

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
Ingeniería Civil

**ANÁLISIS DEL CONTRASTE DE IMPEDANCIA EN LA PREDICCIÓN DEL
MOVIMIENTO DEL SUELO**

**Tesis presentada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de
Concepción para optar al grado académico**

Magíster en ciencias de la ingeniería, con mención en ingeniería civil

POR: THIARE CAMILA MAGALLANES FIGUEROA.

Profesor Guía: Gonzalo Andrés Montalva Alvarado.

Concepción, Chile 2022

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis fue financiada por Núcleo Científico Milenio “El Ciclo Sísmico a lo largo de Zonas de Subducción (CYCLO)”, Iniciativa Científica Milenio (MSI) de la Subvención del Gobierno de Chile, número NC160025.

También fue respaldada por la “Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo” de la Universidad de Concepción, VRID número 218.091.049-1.0.

Quisiera agradecer a mi madre por todo lo entregado en vida, por inculcarme el estudio y la perseverancia, junto a mi padre. A mi hermana por todo su apoyo, y por supuesto a mi esposo, por ser el pilar fundamental.

Agradecer a mi profesor guía, Gonzalo Montalva, por su disposición en la investigación para guiarme y entregarme sus consejos.

Índice de contenidos

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Metodología	5
1.4 Principales resultados y conclusiones	5
1.5 Organización de la tesis.....	6
2. ESTADO DEL ARTE	7
2.1 Introducción	7
2.2 Conceptos básicos	7
2.2.1 Ruido Ambiente.....	7
2.2.2 Ondas de Rayleigh.....	8
2.2.3 Velocidad de onda.....	9
2.3 Impedancia de un suelo.....	11
2.4 Modelo de predicción del movimiento del suelo	16
2.5 Conclusiones	18
3. ESTACIONES DE MONITOREO Y CARACTERIZACIÓN DE SITIO	19
3.1 Introducción	19

3.2	Estaciones de monitoreo sísmico y caracterización de sitio	19
3.3	Conclusiones	22
4.	METODOLOGÍA	24
4.1	Introducción	24
4.1.1	Intensidad de Movimiento del Suelo Observada	24
4.2	Intensidad de Movimiento del Suelo Predicha	25
4.3	Residuales	27
4.4	Conclusión	28
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	29
5.1	Introducción	29
5.2	Resultados	29
6.	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	38
7.	REFERENCIAS	40
8.	ANEXOS	46
8.1	Anexo 1	46

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1.1: Efecto de sitio (LIS, UCR)	2
Ilustración 2.1: Registro temporal	8
Ilustración 2.2: Propagación de una onda de Rayleigh (NC Arquitectura)	9
Ilustración 2.3: Equilibrio en una columna de suelo. (Yoshida, 2015)	13
Ilustración 3.1: Ubicación de las estaciones sismológicas y eventos	20
Ilustración 3.2: Contraste de impedancia calculado para cada una de las 17 estaciones seleccionadas	22
Ilustración 4.1: Localidad de los eventos utilizados en el análisis En rojo se muestra el territorio chileno para eventos intraplaca, y en azul está delimitado el límite Perú-Chile y la costa hasta 2.5° hacia el este y oeste, para eventos interplaca.	26
Ilustración 5.1: Residuales totales (δ), residuales within-event (δW_{es}) y residuales between-event (δB_e), para evento de M_w 5.8, para tres estaciones. Arriba: GMPM de Montalva et al 2017, abajo, GMPM de Parker et al. (2021)..	30
Ilustración 5.2: Mediana y desviación estándar para residuales totales y between-event, para eventos entre M_w 5.0 – 5.9- Columna 1 y 2 corresponde a los GMPMs de Montalva et al. (2017) y Parket et al. (2021), respectivamente.	33
Ilustración 5.3 Residuales totales para evento de M_w 8.4, para seis estaciones.	35
Ilustración 5.4 Residuales totales y “within-event” para el GMPM de Montalva et al. (2017), para diferentes estaciones. Filas de la uno a la cuatro corresponden a evento de M_w 6.8 (Noviembre 07, 2015), evento de M_w 6.7 (Septiembre 17, 2015), evento de M_w 6.2 (Septiembre 22, 2015), evento de M_w 6.0 (Octubre 03, 2015).	37

RESUMEN

Por medio de los grandes eventos sísmicos ocurridos en el mundo, se ha reconocido el impacto generado por el cambio en las propiedades en superficie en la demanda sísmica. Este efecto ocurre debido a distintos fenómenos físicos, siendo uno de estos el cambio en la impedancia entre la roca y sedimentos superficiales. La razón entre estas impedancias, conocida como el Contraste de Impedancia (IC, por su sigla en inglés), es conocida por definir la amplificación que ocurre entre estos dos materiales y controla los efectos de sitio, como ocurrió, por ejemplo, para el terremoto de México 1985. Sin embargo, en la actualidad, la mayoría de los Modelos de Predicción del Movimiento del Suelo (GMPMs, por sus siglas en inglés) y las normativas de diseño sísmico se basan en el promedio de la velocidad de ondas de corte en los primeros 30 metros superficiales (V_{s30}) como principal parámetro para la caracterización de los efectos de sitio.

Nosotros analizaremos el impacto del contraste de impedancia en las intensidades de superficie, evaluando los residuales de un número de eventos ocurridos un ambiente subductivo, y como impacta el contraste de impedancia en ellos. Estimamos el contraste de impedancia en estaciones sísmicas de monitoreo de movimiento del suelo, considerando sus perfiles de velocidad de ondas de corte; se observa una tendencia de mayores residuales en sitios caracterizados con un alto IC, y menores residuales para aquellos sitios con bajo

o medio valor de IC. Estos resultados reflejan la importancia de tener una apropiada caracterización de este parámetro, y su inclusión en las estimaciones de amplificación de sitio, y por consiguiente una potencial reducción de incertidumbre. Este trabajo tiene implicancias para el futuro desarrollo de GMPMs, parametrización de tipos de sitio en normativas y estimaciones de peligro sísmico.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La ingeniería sísmica ha reconocido el impacto de los sedimentos superficiales en la demanda sísmica tempranamente con los terremotos de México en 1985 (Chávez-García & Bard, 1994) y Loma Prieta en 1989 (Seed et al., 1991). Esto es causado en gran medida por el cambio de rigidez entre la roca y el suelo, más precisamente el cambio en la impedancia ($V_s \times \rho$, donde V_s es la velocidad de propagación de onda de corte y ρ es la densidad del material) de una capa superior y una inferior, o el contraste de impedancia del basamento rocoso/suelo (Baise et al., 2016).

Los efectos de sitio (Ilustración 1.1) son producidos por varios mecanismos de amplificación, para los distintos tipos de ondas. En general, las ondas sísmicas son alteradas por depósitos de suelos superficiales (suelo a unos pocos cientos de metros desde la superficie) debido a cuatro mecanismos: (1) cambio en la velocidad de ondas de corte, (2) reflexión en la superficie, (3) reflexión en las capas subyacentes y (4) resonancia (Yoshida, 2015). Tres de estos cuatro mecanismos (1, 3 y 4) no pueden ser considerados apropiadamente sin conocer las características de la roca que subyace un perfil de suelo, junto con las propiedades superficiales usados actualmente en la práctica.

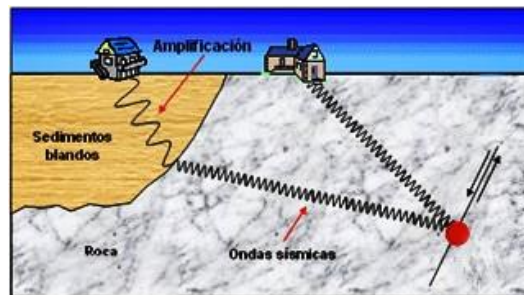


Ilustración 1.1: Efecto de sitio (LIS, UCR)

Por lo tanto, en este estudio, exploramos el impacto del cambio del contraste de impedancia entre roca y suelo, en las intensidades de superficie observadas y su variabilidad.

Por otro lado, la geología superficial afecta las características del movimiento del suelo, mientras que las normas sísmicas y los GMPMs se enfocan principalmente en la velocidad de onda de corte hasta los 30 m (V_{s30}) para incluir sus efectos (Idriss 2014; Zhao et al. 2016; Boore et al. 2021). Aun cuando los efectos de sitio pueden ser estimados con parámetros superficiales simples, como el periodo de sitio (T_0) o V_{s30} , la limitación de estas medidas radica en la física de los fenómenos de respuesta de sitio, ignorando los mecanismos de propagación descritos anteriormente. No todas las amplificaciones sísmicas pueden ser explicadas por estos parámetros, siendo reconocido como una limitación no incluir la roca bajo los sedimentos o incluso sedimentos más rígidos y profundos en la estimación de amplificación de sitio (Cramwick et al. 1990; Frankel et al.

2002; Castellaro et al. 2008; Shingaki et al. 2018). Castellaro et al. (2008) concluye que V_{s30} pareciera ser un parámetro poco convincente para estimar la amplificación de un sitio, debido a que la amplificación de sitio es un fenómeno muy complejo para ser descrito por un solo parámetro. Lee & Trifunac (2010) también analizan si V_{s30} debiera ser un parámetro para describir la amplificación sísmica, concluyendo que no debería ser el único parámetro para estimar la amplificación de un movimiento fuerte.

Montalva et al. (2016) muestra que el parámetro V_{s30} no es suficiente para describir la distribución de intensidad en la superficie, debido a que para valores promedio prácticamente idénticos de V_{s30} , fueron observados daños significativamente distintos en estructuras con una misma vulnerabilidad, en la misma ciudad y para un mismo evento (Terremoto de Maule Mw 8.8, 2010). El objetivo de este estudio apunta a explicar parte de la variabilidad del Movimiento del Suelo (GM, por su sigla en inglés), a través de la evaluación geofísica del IC. Esto es logrado a través del análisis del impacto del IC en los residuales de la intensidad del GM. Las intensidades del GM fueron calculadas en base a una base de datos de registros compiladores desde el Centro Sismológico Nacional de Chile (CSN). Se estimaron las intensidades del GM utilizando el GMPM desarrollado por Montalva et al. (2017), para la componente horizontal del espectro de respuesta de aceleraciones, de la zona de subducción de Chile, y el modelo global de Parker et al. (2021), con su correspondiente término regional.

Con las intensidades del GM observado y predicho, se calcularon los residuales de las 17 estaciones, para evaluar su dependencia con el IC y la variabilidad espacial de este.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el contraste de impedancia en la predicción del movimiento del suelo para distintas estaciones sismológicas de Chile.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el contraste de impedancia en sitios con estaciones de monitoreo sísmico.
- Calcular la intensidad de superficie observada de registros sísmicos.
- Elaborar una base de datos con la información de los eventos sísmicos ocurridos en el país, para su posterior uso en la predicción de demanda sísmica.
- Estimar la intensidad de superficie predicha por medio de dos GMPMs.
- Evaluar el impacto del contraste de impedancia en los residuales.

1.3 Metodología

La investigación comienza con la elección de los sitios que tienen estaciones de monitoreo sísmico y que además poseen levantamiento de mediciones activas o pasivas de ondas para la inversión de perfiles de velocidad de onda de corte. Esta inversión de perfiles de V_s se realiza mediante el *software* “Dinver” (Wathelet et al. 2008), cuyo proceso consiste en inversiones aproximadas realizando procesos de cálculos iterativos que permiten ajustar los parámetros del suelo minimizando el error. Con los perfiles, es posible obtener V_{s30} como parámetro de caracterización de sitio, y el IC para el posterior análisis.

Se estima la intensidad de superficie observada por medio de registros sísmicos; posteriormente se recolecta la información de los eventos sísmicos ocurridos en el territorio chileno, clasificándolos (intraplaca o interplaca) y generando una base de datos de 751 eventos. Con la caracterización de cada evento, se obtiene mediante GMPMs, la predicción del movimiento del suelo y se procede a calcular los residuales y analizar la implicancia del IC en estos valores.

1.4 Principales resultados y conclusiones

Se han utilizado dos GMPMs para la predicción del movimiento del suelo, Montalva et al. (2017) y Parker et al. (2021). Comparando ambos modelos, se

observa una mejor predicción del GMPM de Montalva et al. (2017) dado que los residuales son menores con este modelo.

El análisis realizado con los residuales y las distintas estaciones de monitoreo muestra que el contraste de impedancia tiene un fuerte impacto en el movimiento del suelo predicho; se observa una clara tendencia en las estaciones con un alto IC, en las cuales la amplificación de sitio es mayor que en aquellos sitios con un bajo o mediano valor de IC.

1.5 Organización de la tesis

La tesis consta de seis capítulos, los cuales inician con la presente introducción del tema en investigación, seguido del segundo capítulo, donde se presenta la base teórica en la cual se sustenta la investigación, como las ondas superficiales, el contraste de impedancia y la estimación de las intensidades del movimiento del suelo observadas y predichas. En el tercer capítulo, se presenta la zona de estudio y caracterización de sitio, en el cuarto capítulo, se presenta la metodología, tanto para el preprocesamiento de los datos, como para el posterior procesamiento. En el quinto capítulo se muestran los principales resultados con los residuales y el análisis de la implicancia del contraste de impedancia en estos.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

A continuación, se presentan los fundamentos teóricos en los cuales se basa la investigación, que es la caracterización de sitio junto con el concepto de impedancia de un suelo y su relación con la propagación de ondas y la amplificación de un sitio y el cálculo de intensidades de movimiento del suelo observadas y predichas, para obtener los residuales asociados a un evento sísmico, a un sitio y un periodo.

2.2 Conceptos básicos

2.2.1 Ruido Ambiente

Se llama ruido ambiente al registro temporal continuo de un sismómetro que no contiene eventos sísmicos, como se observa en la Ilustración 2.1. Alternativamente es llamado microtremor y resulta de la propagación de ondas superficiales, que pueden ser de baja o alta amplitud. Los registros con contenido de ondas de baja amplitud, pueden ser analizados utilizando la metodología SPAC (Spatial AutoCorrelation, en inglés), desarrollada por Aki (1957), la cual permite, a través de las mediciones pasivas de ondas sísmicas (es decir, sin intervención antropogénica), desarrollar una inversión de perfiles de V_s . Los

registros con contenidos de ondas de alta amplitud pueden ser analizados utilizando la metodología F-K (Spectral frequency-wave number) desarrollada por Kvaerna & Ringdahl (1986).

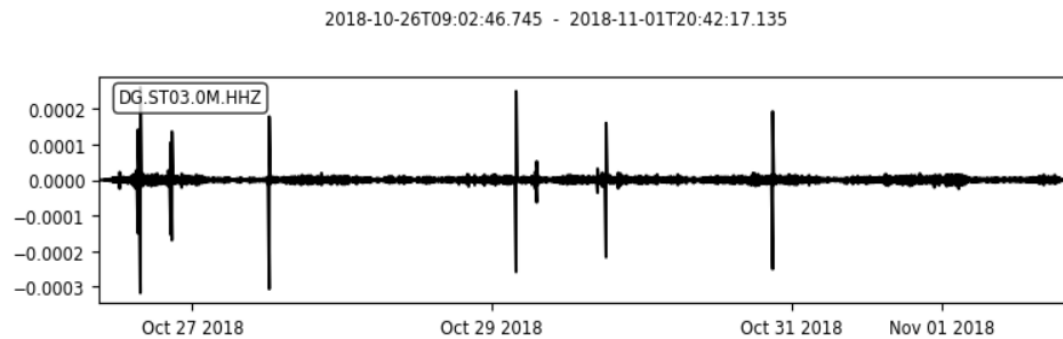


Ilustración 2.1 Registro temporal

2.2.2 Ondas de Rayleigh

Las ondas de Rayleigh son un tipo de onda de superficie en la que las partículas se mueven describiendo un trayecto elíptico retrógrado (Ilustración 2.2), es decir, las partículas del material se mueven describiendo una elipse en dirección opuesta a la dirección de propagación de la energía. Las ondas de Rayleigh son de naturaleza dispersiva, es decir, la velocidad de propagación de la onda depende de su frecuencia, esto como consecuencia de tener dimensiones finitas (con un espesor de capa determinado), ya que la velocidad depende de la relación entre la longitud de onda y el espesor del estrato. De aquí nace el concepto de curva de dispersión, en la cual se tiene la dependencia de los valores

de velocidad con respecto a la frecuencia de las ondas y con la cual es posible, mediante un proceso de inversión, determinar el perfil de V_s de un sitio (Foti, 2014). Es por esto que las ondas de Rayleigh resultan de utilidad para la evaluación de la velocidad con la profundidad.

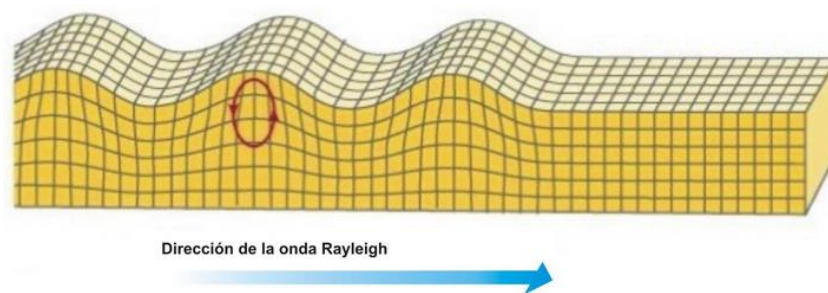


Ilustración 2.2 Propagación de una onda de Rayleigh (NC Arquitectura)

2.2.3 Velocidad de onda

Para la generación de ondas Rayleigh, existen diferentes tipos de fuentes que pueden ser utilizadas, siendo una la generación pasiva por medio de los microtemores, o la generación activa, por medio de fuentes dinámicas.

El movimiento producido puede ser descrito a través de un paquete de ondas que contiene un determinado contenido de frecuencias (Foti, 2014). Para estudiar las características de su propagación, se necesita detectar la señal y a partir de ésta inferir las propiedades del material por el cual viaja.

Se observa que una de las características de su propagación es que sufre dispersión, es decir, las ondas de diferentes frecuencias se propagan a distintas velocidades. Con esta noción, es posible definir la velocidad de fase, Ecuación 2.1, como la velocidad de propagación de una onda interna determinada por una frecuencia única.

Si ahora se considera un paquete de ondas internas que viajan a distintas frecuencias, formando el movimiento global de una onda, se define la velocidad de grupo, Ecuación 2.2, la cual representa una envolvente del paquete de frecuencias.

$$V_g = \frac{\delta w}{\delta k} \quad (2.1)$$

$$V_f = \frac{w}{k} \quad (2.2)$$

Para ambas ecuaciones, w es la frecuencia angular y k el número de ondas.

Se representa una onda o señal como el movimiento global de ondas internas que viajan a distinta frecuencia, y dada la superposición del movimiento, se genera el paquete de ondas que caracteriza la propagación de las ondas Rayleigh a través de un medio. Ambas velocidades se relacionan mediante la Ecuación 2.3, de donde se tiene dos opciones de cálculo. La primera es obtener

la velocidad de grupo por medio del análisis temporal de microtremores e integrar su valor para conseguir la velocidad de fase. La segunda opción es obtener la velocidad de fase por medio del análisis espectral de microtremores, derivar su valor y conseguir la velocidad de grupo.

$$V_g = \frac{\delta w}{\delta k} = \frac{\delta(V_f \times k)}{\delta k} \quad (2.3)$$

2.3 Impedancia de un suelo

La impedancia de un suelo (Ecuación 2.4) indica la resistencia que posee éste al cambio en la intensidad de su movimiento y es el fenómeno físico más relevante en la amplificación pues depende directamente del contraste de impedancia (Ecuación 2.5) de un suelo (razón entre las impedancias de dos estratos de suelo adyacentes).

$$I = \rho \times V_s \quad (2.4)$$

$$\alpha = \frac{V_{s_r} \times \rho_r}{V_{s_s} \times \rho_s} \quad (2.5)$$

Donde V_{sr} es la velocidad de onda de corte de la roca, V_{ss} es la velocidad de onda de corte del estrato de suelo adyacente, ρ_r es la densidad de la roca y ρ_s es la densidad del estrato de suelo adyacente.

De acuerdo con Jamshidi et al. (2012), se puede calcular la amplificación para casos simples usando el principio de conservación de la energía y obviando la pérdida de energía debido al amortiguamiento. El flujo de energía sísmica de una columna de suelo queda expresado en la Ecuación 2.6, donde $\dot{u}(t)$ es la velocidad del movimiento sísmico.

$$E(t) = \frac{1}{2}(\rho V)\dot{u}(t)^2 \quad (2.6)$$

Debido a que la energía debe permanecer constante durante la propagación, cualquier reducción en la impedancia es compensada por un incremento en $\dot{u}(t)$. Si la impedancia cambia gradualmente de $(\rho V)_1$ a $(\rho V)_2$, donde el subíndice 1 indica el estrato inferior de mayor rigidez y el subíndice 2 el estrato superior de menor rigidez, la igualdad del flujo de energía (por conservación) entrega la siguiente amplificación (A) de sitio (Ecuación 2.7):

$$A = \frac{\dot{u}(t)_2}{\dot{u}(t)_1} = \sqrt{\frac{(\rho V)_1}{(\rho V)_2}} \quad (2.7)$$

Se observa que las ondas que se propagan por un medio con densidad y velocidad de propagación mayor $((\rho V)_1$, por ejemplo, roca) a la del estrato superior adyacente $((\rho V)_2)$, generarán amplificación en la columna de suelo. Si la densidad y velocidad de propagación del estrato superior disminuye (se tiene un estrato menos denso), entonces el contraste de impedancia aumenta y por consecuencia la amplificación.

Por otro lado, si se considera una columna unidimensional, el equilibrio del elemento (Ilustración 2.3) entrega la ecuación de movimiento (Ecuación 2.8) que es importante para considerar la propagación de ondas (Yoshida, 2015).

$$d\tau = \ddot{u}\rho dz \quad (2.8)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, \ddot{u} es la aceleración del suelo y z la profundidad del estrato de suelo en estudio.

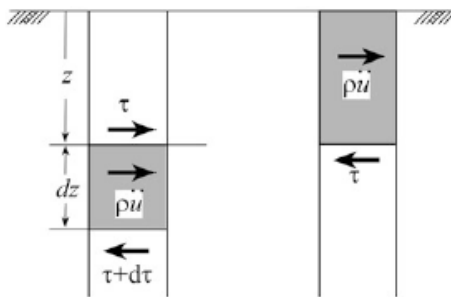


Ilustración 2.3: Equilibrio en una columna de suelo. (Yoshida, 2015)

Además, la relación $\tau - \gamma$ (Esfuerzo de corte – Deformación de corte) es dada en la Ecuación 2.9 y el módulo de corte (G) en la Ecuación 2.10.

$$\tau = G\gamma \quad (2.9)$$

$$G = V_s^2 \rho \quad (2.10)$$

Si se considera el equilibrio de esfuerzos de un elemento de suelo que se encuentra en una interfaz de dos estratos, uno de mayor rigidez que otro, se tiene una igualdad en el esfuerzo de corte, que se muestra en la Ecuación 2.11.

$$\tau_1 = \tau_2 \rightarrow (V_s^2 \rho)_1 \gamma_1 = (V_s^2 \rho)_2 \gamma_2 \quad (2.11)$$

Esto indica finalmente que el equilibrio de esfuerzos y por lo tanto de deformación, depende del contraste de impedancia. Si la impedancia del estrato superior es menor, entonces la deformación en este estrato debe ser mayor para que el equilibrio se conserve. Entonces se tiene que el contraste de impedancia es inversamente proporcional a la deformación, pues la deformación de un suelo menos denso debe ser mayor a la de un suelo más denso para que esta conservación se cumpla. Esto queda ilustrado en la **Error! Reference source not found.**, donde los sedimentos blandos generan una amplificación en la

amplitud de la onda respecto de su propagación en roca, esto debido a la energía liberada por el desplazamiento de una falla.

Como último punto a destacar el contraste de impedancia actúa directamente en uno de los mecanismos de amplificación de la onda (Yoshida, 2015). Una onda reflejada en la superficie del suelo puede ser nuevamente reflejada en las interfaces de las capas subterráneas, pero esto dependerá exclusivamente de la impedancia del suelo. A diferencia de la reflexión total de ondas en superficie, en la interfaz, un paquete de ondas puede tener una parte que es transmitida y el resto reflejada. En un medio homogéneo, la reflexión es nula y toda la porción de ondas es transmitida.

A medida que aumenta el contraste de impedancia, más ondas serán reflectadas, por la resistencia que opone el suelo al cambio en la intensidad de movimiento. Esto permite entonces considerar la amplificación o atenuación de una onda en el análisis de respuesta de sitio.

Es por esto por lo que diversos autores (Narayan, 2010; Boaga et al., 2011; Jamshidi et al., 2012; Baise et al., 2016) han identificado la importancia del contraste de impedancia en la amplificación de un sitio, considerando relevante su variabilidad. Debido a que la impedancia depende directamente de la

amplificación (Jamshidi et al., 2012), se espera una amplificación mayor cuando el valor del IC sea alto (Narayan, 2010; Baise et al., 2016)

2.4 Modelo de predicción del movimiento del suelo

Un GMPM es una relación utilizada para estimar y/o predecir medidas de intensidades de superficie y se basa principalmente en parámetros superficiales como V_{s30} para la caracterización de sitio.

Estas ecuaciones, que son utilizadas para predecir el movimiento del suelo, describen la distribución del movimiento del suelo en términos de una mediana y una desviación estándar logarítmica (Al atik et al., 2010; Rodriguez-Marek et al., 2011). La mediana es el valor estimado para una parametrización utilizada (magnitud de momento, distancia más cercana al plano de ruptura, V_{s30} , entre otros) y la desviación estándar es comúnmente interpretada como la variabilidad aleatoria de la predicción del movimiento del suelo. En la ecuación 2.12 se muestra la forma general que tiene un GMPM:

$$\ln (SA_{\text{predicted}}(T)) = \mu(Z|\theta) + \delta \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

en donde $\mu(Z|\theta)$ es la mediana del movimiento del suelo, con Z siendo una matriz con todas las variables explicativas y θ los coeficientes de la regresión, SA es la

aceleración espectral con un 5% de amortiguamiento en unidades de g, δ es el residual, es decir, la diferencia entre la observación y la predicción.

El residual se define de acuerdo a la Ecuación 2.13, como la diferencia entre el logaritmo natural del espectro de aceleraciones observado, y la predicción mediana del modelo.

$$\delta = \ln (S_{A_{\text{observed}}}(T)) - \ln (S_{A_{\text{predicted}}}(T)) \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

A su vez, el residual puede ser descompuesto en dos variables, de acuerdo a la Ecuación 2.14:

$$\delta = \delta B_e + \delta W_{es} \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

en donde δB_e y δW_{es} son variables aleatorias con promedio cero que corresponden a los residuales del movimiento del suelo y los subíndices e y s se refieren a “evento” y “estación”, respectivamente. δB_e es el residual entre-evento (o por su nombre en inglés, “Between-event residual” o también llamado “interevent residual”), el cual corresponde al promedio de la diferencia de los registros (intensidades observadas) de un evento en particular con respecto a la mediana del modelo del movimiento del suelo. δW_{es} es el residual de un evento (o por su nombre en inglés, “Within-event residual”, o también llamado “intraevent

residual), el cual corresponde a la diferencia entre una observación individual y la mediana corregida del evento estimada (Al atik et al., 2010; Rodriguez-Marek et al., 2011).

2.5 Conclusiones

En este capítulo se presentó la base teórica para comprender la física de la propagación de ondas en el suelo, se define la impedancia de un suelo y su importancia en la amplificación del suelo. Además, se definen los conceptos generales de un GMPM y la obtención de los residuales, siendo estos la diferencia entre la intensidad de movimiento predicha y observada.

3. ESTACIONES DE MONITOREO Y CARACTERIZACIÓN DE SITIO

3.1 Introducción

Para evaluar el impacto del IC en las intensidades del movimiento observadas y predichas (es decir, residuales), se ha utilizado registros sísmicos brutos de distintos eventos sísmicos. A continuación, se presenta la ubicación de las 17 estaciones de monitoreo de movimiento fuerte del suelo utilizadas para el análisis, y que son mantenidas por el CSN. Estas estaciones entregarán los registros sísmicos que serán utilizados para obtener el movimiento de suelo observado, y ser la base de comparación con las predicciones del movimiento del suelo.

3.2 Estaciones de monitoreo sísmico y caracterización de sitio

Para el análisis, se han seleccionado 17 estaciones de monitoreo de movimiento fuerte del suelo, las cuales son mantenidas por el CSN. Estas estaciones han sido seleccionadas en base a la disponibilidad de mediciones activas o pasivas de ondas de corte para la inversión de las curvas de dispersión, de las cuales se obtienen los perfiles de V_s (Leyton et al. 2018), alcanzando con éxito el basamento rocoso, y la disponibilidad de registros de movimiento fuerte del suelo para eventos con magnitud de momento, $M_w > 5,0$. Por otro lado, se necesita la caracterización del sitio para obtener la predicción del GM de un GMPM, la cual

utiliza V_{s30} , y para el cálculo del contraste de impedancia. En la Ilustración 3.1 se observan los eventos utilizados para el análisis, junto con la ubicación de las estaciones.

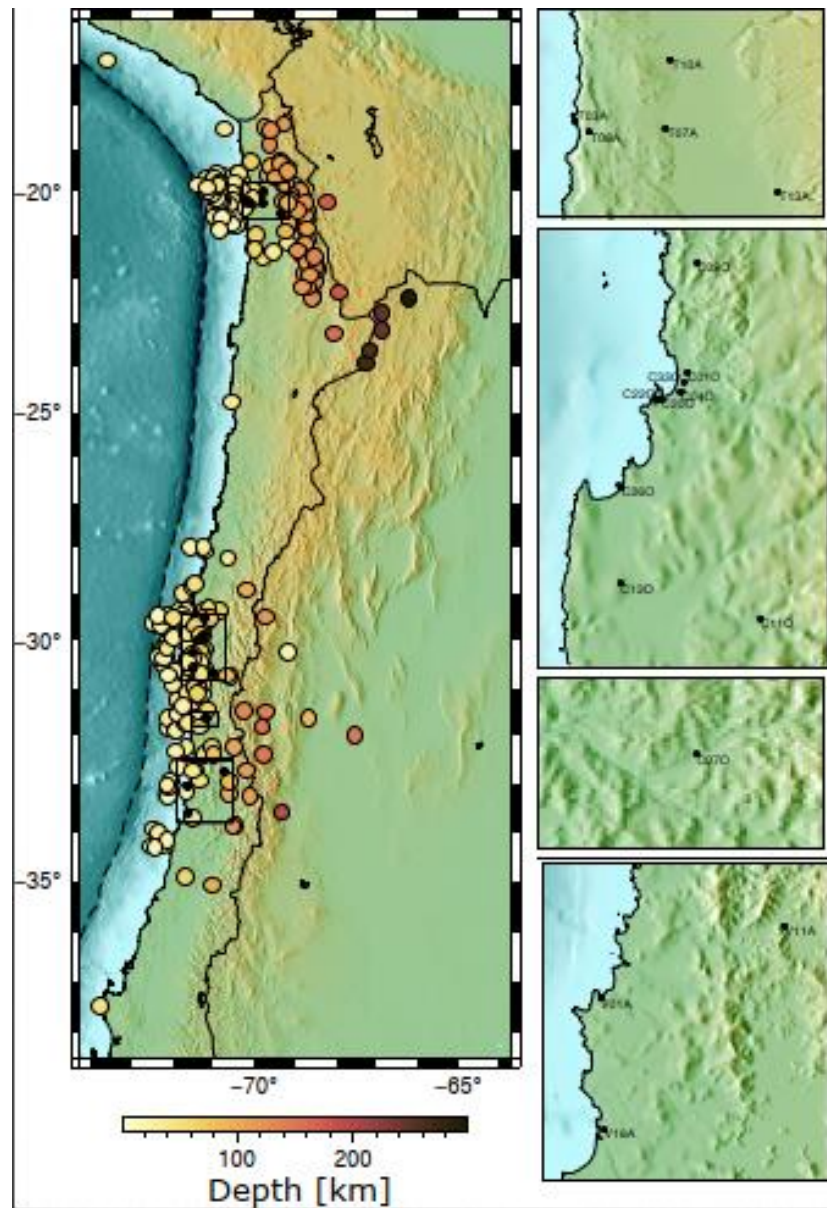


Ilustración 3.1: Ubicación de las estaciones sismológicas y eventos

Otra condición para la elección de las estaciones sismológicas fue la presencia de roca superficial, al menos en los primeros 100 m de profundidad, para obtener el contraste de impedancia de cada sitio.

Para la caracterización de sitio, se utilizaron arreglos superficiales de mediciones pasivas y activas para invertir, para posteriormente generar los perfiles de V_s . Los arreglos de mediciones pasivas fueron analizados utilizando la metodología SPAC propuesta por Aki (1957) y las mediciones activas de acuerdo a la metodología F-K propuesta por Kvaerna & Ringdahl (1986). En base a estas metodologías, se obtiene la curva de dispersión correspondiente de cada estación y se procede con la inversión para encontrar el perfil de V_s que mejor se ajuste a esta curva.

Esto se realiza con el complemento Dinver del *software* Geopsy (Wathelet et al., 2008), el cual busca generar diversos modelos de V_s que se comparan con un modelo inicial propuesto (modelo de entrada) y para el cual se busca converger a la solución en base a iteraciones, dada la curva de dispersión obtenida de la metodología SPAC o FK, de mediciones pasivas o activas, respectivamente. Finalmente, se obtiene el perfil de V_s por cada sitio con estación de monitoreo, que mejor se ajusta a la curva. Todos los sitios disponibles fueron caracterizados con V_{s30} entre 300 y 950 m/s, con profundidades hasta la roca de 8 a 85 m.

Con los perfiles de V_s , se procede con el cálculo de los contrastes de impedancia de cada una de las 17 estaciones de monitoreo (Ecuación 2.5). Para la simplificación del cálculo, se asume una densidad homogénea a lo largo de toda la columna de suelo analizada. Considerando este supuesto, se obtiene el IC más pequeño que es posible, obviando el hecho que la densidad de la roca es generalmente mayor a la de suelo blando o sedimentos.

En la Ilustración 3.2 se muestran los contrastes de impedancia calculados para cada estación.

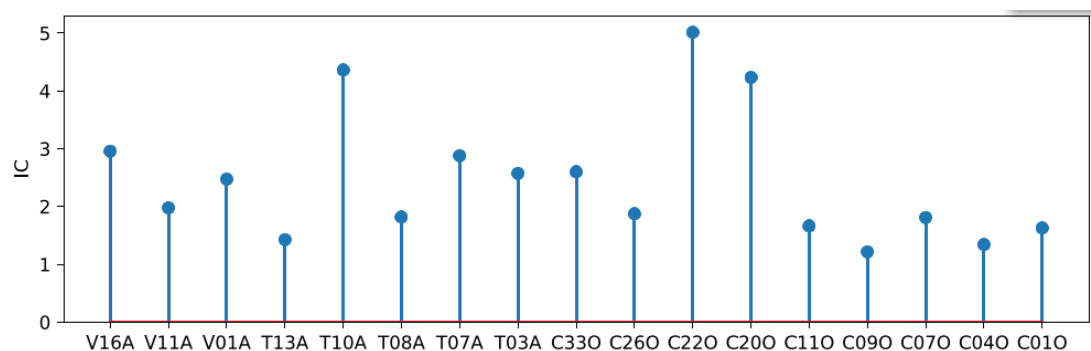


Ilustración 3.2: Contraste de impedancia calculado para cada una de las 17 estaciones seleccionadas

3.3 Conclusiones

Se presentó la selección y caracterización de los sitios en los cuales se encuentran emplazadas las estaciones de monitoreo del movimiento del suelo.

En base a los registros de estas estaciones, y en base a la caracterización de sitio de cada una, se aplica la teoría descrita en el Capítulo 2.

4. METODOLOGÍA

4.1 Introducción

A continuación, se presenta el procedimiento para la utilización de los registros sísmicos recolectados de las estaciones, para la obtención del movimiento del suelo observado, y el procedimiento para la obtención del movimiento predicho a través de la utilización de los GMPM seleccionados.

Para esto, se ha creado una base de datos para guardar y manejar toda la información requerida, utilizando la herramienta SQLite, en conjunto con el lenguaje de programación Python.

4.2 Intensidad de Movimiento del Suelo Observada

Se ha utilizado la información sísmica disponible de la base de datos del CSN para calcular el espectro de respuesta instrumental de cada registro utilizado. La base de datos para las 17 estaciones seleccionadas incluye 1694 registros de 3 componentes, de 751 eventos sísmicos, de los cuales 438 corresponden a eventos interplaca y 313 a eventos intraplaca.

Cada registro temporal de los eventos sísmicos es transformado al dominio de la frecuencia por medio del algoritmo de Nigam & Jennings (Boore, 2008), desarrollado en Python, estimando un pseudo-espectro de respuesta de aceleraciones horizontales amortiguadas en un 5%, para periodos entre 0.01 y

10 s. Cada pseudo-espectro de respuesta ha sido almacenado en la base de datos, para cada par estación-evento.

4.3 Intensidad de Movimiento del Suelo Predicha

Para estimar la intensidad de movimiento del suelo predicha de cada par estación-evento, se utilizó la información hipocentral de cada evento ya mencionado, como M_w , coordenadas epicentrales, profundidad focal, tipo de evento (interplaca o intraplaca), medidas fuente-sitio como hipocentro, distancia más cercana al plano de ruptura, y V_{s30} de cada estación de monitoreo. Toda esta información fue almacenada en la base de datos, para cada par estación-evento. Los eventos interplaca, que son asociados a fallas reversas, han sido localizados entre el límite Perú-Chile y la costa chilena, hasta 2.5° hacia el este con profundidades focales de hasta 50 km, y los eventos intraplaca, que son asociados a eventos con fallas normales con profundidades focales mayores a 50 km, pero localizados a más de 2.5° del límite de la costa (Bastías & Montalva, 2016). Esto se puede ver en la Ilustración 4.1.

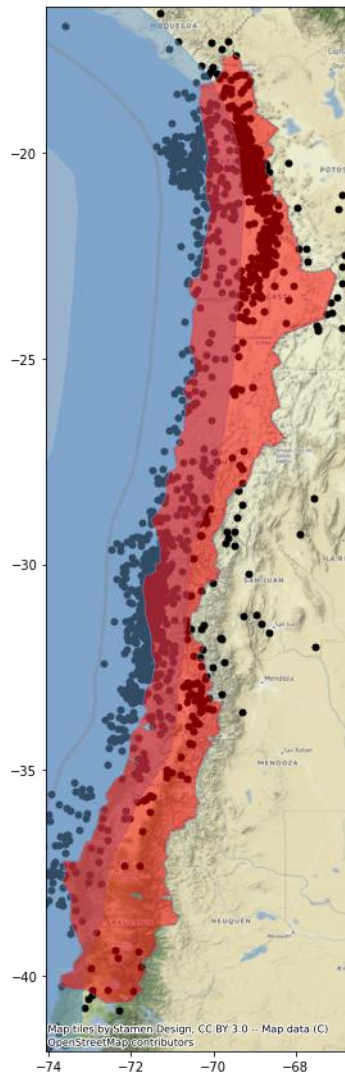


Ilustración 4.1: Localidad de los eventos utilizados en el análisis En rojo se muestra el territorio chileno para eventos intraplaca, y en azul está delimitado el límite Perú-Chile y la costa hasta 2.5° hacia el este y oeste, para eventos interplaca.

Para obtener la distancia más corta al plano de ruptura, se asume la distancia hipocentral como la distancia más corta al plano de ruptura, para eventos con magnitud de momento relativamente pequeña (M_w entre 5.0 – 5.9). Para eventos

con $M_w > 6.0$, se utilizaron planos de rupturas publicados por “United States Geological Survey” (USGS, por sus siglas en inglés), de aquellos eventos que tienen definido un plano de ruptura.

Con la información almacenada en la base de datos, se ha utilizado Montalva et al. (2017) y Parker et al. (2021) como GMPMs apropiados para la zona subductiva chilena. Los parámetros del movimiento del suelo predichos son la Aceleración Peak del Suelo (PGA, por su sigla en inglés) y el espectro de respuesta de pseudo-aceleraciones amortiguado en un 5%, hasta un periodo de 10 s. Estas predicciones de pseudo-aceleraciones han sido almacenadas para cada par estación evento, en correlativo con el periodo correspondiente de la predicción.

4.4 Residuales

Con el cálculo de la intensidad del movimiento observada, y la predicción de la intensidad del movimiento del suelo, se procede al cálculo del residual total (Ecuación 2.13) y los residuales within-event y between-event, para cada par estación evento, los cuales quedan almacenados en la base de datos, para cada modelo utilizado. Este es el último cálculo necesario para realizar el análisis de la implicancia de los contrastes de impedancia en los residuales.

4.5 Conclusión

Se ha presentado el procedimiento y la información necesaria para realizar los análisis, que incluyen el cálculo de la estimación del movimiento del suelo observado, utilizando los registros de eventos con $M_w > 5,0$, de las estaciones, el cálculo del movimiento del suelo predicho, utilizando la información de cada registro.

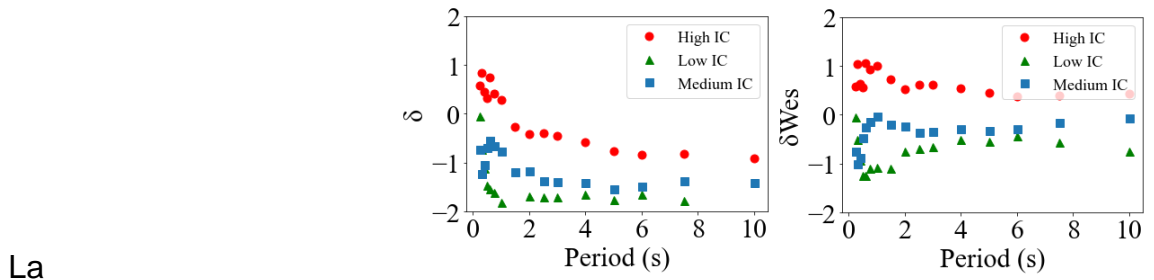
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Introducción

A continuación, se analiza la implicancia del contraste de impedancia en la predicción del movimiento del suelo, considerando los modelos de Montalva et al. (2017) y Parker et al. (2021). Se presentan comparaciones de distintas estaciones con respecto a los residuales obtenidos para una serie de eventos.

5.2 Resultados

Como primer análisis, se muestran los residuales totales, los residuales “within-event” y los residuales “between-event”, para tres sitios distintos. Uno de ellos con un bajo valor de IC (más bajo que 2.0), otro con un valor medio de IC (entre 2.0 y 4.0) y el otro con un alto valor de IC (mayor que 4.0). El evento considerado para este primer análisis tiene una magnitud de M_w 5.8 y se utilizaron 7 registros disponibles de las diferentes estaciones para el cálculo de δB_e .



La

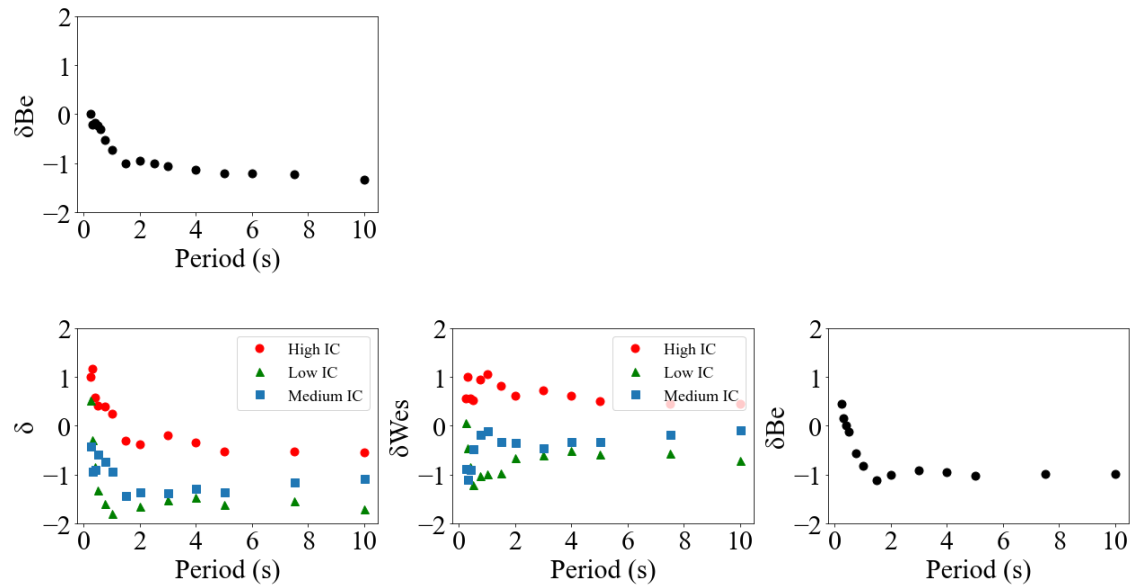
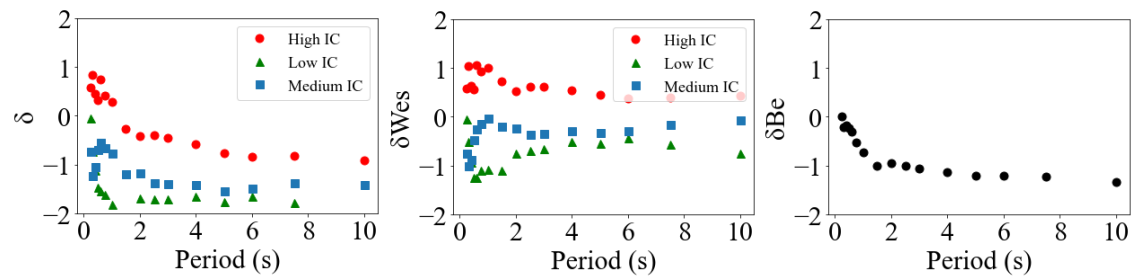


Ilustración 5.1 muestra los residuales para los modelos de Montalva et al. (2017) y Parket et al. (2020).



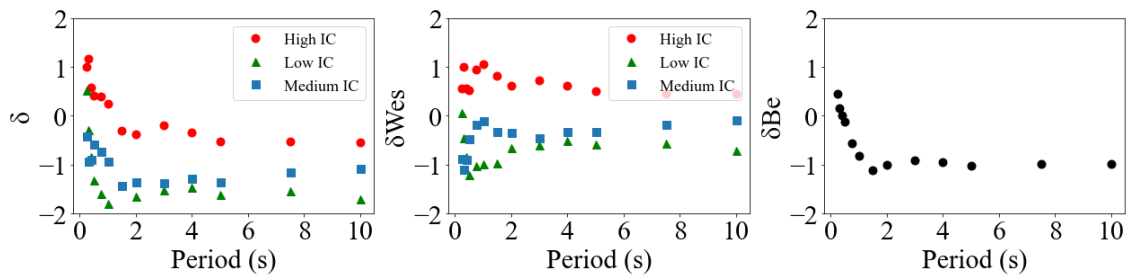


Ilustración 5.1 Residuales totales (δ), residuales within-event (δW_{es}) y residuales between-event (δB_e), para evento de M_w 5.8, para tres estaciones. Arriba: GMPM de Montalva et al 2017, abajo, GMPM de Parker et al. (2021)

Este análisis muestra que el sitio con el mayor IC posee los mayores valores de residuales, siendo positivos para bajos periodos. Residuales positivos indican que el movimiento de suelo observado para este evento es mayor que el predicho por los modelos, por lo cual este primer resultado indica que la amplificación está siendo subestimada para bajos periodos, para sitios con un alto valor de IC. Las diferencias para este caso, entre el sitio con el mayor IC y el sitio con el menor IC alcanzan 2.0 (g) como máximo, para periodos entre 0.5 y 1.0 s.

Identificando que los residuales totales y los residuales “within-event” son mayores para sitios con un alto IC, podría implicar una reducción en la incertidumbre en un Análisis Probabilístico de Riesgo Sísmico (PSHA, por sus siglas en inglés), y una predicción más precisa para los sitios con IC conocido.

Hay algunos GMPMs que incluyen, en cierto modo, las características de la roca. Abrahamson et al. (2014) o Boore et al. (2014) desarrollaron modelos para regiones corticales activas, que incluyen V_{s30} como el principal parámetro para la caracterización de sitio y también la profundidad a la cual V_s alcanza los 1000 m/s, z_1 . Este parámetro es seleccionado por ser más cercano a la definición más tradicional de “profundidad al basamento rocoso”, también conocido como “roca ingenieril”, permitiendo distinguir entre sitios de suelo superficial o profundo. El modelo de NGA-Subduction de Parker et al. (2021), que es un GMPM global para subducción con términos regionales, incluye la profundidad a la cual V_s alcanza los 1000 m/s, z_1 , y además, la profundidad a la cual V_s alcanza los 2500 m/s, $z_{2.5}$, para considerar los términos de profundidad de los sedimentos de la cuenca. Estos GMPM están basados en una roca de referencia para la cual se supone una $V_s = 1000$ m/s o $V_s = 2500$ m/s, pero incluso usando 1000 o 2500 m/s como referencia, a las predicciones aún les falta un factor significativo como lo es el contraste de impedancia.

Castellaro & Mulargia (2014) proponen un sistema de clasificación de suelo que incluye 3 parámetros, V_{s30} , f_0 y el IC, reconociendo la necesidad de usar parámetros que consideren mejor física de la amplificación sísmica.

La **Error! Reference source not found.** muestra la mediana y la desviación estándar para residuales totales y “within-event”, para otros eventos registrados por diferentes estaciones. Los eventos considerados tienen M_w entre 5.1 - .5.9,

lo cual genera un total de 627 registros. Nuevamente, se observa la misma tendencia del análisis anterior, donde ambos, los residuales totales y residuales within-event, son mayores para los sitios con un alto valor de IC, alcanzando valores positivos, principalmente para bajo periodos, reforzando la primera conclusión, que la amplificación está siendo subestimada para sitios con un alto valor del IC. Los sitios con un bajo IC presentan una mediana menor para los residuales totales, la cual es un poco mayor para los sitios con un valor medio de IC, que también poseen una mayor desviación estándar, mientras que los sitios con un alto valor de IC presentan residuales con una mayor mediana y una menor desviación estándar.

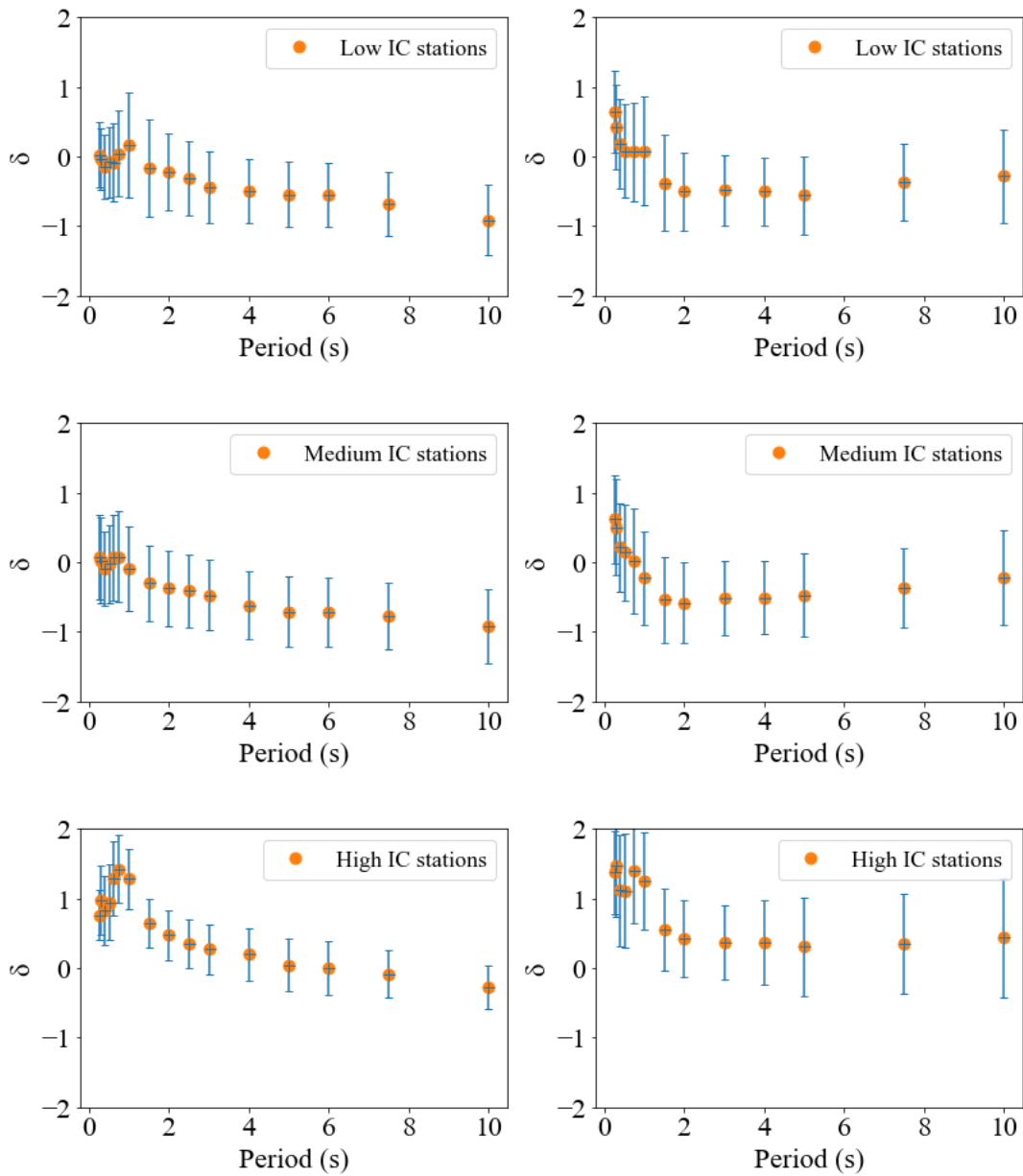


Ilustración 5.2: Mediana y desviación estándar para residuales totales y between-event, para eventos entre M_w 5.0 – 5.9- Columna 1 y 2 corresponde a los GMPMs de Montalva et al. (2017) y Parket et al. (2021), respectivamente.

Estas observaciones han sido realizadas con anterioridad, como en el trabajo de Baise et al. (2016), donde muestran que la amplificación de sitio podría estar subestimada para periodos bajos e intermedios, en sitios con un fuerte contraste de impedancia, en sitios donde la capa mas superficial ha sido caracterizada como rellenos artificiales y sedimentos marinos, con profundidades de basamento rocoso entre 20 y 80 m. Shingaki et al. (2018) comparó V_{s30} con otro parámetro, la razón de impedancia de ondas S (S-wave impedance ratio) de la capa mas superficial y la capa del basamento rocoso, obteniendo mejores resultados para la amplificación de sitio con este parámetro que utilizando V_{s30} , para PGA y periodos bajos.

En la Ilustración 5.3, se evalúa un evento con M_w mayor (Illapel M_w 8.5, 2015, Candia et al., 2017), en donde se observa que el sitio con el mayor valor de IC tiene los mayores valores de residuales totales y residuales within-event, pero también se observa que la diferencia con los otros sitios se reduce en este caso, que se considera un evento de magnitud mayor.

Nuevamente, hay valores positivos de residuales para periodos bajos, para el sitio con un alto IC. Se observa que la el sitio de la estación con un bajo valor de IC tiene valores intermedios de residuales totales, y esto podría deberse a que este sitio está caracterizado por sedimentos marinos sobre conglomerado y arenisca. Esto implicaría un mayor IC si se considera la densidad en el cálculo

del IC y justificaría que estos valores de los residuales sean mayores que aquellos en un sitio con valores medios de IC, debido a que los sedimentos marinos poseen en general densidades significativamente menores que la roca subadyacente.

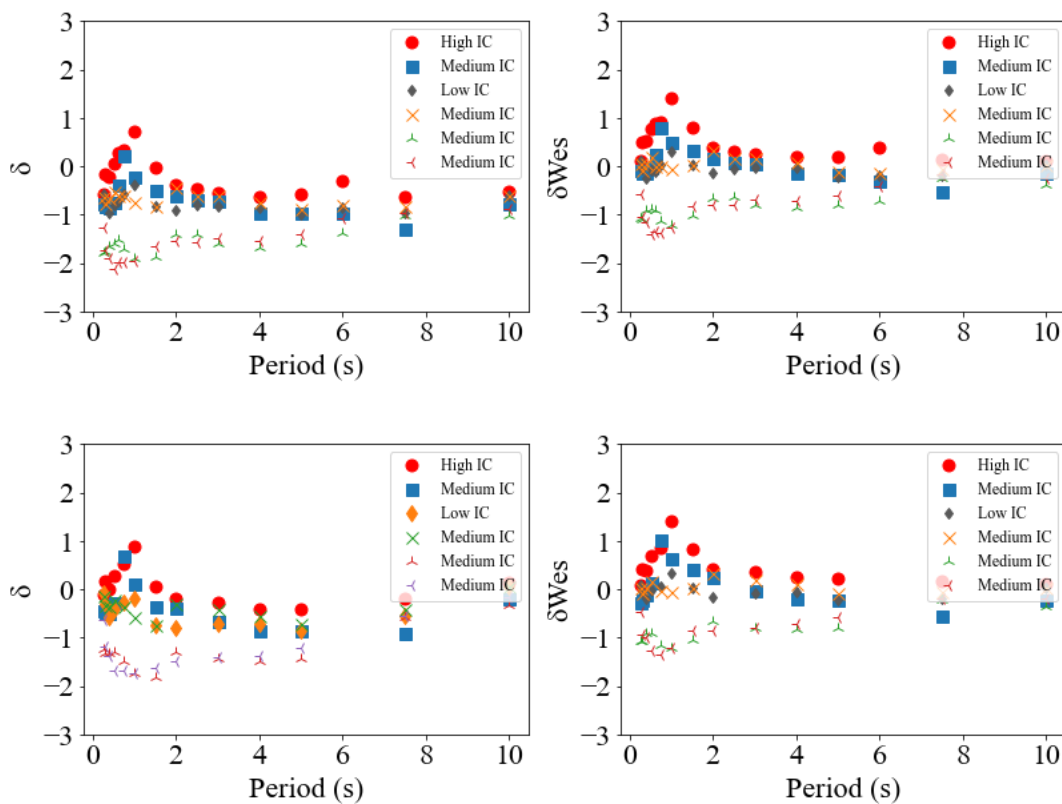
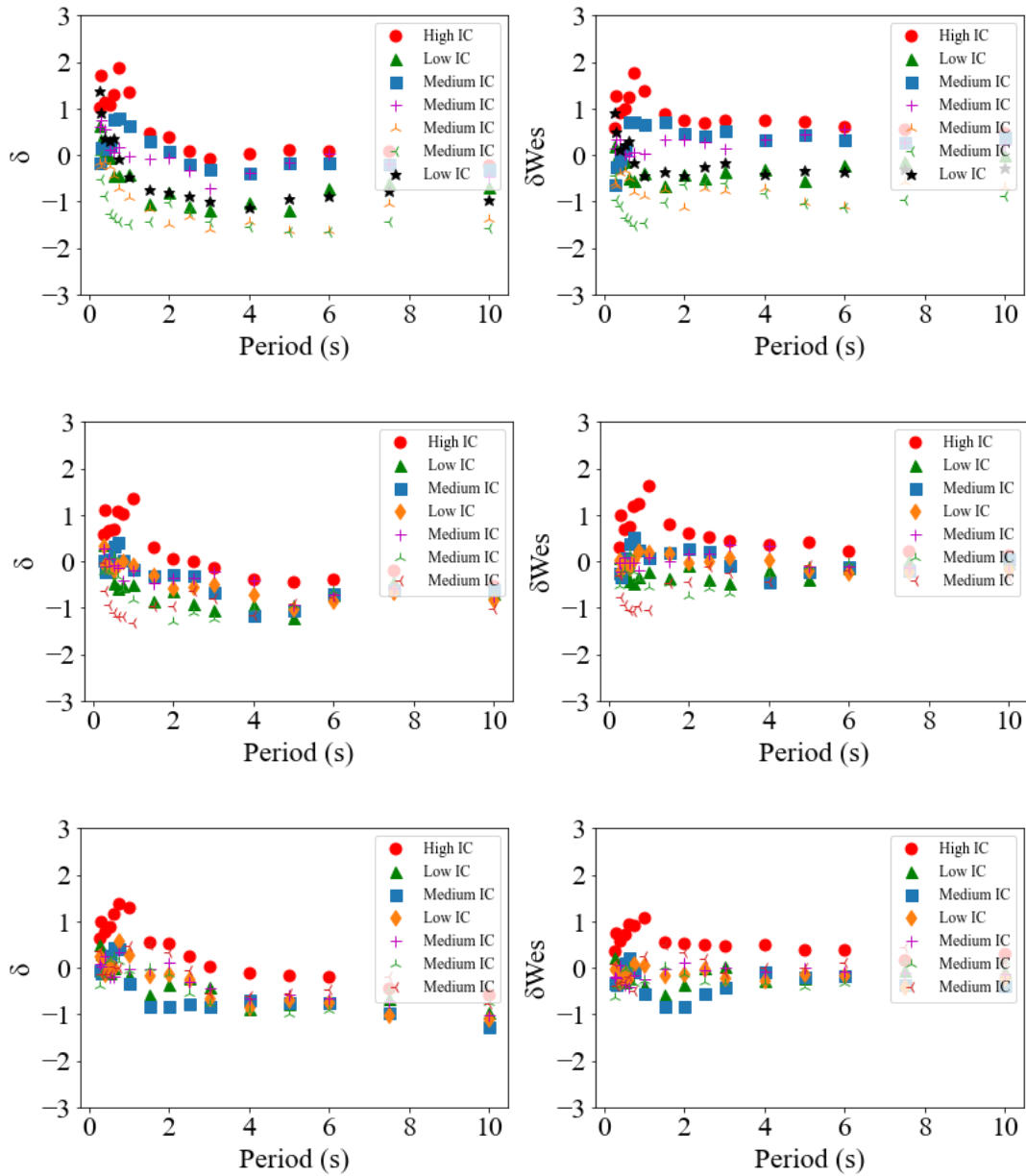


Ilustración 5.3 Residuales totales para evento de M_w 8.4, para seis estaciones.

Si se evalúan otros eventos con M_w mayor que 5.9, se observa que la diferencia entre los residuales de sitios con diferentes IC decrece en algunos casos (Ilustración 5.4). De todas formas, la tendencia es a misma que se ha observado

a lo largo del análisis, la amplificación pareciera ser subestimada para bajos periodos, para los sitios con un alto valor de IC. También, los residuales son mayores para aquellos sitios con un alto.



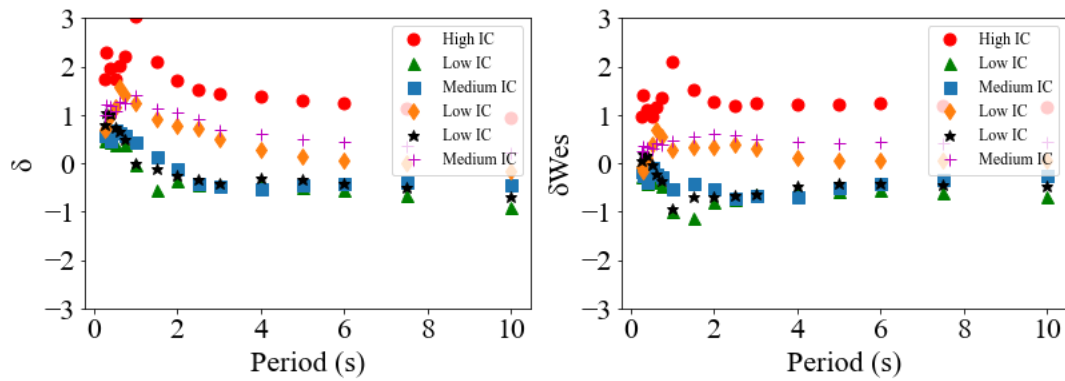


Ilustración 5.4 Residuales totales y “within-event” para el GPM de Montalva et al. (2017), para diferentes estaciones. Filas de la uno a la cuatro corresponden a evento de Mw 6.8 (Noviembre 07, 2015), evento de Mw 6.7 (Septiembre 17, 2015), evento de Mw 6.2 (Septiembre 22, 2015), evento de Mw 6.0 (Octubre 03, 2015).

6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Se ha presentado una serie de análisis que muestran el impacto del contraste de impedancia en los residuales obtenidos por los GMPMs de zonas subductivas (Montalva et al. (2017); Parker et al. (2021)) para una serie de estaciones de monitoreo del movimiento del suelo que han sido bien caracterizadas a través del territorio chileno. En estas estaciones, se han obtenido valores realistas de los IC, basados en perfiles detallados de V_s (Leyton et al. 2018). Estos análisis mostraron que el IC tiene un fuerte impacto en la predicción del GM, se observa una clara tendencia en los sitios de las estaciones con un alto IC, en los cuales la amplificación de sitio es mayor que para aquellos sitios con un valor bajo o medio del IC. Incluso, la amplificación pareciera ser subestimada para sitios con un alto IC, mostrando valores positivos de los residuales, lo cual indica que el movimiento del suelo predicho es menor que el observado, y un sesgo que va desde los 0.36 (g) para la base de datos usada en este trabajo.

Evaluando la Razón Espectral Horizontal-Vertical (HVSr, por si sigla en inglés) de cada estación (de la base de datos del CSN), se muestra que la HVSr está altamente correlacionada con los valores de IC, es decir, los sitios con un bajo IC tienen una menor amplitud de HVSr que aquellos sitios con valores altos de IC. Esto concuerda con las conclusiones del trabajo, donde se ha encontrado que la

amplificación de sitio es mayor para aquellos sitios con un alto IC que para aquellos sitios con un bajo IC.

Varios autores (Castellaro et al., 2008; Narayan, 2010; Lee & Trifunac, 2010; Baise et al., 2016; Montalva et al., 2016; Shingaki et al., 2018) han concluido respecto a la necesidad de tener otros parámetros para la caracterización de sitio además de V_{s30} , dado que este parámetro no es suficiente para representar los efectos de sitio debido a la complejidad de este fenómeno, siendo necesario estudiar otros parámetros, como en este caso, el contraste de impedancia.

Argumentamos, a la luz de estos análisis preliminares, que el IC es un gran candidato para tal mejora, dado que otros parámetros más simples (por ejemplo, $Z_{1.0}$, $Z_{2.5}$) no pueden capturar apropiadamente la amplificación de sitio.

7. REFERENCIAS

- Abrahamson, N., Gregor, N., & Addo, K. (2016). BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23–44.
- Abrahamson, N., Silva, W., & Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1025–1055.
- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors. *Bulletin of Earthquake Research Institute*, 35, 415–456.
- Al Atik, L., Abrahamson, N., Bommer, J., Scherbaum, F., Cotton, F., Kuehn, N. (2010). The variability of ground-motion prediction models and its components. *Seismological Research Letters*, 81(5), 794–801.
- Baise, L. G., Kaklamanos, J., Berry, B. M., & Thompson, E. M. (2016). Soil amplification with a strong impedance contrast: Boston, Massachusetts. *Engineering Geology*, 202, 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.016>
- Boaga, J., Vignoli, G., & Cassiani, G. (2011). Shear wave profiles from surface wave inversion: The impact of uncertainty on seismic site response analysis. *Journal of Geophysics and Engineering*, 8(2), 162–174.

<https://doi.org/10.1088/1742-2132/8/2/004>

Boore, D. (2008, revised 2009). TSPP - A collection of FORTRAN programs for processing and manipulating time series. *U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-111*, 1-52.

Boore, D., Stewart, J., Seyhan, E., & Atkinson, G. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, *30*(3), 1057–1085.

Boore, D., Stewart, J., Skarlatoudis, A., Seyhan, E., Margaris, B., Theodoulidis, N., Scordilis, E., Kalogeras, I., Klimis, N. (2021). A ground-motion prediction model for shallow crustal earthquakes in Greece. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *111*(2); 857-874.

Candia, G., De Pascale, G. P., Montalva, G., & Ledezma, C. (2017). Geotechnical aspects of the 2015 Mw 8.3 Illapel megathrust earthquake sequence in Chile. *Earthquake Spectra*, *33*(2), 709–728.

Castellaro, S., & Mulargia, F. (2014). Simplified seismic soil classification: The Vfz matrix. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *12*(2), 735–754.
<https://doi.org/10.1007/s10518-013-9543-3>

Castellaro, S., Mulargia, F., & Rossi, P. L. (2008). Vs30: Proxy for seismic amplification? *Seismological Research Letters*, *79*(4), 540–543.
<https://doi.org/10.1785/gssrl.79.4.540>

Chávez-García, F. J., & Bard, P. Y. (1994). Site effects in Mexico City eight years

- after the September 1985 Michoacan earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13(4), 229–247. [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(94\)90028-0](https://doi.org/10.1016/0267-7261(94)90028-0)
- Chiou, B. S.-J., & Youngs, R. . (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1117–1153.
- Cranswick, E., King, K., Carver, D., Worley, D., Williams, R., Spudich, P., & Banfill, R. (1990). *Site response across downtown Santa Cruz, California*. 17(10), 1793–1793.
- Foti, S. D. (2014). *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*.
- Frankel, A. D., Carver, D. L., & Williams, R. A. (2002). Nonlinear and linear site response and basin effects in Seattle for the M 6.8 Nisqually, Washington, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6), 2090–2109.
- Idriss, I. (2014). An NGA-West2 empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1155-1177.
- Inzunza, D., Montalva, G., Leyton, F., Prieto, G., & Ruiz, S. (2019). Shallow ambient-noise 3D tomography in the concepción basin, Chile: Implications for low-frequency ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(1), 75–86.

- Jamshidi, R., Davoodi, M., & Alinejad, A. (2012). *Effects of spatial variability of soil properties on natural frequency of natural soil deposits* [Conference session]. 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), Lisbon, Portugal.
- Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H., & Fukushima, Y. (2006). A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data. *Bulletin of Seismological Society of America*, 96(3), 878–897.
- Kvaerna, T., & Ringdahl, F. (1986). Stability of various f-k estimation techniques”. *Norsar Scientific Report*, 1, 29–40.
- Lee, V. W., & Trifunac, M. D. (2010). Should average shear-wave velocity in the top 30m of soil be used to describe seismic amplification? *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11), 1250–1258.
- Leyton, F., Leopold, A., Hurtado, G., Pastén, C., Ruiz, S., Montalva, G. and Saez, E. (2018). Geophysical characterization of the chilean seismological stations: First results. *Seismological Research Letters*, 89(2), 519-525.
- Montalva, G. A., Bastías, N., & Rodriguez-Marek, A. (2017). Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2), 901–911.
- Montalva, G. A., Chavez-Garcia, F. J., Tassara, A., & Jara Weisser, D. M. (2016). Site effects and building damage characterization in Concepción after the Mw 8.8 Maule Earthquake. *Earthquake Spectra*, 32(3), 1469–1488.

- Narayan, J. P. (2010). Effects of impedance contrast and soil thickness on basin-transduced rayleigh waves and associated differential ground motion. *Pure and Applied Geophysics*, 167(12), 1485–1510.
- Parker, G., Stewart, J., Boore, D., Atkinson, G., Hassani, B. (2021). NGA-subduction global ground motion models with regional adjustment factors. *Earthquake Spectra*.
- Rodriguez-Marek, A., Montalva, G. A., Cotton, F., & Bonilla, F. (2011). Analysis of single-station standard deviation using the KiK-net data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(3), 1242–1258.
- Seed, R., Dickenson, S., & Idriss, I. (1991). Principal geotechnical aspects of the 1989 Loma Prieta earthquake. *Soils and Foundations*, 31(1), 1-26.
- Shingaki, Y., Goto, H., & Sawada, S. (2018). Evaluation performance for site amplification factors: S-wave impedance vs. VS30. *Soils and Foundations*, 58(4), 911–927.
- Wathelet, M., Jongmans, D., Ohrnberger, M., Wathelet, M., Jongmans, D., Ohrnberger, M., Array, S. B., Wathelet, M., Jongmans, D., & Ohrnberger, M. (2008). Array performances for ambient vibrations on a shallow structure and consequences over Vs inversion. *Journal of Seismology*, 12, 1–19.
<http://www.geopsy.org/publi/Wathelet2008.pdf>
- Yoshida, N. (2015). *Seismic ground response analysis*. Springer.

Zhao, J., Jiang, F., Shi, P., Xing, H, Huang, H., Hou, R., Zhang, Y., Yu, P., Lan, X., Rhoades, D., Somerville, P., Irikura, K., Fukushima, Y. (2016). Ground-motion prediction equations for subduction slab earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(4), 1-17.

LIS, UCR (2011). **Efectos de Sitio**. Página oficial del Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Instituto de Investigaciones de Ingeniería (INII) de la Universidad de Costa Rica. (<http://www.lis.ucr.ac.cr/239>). Visitado el día 25/03/2019.

8. ANEXOS

8.1 Anexo 1

Tabla A.1.1 Valores del contraste de impedancia de las estaciones de monitoreo sísmico

Estación	IC	Rango
C01O	1.6	Low
C04O	1.3	Low
C07O	1.8	Low
C09O	1.2	Low
C11O	1.7	Low
C20O	4.2	High
C22O	5.0	High
C26O	1.8	Low
C33O	2.6	Medium
T03A	2.6	Medium
T07A	2.9	Medium
T08A	1.8	Medium
T10A	4.4	High
T13A	1.4	Low
V01A	2.6	Medium
V11A	1.9	Medium
V16A	3.0	Medium

