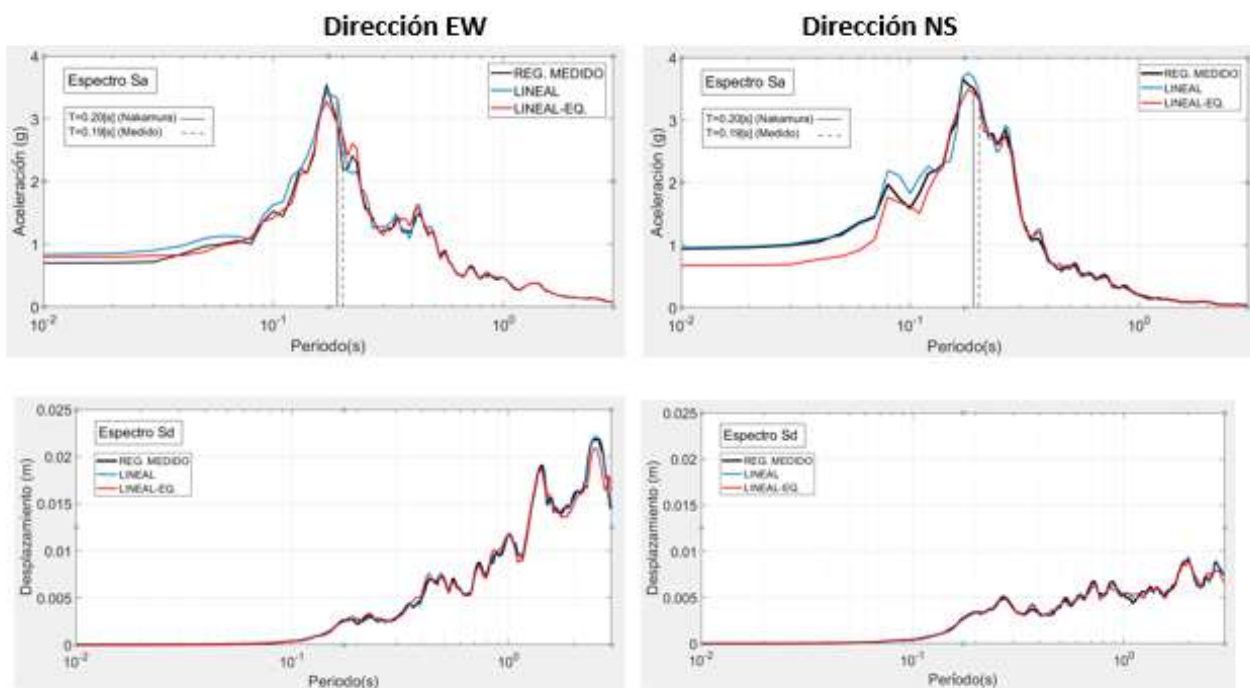


Figura 41 “Espectros de respuestas en superficie, estación Angol, (Elaboración propia)”



b) Estación Constitución.

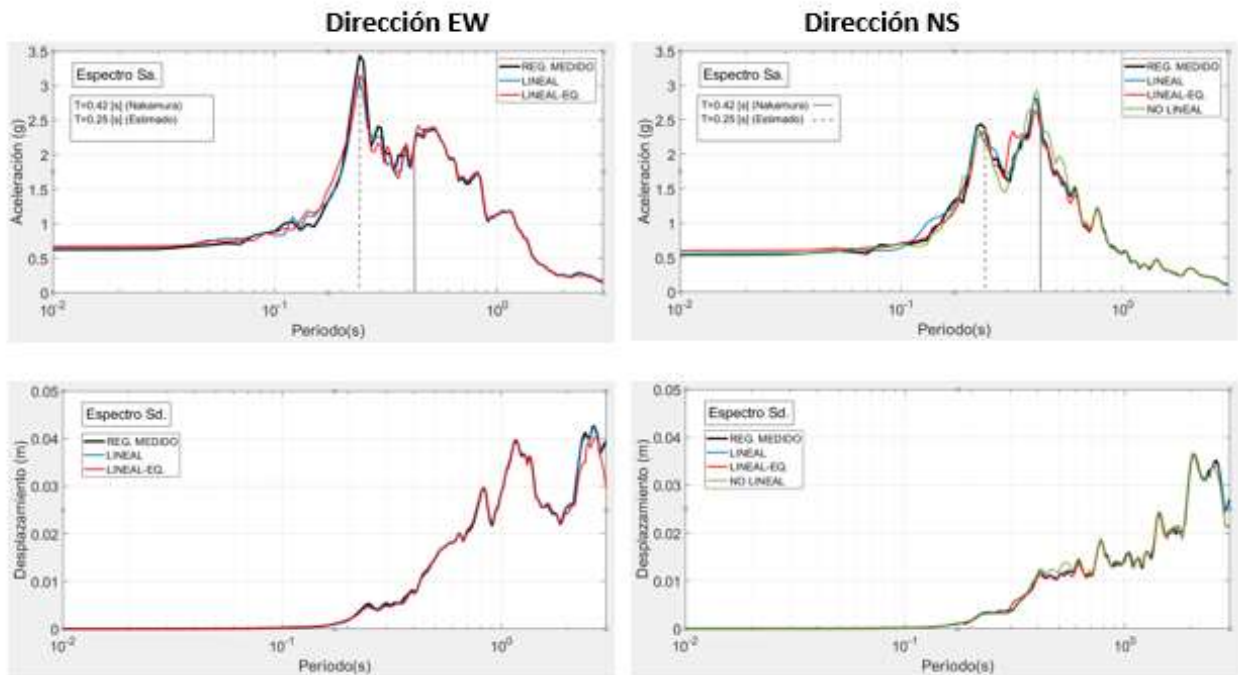


Figura 42 “Espectros de respuestas en superficie, estación Constitución, (Elaboración propia)”

c) Estación Hualañé.

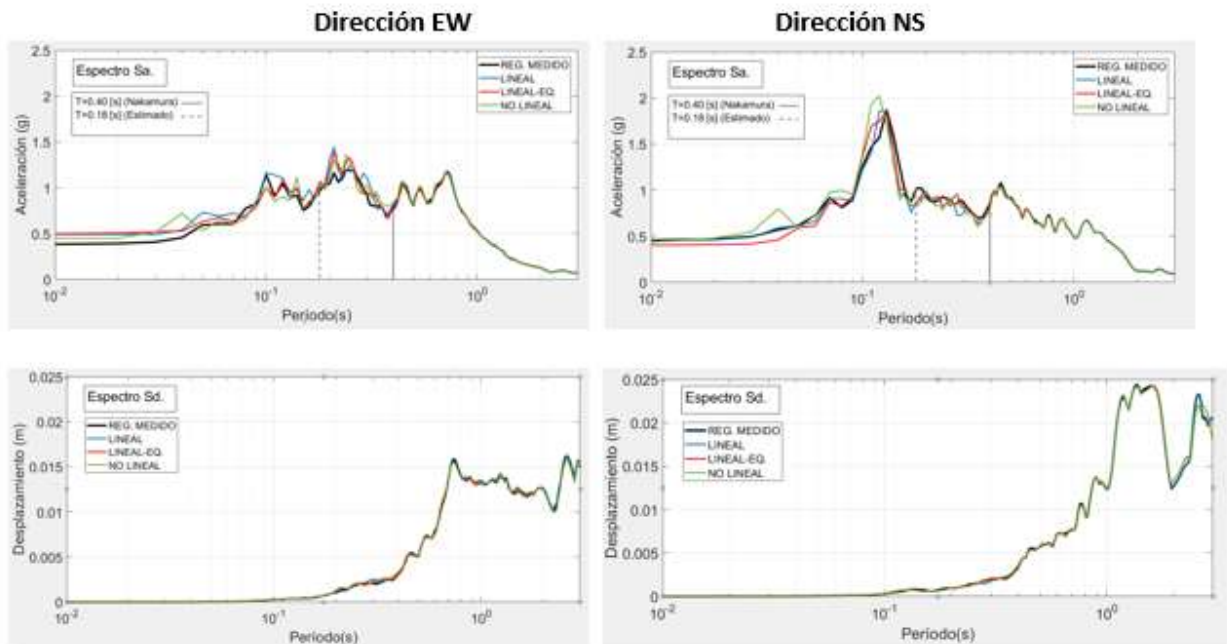


Figura 43 “Espectros de respuestas en superficie, estación Hualañé, (Elaboración propia)”

d) Estación Maipú.

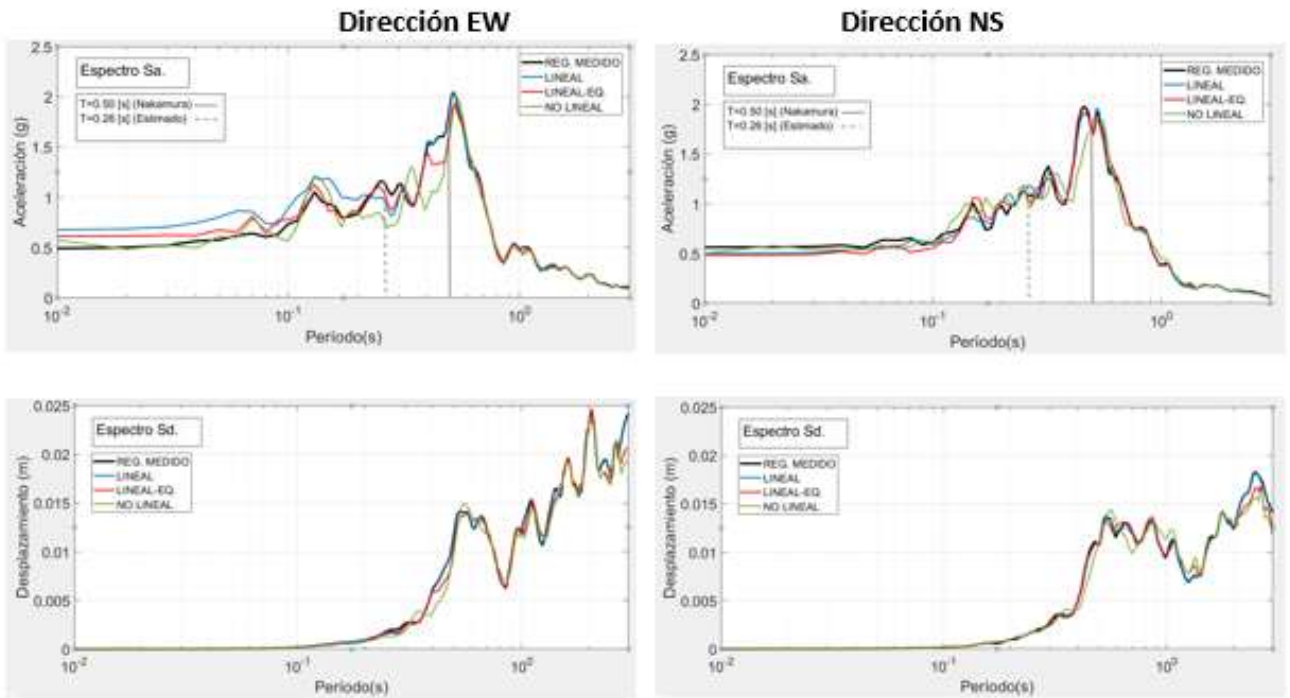


Figura 44 “Espectros de respuestas en superficie, estación Maipú, (Elaboración propia)”

e) Estación Peñalolén

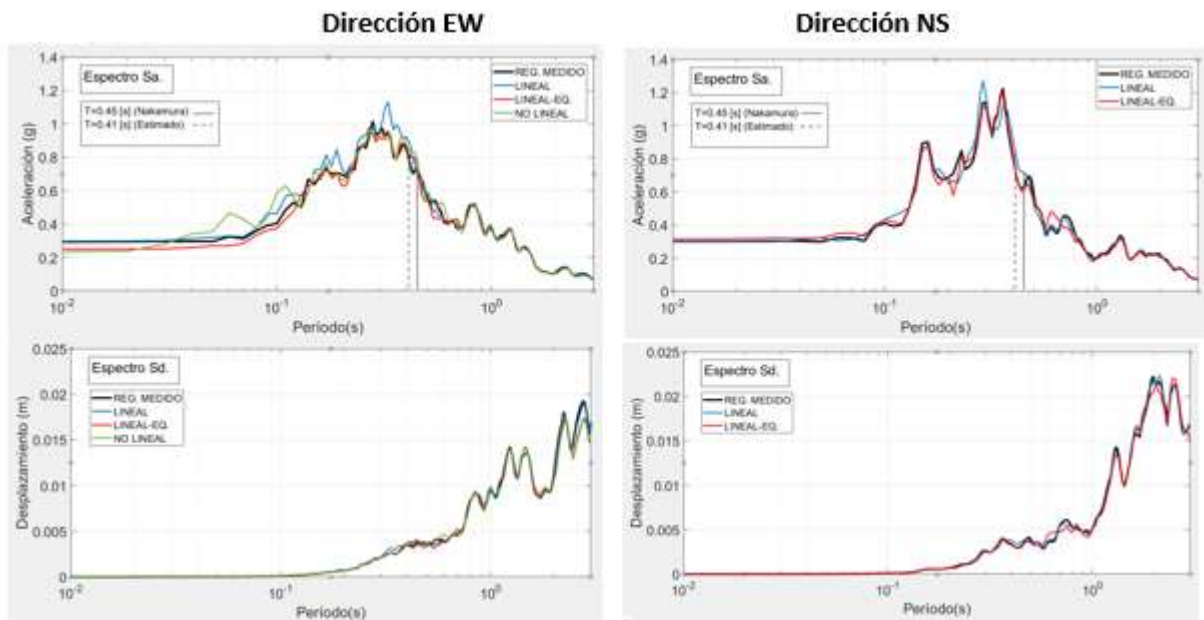


Figura 45 “Espectros de respuestas en superficie, estación Peñalolén, (Elaboración propia)”

Existe la tendencia de que en periodos fundamentales bajos e incluso menores a 0.4 [s], se manifiesten desajustes en la respuesta de pseudo-aceleración en cada una de las estaciones

sismográficas en estudio, como se visualiza en la figura N°44 y N°45, mientras que para periodos superiores a este valor se obtienen excelentes convergencias respecto al espectro de respuesta objetivo, como se muestran en las figuras ilustradas. Tanto el análisis lineal como no lineal, son quienes presentan las mayores variaciones en este rango de periodos, siendo la modelación lineal-equivalente quien mejor ajustó el comportamiento dinámico del suelo.

Es relevante destacar, que a pesar de que el registro de aceleraciones sintético obtenido en el análisis no línea no presentaba una adecuada convergencia y caracterización debido a sus notorias amplificaciones, éste presenta un correcto ajuste en términos de espectro de respuesta, siendo resultados válidos como pudo visualizarse en las figuras N°41 hasta la N°45.

Los periodos fundamentales estimados en las estaciones de Angol (figura N°41) y Constitución (Figura N°42), replicaron de forma cercana el periodo de vibración medido por la estación sismográfica, esto se debe a la caracterización geotécnica se acerca a las condiciones reales del depósito. Mientras que para las demás estaciones sismográficas (figuras N°43, N°44 y N°45), el periodo fundamental dado la modelación de los sitios, no se asemejó al valor medido, como sí lo hicieron los estimados mediante la técnica de Nakamura, siendo por lo tanto, importantes algunos posibles estratos flexibles en profundidad que los sondajes realizados no alcanzaron a caracterizar.

## 5.2 Resultados obtenidos en profundidad.

### 5.2.1 Registros sísmicos obtenidos en profundidad

Se muestran los registros sísmicos sintéticos obtenidos en profundidad, desde la figura N°46 a la N°50, correspondiente a cada estación sismográfica en una dirección horizontal de análisis, siendo anexada la otra dirección. Los registros obtenidos son resultados de la aplicación de deconvolución línea, en modelos lineales, y no lineal, en modelos lineales-equivalentes y no lineales.

#### a) Estación Angol

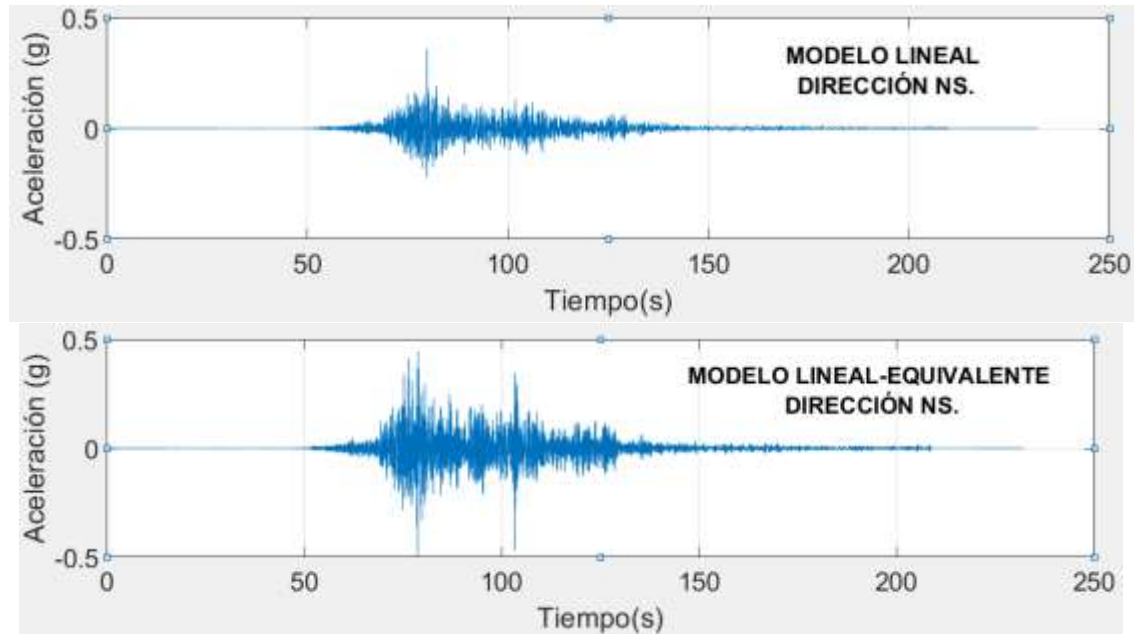


Figura 46 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en profundidad, estación Angol, (Elaboración propia)”

Registro	PGD [cm]	PGV [cm/s]	PGA [g]	Tef. [s]
Lineal	6.52	26.65	0.299	47.06
Lineal-equivalente	4.9	23.51	0.251	50.20
No Lineal	-	-	-	-

Tabla 13 “Caracterización registros sísmicos en profundidad, estación Angol, (Elaboración propia)”

b) Estación Constitución

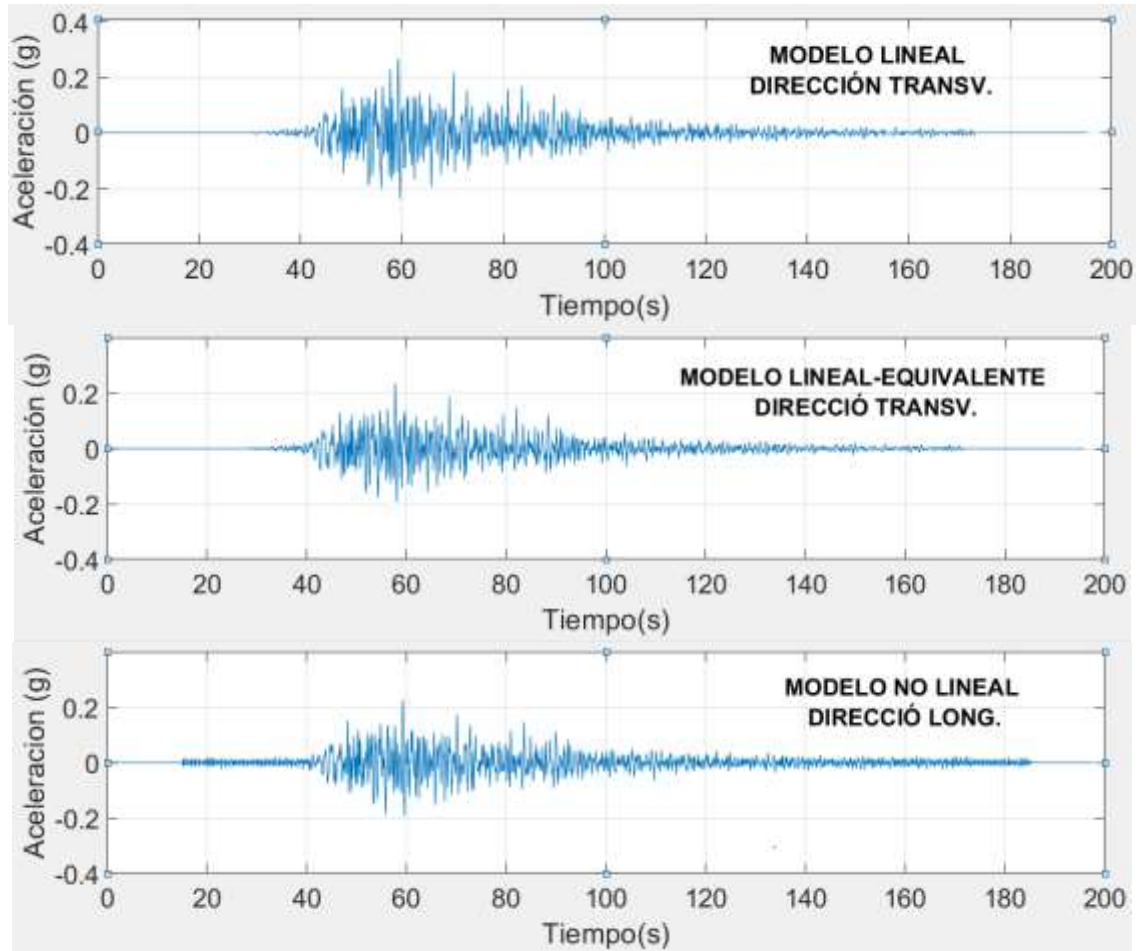


Figura 47 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en profundidad, estación Const., (Elaboración propia)”

Registro	PGD [cm]	PGV [cm/s]	PGA [g]	Tef. [s]
Lineal	9.238	34.17	0.268	53.55
Lineal-equivalente	8.00	29.69	0.236	56.26
No Lineal	8.05	29.37	0.226	62.99

Tabla 14 “Caracterización registros sísmicos en profundidad, estación Constitución, (Elaboración propia)”

c) Estación Hualañé

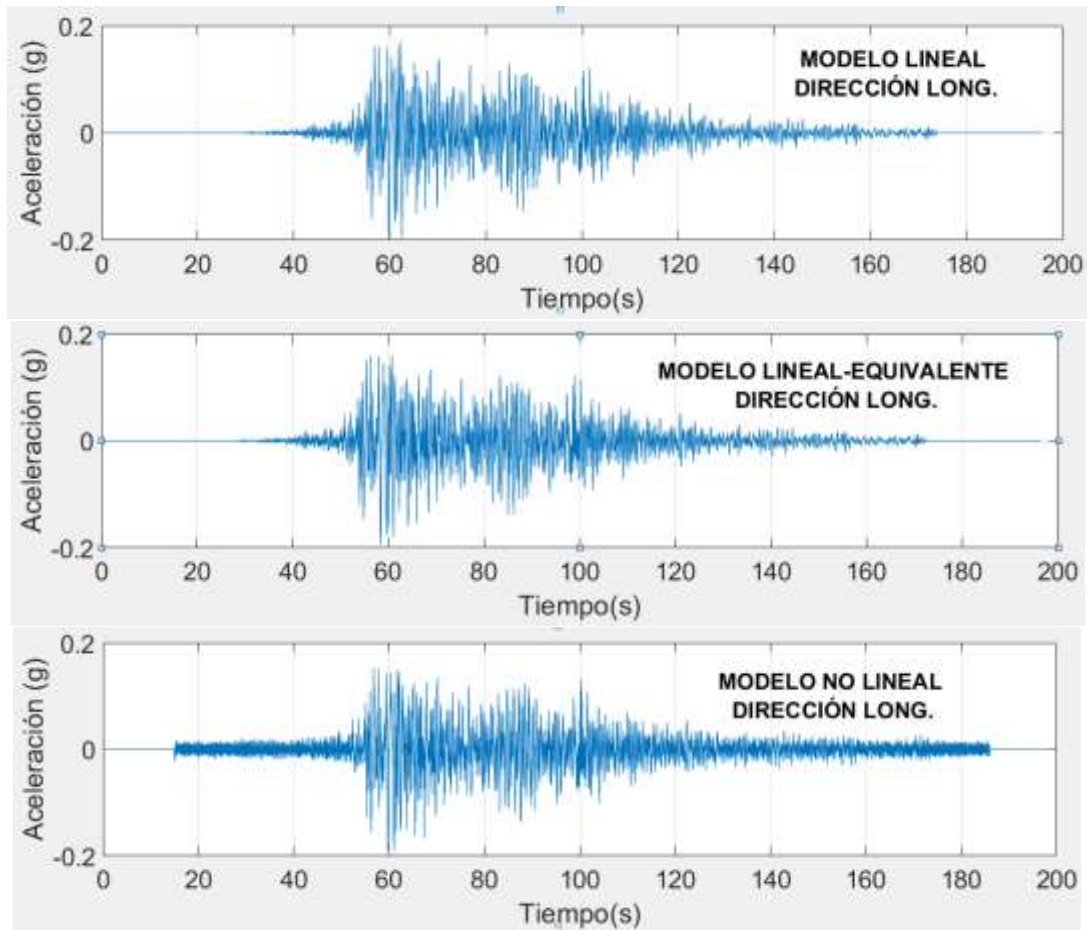


Figura 48 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en profundidad, estación Hualañé, (Elaboración propia)”

Registro	PGD [cm]	PGV [cm/s]	PGA [g]	Tef. [s]
Lineal	6.31	27.20	0.196	56.50
Lineal-equivalente	6.80	28.32	0.194	55.67
No Lineal	6.68	28.03	0.191	60.87

Tabla 15 “Caracterización registros sísmicos en profundidad, estación Hualañé, (Elaboración propia)”

d) Estación Maipú

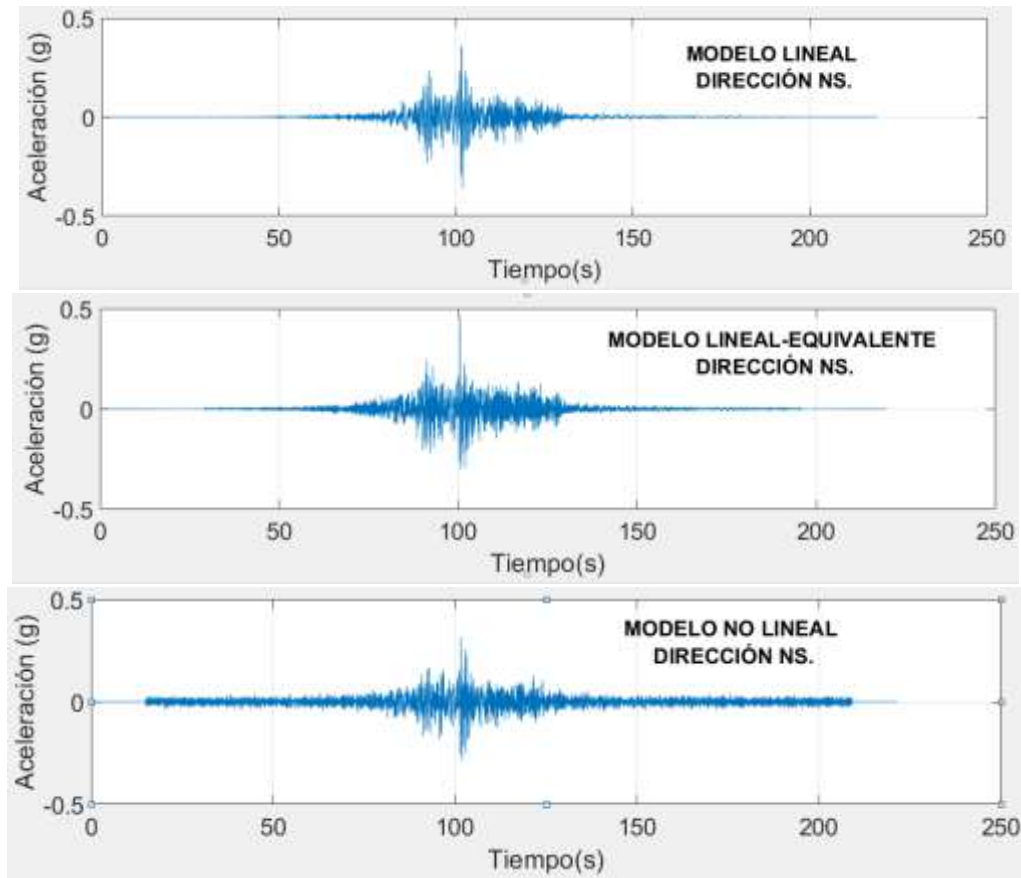


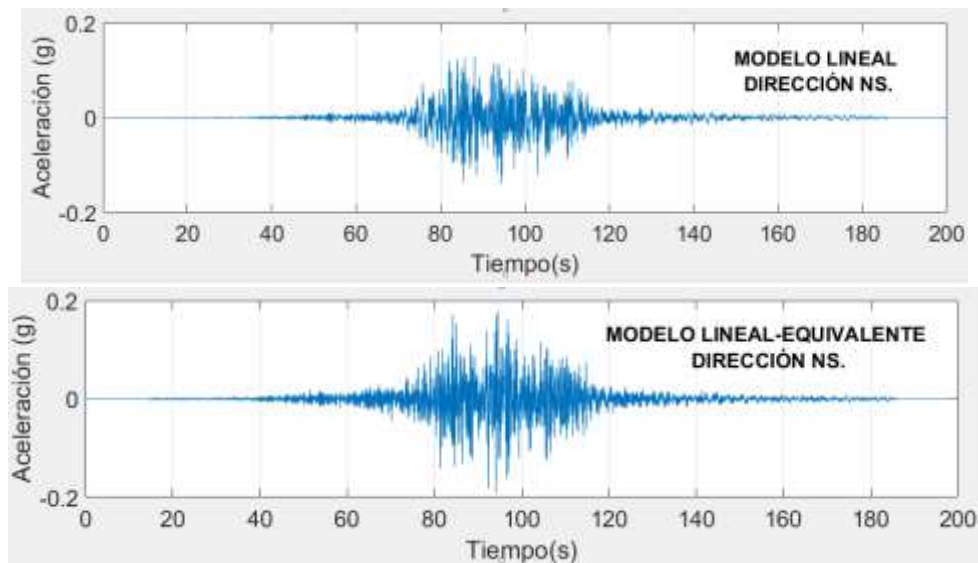
Figura 49 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en profundidad, estación Maipú, (Elaboración propia)”

Registro	PGD [cm]	PGV [cm/s]	PGA [g]	Tef. [s]
Lineal	6.48	31.17	0.365	33.18
Lineal-equivalente	5.61	20.97	0.462	38.70
No Lineal	5.53	21.74	0.318	98.45

Tabla 16 “Caracterización registros sísmicos en profundidad, estación Maipú, (Elaboración propia)”



e) Estación Peñalolén



**Figura 50 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en profundidad, estación Peñalolén, (Elaboración propia)”**

Registro	PGD [cm]	PGV [cm/s]	PGA [g]	Tef. [s]
Lineal	5.11	16.69	0.167	35.15
Lineal-equivalente	3.34	14.92	0.192	34.53
No Lineal	3.26	14.25	0.220	36.77

**Tabla 17 “Caracterización registros sísmicos en profundidad, estación Peñalolén, (Elaboración propia)”**

Los resultados particulares obtenidos en cada uno de los enfoques de análisis, en las estaciones de Angol, Maipú y Peñalolén, correspondientes a las figuras N°46, N°49 y N°50, no presentan una tendencia, ni semejanza en la caracterización de los registros, presentándose notorias variaciones en cada uno de los parámetros que comparan en las tablas N°13, N°16 y N°17, respectivamente. En cambio, para las estaciones de Constitución y Hualañé, los registros obtenidos en cada una de las estaciones sismográficas existe una cercanía en la caracterización y forma de los registros obtenidos para cada enfoque de análisis.

El registro de aceleración obtenido en profundidad correspondiente al análisis no lineal, presenta amplificaciones en términos de amplitud de aceleración, diferenciándose en términos de caracterización de los demás registros obtenidos, dado que se generan aumentos en el ancho de banda y duración de efectiva del registro temporal.



### 5.2.2 Espectros de respuestas de pseudo-aceleración obtenidos en profundidad

Para los resultados obtenidos en profundidad, ilustrados en las figuras N°51 hasta la N°55, es fundamental observar si existe una tendencia en la respuesta sísmica en todas las estaciones en estudio, como también, si a nivel individual los resultados obtenidos para ambos sentidos horizontales de medición tienden a asemejarse.

Se presentan los resultados obtenidos para cada estación sismográfica, en cada una de las direcciones horizontales y análisis aplicados. Los espectros de respuestas se grafican mediante el método Newmark Beta con 5% amortiguamiento.

#### a) Estación Angol

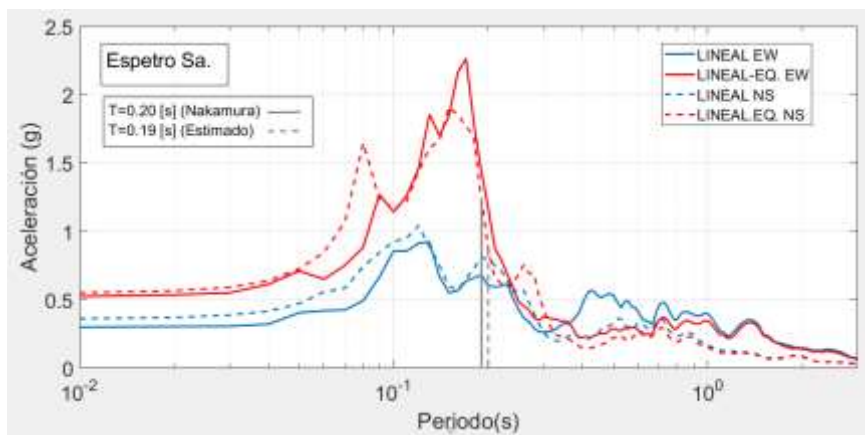


Figura 51 “Espectro de pseudo-aceleración en profundidad, estación Angol, (Elaboración propia)”

#### b) Estación Constitución

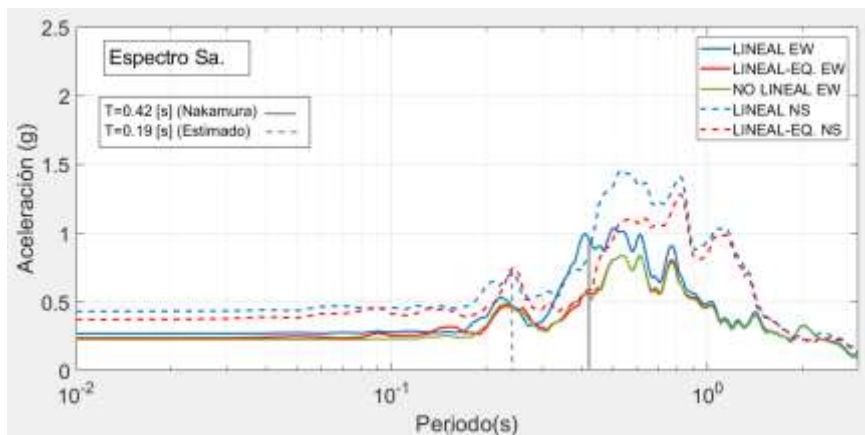


Figura 52 “Espectro de pseudo-aceleración en profundidad, estación Constitución, (Elaboración propia)”

c) Estación Hualañé

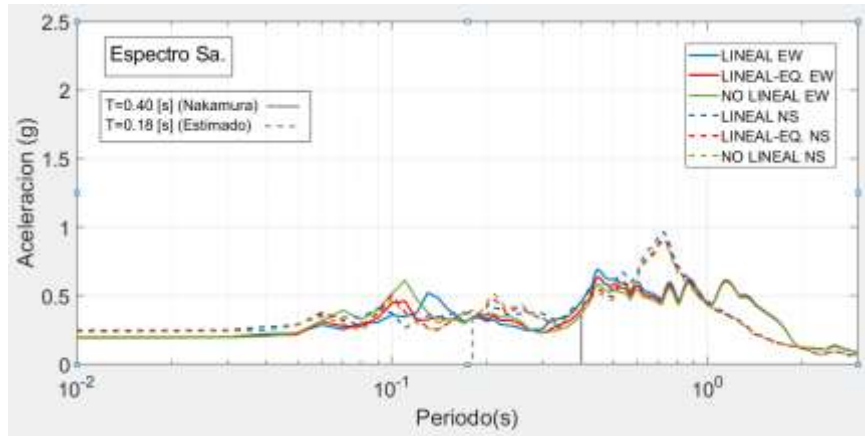


Figura 53 “Espectro de pseudo-aceleración en profundidad, estación Hualañé, (Elaboración propia)”

d) Estación Maipú

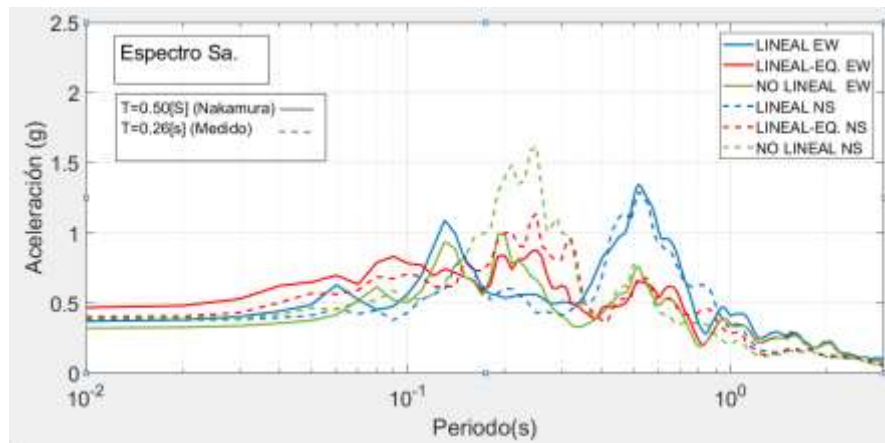


Figura 54 “Espectro de pseudo-aceleración en profundidad, estación Maipú, (Elaboración propia)”

e) Estación Peñalolén

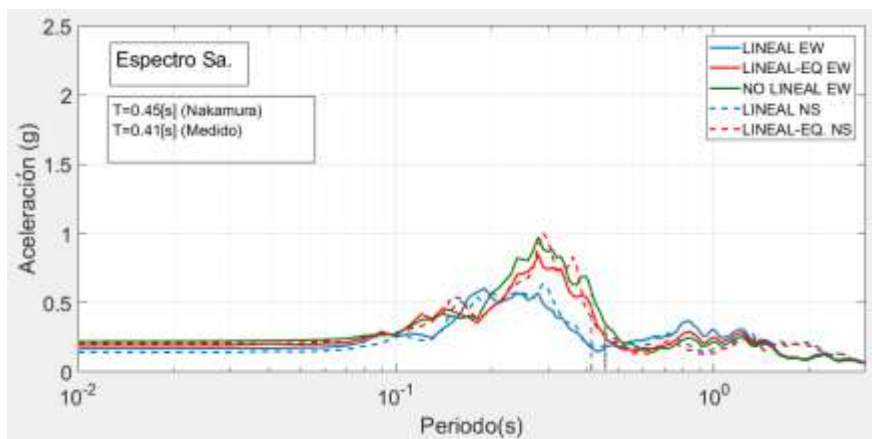


Figura 55 “Espectro de pseudo-aceleración en profundidad, estación Peñalolén, (Elaboración propia)”

En las demandas sintéticas obtenidas en profundidad, para cada estación sismográfica en análisis, no logra observarse una tendencia transversal y rotunda, que indique como podría llegar a ser la respuesta sísmica a niveles tan alejados de la superficie como los estudiados en esta investigación.

Las respuestas sísmicas obtenidas en profundidad para localidades relativamente cercanas, como lo son las estaciones Maipú-Peñalolén (figuras N°54 y N°55) y Hualañé-Constitución (figuras N°52 y N°53), así como también en sitios con la misma clasificación sísmica de suelo, difieren entre sí, imposibilitando agrupar una tendencia en los resultados obtenidos.

Se observa que cada respuesta estimada en las figuras N°51 a la N°55, se encuentra aún muy influenciada por el periodo fundamental de vibración en donde se asienta cada depósito, denotando que aún estamos en presencia de un suelo que pudiera no ser lo suficientemente rígido como un material rocoso.

Analizando los resultados pertenecientes netamente a una estación sismográfica, se divisa que los resultados obtenidos en ambas direcciones horizontales de medición, aplicando un enfoque de modelación lineal-equivalente, los pseudo-espectros de respuesta en aceleración son parecidos entre sí, destacando por sobre los otros enfoques realizados, como mejor pudo observarse en la figura N°53 y N°55.

A pesar de las amplificaciones observadas en los registros sísmicos sintéticos en profundidad obtenidas en modelos no lineales, los espectros de respuestas respectivos a este enfoque presentan un comportamiento que no se aleja de los conseguidos mediante el enfoque lineal-equivalente como pudo observarse en todas las figuras pertenecientes a este ítem.

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se obtienen demandas sísmicas sintéticas que no permiten marcar una tendencia en la respuesta sísmica en profundidad. Lo anterior se debe a la variación, tanto al distanciamiento respecto del epicentro, como del tipo de suelo correspondiente a cada estación sismográfica estudiada. A pesar de no existir una similitud en los resultados obtenidos en profundidad, estos se ajustan a la respuesta real medida en superficie, siendo una demanda sintética válida en profundidad.

El estudio de amplificación local, permite la estimación la respuesta sísmica a nivel de superficie de un sitio, siendo fundamental en la mitigación de daño sísmico ante eventos telúricos.

De los enfoques de modelación que idealizan la naturaleza no lineal del suelo, el enfoque lineal-equivalente es quien requiere de menor cantidad de información acerca del suelo, siendo más simple y rápido, representando de excelente manera las propiedades dinámicas del suelo, por lo tanto se recomienda su aplicación.

El no considerar efectos de presión de poros, como también la ausencia del nivel freático, como se ejecutó en las modelaciones no lineales, tiende a desajustar los resultados asociados a modelos no lineales, dado que estos parámetros no incorporados son fundamentales para representar la variación de las propiedades dinámicas del suelo en este tipo de enfoques, se recomienda que en futuros análisis de éste tipos, dichos efectos sean considerados o bien, elaborar modelos lineales-equivalentes.

La deconvolución aplicada en modelos lineales, obtiene un considerable ajuste a nivel de superficie en la mayoría de las estaciones sismográficas, a pesar de aquello, este enfoque de modelación en las bases y limitaciones en que se sustenta, no permite incursionarse en casos donde las deformaciones unitarias alcanzan valores mayores, siendo no aconsejable su utilización.

El enfoque lineal-equivalente, es quien tiene mejor validación y caracterización en los resultados obtenidos en superficie, mientras que en profundidad, las demandas obtenidas son similares en ambos sentidos horizontales de estudio. Por su parte, los registros sintéticos obtenidos en modelos no lineales, presentan sobre-amplificaciones en frecuencias cercanas al modo fundamental de vibración del depósito, obteniéndose demandas en profundidad con una caracterización no válida. A pesar de los efectos negativos generados, éstos generan una respuesta en superficie que se ajusta

de manera aceptable a la respuesta medida en las estaciones sismográficas durante el sismo utilizado.

Los resultados obtenidos por el análisis lineal y no lineal, tienden a asemejarse en algunas estaciones sismográficas, esto se debe a que se pudieron haber inducido bajas deformaciones de corte en ambos modelos.

No se genera una tendencia en las demandas sintéticas generadas en profundidad para las diferentes estaciones sismográficas, siendo el principal factor el hecho de que a los 50-60 [m] de profundidad a la que llegan las prospecciones, los estratos son modelados en el software como manto rocoso, siendo en la realidad aún algún tipo de suelo.

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Aki, K. (1998). *American Society of Civil Engineering*. Geotechnical Special Publication, 2p. 103-155.

Anderson, D. G. and Stokoe, K. H. (1978), "Shear modulus: A time-dependent soil property." *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM, Philadelphia, pp. 66-90.

Anil, K. Chopra. (2014). *Dinámica de Estructuras*, 4ta edición. University of California, Berkley.

Borcherdt. R. D. (1994). "Estimates of Site-Dependent Responses Spectra for Design", *Earthquake Spectra*, 10, 617-653.

Bowles, J.E. (1996) *Foundation Analysis and Design*. 5th Edition, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.

Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile, Avances en la zonificación sísmica de Chile. (2016). <http://www.csn.uchile.cl/avances-en-la-zonificacion-sismica-de-chile/>, enero 2019.

Comité Europeo de Normalizacion, CEN. (2011). Euro-código 8, Diseño sísmico de Estructuras.

Dobry, R. & Vucetic, M. (1987). "Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits," Proceedings, International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Mexico City, Vol. 2, pp. 51-87.

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. (2012). Informe geotécnico "Caracterización Geotécnica Estaciones de acelerógrafos de la Universidad de Chile" Santiago, Chile.

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, *Terremotos de Chile/ Earthquakes of Chile.*" (2012). <http://terremotos.ing.uchile.cl>. Acceso enero, 2019.

Godoy. C. A. (2013). Estudio de la respuesta de sitio en Santiago mediante el método lineal-equivalente. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.

Instituto Nacional de Normalizacion, INN. (2012). Diseño sísmico de edificios, Nch 433. Santiago, Chile.

International Code Council, ICC. (2012). International Building Code.

Isenhowe, W.M and Stokoe, K. H. (1981). Strain rate dependent shear modulus of San Francisco Bay Mud, Proceedings, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soils Dynamics, St. Louis, Missouri, Vol 2, pp, 597-602.

Kokushu, T., Yoshida, Y., and Esashi, Y. (1982). "Dynamic properties of soft clay for wide strain range," *Soils and Foundations*, Vol. 22. No. 4, pp 1-18.

Masing, G. (1926). "Eigenspannungen and Verfertigung beim Messing," Proceedings, 2nd International Congress on Applied Mechanics, Zurich."

Web Page OpenSees, ND Comands materials,(2018)  
[http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/NDMaterial\\_Command](http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/NDMaterial_Command), Octubre 2018.

Pitilakis, K. (2004). Site effects. In A. Ansaldo (Ed.), *Recent advances in earthquake geotechnical engineering and microzonation* (pp.149-197). Kluwer Academic Publishers.

Roesler, S. K. (1979). "Anisotropic stress modulus due to stress anisotropy," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. GT7, pp 871-880.

Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1970). "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses," Report EERC-70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Seed, H. B., Ugas, C. y Lysmer, J. (1976). "Site dependent spectra for earthquake-resistance design" *Bulletin Seismological Society of America*, 66, 221-243.

S. H. Ju. (2013). "A deconvolution Scheme for Determination of Seismic Loads In Finite-Element Analyses." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.103, No.1, pp. 258-267.

Skempton, A.W. (1986). Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation *Geotechnique*, Vol.36. No. 3. Pp. 425-447.

Silva, W. J. (1988) "Soil response to earthquake ground motion." EPRI Report NP-5747, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California"

Steven L. Kramer. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*, University of Washington, USA.

Stokoe, K. H., Lee, S. H. H., and Knox, D. P (1985). "Shear moduli measurements under true triaxial stresses." Proceedings, *Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions*, ASCE, New York, pp. 166-185.

Sun, J. I., Goleorkhim R., and Seed, H.B (1988). "Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils," Report No. EERC-88/15, Earthquake Engineering Reserach Center, University of California, Berkeley.

Universidad de Costa rica, Laboratorio de Ingenieria Sismica, 2011, "Efectos de Sitio" <http://www.lis.ucr.ac.cr/239>. Acceso febrero 2019.

Vucetic, M. and Dobry, R. (1991). "Effect of soil plasticity on cyclic response," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 1, pp. 89.107.

Yan, L. and Byrne, P. M. (1991) "Stress state and stress ratio effects in downhole and crosshole shear wave velocity test on sands," Proceedings, *2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soils Dynamics*, St. Louis, Misri, Vol. 1, pp.299-306.

Yuji Ishiyama, Dr. (2011). *Introduction to Earth Engineering and Seismic Codes in the World*. Hokkaido University, Japan.



## 8 ANEXOS

### Índice de Anexos

Anexo A “Modelación estaciones sismográficas restantes”.....	65
Anexo B “Síntesis Respuesta sísmica lineal”.....	78
Anexo C “Resultados obtenidos restantes“.....	80

## ANEXO A

### MODELACIÓN ESTACIONES SISMOGRÁFICAS RESTANTES

#### Caracterización demás estaciones seleccionadas

De las estaciones sismográficas chilenas seleccionadas, se extrae el registro en el tiempo de aceleraciones para ambos sentidos horizontales de medición N-S (Longitudinal) y E-W (Transversal) y características geofísicas relevantes para la modelación de las estaciones.

#### 8.1.1 Estación Angol

Estación sismográfica está ubicada en la comuna de Angol, Región de la Araucanía en donde sus principales resultados de medición son los siguientes

Dirección	Aceleración Máxima [g]
NS	0,928
V	0,281
EW	0,681

Tabla A 1 (Elaboración propia)”

#### a) Dirección EW

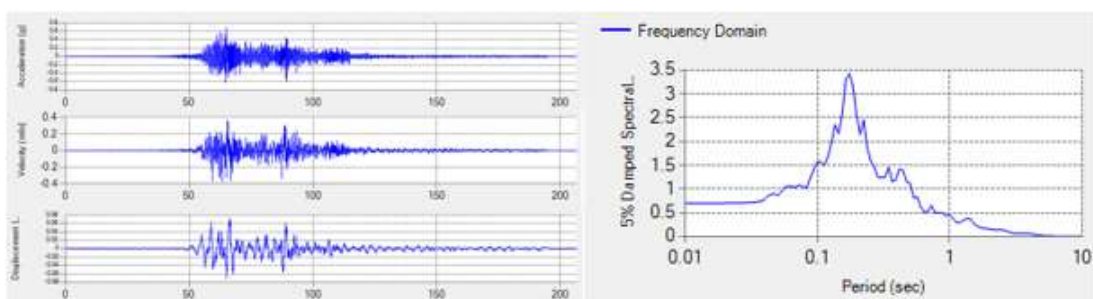


Figura A 1 (Elaboración propia)”

#### b) Dirección N-S:

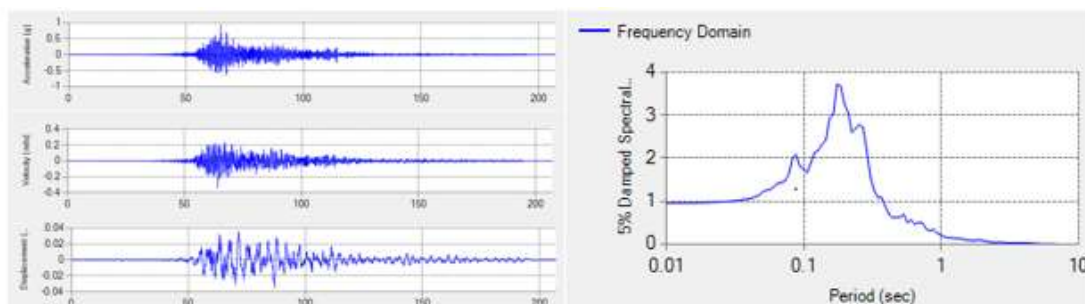


Figura A 2 “Set información medida, estación Angol-NS, (Elaboración propia)””

Las principales propiedades geofísicas medidas en terreno y laboratorio que permitieron caracterizar a los perfiles estratigráficos de las estaciones y realizar la modelación en DeepSoil, son las figuradas en el siguiente log resumen:

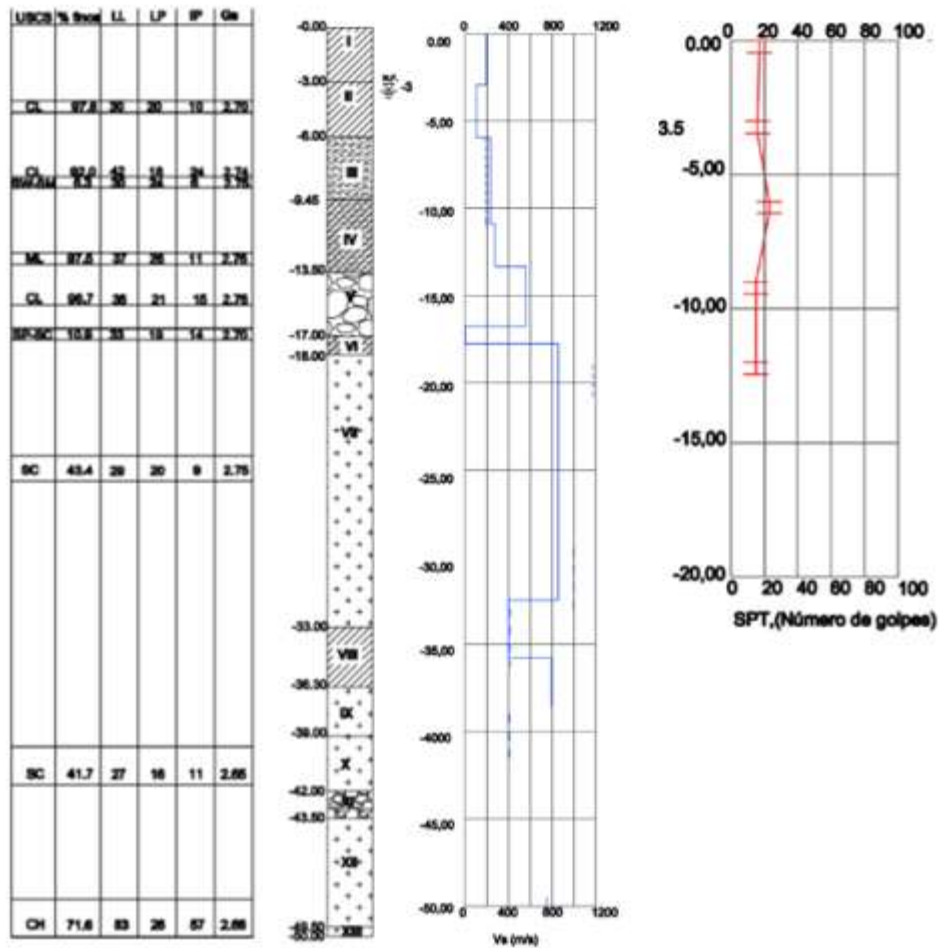


Figura A 3 “Set de propiedades geotécnicas de interés, estación Angol, (Elaboración propia)”

### 8.1.2 Estación Hualañé

Estación sismográfica está ubicada en la comuna de Hualañé, Región del Maule en donde sus principales resultados de medición son los siguientes

#### a) Dirección Transversal

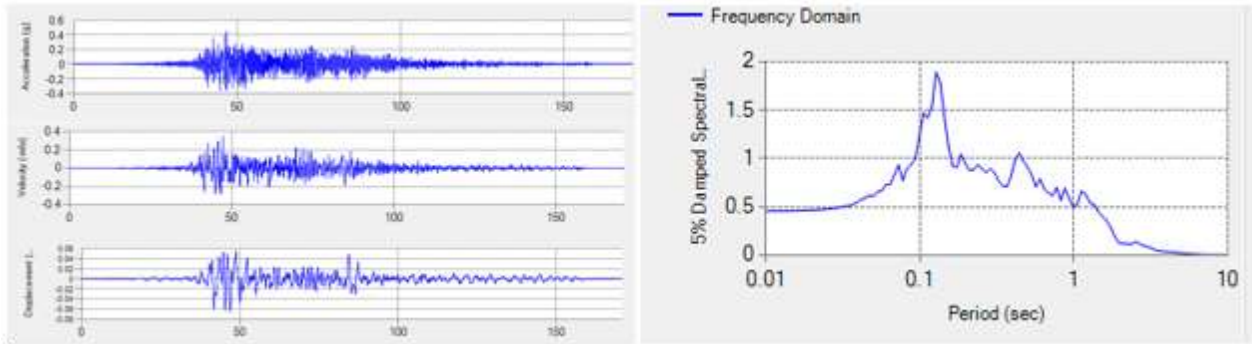


Figura A 4 “Set informacion medida, estación Hualañé-Transv., (Elaboración propia)”

#### b) Dirección Longitudinal

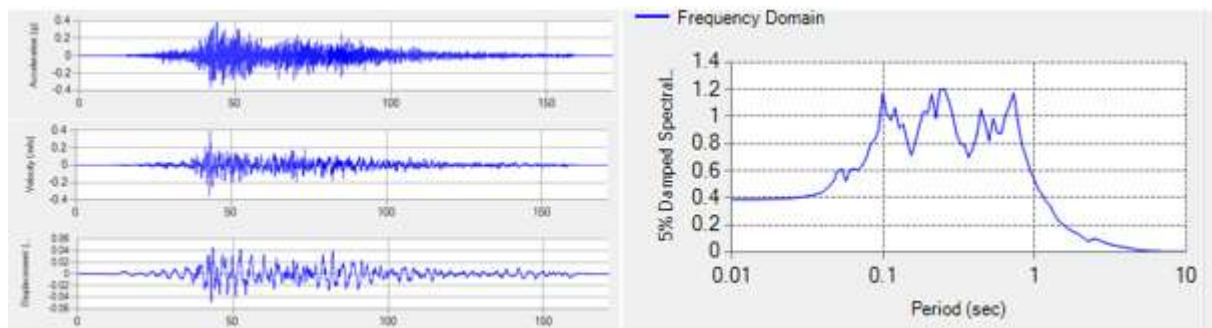


Figura A 5 “Set informacion medida, estación Hualañé-Transv., (Elaboración propia)”

Las principales propiedades geofísicas medidas en terreno y laboratorio que permitieron caracterizar a los perfiles estratigráficos de las estaciones y realizar la modelación en DeepSoil, son las figuradas en el siguiente log resumen:

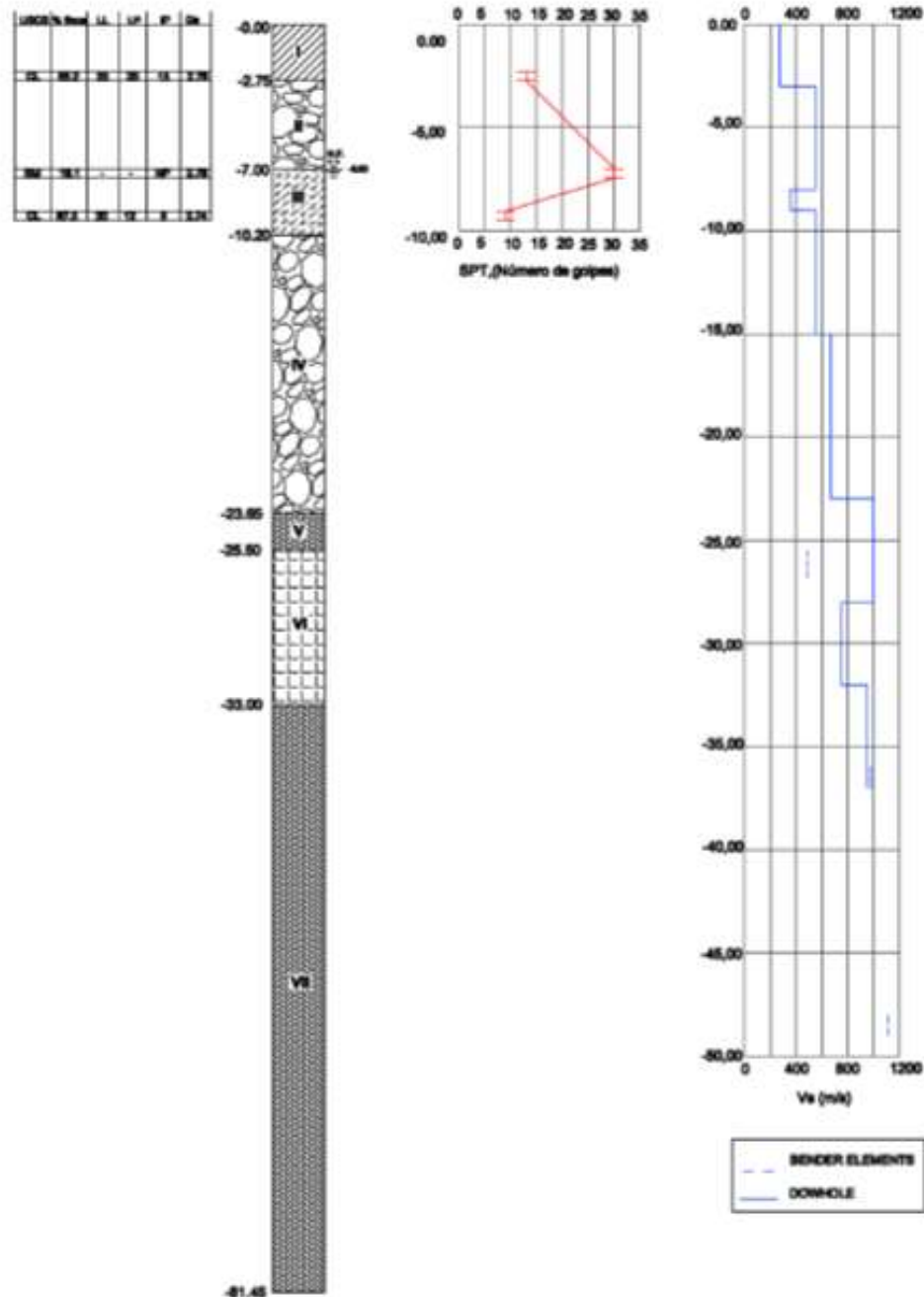


Figura A 6 “Set de propiedades geotécnicas de interés, estación Hualañé, (Elaboración propia)”

### 8.1.3 Estación Maipú

Estación sismográfica está ubicada en la comuna de Maipú, Región Metropolitana en donde sus principales resultados de medición son los siguientes

Dirección	Aceleración Máxima [g]
NS	0,561
V	0,240
EW	0,478

Tabla A 2 (Elaboración propia)”

a) Direccion E-W:

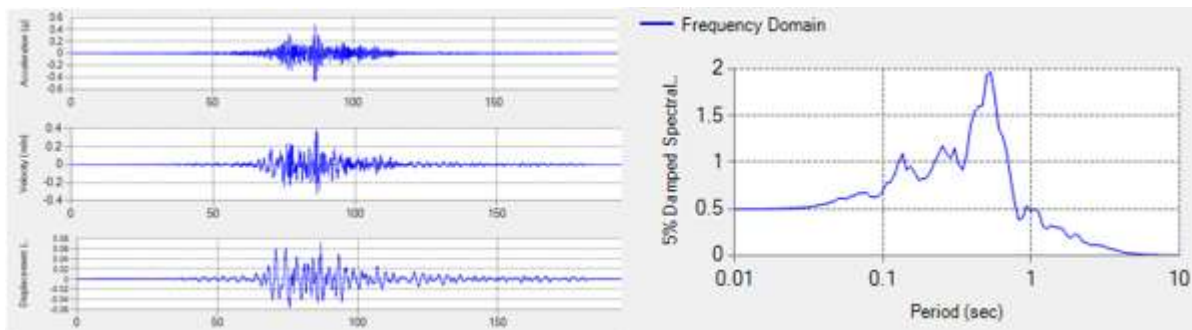


Figura A 7 (Elaboración propia)”

b) Direccion N-S:

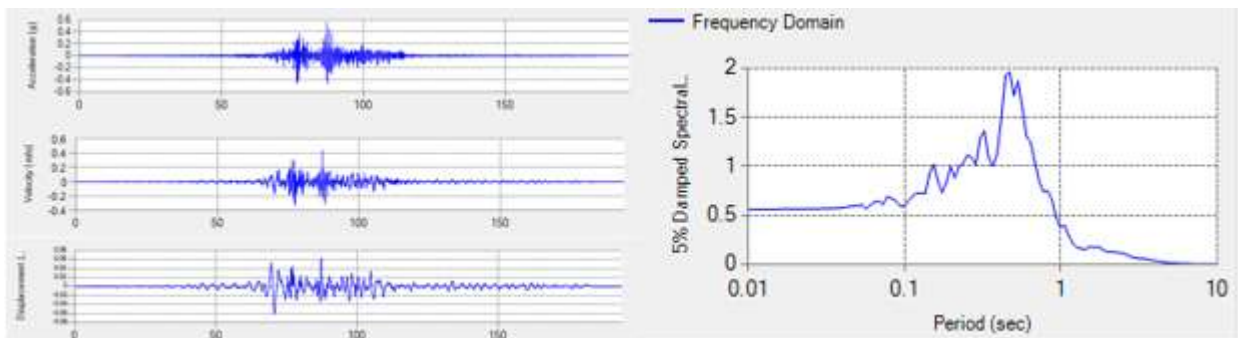


Figura A 8 “Set información medida, estación Maipú-NS, (Elaboración propia)”

Las principales propiedades geofísicas medidas en terreno y laboratorio que permitieron caracterizar a los perfiles estratigráficos de las estaciones y realizar la modelación en DeepSoil, son las figuradas en el siguiente log resumen:

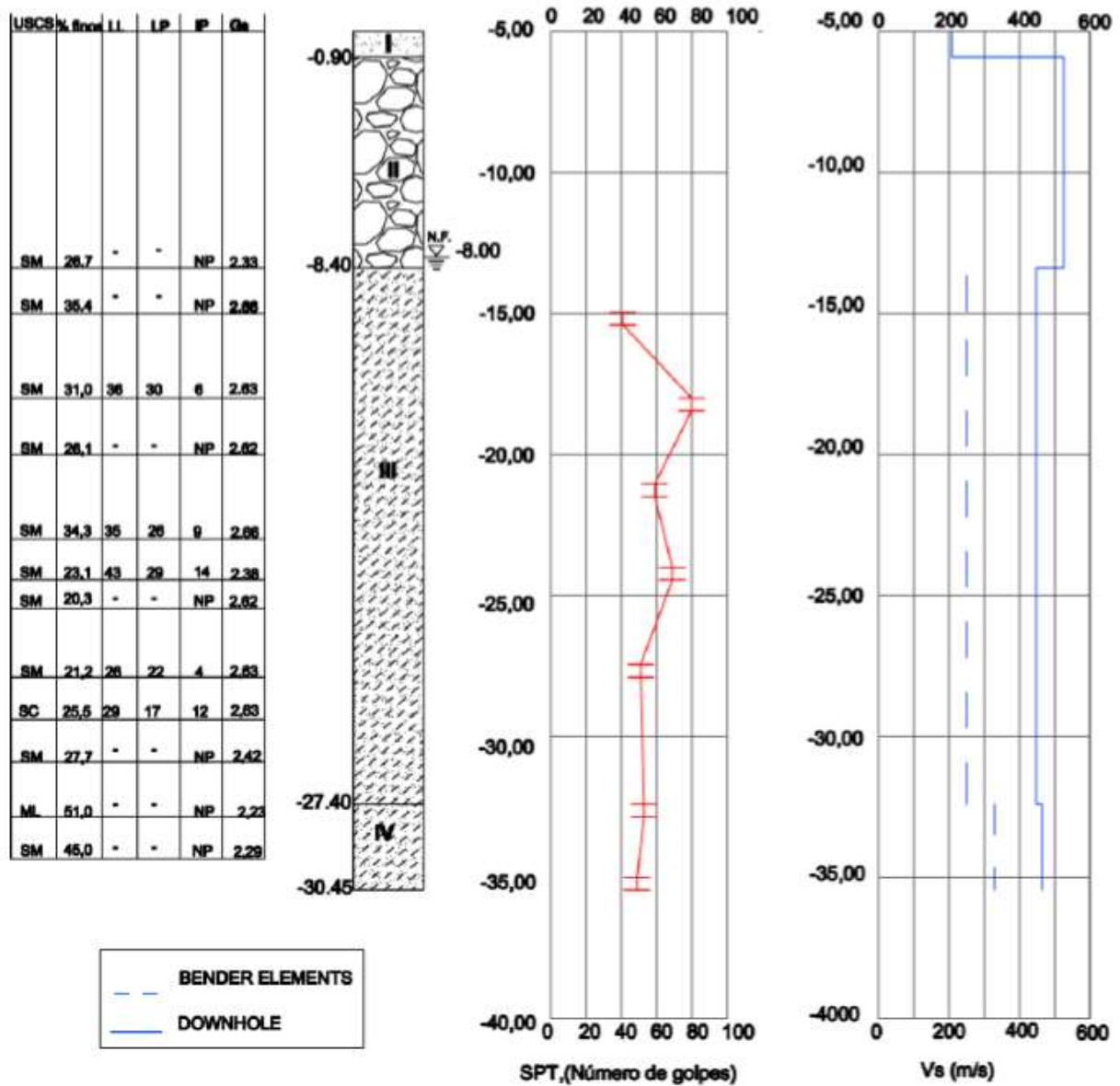


Figura A 9 “Set de propiedades geotécnicas de interés, estación Maipú, (Elaboración propia)”

### 8.1.4 Estación Peñalolén

Estación sismográfica está ubicada en la comuna de Maipú, Región Metropolitana en donde sus principales resultados de medición son los siguientes

Dirección	Aceleración Máxima [g]
NS	0,561
V	0,240
EW	0,478

Tabla A 3 (Elaboración propia)

a) Dirección E-W:

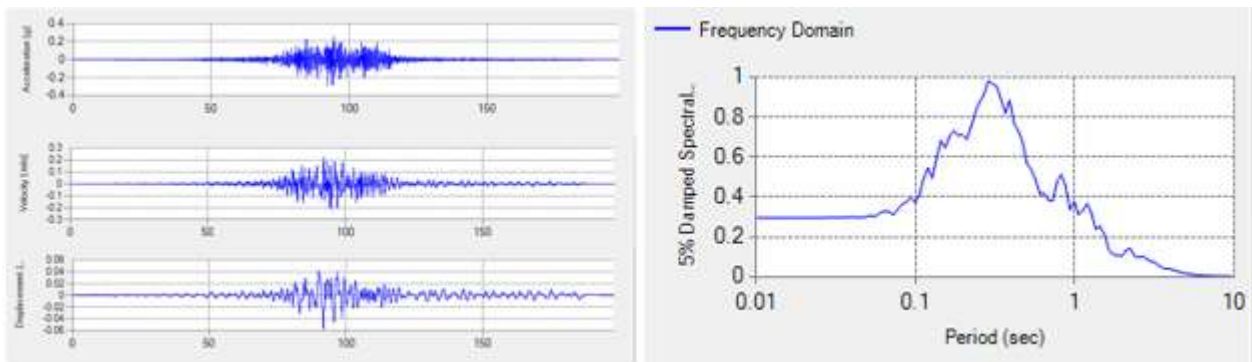


Figura A 10 “Set informacion medida, estación Peñalolén-EW, (Elaboración propia)”

b) Dirección N-S:

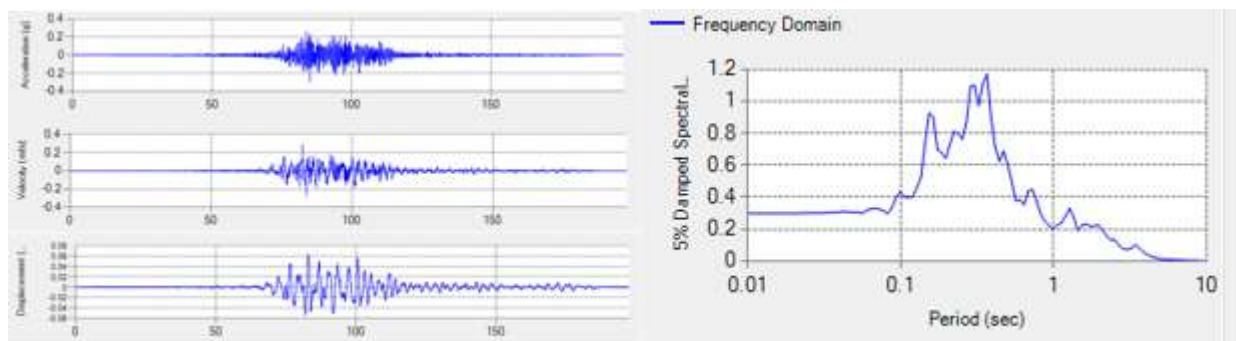


Figura A 11 “Set informacion medida, estación Peñalolén-NS”, (Elaboración propia)”



Las principales propiedades geofísicas medidas en terreno y laboratorio que permitieron caracterizar a los perfiles estratigráficos de las estaciones y realizar la modelación en DeepSoil, son las figuradas en el siguiente log resumen:

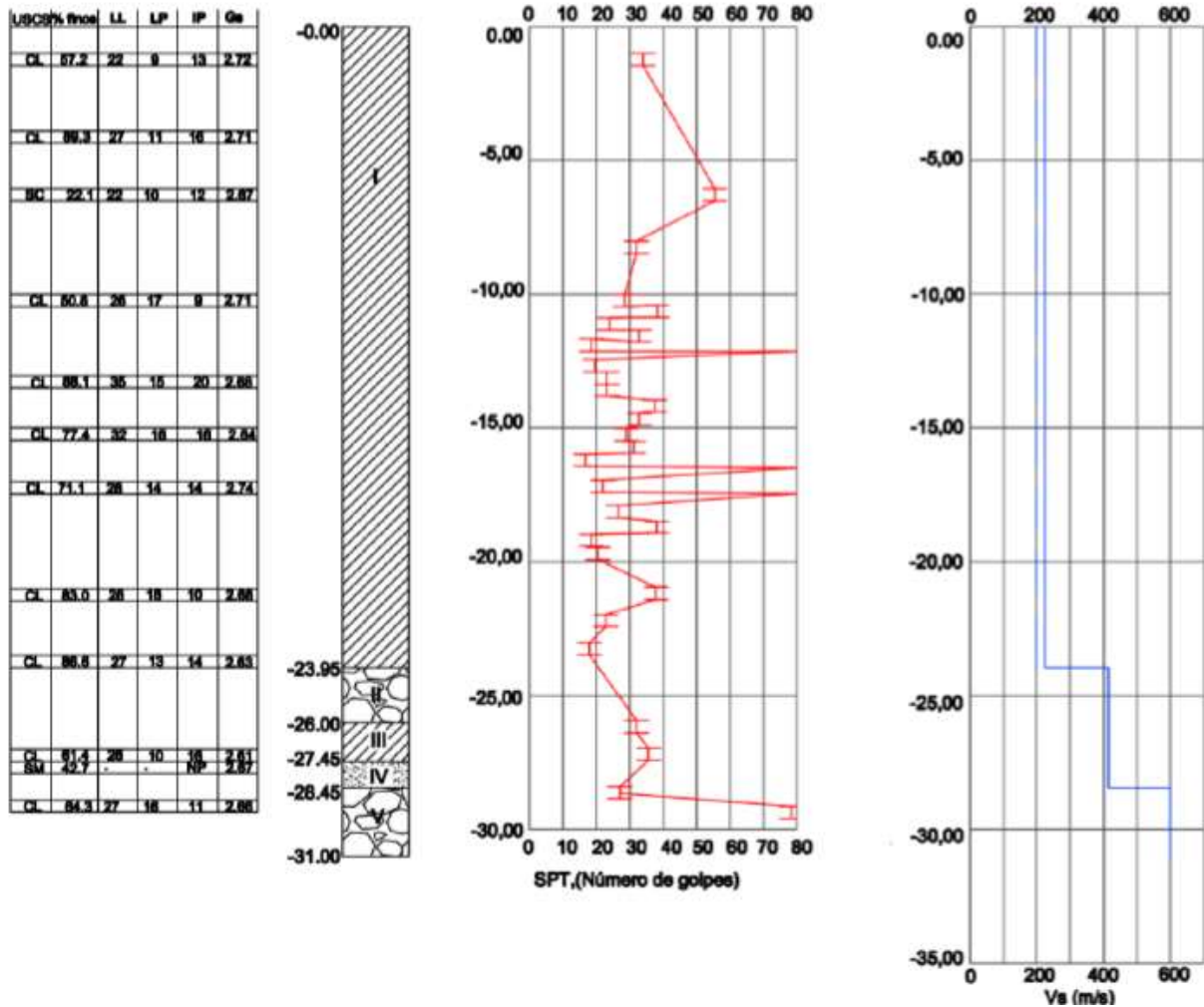


Figura A 12 “Set de propiedades geotécnicas de interés, estación Peñalolén, (Elaboración propia)”

## 8.2 Convergencia deformaciones unitarias de corte

Para el análisis no lineal, en una modelación lineal-equivalente, los niveles de deformación de corte asociados tanto para el módulo de corte y razón de amortiguamiento en las curvas empíricas deben tender a ser los mismos. Es por ello que tras cierto número de iteraciones se obtienen los siguientes niveles de convergencia para cada una de las estaciones sismográficas:

### a) Estación Angol

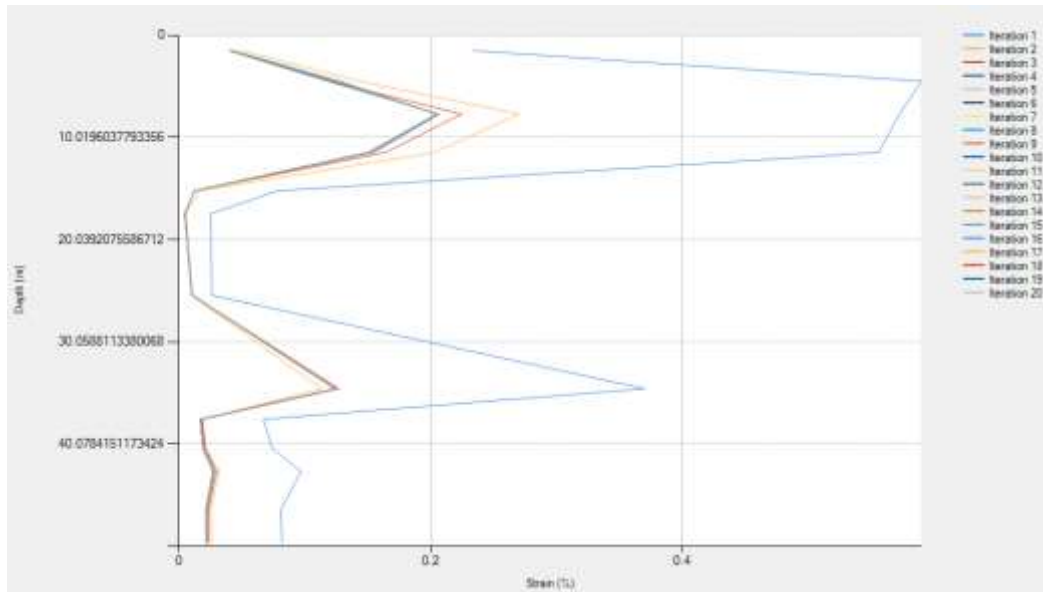


Figura A 13 “Convergencia deformación de corte, estación Angol, (Elaboración propia)”

### b) Estación Constitución

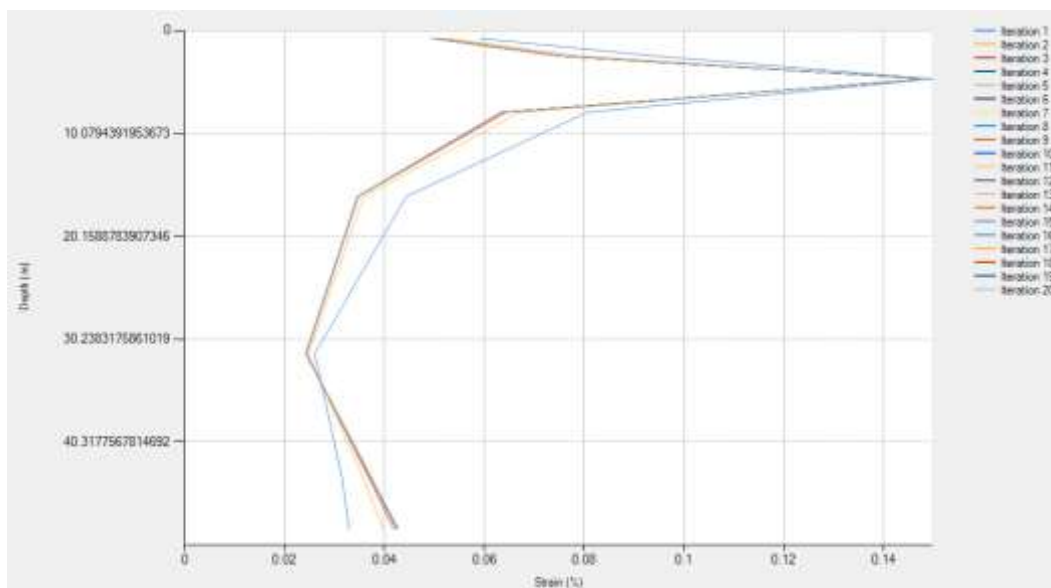


Figura A 14 “Convergencia deformación de corte, estación Constitución, (Elaboración propia)”

c) Estación Hualañé

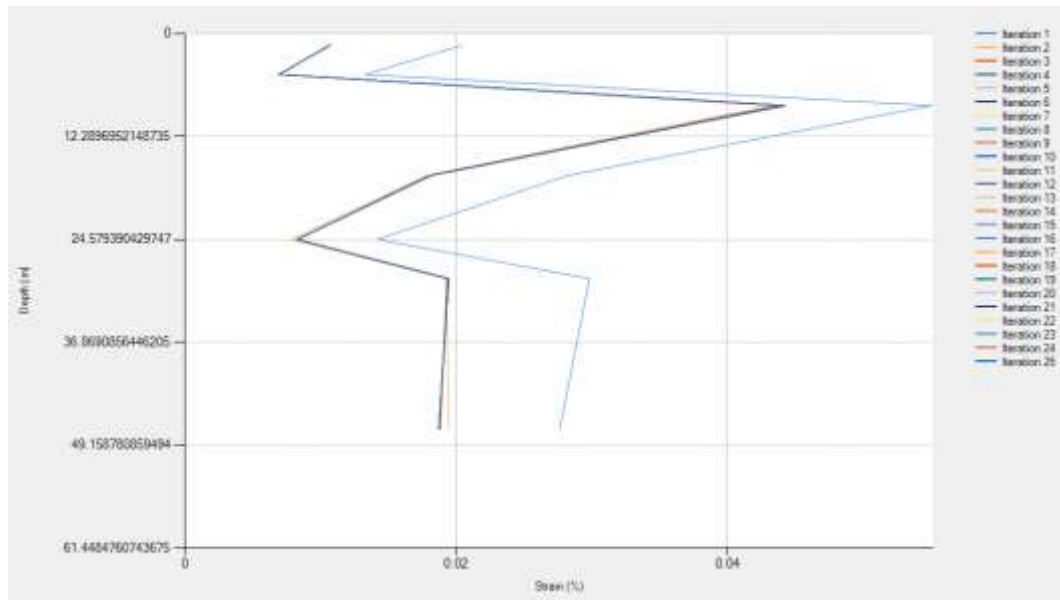


Figura A 15 “Convergencia deformación de corte, estación Hualañé, (Elaboración propia)”

d) Estación Maipú

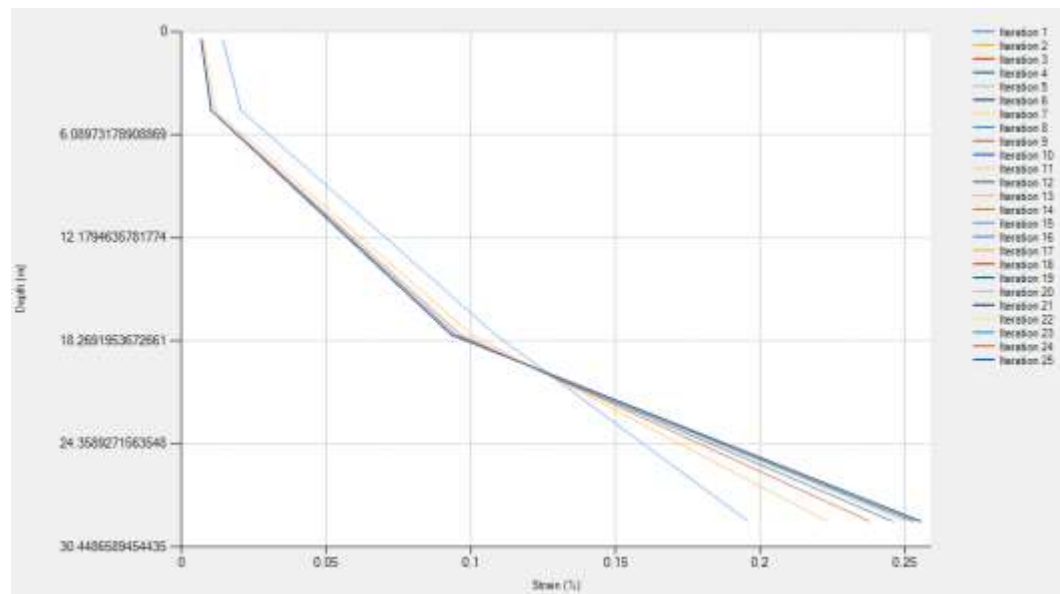


Figura A 16 “Convergencia deformación de corte, estación Maipú, (Elaboración propia)”

e) Estación Peñalolén

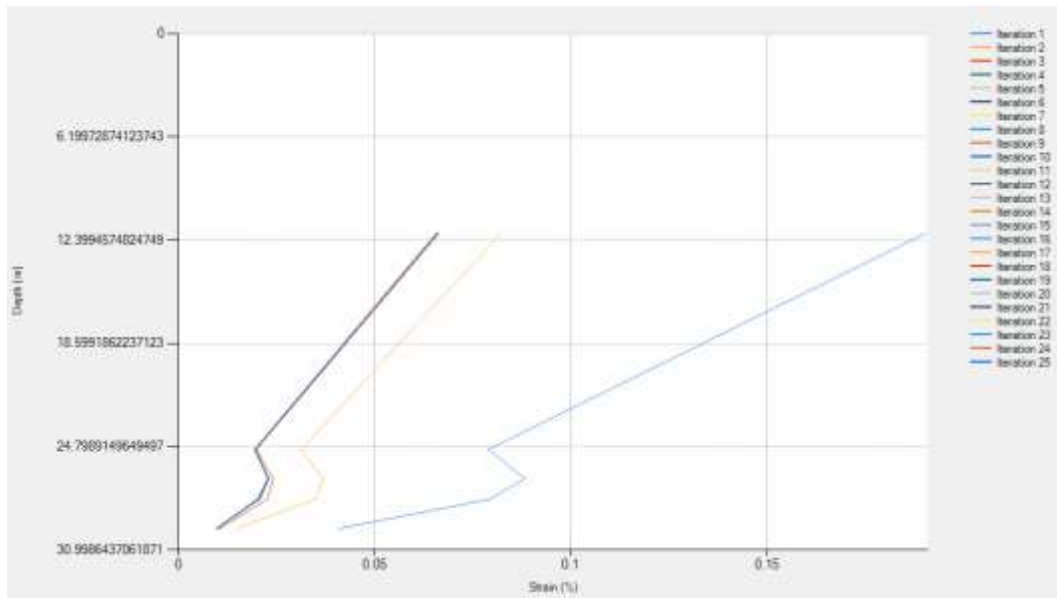


Figura A 17 “Convergencia deformación de corte, estación Peñalolén, (Elaboración propia)”

## ANEXO B

## SÍNTESIS RESPUESTA SÍSMICA LINEAL

## 8.3 Respuesta sísmica de sistemas lineales de 1GDL

La respuesta sísmica de sistemas lineales de 1GDL sometido a aceleraciones de terreno  $u_g(t)$ :

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n \dot{u} + \omega_n^2 u = -\ddot{u}_g(t)$$

**Ecuación B 1 “Respuesta sistema lineal”**

En donde resulta claro que la respuesta sísmica del sistema dependerá solo de la frecuencia natural  $\omega_n$  o del periodo natural  $T_n$  del sistema y su fracción de amortiguamiento  $\xi$  (Anil K. Chopra)

Dado que la aceleración de un terreno ante un sismo varía irregularmente, la solución analítica de la ecuación de movimiento debe descartarse. Por lo tanto, se requieren métodos numéricos para determinar la respuesta estructural.

## 8.3.1 Método Newmark Beta

En 1959, N. M. Newmark desarrollo una familia de métodos paso a paso en el tiempo basado en las siguientes ecuaciones:

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1 - \gamma) \Delta t] \ddot{u}_i + (\gamma \Delta t) \ddot{u}_{i+1}$$

**Ecuación B 2 “Condición N°1, método Newmark Beta”**

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t) \dot{u}_i + [(0.5 - \beta)(\Delta t)^2] \ddot{u}_i + [\beta(\Delta t)^2] \ddot{u}_{i+1}$$

**Ecuación B 3 “Condición N°2, método Newmark Beta”**

Donde las variables “ $\beta$ ” y “ $\gamma$ ” corresponden a constantes que definen la variación de la aceleración durante un espacio de tiempo y determina las características de estabilidad y precisión del método.

Para casos especiales de los métodos propuestos por Newmark, existe uno que describe supuestos de que la variación de la aceleración durante un paso de tiempo es constante, igual a la aceleración promedio o que varía linealmente. Para la estimación de la solución del sistema establece el siguiente procedimiento para sistemas lineales.

Casos especiales

- (1) Método de la aceleración promedio constante ( $\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{4}$ )  
 (2) Método de la aceleración lineal ( $\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{6}$ )

1.0 Cálculos iniciales

1.1  $\ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - ku_0}{m}$ .

1.2 Seleccione  $\Delta t$ .

1.3  $a_1 = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}m + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}c$ ;  $a_2 = \frac{1}{\beta\Delta t}m + \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1\right)c$ ; y

$a_3 = \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)m + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)c$ .

1.4  $\hat{k} = k + a_1$ .

2.0 Cálculos para cada paso de tiempo,  $i = 0, 1, 2, \dots$

2.1  $\hat{p}_{i+1} = p_{i+1} + a_1 u_i + a_2 \dot{u}_i + a_3 \ddot{u}_i$ .

2.2  $u_{i+1} = \frac{\hat{p}_{i+1}}{\hat{k}}$ .

2.3  $\dot{u}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}(u_{i+1} - u_i) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right)\dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{u}_i$ .

2.4  $\ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}(u_{i+1} - u_i) - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{u}_i - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\ddot{u}_i$ .

3.0 Repetición para el siguiente paso de tiempo. Reemplace  $i$  por  $i + 1$  y aplique los pasos 2.1 a 2.4 para el siguiente paso de tiempo.

**Figura B 1 “Metodología Newmark Bheta, Anil. K. Chopra, (2014)”**

### 8.3.2 Construcción de espectros de respuesta

La elaboración de espectros de respuestas que proporcionan un medio conveniente para resumir la respuesta máxima de todos los posibles sistemas lineales de 1GDL. La grafica consiste en definir un valor máximo de una cantidad de respuesta como una función del periodo natural  $T_n$  del sistema para un valor de amortiguamiento  $\xi$  fijo.

$$u_o(T_n, \xi) \equiv \max_t |u(t, T_n, \xi)|$$

$$\dot{u}_o(T_n, \xi) \equiv \max_t |\dot{u}(t, T_n, \xi)|$$

$$\ddot{u}_o(T_n, \xi) \equiv \max_t |\ddot{u}(t, T_n, \xi)|$$

**Figura B 2 “Obtencion de espectros de respuesta, Anil. K. Chopra, (2014)”**

En donde un espectro de respuesta de pseudo deformación es una gráfica de  $u_o$  en función de  $T_n$  para un  $\xi$  fijo. Una gráfica similar es para  $\dot{u}_o$  es el espectro de respuesta de velocidad relativa y para  $\ddot{u}_o$  es el espectro de respuesta de pseudo-aceleración, Anil K. Chopra (2011).

## ANEXO C

### RESULTADOS OBTENIDOS RESTANTES

#### 8.4 Validación resultados no mostrados.

##### 8.4.1 Registros sísmicos medidos en superficie

Se muestran a continuación los registros sísmicos medidos en superficie y los registros sintéticos generados en profundidad y sus respectivas caracterizaciones. Los resultados graficados representan una dirección horizontal faltante en la etapa de resultados mostrados.

a) Estación Angol, dirección NS:

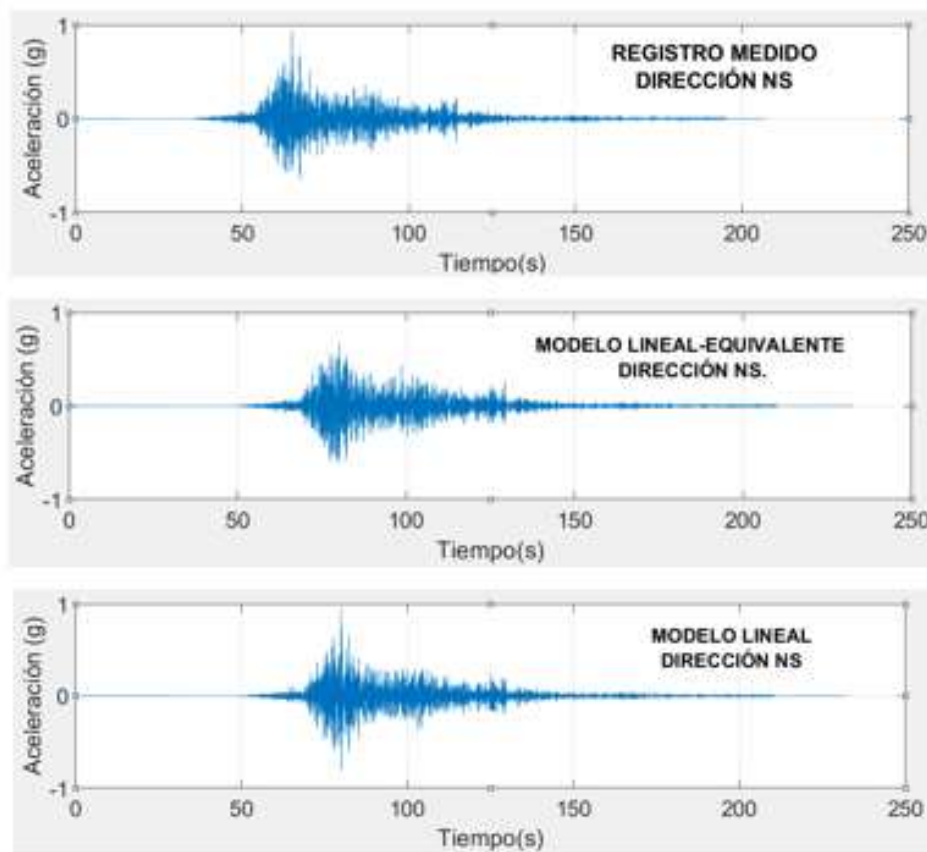


Figura C 1 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en superficie estación Angol, (Elaboración propia)”

b) Estación Constitución, dirección transversal:

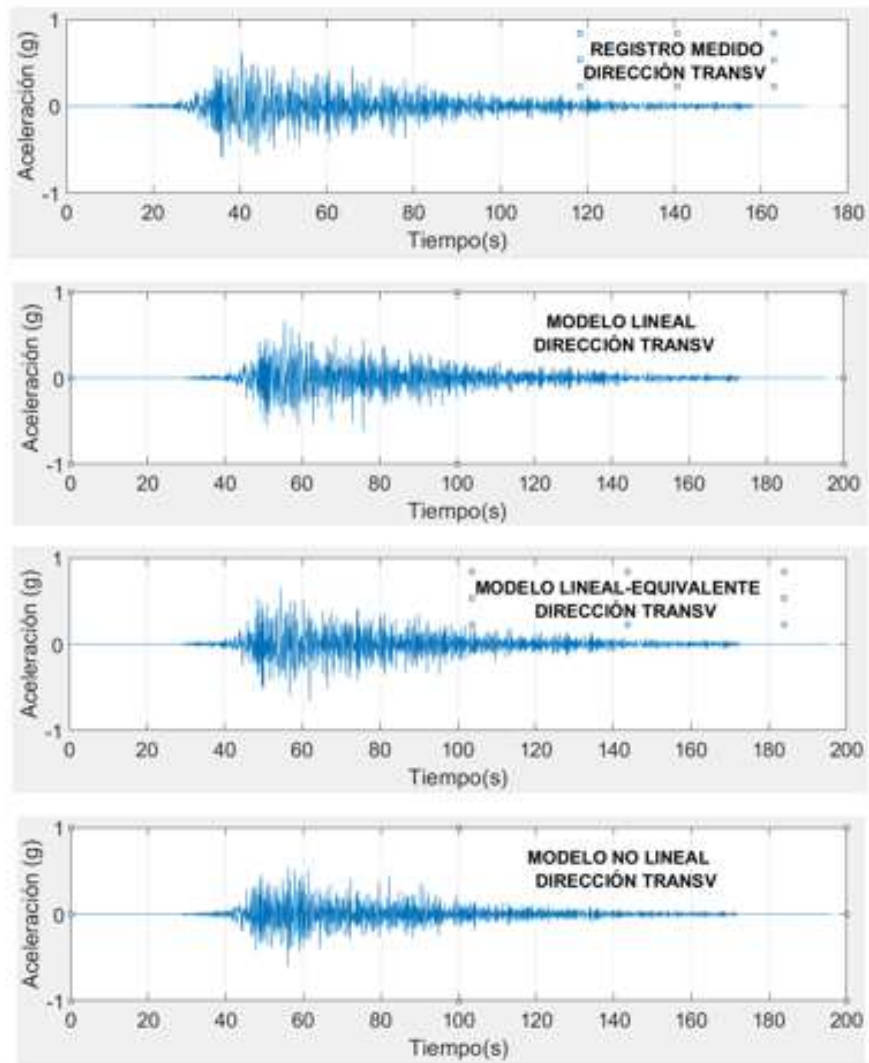


Figura C 2 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en superficie, estación Constitución, (Elaboración propia)”



c) Estación Hualañé, dirección Longitudinal:

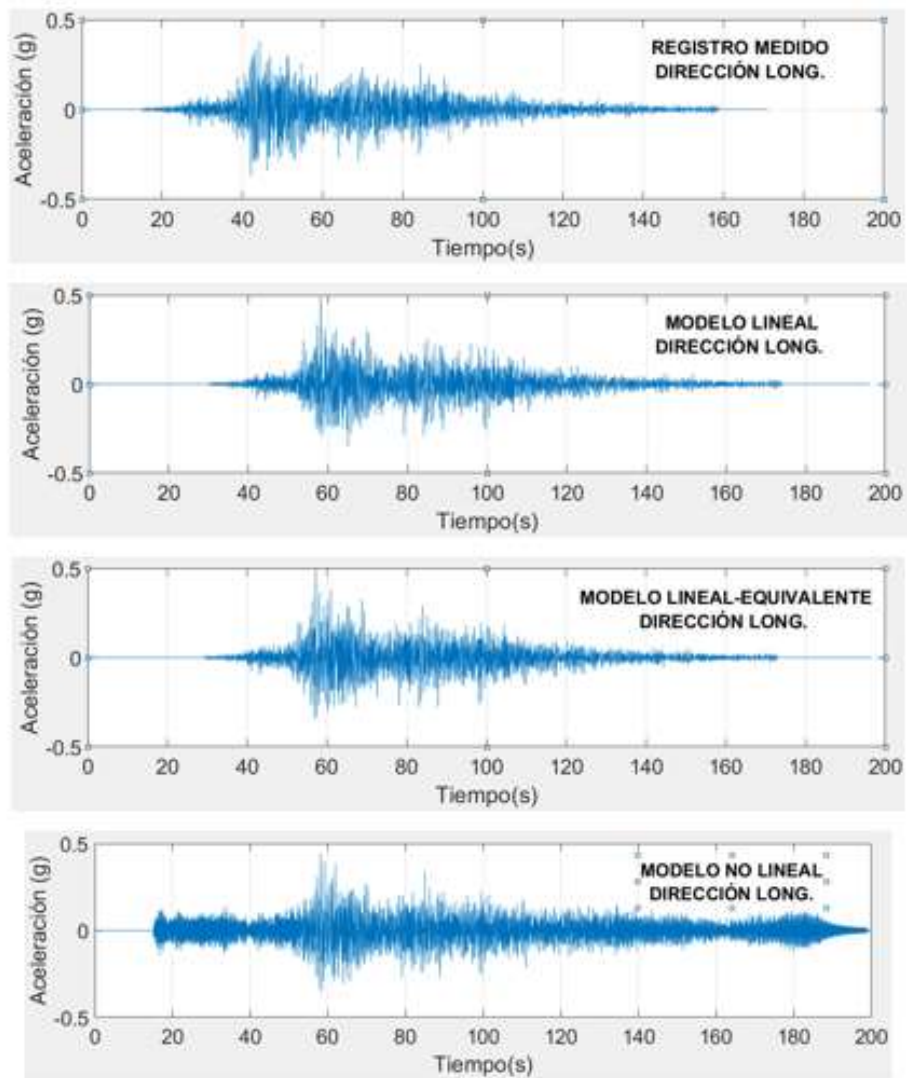


Figura C 3 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en superficie, estación Hualañé, (Elaboración propia)”

d) Estación Maipú, dirección NS

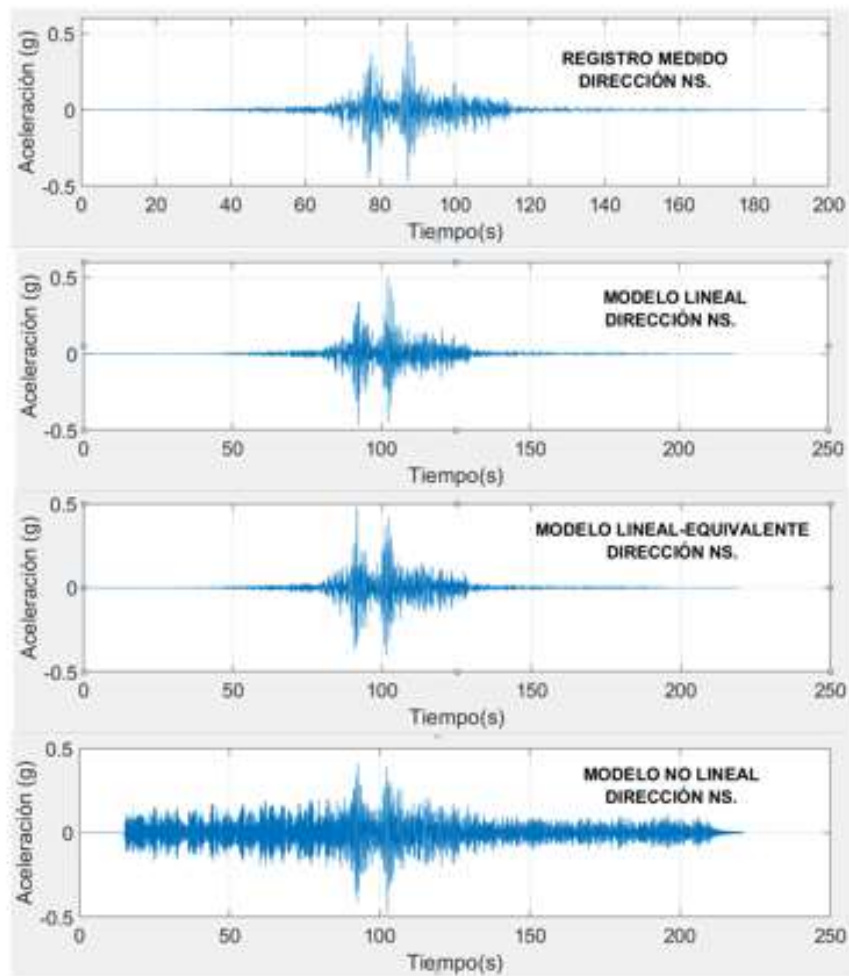


Figura C 4 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en superficie, estación Maipú, (Elaboración propia)”

e) Estación Peñalolén, dirección NS

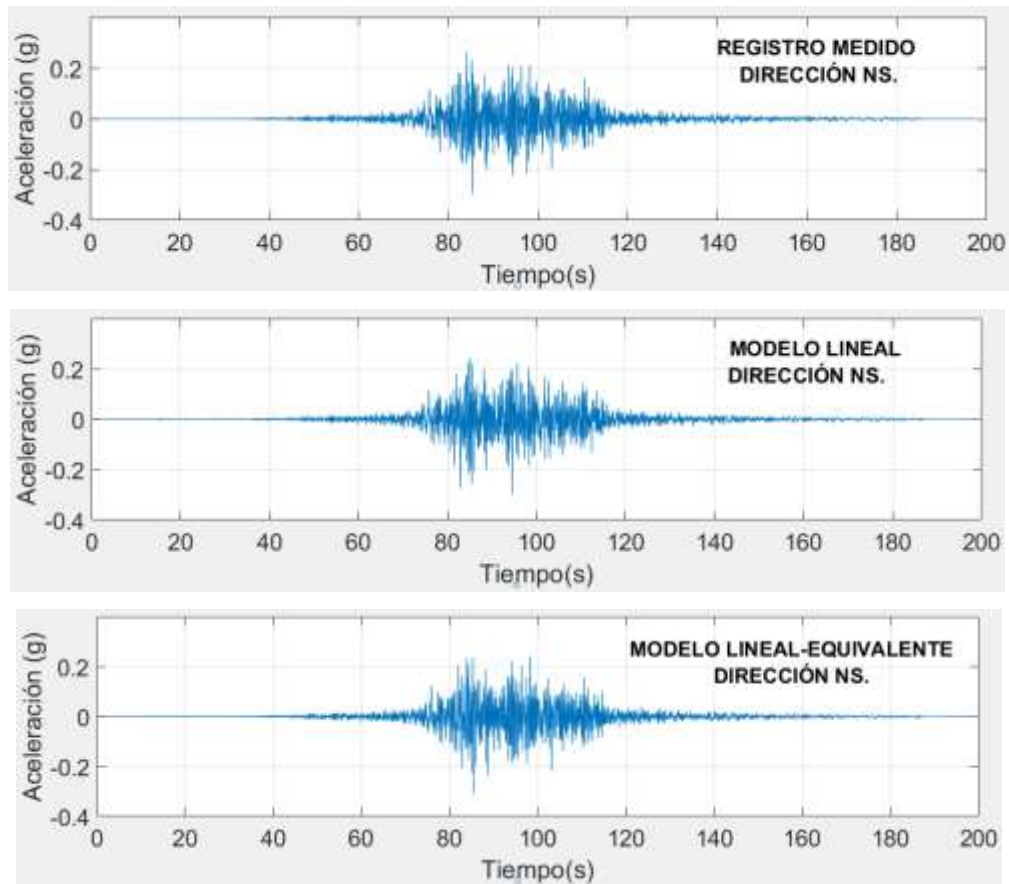


Figura C 5 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en superficie, estación Peñalolén, (Elaboración propia)”

#### 8.4.2 Espectros de frecuencias registros en superficie otra dirección

Este tipo de validación responde a las diferencias observadas en los registros temporales de aceleración. Se muestra la amplitud del contenido de frecuencias para los registros superficiales en análisis en la dirección horizontal faltante en los resultados mostrados.

a) Estación Angol, dirección NS:

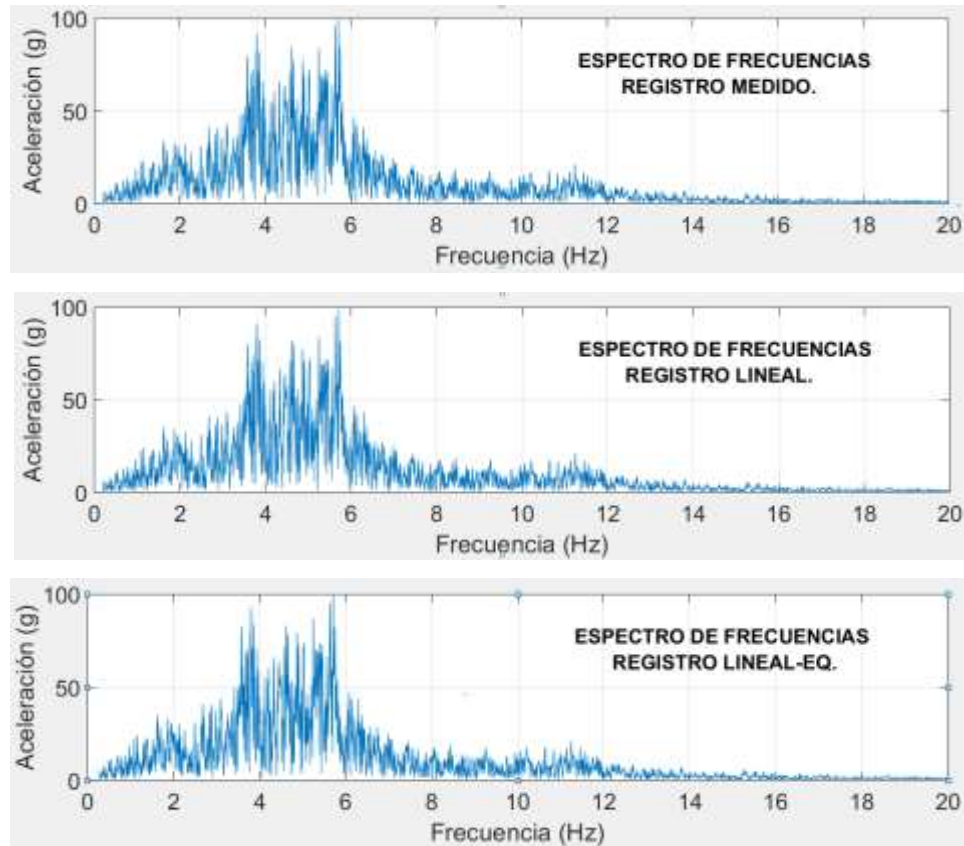


Figura C 6 “Set espectros de frecuencias registros en superficie, estación Angol, (Elaboración propia)”

b) Estación Constitución, dirección Transversal:

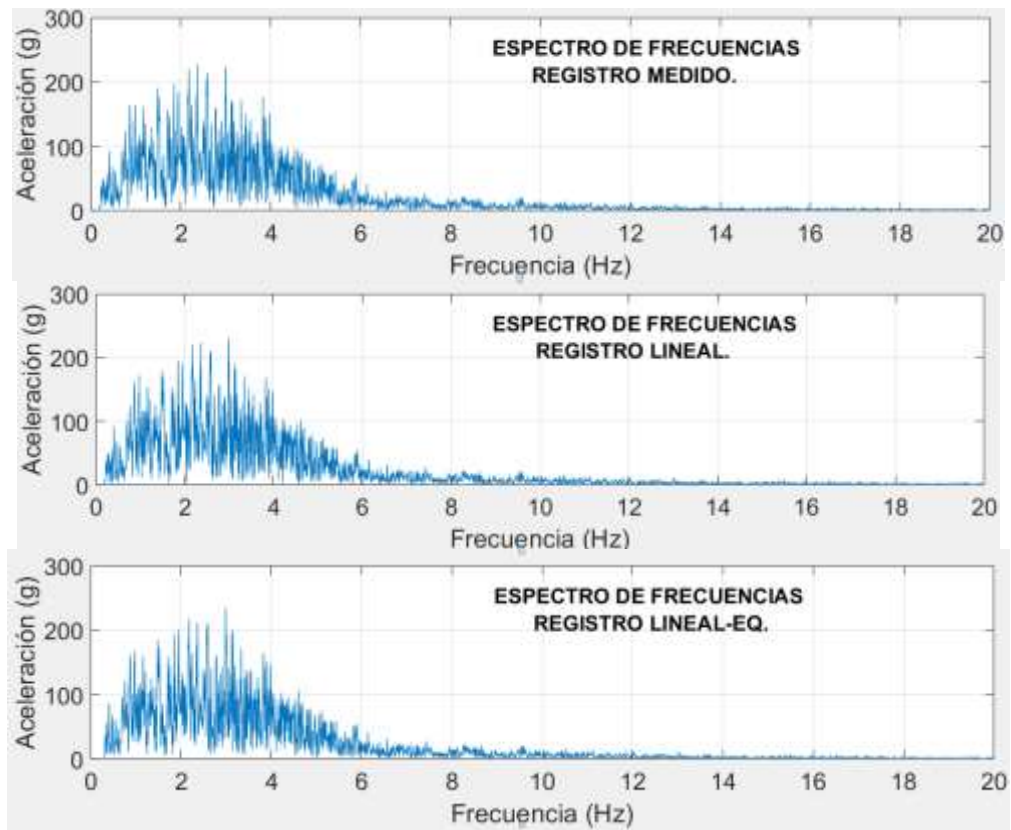


Figura C 7 “Set espectros de frecuencias registros en superficie, estación Constitución, (Elaboración propia)”

c) Estación Hualañé, dirección Longitudinal:

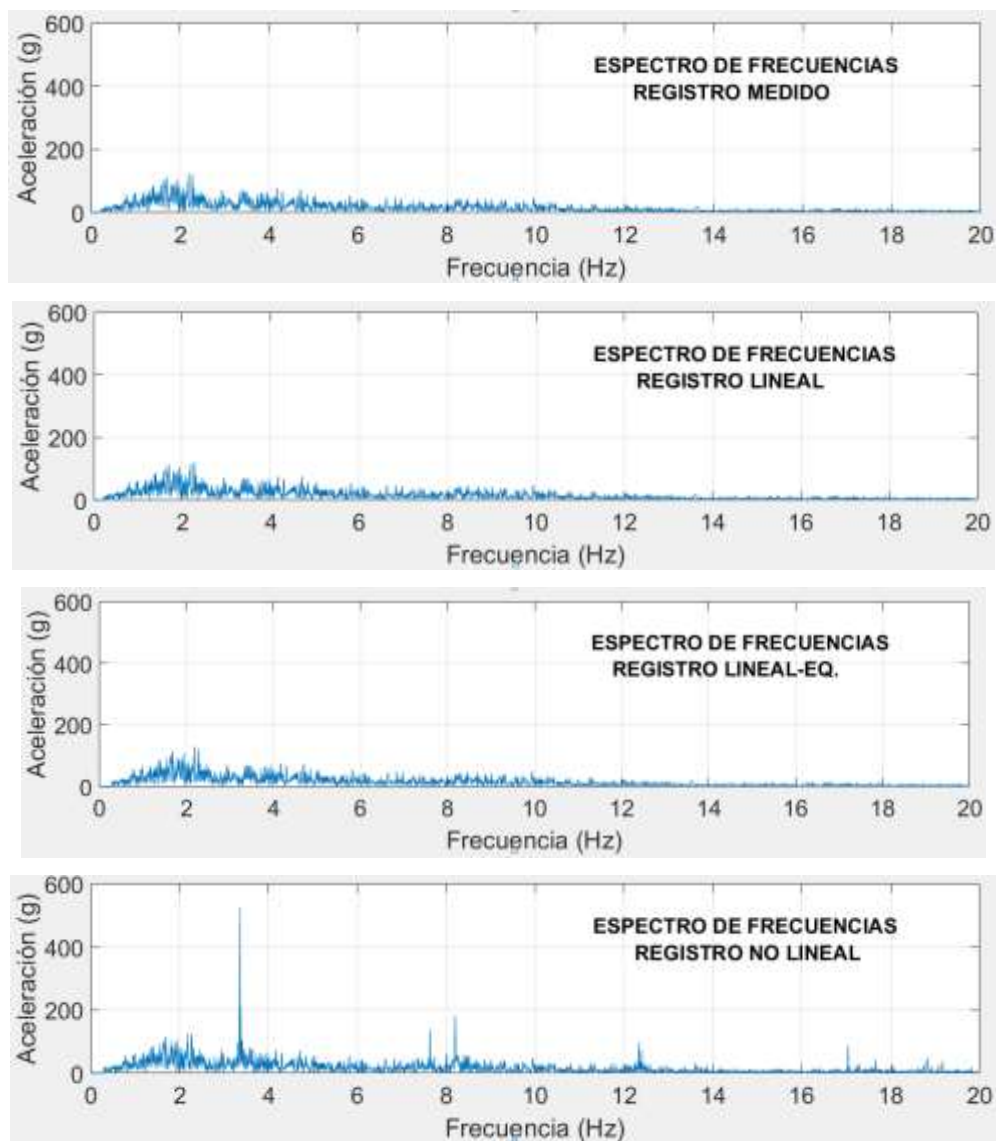


Figura C 8 “Set espectros de frecuencias registros en superficie, estación Hualañé, (Elaboración propia)”

d) Estación Maipú, dirección NS:

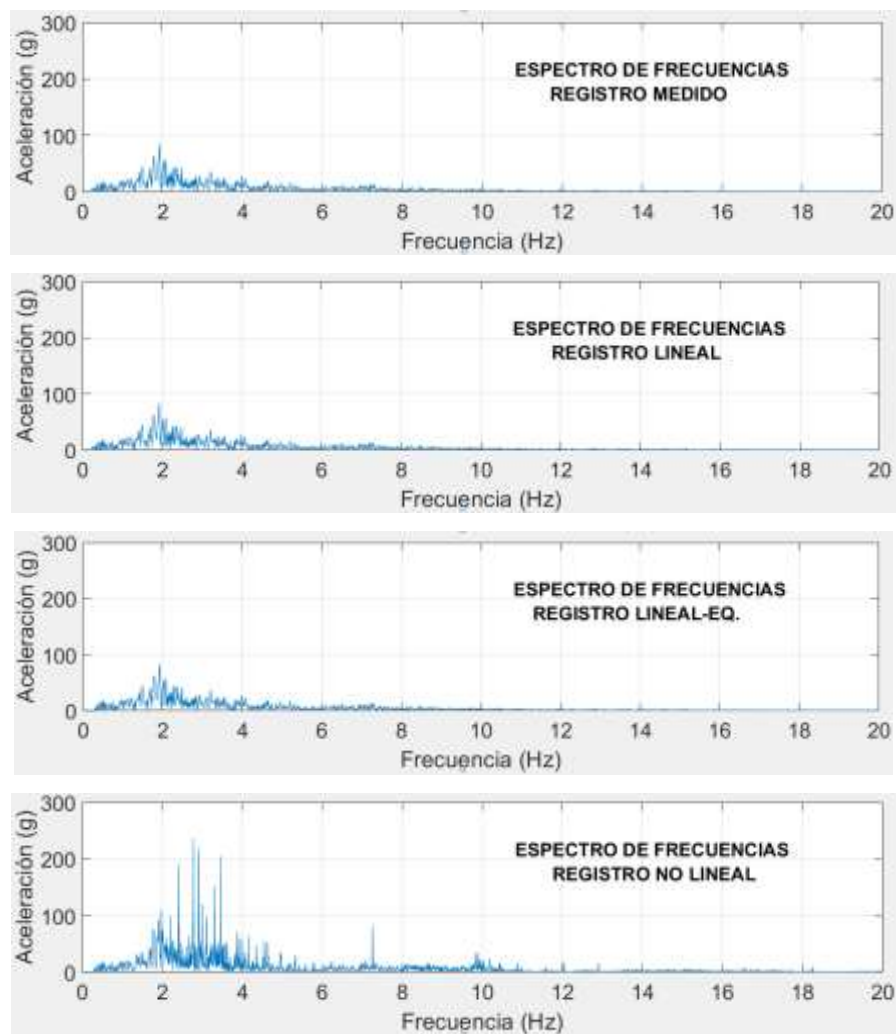


Figura C 9 “Set espectros de frecuencias registros en superficie, estación Maipú, (Elaboración propia)”



e) Estación Peñalolén, dirección NS:

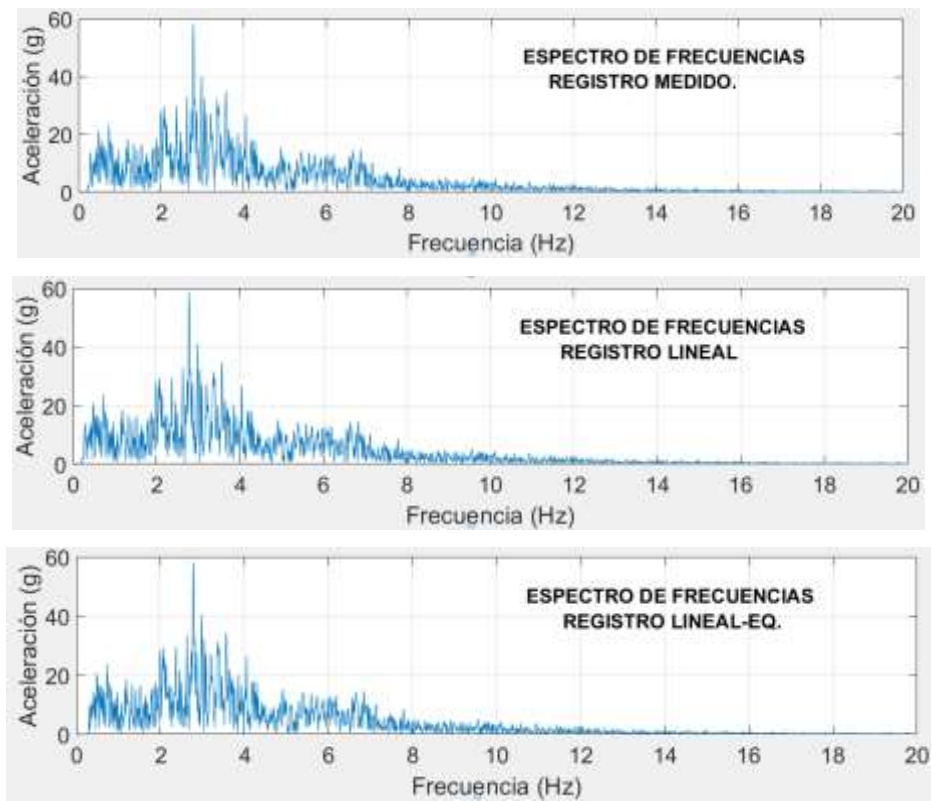


Figura C 10 “Set espectros de frecuencias registros en superficie, estación Peñalolén, (Elaboración propia)”



## 8.5 Resultados obtenidos en profundidad no mostrados.

### 8.5.1 Registros sísmicos en profundidad

Se muestran los registros sísmicos sintéticos obtenidos en profundidad para cada estación sismográfica en su dirección horizontal faltante en la etapa de resultados. Los registros obtenidos son resultados de la aplicación de deconvolución según cada enfoque.

a) Estación Angol, dirección Longitudinal:

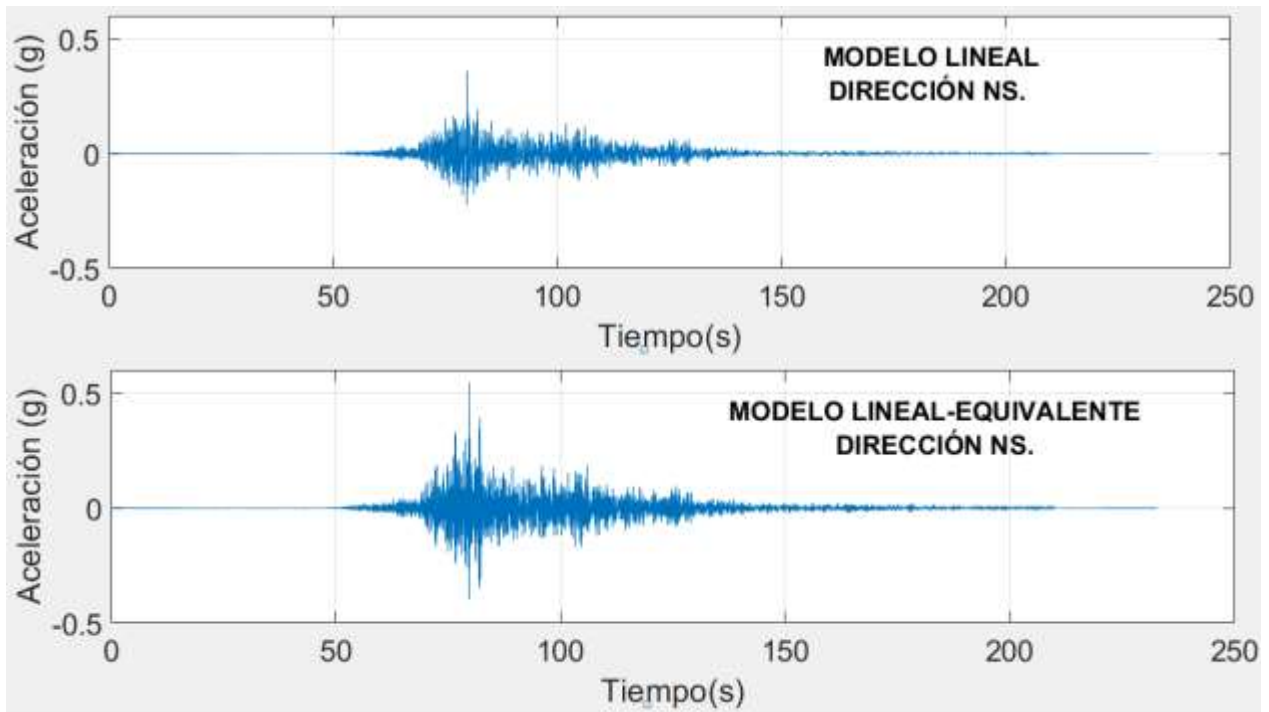


Figura C 11 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en profundidad, estación Angol, (Elaboración propia)”

b) Estación Constitución, dirección Transversal:

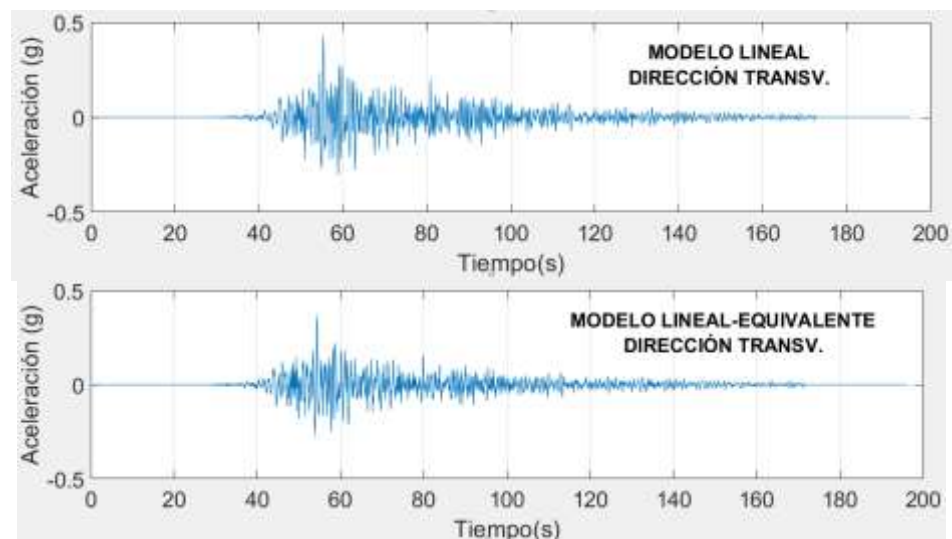


Figura C 12 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en profundidad, estación Constitución, (Elaboración propia)”

c) Estación Hualañé, dirección Longitudinal:

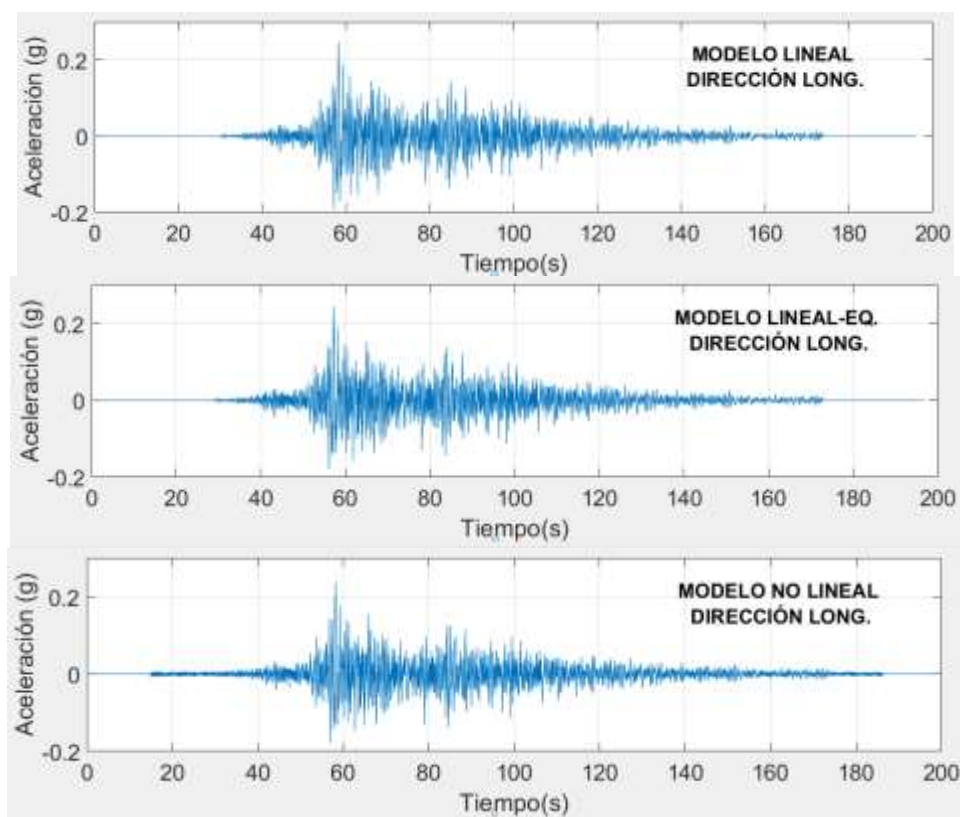


Figura C 13 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en profundidad, estación Hualañé, (Elaboración propia)”

d) Estación Maipú, dirección NS:

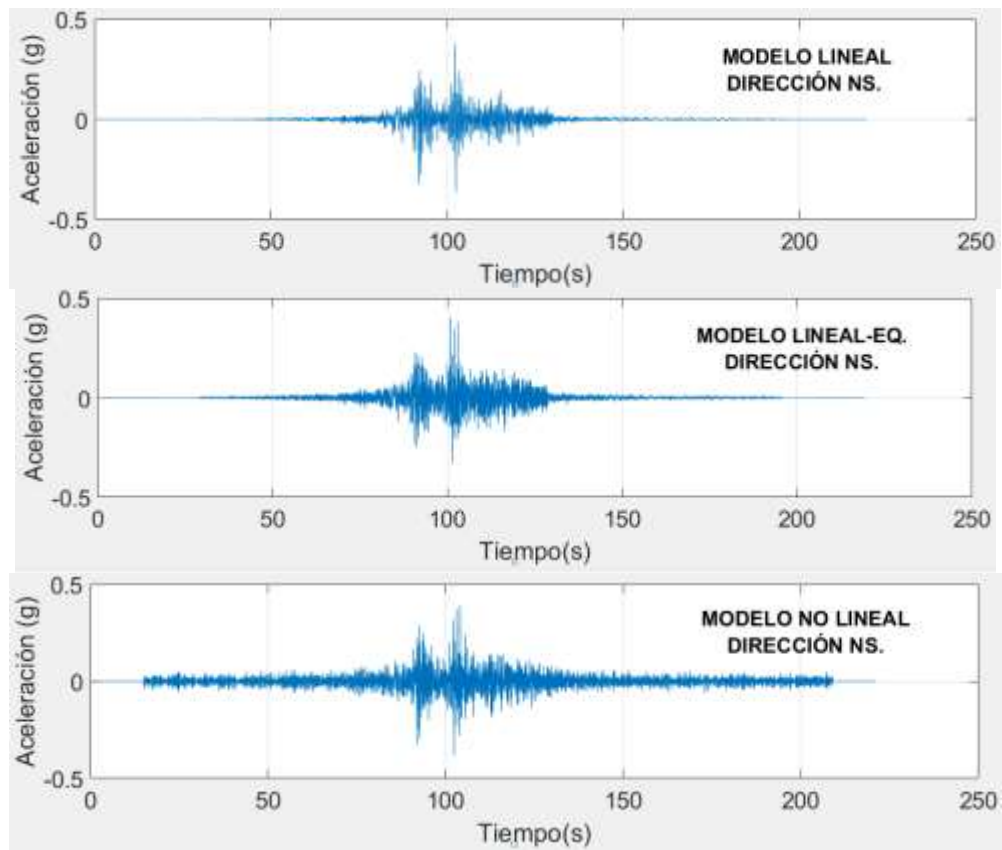


Figura C 14 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en profundidad, estación Maipú, (Elaboración propia)”

e) Estación Peñalolén, dirección NS:

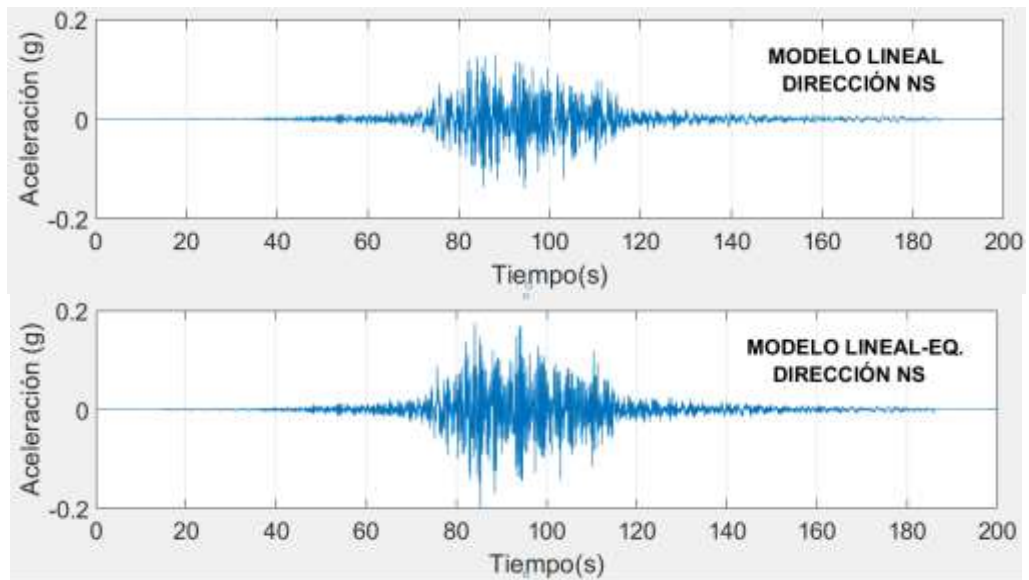


Figura C 15 “Set registros sísmicos de aceleración obtenidos en profundidad, estación Peñalolén, (Elaboración propia)”

## 8.6 Cuantificación de respuesta sísmica en profundidad

Se representa a través de las siguientes tablas resúmenes, los valores de pseudo-aceleración y pseudo-desplazamiento para diferentes valores de periodos fundamentales

### 8.6.1 Estación Angol

ESTACIÓN ANGOL							
REGISTRO	VARIABLE	EW			NS		
		T= 0.1 [s]	T=0.5[s]	T=1.5[s]	T= 0.1 [s]	T=0.5[s]	T=1.5[s]
LINEAL	$\underline{S_a}$ [g]	0.857	0.534	0.251	0.927	0.331	0.084
	$\underline{S_d}$ [m]	0.0002	0.003	0.014	0.0002	0.002	0.005
LINEAL-EQ.	$\underline{S_a}$ [g]	1.142	0.289	0.238	1.162	0.220	0.080
	$\underline{S_d}$ [m]	0.0003	0.002	0.014	0.0003	0.001	0.005
NO LINEAL	$\underline{S_a}$ [g]	-	-	-	-	-	-
	$\underline{S_d}$ [g]	-	-	-	-	-	-

Tabla C 1 “Cuantificación de respuesta en profundidad, estación Angol, (Elaboración propia)”

### 8.6.2 Estación Constitución

ESTACIÓN CONSTITUCIÓN							
REGISTRO	VARIABLE	TRANSV			LONG		
		T= 0.1 [s]	T=0.5[s]	T=1.5[s]	T= 0.1 [s]	T=0.5[s]	T=1.5[s]
LINEAL	$\underline{S_a}$ [g]	0.458	1.338	0.418	0.277	1.036	0.321
	$\underline{S_d}$ [m]	0.0001	0.008	0.023	0.0001	0.007	0.018
LINEAL-EQ.	$\underline{S_a}$ [g]	0.412	0.940	0.400	0.254	0.808	0.303
	$\underline{S_d}$ [m]	0.0001	0.006	0.023	0.0001	0.005	0.017
NO LINEAL	$\underline{S_a}$ [g]	-	-	-	0.230	0.804	0.299
	$\underline{S_d}$ [g]	-	-	-	0.0001	0.005	0.017

Tabla C 2 “Cuantificación de respuesta en profundidad, estación Constitución, (Elaboración propia)”

8.6.3 Estación Hualañé

ESTACIÓN HUALAÑE							
REGISTRO	VARIABLE	TRANSV			LONG		
		T= 0.1 [s]	T=0.5[s]	T=1.5[s]	T= 0.1 [s]	T=0.5[s]	T=1.5[s]
LINEAL	<u>Sa</u> [g]	0.361	0.620	0.396	0.374	0.543	0.203
	<u>Sd</u> [m]	0.0001	0.003	0.023	0.0001	0.003	0.012
LINEAL-EQ.	<u>Sa</u> [g]	0.447	0.576	0.392	0.507	0.491	0.199
	<u>Sd</u> [m]	0.0001	0.004	0.022	0.0001	0.003	0.011
NO LINEAL	<u>Sa</u> [g]	0.515	0.533	0.387	0.477	0.467	0.197
	<u>Sd</u> [g]	0.0001	0.003	0.022	0.0001	0.003	0.011

Tabla C 3 “Cuantificación de respuesta en profundidad, estación Hualañé, (Elaboración propia)”

8.6.4 Estación Maipú

ESTACIÓN MAIPÚ							
REGISTRO	VARIABLE	EW			NS		
		T= 0.1 [s]	T=0.5[s]	T=1.5[s]	T= 0.1 [s]	T=0.5[s]	T=1.5[s]
LINEAL	<u>Sa</u> [g]	0.567	1.235	0.262	0.434	1.150	0.169
	<u>Sd</u> [m]	0.0001	0.008	0.015	0.0001	0.007	0.010
LINEAL-EQ.	<u>Sa</u> [g]	0.781	0.600	0.248	0.709	0.590	0.158
	<u>Sd</u> [m]	0.0002	0.004	0.014	0.0001	0.004	0.009
NO LINEAL	<u>Sa</u> [g]	0.504	0.696	0.238	0.527	0.768	0.153
	<u>Sd</u> [g]	0.0001	0.004	0.014	0.0001	0.005	0.009

Tabla C 4 “Cuantificación de respuesta en profundidad, estación Maipú, (Elaboración propia)”

8.6.5 Estación Peñalolén

ESTACIÓN PEÑALOLEN							
REGISTRO	VARIABLE	EW			NS		
		T= 0.1 [s]	T=0.5[s]	T=1.5[s]	T= 0.1 [s]	T=0.5[s]	T=1.5[s]
LINEAL	Sa [g]	0.251	0.182	0.215	0.263	0.195	0.188
	Sd [m]	0.0001	0.001	0.012	0.0001	0.001	0.011
LINEAL-EQ.	Sa [g]	0.265	0.177	0.204	0.285	0.209	0.172
	Sd [m]	0.0001	0.001	0.012	0.0001	0.001	0.010
NO LINEAL	Sa [g]	0.272	0.238	0.190	-	-	-
	Sd [g]	0.0001	0.002	0.010	-	-	-

Tabla C 5 “Cuantificación de respuesta en profundidad, estación Peñalolén, (Elaboración propia)”

8.7 Deformaciones máximas unitarias inducidas

8.7.1 Estación Angol

ANÁLISIS LINEAL			
Dirección EW		Dirección NS	
Profundidad [m]	Deformación Max. [%]	Profundidad [m]	Deformación Max. [%]
1.5	0.029	1.5	0.034
4.5	0.079	4.5	0.082
7.73	0.082	7.73	0.078
11.47	0.090	11.47	0.085
15.25	0.016	15.25	0.014
17.5	0.006	17.5	0.006
25.5	0.007	25.5	0.008
34.65	0.061	34.65	0.065
37.65	0.011	37.65	0.010
40.50	0.011	40.50	0.010
42.75	0.016	42.75	0.010
46.5	0.013	46.5	0.010
49.8	0.014	49.8	0.010

ANÁLISIS LINEAL-EQUIVALENTE			
Dirección EW		Dirección NS	
Profundidad [m]	Deformación Max. [%]	Profundidad [m]	Deformación Max. [%]
1.5	0.042	1.5	0.035
4.5	0.127	4.5	0.102
7.73	0.205	7.73	0.167
11.47	0.151	11.47	0.104
15.25	0.012	15.25	0.009
17.5	0.005	17.5	0.004
25.5	0.010	25.5	0.009
34.65	0.124	34.65	0.100
37.65	0.017	37.65	0.015
40.50	0.019	40.50	0.015
42.75	0.027	42.75	0.020
46.5	0.021	46.5	0.017
49.8	0.021	49.8	0.018

Tabla C 6 “Deformaciones de corte, Angol-Lineal”      Tabla C 7 “Deformaciones de corte, Angol-Lineal-Eq.”

(Elaboración Propia)”

(Elaboración Propia)”

8.7.2 Estación Constitución

ANÁLISIS LINEAL			
Dirección Longitudinal		Dirección Transversal	
Profundidad [m]	Deformación Max. [%]	Profundidad [m]	Deformación Max. [%]
0.75	0.027	0.75	0.034
2.48	0.044	2.48	0.057
4.73	0.072	4.73	0.096
8.00	0.041	8.00	0.057
16.25	0.026	16.25	0.039
31.65	0.017	31.65	0.028
44.00	0.024	44.00	0.039
48.80	0.026	48.80	0.043

ANÁLISIS LINEAL-EQUIVALENTE			
Dirección Longitudinal		Dirección Transversal	
Profundidad [m]	Deformación Max. [%]	Profundidad [m]	Deformación Max. [%]
0.75	0.050	0.75	0.057
2.48	0.075	2.48	0.085
4.73	0.149	4.73	0.173
8.00	0.063	8.00	0.077
16.25	0.035	16.25	0.044
31.65	0.024	31.65	0.035
44.00	0.038	44.00	0.057
48.80	0.043	48.80	0.066

Tabla C 8 “Deformaciones de corte, Const.-Lineal”      Tabla C 9 “Deformaciones de corte, Const.-Lineal-eq.”

(Elaboración Propia)”

(Elaboración Propia)”

ANÁLISIS NO LINEAL			
Dirección Longitudinal		Dirección Transversal	
Profundidad [m]	Deformación Max. [%]	Profundidad [m]	Deformación Max. [%]
0.38	0.020	0.38	-
1.12	0.135	1.12	-
1.99	0.057	1.99	-
2.96	0.092	2.96	-
4.09	0.137	4.09	-
5.36	0.216	5.36	-
7.00	0.060	7.00	-
9.00	0.084	9.00	-
12.08	0.029	12.08	-
16.25	0.039	16.25	-
20.41	0.05	20.41	-
24.78	0.206	24.78	-
29.35	0.267	29.35	-
33.93	0.033	33.93	-
38.50	0.040	38.50	-
42.39	0.047	42.39	-
45.59	0.052	45.59	-
47.99	0.057	47.99	-
49.59	0.059	49.59	-

Tabla C 10 “Deformaciones de corte, Const.-No Lineal, (Elaboración Propia)”

8.7.3 Estación Hualañé

ANÁLISIS LINEAL			
Dirección Longitudinal		Dirección Transversal	
Profundidad [m]	Deformación Max. [%]	Profundidad [m]	Deformación Max. [%]
1.37	0.009	1.37	0.008
4.88	0.006	4.88	0.005
8.60	0.029	8.60	0.023
16.93	0.016	16.93	0.011
24.57	0.008	24.57	0.006
29.25	0.018	29.25	0.012
47.23	0.017	47.23	0.012

ANÁLISIS LINEAL-EQUIVALENTE			
Dirección Longitudinal		Dirección Transversal	
Profundidad [m]	Deformación Max. [%]	Profundidad [m]	Deformación Max. [%]
1.37	0.011	1.37	0.008
4.88	0.007	4.88	0.006
8.60	0.044	8.60	0.032
16.93	0.018	16.93	0.013
24.57	0.008	24.57	0.006
29.25	0.019	29.25	0.013
47.23	0.019	47.23	0.012

Tabla C 11 “Deformaciones de corte, Hual.-Lineal”

Tabla C 12 “Deformaciones de corte, Hual.-Lineal-Eq.”

(Elaboración Propia)”

(Elaboración Propia)”

ANÁLISIS NO LINEAL			
Dirección Longitudinal		Dirección Transversal	
Profundidad [m]	Deformación Max. [%]	Profundidad [m]	Deformación Max. [%]
0.69	0.005	0.69	0.004
2.06	0.016	2.06	0.015
3.81	0.005	3.81	0.004
5.94	0.008	5.94	0.008
7.80	0.040	7.80	0.037
9.40	0.055	9.40	0.049
11.54	0.011	11.54	0.010
14.24	0.014	14.24	0.012
16.92	0.018	16.92	0.014
19.61	0.021	19.61	0.016
22.26	0.025	22.26	0.018
24.48	0.008	24.48	0.006
26.66	0.017	26.66	0.012
29.16	0.020	29.16	0.014
31.66	0.022	31.66	0.015
34.16	0.025	34.16	0.016
36.83	0.015	36.83	0.010
39.68	0.016	39.68	0.011
42.52	0.017	42.52	0.011
45.37	0.019	45.37	0.012
48.21	0.020	48.21	0.013
51.06	0.021	51.06	0.014
53.90	0.022	53.90	0.015
56.75	0.024	56.75	0.016
59.59	0.025	59.59	0.017
62.44	0.026	62.44	0.018

Tabla C 13 “Deformaciones de corte, Hual.-No Lineal, (Elaboración propia)”



8.7.4 Estación Maipú

<b>ANÁLISIS LINEAL</b>			
Dirección EW		Dirección NS	
Profundidad [m]	Deformación Max. [%]	Profundidad [m]	Deformación Max. [%]
0.45	0.007	0.45	0.005
4.65	0.010	4.65	0.008
17.90	0.050	17.90	0.043
28.92	0.091	28.92	0.080

<b>ANÁLISIS LINEAL-EQUIVALENTE</b>			
Dirección EW		Dirección NS	
Profundidad [m]	Deformación Max. [%]	Profundidad [m]	Deformación Max. [%]
0.45	0.007	0.45	0.005
4.65	0.010	4.65	0.008
17.90	0.093	17.90	0.083
28.93	0.256	28.93	0.279

Tabla C 14 “Deform. Corte, Maipú.-Lineal”

Tabla C 15 “Deform. Corte, Maipú.-Lineal-eq.”

(Elaboración Propia)”

(Elaboración Propia)”

<b>ANÁLISIS NO LINEAL</b>			
Dirección EW		Dirección NS	
Profundidad [m]	Deformación Max. [%]	Profundidad [m]	Deformación Max. [%]
1.25	0.002	1.25	0.002
3.75	0.006	3.75	0.006
6.25	0.012	6.25	0.012
8.45	0.036	8.45	0.040
10.35	0.047	10.35	0.053
12.25	0.059	12.25	0.066
14.15	0.072	14.15	0.081
16.05	0.084	16.05	0.099
17.95	0.095	17.95	0.118
19.85	0.105	19.85	0.138
21.75	0.112	21.75	0.141
23.65	0.120	23.65	0.147
25.55	0.124	25.55	0.161
27.26	0.453	27.26	0.771
28.79	0.564	28.79	0.710

Tabla C 16 “Deformaciones de corte, Maipú.-Lineal, (Elaboración Propia)”

8.7.5 Estación Peñalolén

<b>ANÁLISIS LINEAL-EQUIVALENTE</b>			
Dirección EW		Dirección NS	
Profundidad [m]	Deformación Max. [%]	Profundidad [m]	Deformación Max. [%]
11.98	0.066	11.98	0.072
24.98	0.020	24.98	0.019
26.73	0.023	26.73	0.022
27.95	0.020	27.95	0.019
29.73	0.010	29.73	0.009

<b>ANÁLISIS LINEAL</b>			
Dirección EW		Dirección NS	
Profundidad [m]	Deformación Max. [%]	Profundidad [m]	Deformación Max. [%]
11.98	0.043	11.98	0.045
24.98	0.018	24.98	0.018
26.73	0.021	26.73	0.021
27.95	0.019	27.95	0.020
29.73	0.010	29.73	0.011

Tabla C 17 “Deform. Corte, Peñal.-Lineal,  
(Elaboración Propia)”

Tabla C 18 “Deform. Corte, Peñal.-Lineal-eq.,  
(Elaboración Propia)”

<b>ANÁLISIS NO LINEAL</b>			
Dirección EW		Dirección NS	
Profundidad [m]	Deformación Max. [%]	Profundidad [m]	Deformación Max. [%]
1.00	0.004	1.00	-
3.00	0.014	3.00	-
5.00	0.026	5.00	-
7.00	0.040	7.00	-
9.00	0.057	9.00	-
11.00	0.074	11.00	-
13.00	0.089	13.00	-
15.00	0.105	15.00	-
17.00	0.121	17.00	-
19.00	0.137	19.00	-
21.00	0.147	21.00	-
23.00	0.149	23.00	-
25.03	0.018	25.03	-
26.78	0.022	26.78	-
28.00	0.021	28.00	-
29.78	0.010	29.78	-

Tabla C 19 “Deformaciones de Corte, Peñalolén.-No Lineal, (Elaboración Propia)”