



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería – Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en
Ingeniería Civil

Análisis del método HVSR como una función de transferencia para la cuenca de Concepción

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con
Mención en Ingeniería Civil

PAULINA BEATRIZ REBOLLEDO FUENTEALBA
CONCEPCIÓN – CHILE
2023

Profesor Guía: Dr. Gonzalo Montalva Alvarado
Evaluador Interno: Dra. Daniella Escribano
Evaluador Externo: Dr. Felipe Leyton
Dpto. de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

© 2023 Paulina Rebolledo Fuentealba

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

RESUMEN

Los efectos de sitio son las modificaciones locales que sufren las ondas sísmicas al propagarse a través de las capas del suelo. Una de las formas de cuantificar estos efectos es mediante funciones de transferencia empíricas (ETF). Entre los métodos de cálculo de los ETF se encuentran las relaciones espectrales estándar (SSR), la inversión paramétrica del espectro de amplitud de la onda S (GIS) y la técnica de relaciones espectrales horizontales a verticales (HVSR). Esto último es especialmente relevante ya que sus resultados no dependen de una estación de referencia. Aunque el HVSR ha demostrado ser un buen estimador de la frecuencia predominante de suelos blandos, los resultados asociados con el nivel de amplificación varían de una estación a otra. Este estudio evalúa el HVSR como estimador de respuesta de sitio en cuencas, utilizando la cuenca de Concepción como caso de estudio. Utilizamos una red sismológica local establecida en 2018 en Concepción, Chile. Las funciones de transferencia se calcularon utilizando los métodos HVSR, función de transferencia de superficie (STF) y función de transferencia de pozo (BTF). Dadas las discrepancias en el nivel de amplificación del HVSR con otros métodos, concluimos que las principales causas de esta discrepancia son los efectos del HVSR al nivel del lecho de roca ($HVSR_B$) y la amplificación vertical del suelo (BTF_V). Proponemos una corrección al estándar HVSR basado en $HVSR_B$ y BTF_V , que disminuyó el error de amplificación de HVSR de más del 140% a menos del 22%.

ABSTRACT

Site effects are the local modifications seismic waves suffer when propagating through the soil layers. One of the ways to quantify these effects is through empirical transfer functions (ETF). Among the ETFs calculation methods are the standard spectral ratios (SSR), the parametric inversion of the S-wave amplitude spectrum (GIS), and the horizontal-to-vertical spectral ratios technique (HVSR). The latter is especially relevant since its results do not depend on a reference station. Although the HVSR has proven to be a good estimator for the predominant frequency of soft soils, the results associated with the level of amplification vary from station to station. This study evaluates the HVSR as an estimator of site response in basins, using the Concepción basin as a case study. We used a local seismological network established in 2018 in Concepción, Chile. The transfer functions were calculated using HVSR, Surface Transfer Function (STF), and Borehole Transfer Function (BTF) methods. Given the discrepancies in the level of amplification of the HVSR with other methods, we concluded that the main causes of this discrepancy are the effects of the HVSR at the bedrock level (HVSRB) and the vertical amplification of the soil (BTFV). We propose a correction to the HVSR standard based on HVSRB and BTFV, which decreased the amplification error of HVSR from more than 140% to less than 22%. The proposal was successfully tested at Kik-net station AICH16.

AGRADECIMIENTOS

Se reconoce el apoyo prestado por el programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería de la Universidad de Concepción para el desarrollo de este trabajo, así como el apoyo incondicional de familiares y amigos. Junto con lo anterior se agradece al proyecto FONDEQUIP EQM 160015 que financió el “Observatorio de Respuesta de Sitio sobre Cuencas Aluviales”, sin el cual no habría sido posible esta investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Hipótesis de investigación	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Metodología de trabajo	3
1.5 Principales resultados y conclusiones	3
1.6 Organización del documento	4
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE	5
2.1 Introducción	5
2.2 Efecto de sitio	5
2.3 Métodos experimentales de evaluación de respuesta en superficie	6
2.4 Conclusiones	9
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DEL METODO HVSR EN LA CUENCA DE CONCEPCIÓN.....	10
3.1 Introducción	10
3.2 Sitio de estudio.....	10
3.3 Compilación de datos.....	11
3.4 Procesamiento de base de datos de terremotos	12
3.5 Procesamiento de base de datos de microtemores	13
3.6 Formulación basada en HVSR y TFV	14
3.7 Conclusiones	15
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	16
4.1 Introducción	16
4.2 Análisis de razones espectrales H/V en superficie	16
4.3 Comparación de los resultados del HVSR y el SSR	19
4.4 Análisis de las hipótesis del HVSR	22
4.5 Estimación de la amplificación horizontal de sitio según HVSR	24
4.6 Conclusiones	27
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES	28

REFERENCIAS	31
ANEXO 3.1 SISMOS CONSIDERADOS.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Resumen de los valores de frecuencia predominante y amplitud del peak del eHVSR y mHVSR	18
Tabla 4.2 Valores de frecuencia predominante y amplitud del peak del mHVSR y SSR	20
Tabla 4.3 Valores de frecuencia predominante y amplitud del peak del mHVSR corregido localmente en base a una estación de roca superficial y la función teórica.....	26
Tabla A.3.1 Detalle de sismos considerados	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estaciones empleadas por el método SSR	7
Figura 3.1 Distribuciones estaciones en la cuenca de Concepción	11
Figura 3.2 Área de estudio y sismos considerados	12
Figura 4.1 Comparación curvas eHVSr y mHVSr.....	17
Figura 4.2 Razones espectrales obtenidas según los métodos HVSR, STF y BTF para cada estación	20
Figura 4.3 mHVSr (de la roca en profundidad) de la ST01 junto a su media.....	23
Figura 4.4 Comparación del BTF _v respecto a la razón BTF _H /HVSR _s de la ST01	23
Figura 4.5 Comparación del mHVSr corregido localmente, STF, mHVSr y función de amplificación teórica	25
Figura 4.6 Comparación del mHVSr corregido localmente con STF, mHVSr y función de amplificación teórica en la estación AICH16 de la red de Kik-net	26

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Dado que el efecto de sitio puede generar amplificaciones importantes en la superficie, este debe ser considerado al momento de diseñar infraestructura crítica, planificar el uso de suelo o al generar regulaciones sísmicas.

Debido a múltiples variables topográficas, espaciales y geológicas que influyen en el efecto de sitio, la caracterización de este efecto es bastante compleja. Por este motivo, los investigadores han desarrollado diversos métodos para estimar los principales efectos locales que afectan el vibrar del suelo. Entre estos se destacan los métodos experimentales de la evaluación de la respuesta de sitio en superficie. La principal ventaja de estos métodos radica en su fiabilidad pues la información proviene del sitio de estudio.

Dentro de los métodos experimentales de la evaluación de la respuesta de sitio en superficie se distingue las relaciones espectrales estándar (SSR) y las relaciones espectrales horizontales a verticales (HVSR), destacando este último porque sus cálculos no requieren una estación de referencia. De hecho, la simplicidad y bajo costo del método HVSR lo posiciona como uno de los métodos experimentales más atractivos.

La principal utilidad del método HVSR se encuentra en la determinación de la frecuencia predominante de suelos blandos. Sin embargo, a la fecha no existe un claro consenso respecto a la estimación del nivel de amplificación utilizando este método. Este aspecto puede ser abordado mediante el uso de mediciones de pozo, pues estas permiten calibrar, comparar y entender las funciones HVSR.

Se ha observado que las discrepancias en el nivel de amplificación entre el HVSR y los otros métodos provienen de los supuestos de Nakamura, ya que este subestima el efecto de las relaciones espectrales horizontales a verticales dadas por mediciones de microtremor (mHVSR) de la roca en profundidad (mHVSR_B) y la función de transferencia de pozo (BTF) para la componente vertical (BTF_V). Esta investigación centra su estudio en este último aspecto, enfocado en la cuenca de

Concepción. Para ello fue evaluado el método HVSR corregido localmente como estimador de la respuesta de sitio en la cuenca de Concepción.

1.2 Hipótesis de investigación

Al incorporar los efectos del HVSR de la roca en profundidad y el BTF para la componente vertical en la formulación de Nakamura, el mHVSR es un buen estimador de la respuesta de sitio en la cuenca de Concepción.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el mHVSR como estimador de la respuesta de sitio en la cuenca de Concepción al incorporar los efectos del HVSR en la roca en profundidad (*Borehole Horizontal to Vertical Spectral Ratio at Bedrock*, $HVSR_B$) y el BTF para la componente vertical (*Vertical Borehole Transfer Function*, BTF_V) en la formulación de Nakamura.

1.3.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos asociados al desarrollo de esta investigación son:

1. Calcular el mHVSR en todas las estaciones del “Observatorio de Respuesta de Sitio en Cuencas Aluviales” (ORSCA) ubicado en la cuenca de Concepción.
2. Comparar los resultados de las curvas de los métodos STF, BTF con los del método mHVSR.
3. Analizar los supuestos del mHVSR para la estimación de la función de transferencia en la cuenca de Concepción.
4. Incluir los efectos del $HVSR_B$ y del BTF_V en la formulación de Nakamura para el método mHVSR corregido localmente.

1.4 Metodología de trabajo

Para lograr los objetivos de esta investigación, la metodología de trabajo se dividió en cuatro etapas, cada una de ellas asociada a un objetivo específico.

1. Para la FT obtenida del mHVS_R se requirieron mediciones de ruido ambiental a distintos horarios. Las funciones fueron analizadas y procesadas mediante el programa GEOPSY.
2. El cálculo de STF y el BTF fue realizado mediante la razón de espectros de Fourier entre los registros de superficie y la estación de referencia (estación en roca). En el caso del STF la estación de referencia era una roca superficial, en cambio, en el BTF era una roca en profundidad. Ambos espectros fueron calculados desde la llegada de la onda S. Para comparar los resultados de las curvas de los métodos STF y BTF con los del método mHVS_R fueron considerados los parámetros de frecuencia predominante del suelo y el nivel de amplificación entregado por cada método.
3. La evaluación de la veracidad de los supuestos del HVS_R para la estimación de la función de transferencia fue realizado calculando el HVS_R en la roca en profundidad y el BTF para la componente vertical.
4. Para incluir los efectos del HVS_{R_B} y del BTF_V en la ecuación de Nakamura, esta fue reformulada como $HVS_{R_S} \times BTF_V / HVS_{R_B}$. Dicha formulación fue evaluada en todas las estaciones de la red ORSCA y comparada con los métodos mHVS_R, BTF y TF teórica.

1.5 Principales resultados y conclusiones

El análisis realizado sobre los métodos mHVS_R, BTF y STF para la obtención de la respuesta de sitio de las seis estaciones superficiales y la estación en profundidad indicó que el mHVS_R es un buen estimador de la frecuencia predominante del sitio, pero no un buen estimador del nivel de amplificación en la cuenca de Concepción.

Las diferencias en el nivel de amplificación del HVS_R y del SSR se deben principalmente a dos factores. El primero de ellos es el HVS_R en la roca cuyos cálculos demostraron que es una curva relativamente plana, cuyo efecto puede ser aproximado a una constante que difiere del valor 1 asumido por Nakamura (1989), en el caso de la cuenca de Concepción el valor fue de 1,32. El

segundo es la amplificación vertical que sufre el suelo la cual llegó a un valor de amplitud cercano a 8.

Comparativamente, el método mHVSR corregido localmente, el cual incluyó el efecto del BTF_V y el $HVSR_B$, presentó una mejora respecto al mHVSR, ya que el primero se aproxima mejor a la amplificación real observada del suelo en la cuenca de Concepción. De manera complementaria fue evaluado el mHVSR corregido localmente en una estación de la red japonesa Kik-net, la cual presentó un buen ajuste, reforzando las conclusiones obtenidas.

En particular, al evaluar la única estación de la red ORSCA con arreglo vertical, se obtuvo que el mHVSR corregido localmente entregó mejores resultados para estimar la función de transferencia horizontal que la función de amplificación teórica unidimensional. Pese a lo anterior, el mHVSR corregido localmente subestimó la amplificación real en un -16%.

1.6 Organización del documento

El documento se divide en cinco capítulos. El primer capítulo corresponde a la introducción de la investigación, en el cual se expone la hipótesis, los objetivos, la metodología de trabajo y los principales resultados. En el segundo capítulo se presenta el estado del arte asociado al efecto de sitio, los métodos experimentales de evaluación de la respuesta de sitio y la relevancia del método HVSR. En el tercer capítulo se introduce el sitio de estudio el cual considero una red de sismómetros que entregaron la información para el desarrollo de esta investigación, junto con el proceso de selección y procesamiento de la base de datos, donde se definen los criterios para la selección de registros y se entrega el procesamiento utilizado para la corrección del set de registros y el set de ruido ambiental. Luego, en el cuarto capítulo se presenta el análisis de resultados relacionados con los diferentes objetivos definidos. Finalmente, en el quinto capítulo se discuten los resultados y se sintetizan las conclusiones.

CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

Este capítulo abarca diversos temas involucrados con la obtención de la respuesta de sitio mediante el método HVSR. Primero se describe el efecto de sitio para luego explicar la formulación de los principales métodos experimentales de evaluación de este efecto en superficie, junto con sus aplicaciones y limitaciones.

2.2 Efecto de sitio

Las ondas sísmicas, al propagarse a través de un medio ortotrópico, experimentan una amplificación local de su respuesta, fenómeno observado en los terremotos de Loma Prieta 1989, Northridge 1994, Kobe 1995, Quindío 1999, Kocaeli 1999, Atenas 1999, Bhuj 2001, Bam 2003, Concepción 2010 y México 2017. Este fenómeno se debe a factores como el contraste en las velocidades de propagación de las ondas entre las diversas capas de suelo, la refracción-reflexión de las ondas entre capas y la topografía superficial, entre otros (Şafak, 2001). La amplificación resultante puede tener un impacto significativo en la demanda sísmica en la superficie, afectando a estructuras que no fueron diseñadas teniendo en cuenta tales escenarios.

En numerosos estudios, se ha observado que los terremotos causan daños más significativos en la superficie de suelos blandos en comparación con los afloramientos rocosos. Es decir, las ondas sísmicas, al propagarse a través de una capa de suelo blando, experimentan un aumento considerable en la amplitud del movimiento del suelo (Borcherdt, 1970; Anderson *et al.*, 1986; Shearer y Orcutt 1987). Este fenómeno es de particular relevancia, dado que muchos asentamientos humanos se encuentran ubicadas en valles de ríos sobre depósitos no consolidados o en cuencas rellenas con sedimentos aluviales.

Dado que Chile es un país con una alta actividad sísmica (Cisternas *et al.*, 2005) y ha experimentado terremotos significativos en los últimos años, como el de Maule en 2010, Iquique en 2014, Illapel en 2015 y Melinka en 2016, se ha evidenciado la necesidad de desarrollar modelos adaptados a los

eventos sísmicos de nuestra región con el fin de mitigar los riesgos (Montalva *et al.*, 2016; Montalva *et al.*, 2022). Esta necesidad se destaca especialmente en las cuencas aluviales, como la de Concepción, que han mostrado particularidades en su respuesta sísmica (Chávez-García y Montalva, 2014). Para lograr este objetivo, es esencial considerar la amplificación del sitio.

Las aceleraciones sísmicas en la superficie son el resultado de la superposición de tres efectos principales: (1) la acción sísmica en la fuente, (2) la atenuación de ondas durante su desplazamiento y (3) el efecto de sitio. Este último ha captado la atención de diversos investigadores ya que particulariza la demanda sísmica en un sitio. Se han desarrollado diversas técnicas para estimar los efectos locales que afectan la vibración del suelo. Estas técnicas se basan en datos instrumentales (métodos experimentales), como mediciones de microtremor y eventos sísmicos de alta y baja intensidad, así como enfoques numéricos (como elementos finitos y matriz de propagación), métodos de cálculo (incluyendo análisis lineal y lineal equivalente), y diversas ecuaciones empíricas que relacionan los parámetros de movimiento de un terremoto (magnitud, profundidad, etc.) con las amplitudes de movimiento del suelo en un sitio específico o GMPE según sus siglas en inglés (*Ground Motion Prediction Equation*).

2.3 Métodos experimentales de evaluación de respuesta en superficie

En líneas generales, los métodos experimentales se dividen en dos categorías: aquellos calculados con base en un sitio de referencia y aquellos calculados sin un sitio de referencia (Bard, 1995). Mientras que el primero implica la instalación de una estación en una roca dura como punto de referencia, el segundo parte del supuesto de que una de las componentes del suelo, generalmente la vertical, refleja el movimiento del suelo en la roca (Burdick y Langston, 1977; Chávez-García y Tejada, 2010). Este supuesto se sustenta en la observación empírica de que las amplitudes de las componentes horizontales y verticales del movimiento del suelo en estaciones de pozos son similares y se apoya en la ausencia de amplificación en los registros obtenidos en pozos (Nakamura, 1989).

Dentro de los métodos experimentales calculados en base a un sitio de referencia, se destaca el *Standard Spectral Ratio* (SSR, por sus siglas en inglés), que es una de las técnicas más utilizadas

y confiables para estimar efectos de sitio. Introducida por Borchardt en 1970, esta técnica consiste en obtener los factores de amplificación dividiendo A sobre B la cual llamaremos STF (*Surface Transfer Function*) o dividiendo A sobre C la cual se menciona como BTF (*Borehole Transfer Function*) (Figura 2.1), siendo A el espectro de respuesta de las amplitudes de Fourier del registro del movimiento del suelo en la superficie del depósito de suelo, B el espectro de movimiento en la superficie de un afloramiento rocoso (*outcropping rock site*) STF, C el espectro del movimiento en la base del depósito (*bedrock site*) BTF.

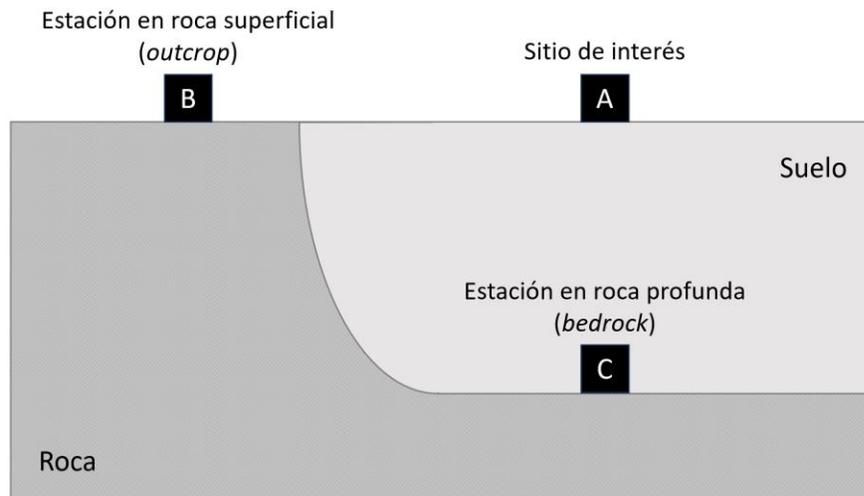


Figura 2.1 Estaciones empleadas por el método SSR

El Standard Spectral Ratio (SSR) sugiere que, si las estaciones están cercanas, se puede asumir que comparten la misma fuente y efectos de propagación. La estación de referencia, al ser un afloramiento rocoso, no se ve afectada por los efectos de sitio. Por lo tanto, la relación espectral proporciona directamente la respuesta de sitio en el lugar de interés, mostrando su amplificación local. Varios estudios han calculado las funciones de transferencia mediante STF (Field, 1996; Riepl, 1998; Parolai, 2004; Chávez-García y Tejeda, 2010; Özer, 2017), obteniendo resultados confiables. Sin embargo, el principal inconveniente de este método es que no siempre es posible encontrar una estación de referencia adecuada (Steidl *et al.*, 1996; Theodulidis *et al.*, 1996), ya que las estaciones en roca también pueden tener su propia respuesta y no estar completamente libres de efectos topográficos. Además, un buen sitio de referencia podría estar ubicado demasiado lejos del sitio objetivo, lo que impediría asumir similitudes en las rutas de las ondas hacia las dos estaciones.

A pesar de los estudios realizados en los últimos años, persisten observaciones de sitios cuyo comportamiento difiere de las predicciones (Zhu *et al.*, 2022; Kaklamanos y Bradley, 2018; Boore, 2004). Por lo anterior, se introducen los arreglos verticales, los cuales evidencian la propagación de las ondas en las capas de suelo, proporcionando la función de amplificación directa conocida como BTF (Assimaki *et al.*, 2008; Bonilla *et al.*, 2002; Zhu *et al.*, 2020). El principal inconveniente de este método está vinculado al efecto de las ondas reflejadas, el cual no siempre puede ser eliminado con éxito (Tao y Rathje, 2020). Además, el alto costo de la instalación de instrumentos en la base del depósito de suelo profundo desincentiva la instalación de estas.

Dentro de los métodos experimentales que prescinden de una estación de referencia, destaca la técnica de las razones espectrales horizontales con respecto a la vertical (H/V) en la superficie, conocida como *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSr, por sus siglas en inglés). Este método prescinde de la necesidad de una estación de referencia, ya que asume que las ondas de la componente vertical, al desplazarse desde la roca hacia las capas superficiales, no sufren una amplificación significativa, por lo tanto, esta componente proporciona el movimiento de la roca. El método HVSr puede calcularse utilizando mediciones de ruido ambiental o microtremor (Horike *et al.*, 2001; Poggi y Fäh, 2010; Motazedian *et al.*, 2011; Langston y Horton, 2014), denominándose mHVSr (*Microtemor Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*), o utilizando mediciones de eventos sísmicos (Lermo y Chávez-García, 1993; Field y Jacob, 1995; Hassani y Atkinson, 2016), conocidas como eHVSr (*Earthquake Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*).

2.3.1 Razones espectrales H/V en superficie con mediciones de ruido ambiental

El mHVSr, presentado por Nakamura en 1989, sigue las conclusiones de varios científicos japoneses (Nogoshi e Igarashi, 1971; Shiono *et al.*, 1979; Kobayashi, 1980). Este método propone estimar el factor de amplificación o la función de transferencia de un depósito de suelo superficial frente a ondas S, mediante mediciones de microtremor. La razón de esto radica en que, para las ondas S de un terremoto, las relaciones H/V de los registros de ruido ambiental son equivalentes a las obtenidas entre la superficie del depósito de suelo y su base.

Basándose en tres supuestos, Nakamura (1989) distingue entre las ondas superficiales y las ondas de cuerpo de los microtemores. El primer supuesto asume que los microtemores consisten en ondas Rayleigh (Nogoshi e Igarashi, 1971), que se propagan desde la roca firme hasta las capas superficiales del suelo. El segundo supuesto considera que el efecto de las fuentes profundas es despreciable, ya que el movimiento solo se origina en fuentes locales. El tercer supuesto indica que el movimiento de los microtemores en la roca firme no se ve influenciado por las fuentes locales.

Luego de la publicación de Nakamura, varios investigadores, como Field y Jacob (1993), Lermo y Chavez-Garcia (1994), y Bard (1999), utilizaron esta técnica con el propósito de comprender por qué el mHSVR, basado en registros de ruido ambiental, compuesto principalmente por ondas Rayleigh débiles, también debería aplicarse a registros de ondas S. Llegando a la conclusión que la principal utilidad del método HVSR radica en la determinación de la frecuencia predominante de suelos blandos (Field y Jacob 1995; Bonilla *et al.*, 1997; Satoh *et al.*, 2001), considerando esta frecuencia predominante como aquella en la que se produce el peak de la razón espectral.

2.4 Conclusiones

En este capítulo fue presentado el efecto de sitio, los factores que lo generan y los efectos que produce. Por lo anterior, diversas investigaciones han concluido que el efecto de sitio es un fenómeno de gran interés.

Además, fueron indicadas diversas técnicas para estimar los efectos locales que afectan la vibración del suelo, enfocándose en los métodos experimentales de la evaluación de la respuesta de sitio en superficie. Dentro de estos métodos se profundizó en la técnica de las razones espectrales horizontales con respecto a la vertical en la superficie, ya que sus cálculos no requieren una estación de referencia. Fue demostrado que la principal utilidad del método HVSR se encuentra en la determinación de la frecuencia predominante de suelos blandos. Sin embargo, a la fecha no existe un claro consenso respecto al nivel de amplificación. Este aspecto puede ser abordado mediante el uso de mediciones de pozo, pues estas permiten calibrar, comparar y entender las funciones HVSR, además que permiten generar sugerencias de cómo obtener la función de amplificación usando el HVSR.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DEL METODO HVSR EN LA CUENCA DE CONCEPCIÓN

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta la red sísmica instalada en la cuenca de Concepción con el nombre “Observatorio de Respuesta de Sitio en Cuencas Aluviales” financiado por el programa FONDEQUIP de CONICYT (EQM160015), aprobado el año 2016. Junto con lo anterior se indican las principales propiedades geológicas de la cuenca.

Además, se introduce la base de datos utilizada en el desarrollo del estudio, indicando cuales fueron los criterios empleados para la selección de los registros sísmicos. Asimismo, se entregan las características de las mediciones asociadas al ruido ambiental y los detalles del procesamiento utilizado para la corrección de ambos sets de datos. Finalmente, se explica la formulación del HVSR de Nakamura, teniendo en consideración los efectos del $HVSR_B$ y del BTF_V en la formulación.

3.2 Sitio de estudio

La cuenca de Concepción, descrita en el trabajo de Montalva *et al.* (2016), es una cuenca aluvial la cual fue rellenada en su mayoría por depósitos del río Bío Bío y del río Andalién, dejando capas de arena finas y gruesas, hasta arenas arcillosas y limosas.

En el terremoto de Maule 2010 en Concepción, fue observado que zonas afectadas por la misma fuente (terremoto), trayectoria (distancia) y con estructuras similares, presentaron distintos niveles de daño Montalva *et al.* (2016). Esto evidencia el efecto de sitio factor que cobra relevancia en la cuenca de Concepción y en la cual sus efectos deben ser estudiados y analizados.

Por lo anterior, el año 2018 fue instalada la red sísmica con el nombre “Observatorio de Respuesta de Sitio en Cuencas Aluviales” financiado por el programa FONDEQUIP de ANID, número de proyecto EQM160015, la cual se compone de seis estaciones distribuidas en la cuenca (Figura 3.1). Todas las estaciones constan de un sismómetro de banda ancha en la superficie (sismómetros triaxiales configurados con una tasa de muestreo de 200 Hz y que poseen un período fundamental

de 60 segundos). Además, una de las estaciones cuenta con dos acelerómetros de pozo (Sensores triaxiales configurados con una tasa de muestreo de 100 y 200 Hz, y un período fundamental es de 120 segundos), los cuales están instalados a 40 y 80 metros de profundidad (ST01). Este arreglo vertical tiene por objetivo capturar la respuesta unidimensional de la cuenca.

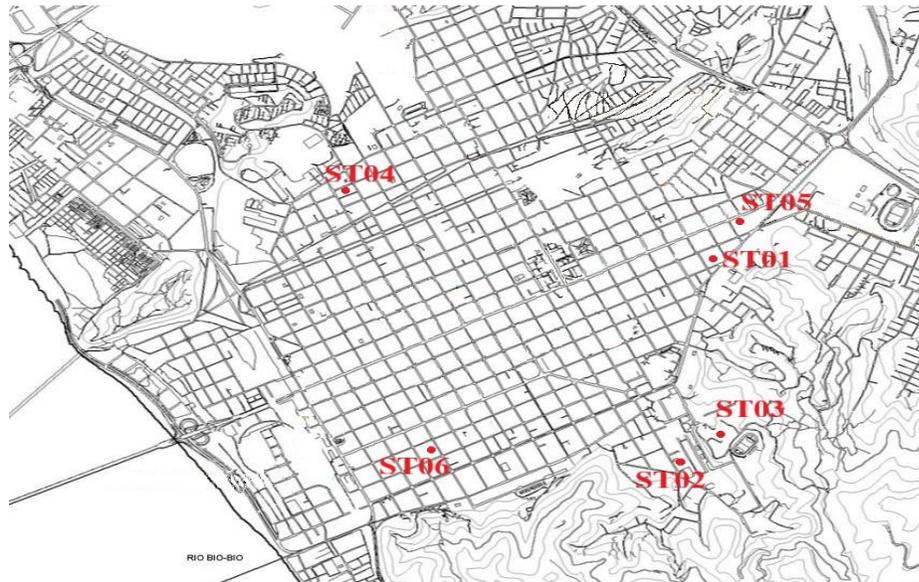


Figura 3.1 Distribuciones estaciones en la cuenca de Concepción

3.3 Compilación de datos

Para crear la base de datos empleada en esta investigación, se generaron dos sets de datos, los cuales fueron escogidos siguiendo distintos criterios, ya que ambos fueron utilizados en diferentes análisis.

Set de registros: Fue creado con el objetivo de analizar la amplificación sísmica mediante el método BTF, STF y eHVSR, cuenta con un total de 413 registros proveniente de todas las estaciones. El criterio de selección se basa en lo presentado por Hassani *et al.* (2019), el cual consiste en utilizar todos los registros cuya magnitud fuera mayor o igual a tres y que la distancia entre el hipocentro y la estación a considerar sea menor a 300 km tal como es presentado en la Figura 3.2 y detallado en el Anexo 3.1.

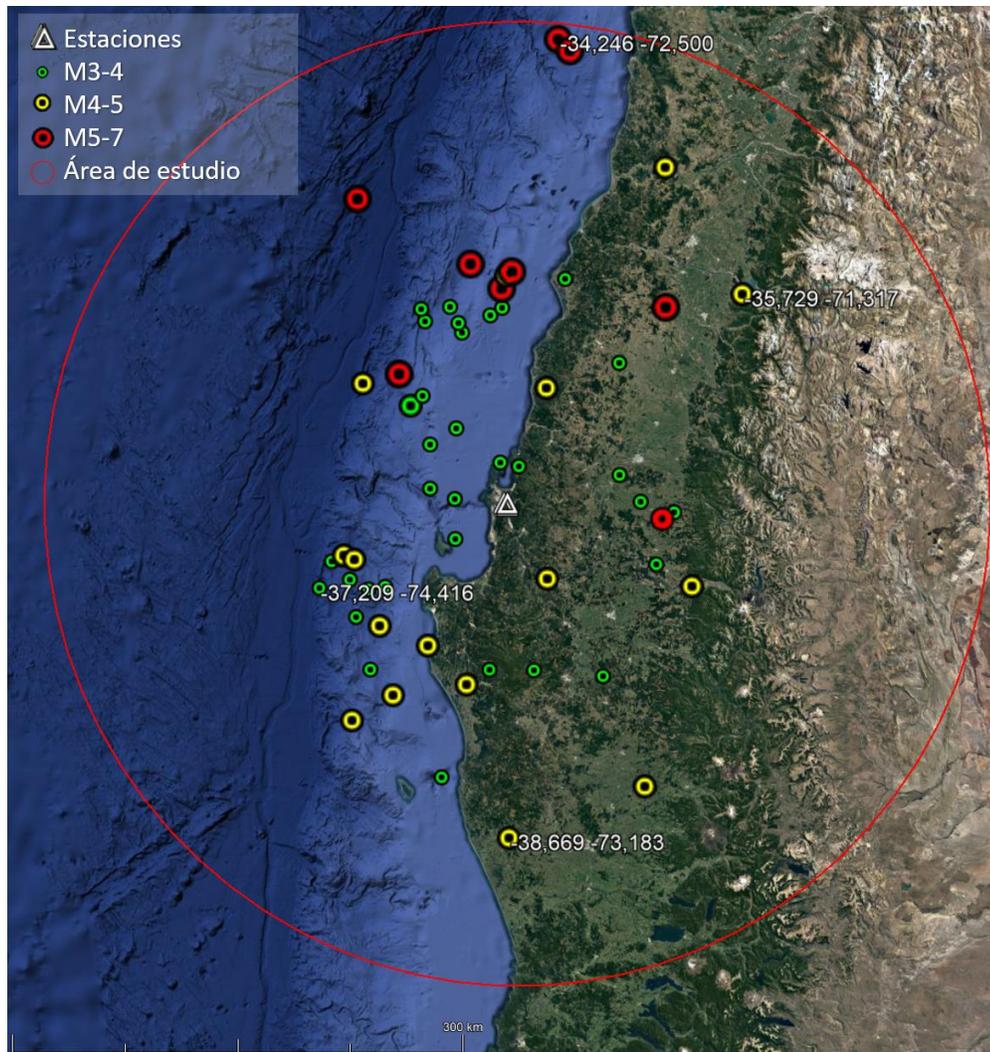


Figura 3.2 Área de estudio y sismos considerados

Set de ruido ambiental: Fue creado con el objetivo de analizar la amplificación sísmica mediante el método mHVSR y cuenta con un total de 126 registros de ruido ambiental de las seis estaciones, todas ellas, realizadas a diferentes horas y días. Las mediciones consisten en un bloque de datos cuya duración es de una hora.

3.4 Procesamiento de base de datos de terremotos

Antes de realizar el procesamiento de los registros, fueron utilizados respfiles para transformar los registros a las unidades físicas correspondientes. Posteriormente, los registros sísmicos fueron corregidos para remover errores, los cuales en su mayoría están asociados a la existencia de

tendencias en los valores de aceleración. Para realizar aquello fue empleado el proceso descrito por Boore *et al.* (2012) y modificado por Sinnan Akkar, detalles del proceso pueden verse en (Bastías y Montalva, 2016).

Con el objetivo de disminuir el ruido presente en los registros fue realizado un filtrado de frecuencias, donde las frecuencias de corte inferior fueron obtenidas mediante un análisis de la razón ruido-síñal (SNR, según sus siglas en inglés). Con la SNR calculada, fue seleccionada la frecuencia mínima de corte, la cual se define como la frecuencia máxima para la cual la SNR es menor a tres, siguiendo lo especificado por Bastías y Montalva (2016). Siguiendo lo recomendado por Oth *et al.* (2011) se estableció el límite superior para la frecuencia mínima de corte de 0.5 Hz. La frecuencia máxima de corte fue calculada mediante la frecuencia de Nyquist, que es la frecuencia más alta con la que se puede muestrear con precisión en base a la frecuencia de muestreo.

Siguiendo las recomendaciones de Boore y Bommer (2005), se aplicó un filtro de frecuencias Butterworth de 4° orden del tipo BandPass (Butterworth, 1930), pero antes de su aplicación fue removida la media de los datos y fue agregada series de ceros al principio y al final del registro todo esto para poder usar la Transformada rápida de Fourier. Finalmente, se realiza el proceso de corrección por línea base siguiendo la metodología indicada por Boore y Bommer (2005).

3.5 Procesamiento de base de datos de microtemores

Al igual que el procesamiento para el set de registros de terremotos, cada una de las componentes fue corregida por línea base. Luego mediante el algoritmo STA/LTA de Withers *et al.*, (1998) (*Short Time Average over Long Time Average*) fueron seleccionadas las ventanas libres de vibraciones artificiales, las cuales son removidas en el mHVSR. Para que un registro fuese considerado en la base de datos se requirió un mínimo de veinte ventanas, las cuales fueron seleccionadas mediante el programa GEOPSY. Los parámetros del método STA/LTA utilizados en este trabajo provienen del estudio realizado por Pastén (2007).

Finalmente, en cada componente fue aplicado un taper de tipo Hann con $r=5\%$ y fue calculado el espectro de amplitudes de Fourier a través de la transformada rápida de Fourier (FFT, según sus siglas en inglés), considerando un espaciado de frecuencias lineal de 0,15 entre 0,1 y 15 Hz (100 puntos). Los espectros fueron suavizados mediante una función de Konno y Ohmachi (1998) con un ancho de ventana de 20 puntos.

3.6 Formulación basada en HVSR y TFV

Nakamura (1989) propuso estimar la función de transferencia de un depósito de suelo superficial solicitador por ondas S, mediante mediciones de microtremor, definiendo así el HVSR como el cociente espectral entre las componentes horizontales, $H_S(f)$ y la vertical registradas en la superficie, $V_S(f)$, lo cual queda definido en la Ecuación (3.1, siguiendo lo planteado por Rong *et al.* (2017) esta se puede reescribir como la Ecuación (3.2).

$$S_M(f) = \frac{H_S(f)}{V_S(f)} \quad (3.1)$$

$$HVSR_S = \frac{H_S(f)}{H_B(f)} \times \frac{H_B(f)}{V_B(f)} \times \frac{V_B(f)}{V_S(f)} \quad (3.2)$$

Donde $H_B(f)$ es el espectro de Fourier de la componente horizontal en la base de la columna sedimentaria (estación de roca en profundidad) y $V_B(f)$ es el espectro de Fourier de la componente vertical en la base de la columna sedimentaria (estación de roca en profundidad).

Considerando la estación de pozo como estación de referencia (Figura 2.1), los términos de la Ecuación (3.2) fueron reescritos como BTF_H , *Horizontal Borehole Transfer Function* en Ecuación (3.3, BTF_V , *Vertical Borehole Transfer Function* en Ecuación (3.4, y $HVSR_B$, *Horizontal to Vertical Spectral Ratio at Bedrock* en Ecuación (3.5. Cabe destacar que, al considerar los registros de la estación en profundidad, los efectos de las ondas reflejadas hacia arriba y abajo se encuentran presentes en los registros de las estaciones. Considerando la investigación de Bonilla *et al.* (2002) y Rong *et al.* (2017) las componentes $H_B(f)$ y $V_B(f)$ pueden ser aproximadas como ondas incidentes hacia arriba, solo si se puede desestimar el efecto de las ondas que se desplazan hacia abajo.

$$BTF_H = \frac{H_S(f)}{H_B(f)} \quad (3.3)$$

$$BTF_V = \frac{V_S(f)}{V_B(f)} \quad (3.4)$$

$$HVSR_B = \frac{H_B(f)}{V_B(f)} \quad (3.5)$$

Reescribiendo la Ecuación (3.2 en función de la Ecuación (3.3, la Ecuación (3.4 y la Ecuación (3.5 fue obtenida la Ecuación (3.6 en la cual se observa que si los supuestos de Nakamura (1989) se cumplen, la principal diferencia entre los resultados del BTF y del HVSR, provienen de BTF_V .

$$BTF_H = \frac{HVSR_S \times BTF_V}{HVSR_B} \quad (3.6)$$

3.7 Conclusiones

En este capítulo fueron presentadas las características geológicas más importantes de la cuenca de Concepción y la principal razón por la cual se debe estudiar la respuesta sísmica en una cuenca aluvial como esta. Además, fue presentado el “Observatorio de Respuesta de Sitio en Cuencas Aluviales” con sus estaciones y equipos, los cuales entregaron la información necesaria para este estudio.

Luego fueron indicados los criterios utilizados para la selección de los sets de datos empleados en este análisis. Posteriormente, fue expuesta la metodología utilizada para el procesamiento de ambos sets de datos. Para el *set* de registros fueron empleados los procesos de filtrado de frecuencias, corrección por línea base, aplicación del filtro no causal y cálculo de razones espectrales. En cambio, para el *set* de ruido ambiental solo fue requerido aplicar los procesos de corrección por línea base, selección de ventanas de información y cálculo de razones espectrales.

Finalmente fue presentado el mHVSR corregido localmente en el cual se considera el efecto del BTF_H y $HVSR_B$, donde fue concluido que, si los supuestos de Nakamura se cumplen, la principal diferencia entre los resultados del BTF y del HVSR, provienen de BTF_V .

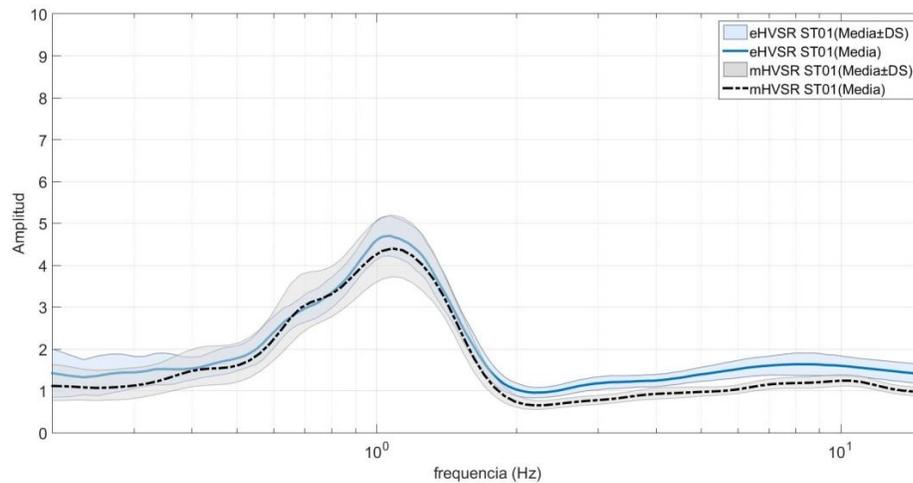
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan, para cada una de las estaciones descritas en el Capítulo 3, el análisis de resultados al comparar los distintos métodos de obtención de la respuesta de sitio explicados en el Capítulo 2. A continuación, se analiza si el mHVSr es un buen estimador de la respuesta de sitio con respecto al eHVSr, STF y BTF. Además, se analizan los supuestos asociados al mHVSr, y se evalúa el mHVSr corregido localmente en las estaciones de la cuenca como método de predicción de la amplificación real que sufre el suelo frente a un sismo. Todo esto con el fin de desarrollar los objetivos definidos en esta investigación.

4.2 Análisis de razones espectrales H/V en superficie

El análisis de las razones espectrales H/V en superficie fue realizado comparando los resultados obtenidos del mHVSr con los del eHVSr. Para ello, fueron considerados los parámetros de amplitud y frecuencia predominante entregados por cada método.



a) ST01

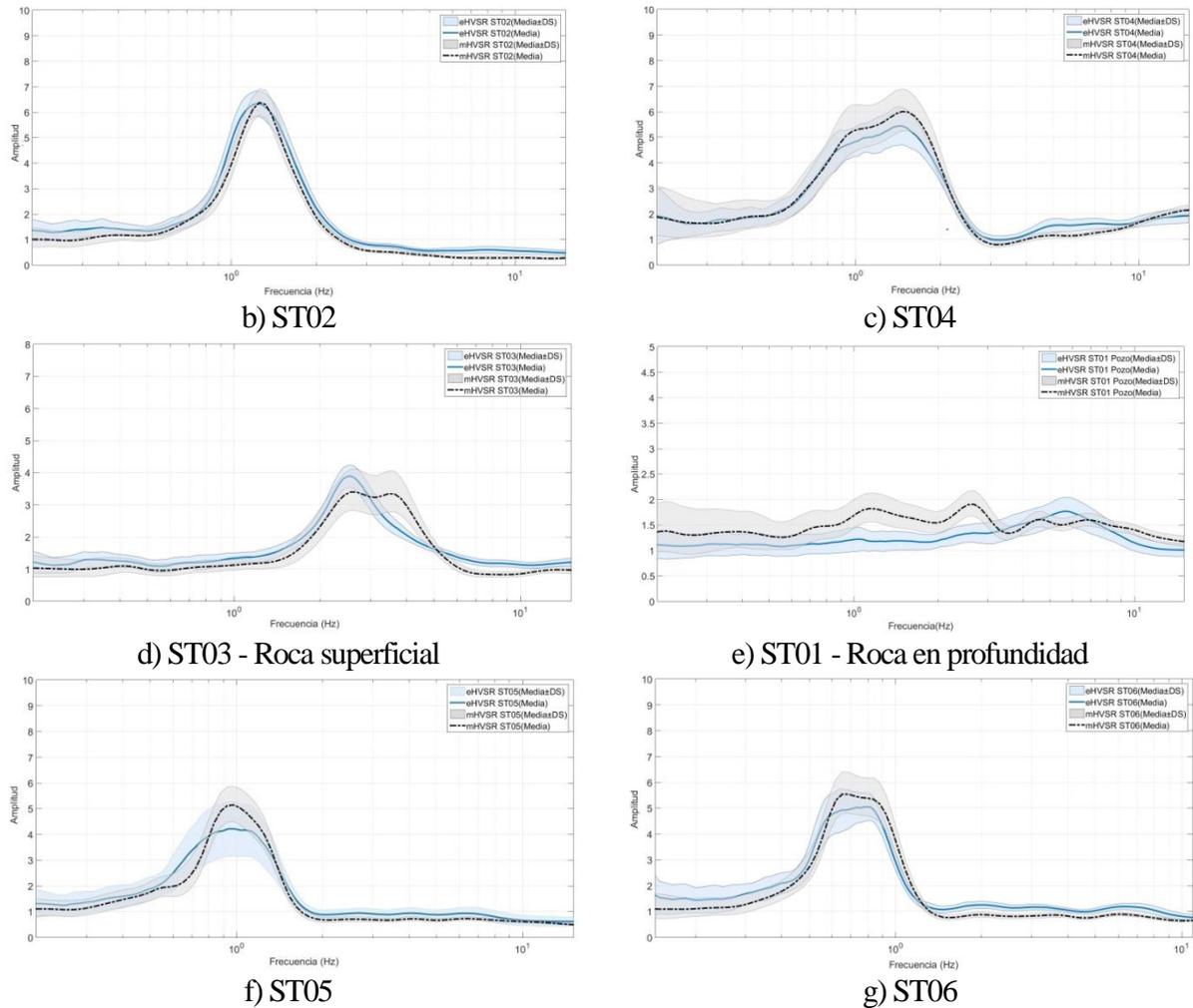


Figura 4.1 Comparación curvas eHVS y mHVS

Los valores de frecuencia predominante y amplitud indicados en la Figura 4.1 son presentados en la Tabla 4.1. A partir de estos resultados fue concluido que, para las estaciones que se encuentran sobre una capa de sedimentos (ST01, ST02, ST04, ST05 y ST06), el eHVS y mHVS estiman de forma similar la frecuencia predominante del sitio y su amplitud en todo el dominio de la frecuencia. En el caso de la frecuencia predominante, la máxima diferencia entre estos dos métodos fue de un 15%. De esta forma se llega a resultados similares a los de Lermo y Chávez-García (1993), Konno y Ohmachi (1998), Kawase *et al.* (2011), Ghofrani *et al.* (2013), Farrugia *et al.* (2017) y Hassani *et al.* (2019) los cuales concluyeron que la frecuencia predominante del sitio se puede obtener tanto de grabaciones de ruido ambiental como de registros de eventos sísmicos.

Tabla 4.1 Resumen de los valores de frecuencia predominante y amplitud del peak del eHVS y mHVS

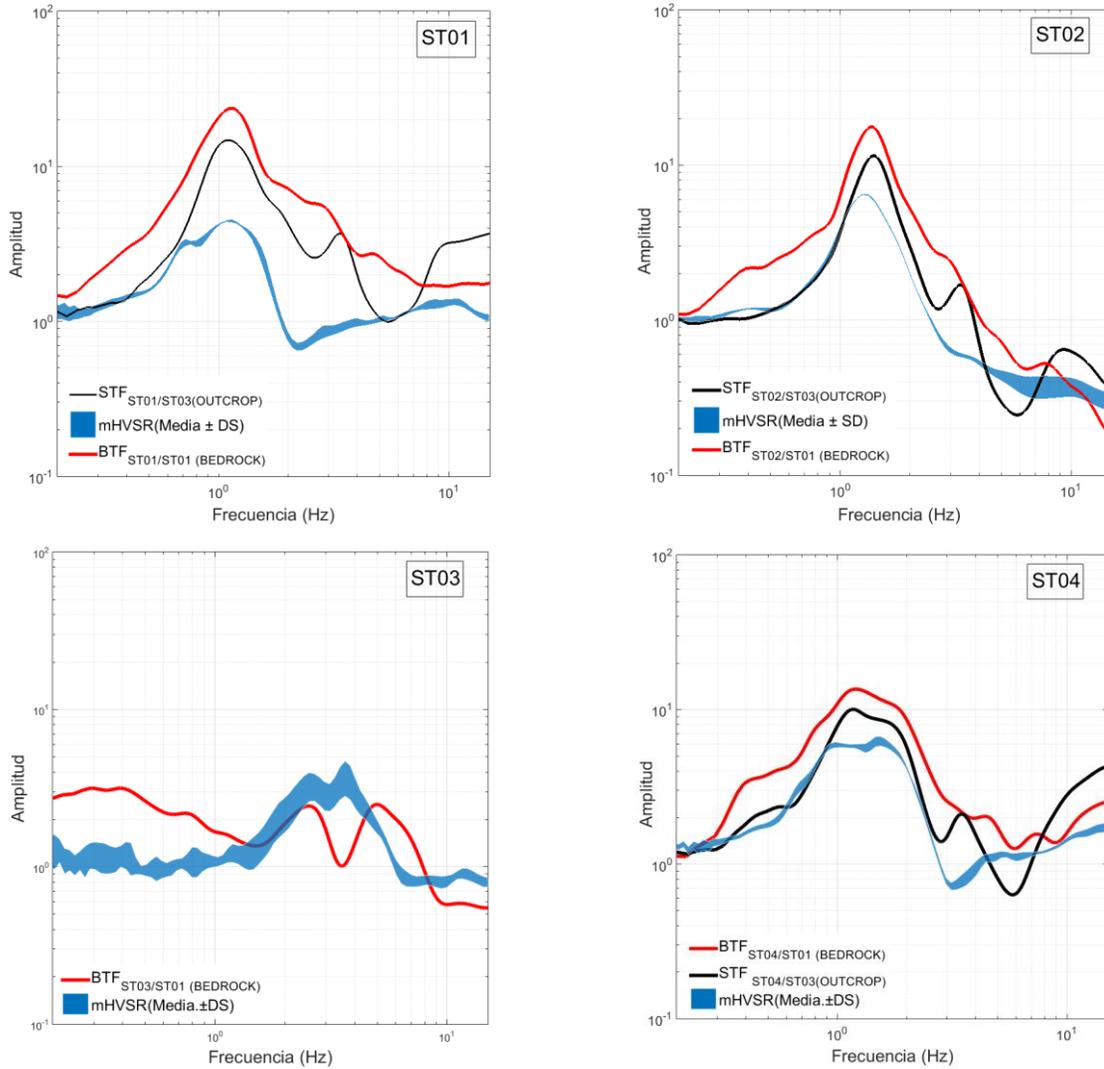
Estación	Frecuencia predominante (Hz)		Amplitud del peak	
	mHVS	eHVS	mHVS	eHVS
ST01	1,08	1,07	4,40	4,70
ST02	1,26	1,23	6,38	6,33
ST03	2,55	2,53	3,40	3,89
ST04	1,46	1,43	6,01	5,44
ST05	0,98	0,95	5,14	4,22
ST06	0,69	0,80	5,54	5,05
Pozo	2,68	5,65	1,91	1,77

Ahora, al considerar los resultados asociados a las estaciones en roca fue observado un comportamiento que difiere con los ya expuestos. Al analizar la ST01 de roca en profundidad, pese a que las curvas obtenidas con ambos métodos son similares, estas fueron constantes y relativamente planas, por lo tanto, no fue posible asociar un peak a la frecuencia predominante. Lo anterior coincide con lo expresado por Rong et al. (2017), quienes, calculando eHVS para tres estaciones de pozo, observaron que las curvas del eHVS de roca en profundidad eran planas y su efecto podía ser aproximado mediante una constante. Cabe señalar que el hecho que las curvas fueran planas se explica mediante una de las hipótesis de Nakamura (1989), la cual expresa que las fuentes locales no afectan el movimiento de los microtemores en la base del estrato de suelo (roca firme), por lo tanto, la componente horizontal y vertical en la roca son similares (Figura 4.1).

La ST03 ubicada en una roca superficial fue la que mostró una mayor diferencia entre los métodos. Para el eHVS se obtuvo un peak claro con un alto valor de amplitud, el cual fue asociado como la frecuencia predominante, en cambio, el mHVS no presentó un peak único, por lo que la frecuencia predominante se determinó en base al peak de mayor amplitud (Tabla 4.1). Uno de los peaks del mHVS coincidió con la frecuencia predominante del eHVS, pero la amplitud entre estos peaks tuvo una diferencia del 10%.

4.3 Comparación de los resultados del HVSR y el SSR

Para cada estación fueron estimadas las razones espectrales mediante los métodos mHVSR en superficie, STF_H y BTF_H . Para comparar los resultados de cada método en cada estación fueron considerados los parámetros de amplitud y frecuencia predominante. En la Figura 4.2 son presentadas las razones espectrales para cada una de las estaciones.



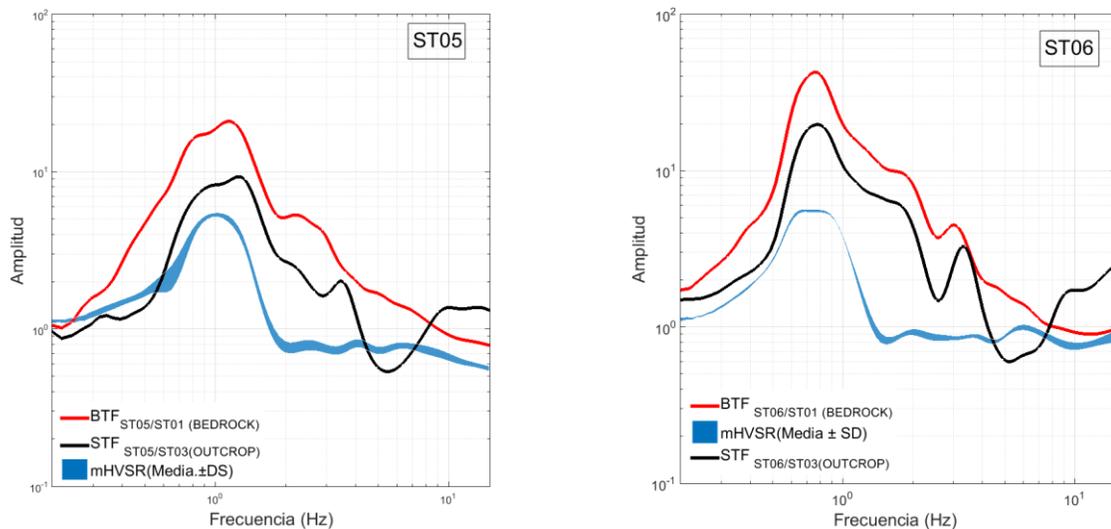


Figura 4.2 Razones espectrales obtenidas según los métodos HVSR, STF y BTF para cada estación

En la Figura 4.2 se puede observar que las frecuencias predominantes de cada método tienden hacia un mismo valor y las curvas se comportan de forma similar. Sin embargo, se distingue una alta diferencia en el nivel de amplitud obtenido por cada método, siendo el menor valor asociado al mHVSr. Los valores de frecuencia predominante y amplitud indicados en la Figura 4.2 son presentados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Valores de frecuencia predominante y amplitud del peak del mHVSr y SSR

Estación	Frecuencia predominante (Hz)			Amplitud del peak		
	mHVSr	STF	BTF	mHVSr	STF	BTF
ST01	1,08	1,15	1,12	4,40	14,89	22,87
ST02	1,26	1,39	1,37	6,38	11,63	15,83
ST03	3,63	-	2,56	3,40	-	2,39
ST04	1,46	1,22	1,17	6,01	9,50	14,58
ST05	0,98	1,03	0,86	5,14	11,65	18,77
ST06	0,69	0,76	0,76	5,54	20,62	41,67

A partir de los resultados de los gráficos (Figura 4.2) y la Tabla 4.2 se pueden clasificar las curvas en tres grupos: (1) El primero, en el cual las curvas de ambos métodos coinciden, tanto el nivel de amplificación (baja amplitud) como en su forma, pero no fue posible identificar un peak claro. (2) El segundo, aquel en que las curvas de los métodos presentaron diferencias tanto en el nivel de amplificación como en su forma. En estas curvas fue posible identificar un peak claro, pero los

valores de los peaks discreparon entre los métodos (diferencia cercana al 20 %). (3) El tercero, fue aquel en que las curvas de los métodos presentaron un comportamiento similar con un distinto nivel de amplificación y los peaks asociados a la frecuencia predominante de cada método presentaron un buen ajuste (diferencia menor al 10 % entre los valores).

Para el primer grupo, compuesto por la estación ST03, los resultados del BTF (A/C en la Figura 2.1) indicaron que las curvas de la estación en roca tuvieron una razón SSR cercana a uno en bajas frecuencias, para luego mostrar un aumento en el nivel de amplificación en las zonas de alta frecuencia. Ahora, al comparar los resultados de ambos métodos se concluyó que el mHVSR es un buen estimador de la respuesta de sitio en rocas, ya que tanto el nivel de amplificación, como la forma de las curvas presentaron altas similitudes, lo cual coincide con los resultados de Cadet *et al.* (2012), quienes calcularon la misma razón para ocho estaciones de la red KiK-net en Japón. Lo anterior se puede explicar debido a que, en los casos donde la amplificación local se debe a un único contraste de impedancia, el nivel de amplificación coincide con lo obtenido mediante el SSR (Horike *et al.* 2001), lo cual se aplica a rocas.

Al examinar las curvas del segundo grupo, compuesto por la estación ST04, se observó una clara diferencia entre los métodos. Al comparar los valores asociados a la frecuencia predominante, el método mHVSR entregó el mayor valor, con una diferencia de un 16 % y un 20 % con respecto al STF y BTF. Lo anterior se debió a que la estación ST04 se encontraba próxima a una roca más blanda que aquellas estaciones utilizadas de referencia (ST03 o ST01_B). Esta roca más blanda tuvo una mayor influencia sobre el comportamiento de la ST04, lo cual se evidenció en la diferencia entre los peaks del mHVSR y los del SSR. Lo anterior se justifica por los resultados de Inzunza (2019) quién calculó la frecuencia predominante para la roca utilizada como estación de referencia (ST03) y la del Cerro Amarillo (roca cercana a ST04), obteniendo una mayor amplitud del peak y un menor valor de frecuencia predominante para la segunda, dando a entender que aquella estación tenía una rigidez menor.

Al analizar las curvas del tercer grupo, compuesto por las estaciones ST01, ST02, ST05 y ST06 se concluyó que el mHVSR es un buen estimador de la frecuencia predominante, ya que todos los métodos entregaron valores similares del peak (frecuencia predominante). Ahora, al considerar el

nivel de amplificación, la amplitud de los métodos (SSR y BTF) coincide con los resultados de Asimaki *et al.* (2020) asociados al terremoto de Puebla (Mw 7,1) y las modelaciones de Roten *et al.* (2011) validadas por las investigaciones de Pang *et al.* (2020) asociadas al terremoto de Magna (Mw 5,7), para la ciudad de Utah. Por su parte al evaluar el nivel de amplificación de los métodos, los resultados del SSR fueron hasta cuatro veces los resultados del mHVSr, donde las mayores diferencias fueron observadas en las cercanías de la frecuencia predominante. De aquello se concluyó que, el mHVSr no es un buen estimador del nivel de amplificación del suelo, coincidiendo con los resultados de otros investigadores (Field, 1996; Satoh *et al.*, 2001; Haghshenas *et al.*, 2008).

Por su parte Chávez-García y Kang (2014) sugieren que la complejidad de la estructura de la cuenca cancela la utilidad del mHVSr, ya que los factores de amplificación entregados no se aproximan a los obtenidos con los métodos en base a un sitio de referencia, los cuales han sido ampliamente validados (Field, 1996, Özer, 2017, Maufroy *et al.*, 2017). Además, Bonilla *et al.* (2002), Rong *et al.* (2016) y Kawase *et al.* (2023) utilizaron la información de los arreglos verticales para identificar las diferencias entre los resultados del SSR y HVSr.

4.4 Análisis de las hipótesis del HVSr

Dadas las discrepancias en el nivel de amplificación entre los métodos HVSr y SSR fueron analizados los supuestos del HVSr. Para esto se utilizó la información entregada por el arreglo vertical de la ST01.

El HVSr aplicado a ruido ambiental se basa en dos supuestos fuertes: a) la componente horizontal y vertical de la roca en profundidad son iguales, por lo que su razón es igual a uno y b) la componente vertical no es amplificada significativamente por las capas superiores de la estructura del suelo. Estos supuestos deben analizarse al aplicarlos al mHVSr. Por lo tanto, para analizar las diferencias se calculó el $HVSr_B$ (Figura 4.3) y la BTF_v (Figura 4.4).

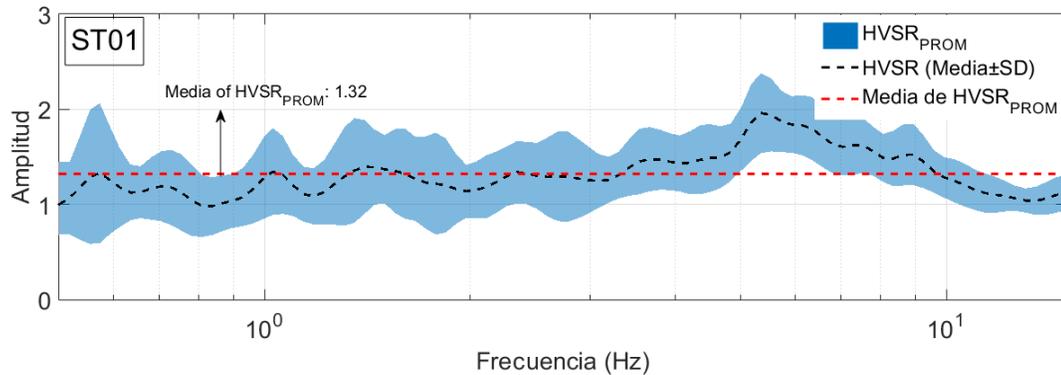


Figura 4.3 mHVSr (de la roca en profundidad) de la ST01 junto a su media

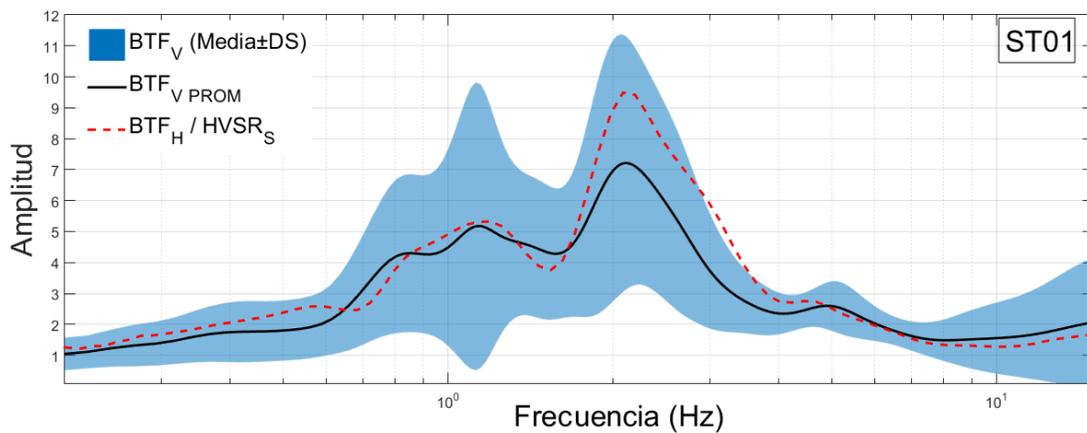


Figura 4.4 Comparación del BTF_v respecto a la razón $BTF_h/HVSR_s$ de la ST01

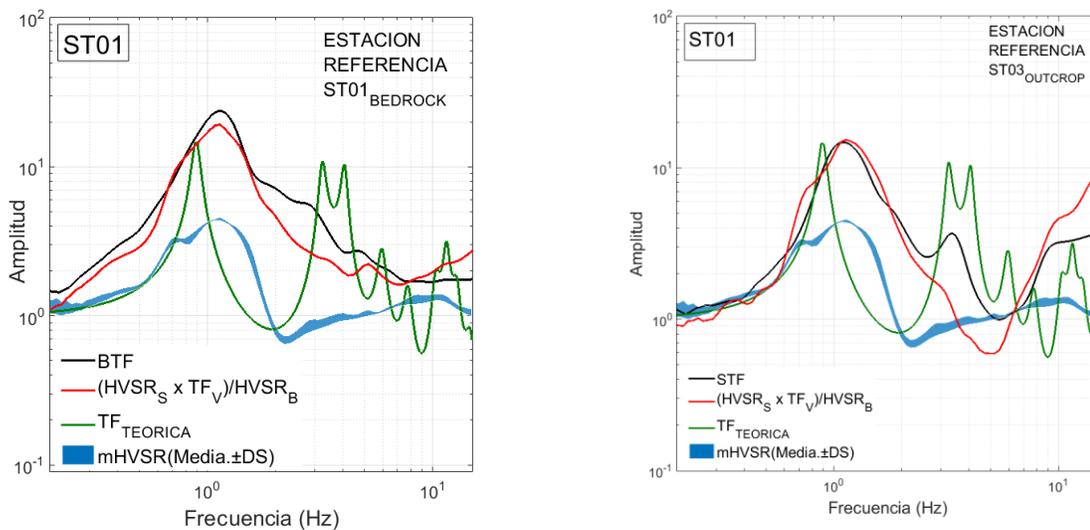
En la Figura 4.3 fue observado que el primer supuesto fuerte (a) no se cumple, ya que, a pesar de que las curvas fueron relativamente planas en todo el dominio de frecuencias estudiadas, el valor promedio difirió de uno, obteniéndose una media igual a 1,32. Lo anterior coincide con lo observado por Cadet *et al.* (2012) y Rong *et al.* (2017).

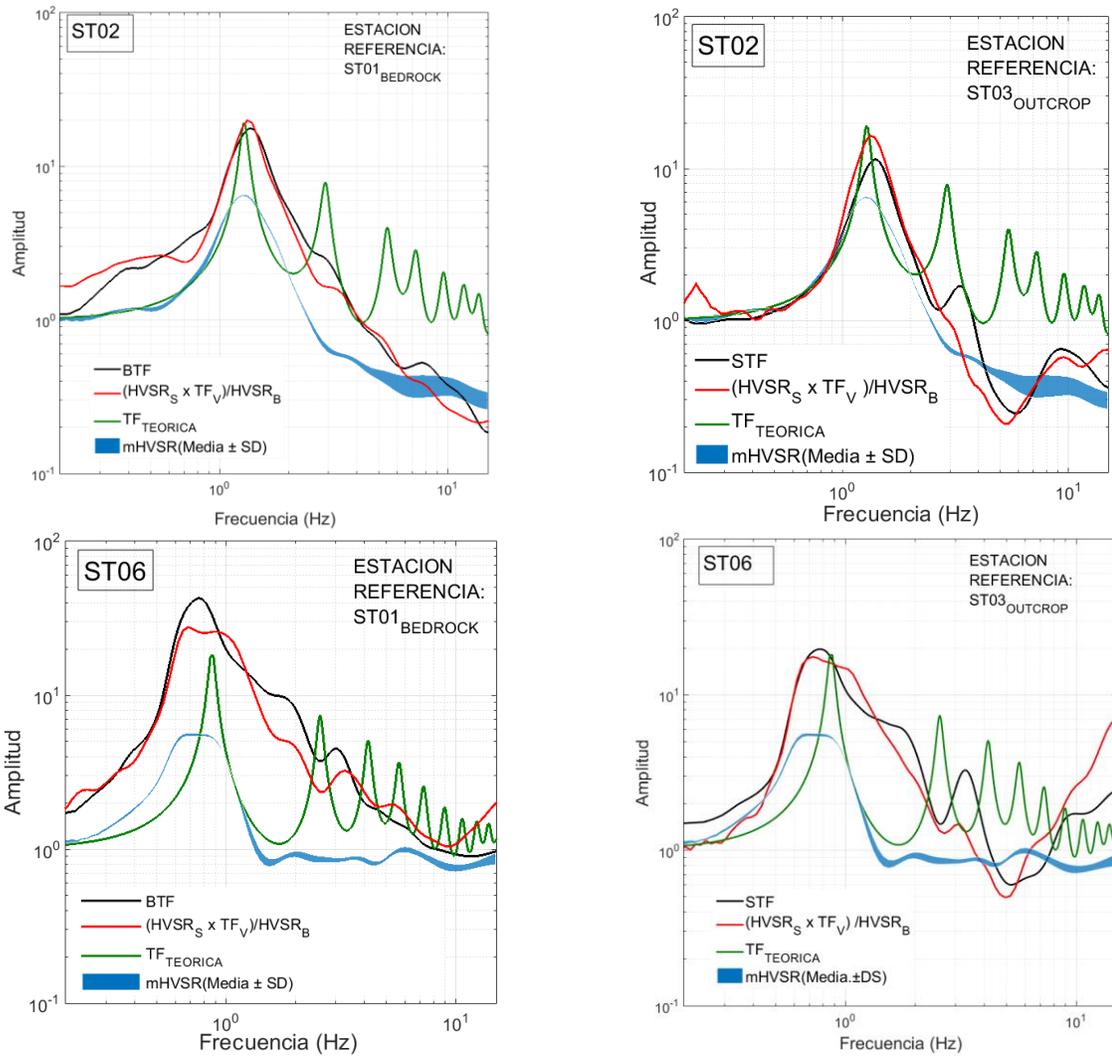
Al analizar la Ecuación (3.6) fue deducido que, si el comportamiento de la roca es asumido como una constante, las diferencias en el nivel de amplificación entre el BTF_h y $HVSR_s$ provienen del BTF_v . Lo anterior fue identificado en la Figura 4.4, donde fue observada una similitud entre la curva del BTF_v y la curva de la razón entre BTF_h y $HVSR_s$ en casi todo el dominio de las frecuencias analizadas. De esta manera se concluyó que las diferencias entre el HVSr y BTF provienen de la amplificación vertical del sitio. Con lo anterior se confirmó que el segundo

supuesto fuerte (b) tampoco se cumple, porque el nivel de amplificación del BTF_V alcanzó altas magnitudes (cercasas a ocho en las proximidades de la frecuencia predominante).

4.5 Estimación de la amplificación horizontal de sitio según HVSR

Con el objetivo de obtener la función de amplificación horizontal del suelo (HSAF, según sus siglas en inglés), fueron incorporados los resultados del $HVSR_B$ y del BTF_V en la formulación de Nakamura para las distintas estaciones. Estos resultados son indicados en la Figura 4.5 y se basaron en la formulación de la Ecuación (3.6). Además, en la Figura 4.5 fue incorporada la función de transferencia teórica, en el cual los valores de amortiguamiento, la velocidad de onda de corte, el espesor de las capas de suelo y la densidad del suelo de las estaciones del ORSCA fueron obtenidos de la investigación de Pozo *et al.* (2023).





a) Estación de referencia roca en profundidad b) Estación de referencia roca superficial

Figura 4.5 Comparación del mHVSr corregido localmente, STF, mHVSr y función de amplificación teórica

En la Figura 4.5 se puede observar que el mHVSr corregido localmente, que consideró el efecto de BTF_v y HVSr_B se aproximó mejor a la amplificación real observada del suelo que el mHVSr sin considerar los efectos mencionados. La diferencia entre la ETF y mHVSr, que se encontraba en el rango de 143-420% fue reducida a 19-22% utilizando el mHVSr corregido localmente.

El análisis de la ST01 cobra relevancia al ser la única estación en Chile con un arreglo vertical, lo que permite obtener la amplificación horizontal y vertical directa. Para la estación el mHVSr corregido localmente entregó mejores resultados para estimar la función de transferencia horizontal

que la función de amplificación teórica unidimensional. Pese a lo anterior, el mHVSr corregido localmente subestimó la amplificación real en un 19%.

Tabla 4.3 Valores de frecuencia predominante y amplitud del peak del mHVSr corregido localmente en base a una estación de roca superficial y la función teórica

Estación	Frecuencia predominante (Hz)		Amplitud del peak	
	mHVSr corregido localmente	TF teórica	mHVSr corregido localmente	TF teórica
ST01	1,13	0,88	15,33	14,44
ST02	1,32	1,27	16,47	19,03
ST06	1,03	0,92	15,94	17,21

De manera complementaria, el mHVSr corregido localmente y la ecuación teórica unidimensional fueron aplicadas a una de las estaciones de la red japonesa Kik-net (*Kiban Kyoshin Network*, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>) tal como es indicado en la Figura 4.6. En dicha figura es observado un buen ajuste de la curva mHVSr reformulada en todo el dominio de la frecuencia analizado. Estos resultados se asemejan a lo obtenido por Pretell *et al.* (2023) para la misma estación.

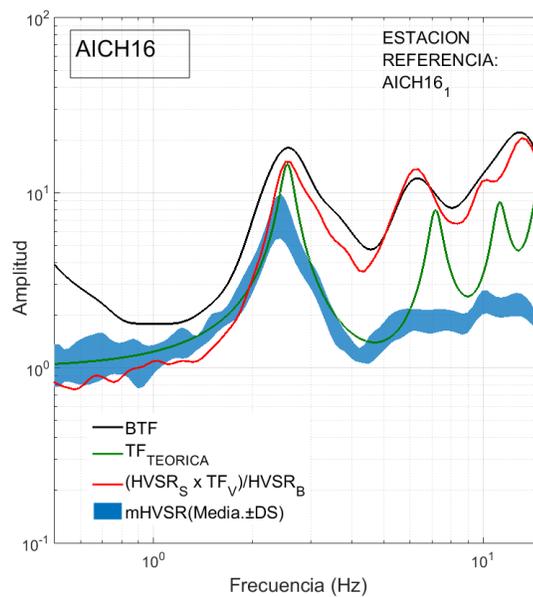


Figura 4.6 Comparación del mHVSr corregido localmente con STF, mHVSr y función de amplificación teórica en la estación AICH16 de la red de Kik-net

4.6 Conclusiones

En este capítulo fueron presentados los resultados de los distintos métodos de obtención de la respuesta de sitio aplicado a las estaciones de la red sísmica “Observatorio de Respuesta de Sitio en Cuencas Aluviales” instalada en Concepción. Para cada una de las estaciones se obtuvo la respuesta de sitio empleando los siguientes métodos: mHVSR, STF, BTF, TF teórica y mHVSR corregido localmente.

Al comparar los resultados del SSR con respecto a los del mHVSR, se determinó que el mHVSR en la cuenca de Concepción es un buen estimador de la frecuencia predominante, pero no del nivel de amplificación, alcanzando diferencias de hasta cuatro veces entre los métodos. Debido a esta diferencia fue analizada la validez de los supuestos del HVSR aplicado a la cuenca de Concepción concluyéndose que estos no se cumplían. Los supuestos no se cumplían ya que la componente vertical y la componente horizontal de la roca en profundidad no son iguales, pero su efecto se puede ajustar a una constante, y que la componente vertical es amplificada por las capas superiores de la estructura del suelo.

Luego, con el objetivo de obtener la HSAF, fueron incorporados los resultados del HVSR_B y del BTF_V en la formulación de Nakamura para las distintas estaciones. De esta manera fue concluido que al incorporar los resultados del HVSR_B y el BTF_V en la formulación de Nakamura, fue obtenida una mejor aproximación del mHVSR respecto a la amplificación real del suelo.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

Este estudio propone un mHVS_R corregido localmente para una cuenca donde HVSR_B y BTF_V son conocidos como estimadores de la función de transferencia empírica (ETF). Fue desarrollado con datos de la Cuenca de Concepción y probado para una estación de la red japonesa Kik-net. Nuestras conclusiones podrían extenderse a otras cuencas, ya que HVSR_B no varía mucho y BTF_V puede estimarse a partir de ondas P (Rong *et al.*, 2017). La base de datos incluía mediciones de microtremor y registros sísmicos de magnitudes mayores o iguales a tres Mw, los cuales fueron medidos por seis estaciones pertenecientes al ORSCA. Las principales conclusiones son las siguientes:

1. La técnica HVSR aplicada a ruido ambiental entregó valores de frecuencia predominante similares a los del SSR. Sin embargo, el nivel de amplificación entre los resultados del SSR fueron hasta cuatro veces los resultados del mHVS_R.
2. En el caso de que la amplificación local se deba a un único contraste de impedancia, los resultados del mHVS_R coinciden con lo obtenido mediante el SSR, siendo este un buen estimador de la respuesta de sitio en rocas.
3. El HVSR de la roca en profundidad (HVSR_B) es una curva relativamente plana, cuyo efecto puede ser aproximado a una constante (Kawase *et al.*, 2011). En el caso de la cuenca de Concepción este valor fue igual a 1,32.
4. La mayor diferencia en el nivel de amplificación de los métodos mHVS_R y SSR proviene de la amplificación vertical que sufre el suelo.
5. Para obtener la amplificación horizontal del suelo, la ecuación de Nakamura puede ser reformulada como $HVS_{R_S} \times BTF_V / HVSR_B$. Todo esto bajo el supuesto de que el efecto de las ondas que se desplazan hacia abajo puede ser despreciado y las componentes $H_B(f)$ y $V_B(f)$ pueden ser aproximadas como ondas incidentes hacia arriba.
6. El mHVS_R corregido localmente presenta una mejora respecto al mHVS_R al aproximarse mejor a la amplificación real observada del suelo.
7. La frecuencia predominante del sitio se puede obtener tanto de grabaciones de ruido ambiental (mHVS_R) como de registros de eventos sísmicos (eHVS_R), pues ambos métodos entregaron resultados similares en la cuenca de Concepción.

8. El mHVSR corregido localmente aplicado a una estación de la red japonesa Kik-net presentó un buen ajuste respecto a la amplificación real del suelo observado, lo cual refuerza las conclusiones obtenidas para la cuenca de Concepción y abre líneas futuras de investigación en otras cuencas.

ABREVIACIONES

BTF	: <i>Borehole Transfer Function</i>
BTF _H	: <i>Horizontal Borehole Transfer Function</i>
BTF _V	: <i>Vertical Borehole Transfer Function</i>
CONICYT	: Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica
eHVS _R	: <i>Earthquake Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio</i>
ETF	: <i>Empirical Transfer Function</i>
FFT	: Transformada rápida de Fourier
FONDEQUIP	: Fondo de Equipamiento Científico y Tecnológico
GMPE	: <i>Ground Motion Prediction Equation</i>
HVS _R	: <i>Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio</i>
HVS _R _B	: <i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio at Bedrock</i>
HSAF	: Función de amplificación horizontal del suelo
H _B (f)	: Espectro de fourier de la componente horizontal de la estación de roca en profundidad
H _s (f)	: Espectro de fourier de la componente horizontal de la estación superficial
Kik-net	: <i>Kiban Kyoshin Network</i>
mHVS _R	: <i>Microtemor Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio</i>
ORSCA	: Observatorio de Respuesta de Sitio en Cuencas Aluviales
SNR	: Razón ruido-señal
SSR	: <i>Standard Spectral Ratio</i>
STF	: <i>Surface Transfer Function</i>
V _B (f)	: Espectro de fourier de la componente vertical de la estación de roca en profundidad
V _s (f)	: Espectro de fourier de la componente vertical de la estación superficial

REFERENCIAS

Anderson, J.G., P., Bodin, J.N., Brune, J., Prince, S.K., Singh, R., Quas, y M., Onate (1986). Strong ground motion from the Michoacan, Mexico, earthquake. **Science**, 233(4768), 1043-1049.

Assimaki, D., W., Li, J.H., Steidl y K., Tsuda (2008). Site amplification and attenuation via downhole array seismogram inversion: A comparative study of the 2003 Miyagi-Oki aftershock sequence. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 98(1), 301-330.

Asimaki, D., K., Mohammadi, P., Ayoubi, J.M., Mayoral y G., Montalva (2020). Investigating the spatial variability of ground motions during the 2017 Mw 7.1 Puebla-Mexico City earthquake via idealized simulations of basin effects. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 132, 106073.

Bard, P.Y. (1995). Effects of surface geology on ground motion: recent results and remaining issues. **In Proc. 10 European Conference on Earthquake Engineering**, ed. Duma, Balkema, Rotterdam (pp. 305-323).

Bard, P.Y. (1999). Microtremor measurements: a tool for site effect estimation?. **The effects of surface geology on seismic motion**, 3, 1251-1279.

Bastías, N., y G.A., Montalva (2016). Chile strong ground motion flatfile. **Earthquake Spectra**, 32,no. 4, 2549–2566.

Bonilla, L.F., J.H., Steidl, J.C., Gariel y R.J., Archuleta (2002). Borehole response studies at the Garner Valley downhole array, southern California. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 92(8), 3165-3179.

Bonilla, L.F., J.H., Steidl, G.T., Lindley, A.G., Tumarkin y R.J., Archuleta (1997). Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 87(3), 710-730.

Boore, D.M. (2004). Can site response be predicted?. **Journal of earthquake Engineering**, 8(spec01), 1-41.

Boore, D.M., A., Azari Sisi y S., Akkar (2012). Using pad-stripped acausally filtered strong-motion data. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 102(2), 751-760.

Boore, D.M. y J.J., Bommer (2005). Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 25(2), 93-115.

Borcherdt, R.D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 60(1), 29-61.

Burdick, L.J. y C.A., Langston (1977). Modeling crustal structure through the use of converted phases in teleseismic body-wave forms. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 67(3), 677-691.

Butterworth, S. (1930). On the theory of filter amplifiers. **Wireless Engineer**, 7(6), 536-541.

Cadet, H., P.Y., Bard y A., Rodriguez-Marek (2012). Site effect assessment using KiK-net data: Part 1. A simple correction procedure for surface/downhole spectral ratios. **Bulletin of Earthquake Engineering**, 10, 421-448.

Chávez-García, F.J. y T.S., Kang (2014). Lateral heterogeneities and microtremors: limitations of HVSR and SPAC based studies for site response. **Engineering Geology**, 174, 1-10.

Chávez-García, F.J. y G.A., Montalva (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. **Obras y proyectos**, (16), 6-30.

Chávez-García, F.J. y J., Tejeda-Jácome (2010). Site response in Tecoman, Colima, Mexico—I: Comparison of results from different instruments and analysis techniques. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 30(8), 711-716.

Cisternas, M., B.F., Atwater, F. Torrejón, Y. Sawai, G. Machuca, M. Lagos, A. Eipert, C. Youlton, I. Salgado, T. Kamataki, M. Shishikura, C.P. Rajendran, J.K. Malik, Y. Rizal y M. Husni (2005). Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. **Nature**, 437(7057), 404-407.

Farrugia, J.J., G.M., Atkinson, y S., Molnar (2017). Validation of 1D Earthquake Site Characterization Methods with Observed Earthquake Site Amplification in Alberta, Canada. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 108(1), 291-308.

Field, E.H. (1996). Spectral amplification in a sediment-filled valley exhibiting clear basin-edge-induced waves. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 86(4), 991-1005.

Field, E. y K., Jacob (1993). The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise. **Geophysical research letters**, 20(24), 2925-2928.

Field, E.H. y K.H., Jacob (1995). A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent. **Bulletin of the seismological society of America**, 85(4), 1127-1143.

Ghofrani, H., G.M., Atkinson y K. Goda (2013). Implications of the 2011 M9.0 Tohoku Japan earthquake for the treatment of site effects in large earthquakes. **Bulletin of Earthquake Engineering**, 11(1), 171-203.

Haghshenas, E., P.Y., Bard, N., Theodulidis y SESAME WP04 Team (2008). Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio. **Bulletin of Earthquake Engineering**, 6, 75-108.

Hassani, B. y G.M., Atkinson (2016). Applicability of the site fundamental frequency as a VS 30 proxy for central and eastern North America. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 106(2), 653-664.

Hassani, B., A., Yong, G.M., Atkinson, T., Feng y L., Meng (2019). Comparison of site dominant frequency from earthquake and microseismic data in California. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 109(3), 1034-1040.

Horike, M., B., Zhao y H., Kawase (2001). Comparison of site response characteristics inferred from microtremors and earthquake shear waves. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 91(6), 1526-1536.

Inzunza, D.A., G.A., Montalva, F., Leyton, G., Prieto y S., Ruiz (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.

Kaklamanos, J. y B.A., Bradley (2018). Challenges in predicting seismic site response with 1D analyses: Conclusions from 114 KiK-net vertical seismometer arrays. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 108(5): 2816–2838.

Kawase, H., K., Nakano, F., Nagashima, E., Ito, J., Sun y Z., Wang (2023). Unified approach for evaluation of horizontal site amplification factors with special reference to history of studies on the effects of surface geology on seismic motion. **Earth, Planets and Space**, 75(1), 1-34.

Kawase, H., F.J., Sánchez-Sesma y S., Matsushima (2011). The Optimal Use of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Motions for Velocity Inversions Based on Diffuse-Field Theory for Plane Waves. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 101(5), 2001-2014.

Kobayashi, K. (1980). A method for presuming deep ground soil structures by means of longer period microtremors. **Proceedings of the 7th WCEE**, Turkey, 1, 237-240.

Konno, K. y T., Ohmachi (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 88(1), 228-241.

Langston, C.A. y S.P., Horton (2014). Three-dimensional seismic-velocity model for the unconsolidated Mississippi embayment sediments from H/V ambient noise measurements. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 104(5), 2349-2358.

Lermo, J. y F.J., Chávez-García (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. **Bulletin of the seismological society of America**, 83(5), 1574-1594.

Lermo, J. y F.J., Chávez-García (1994). Are microtremors useful in site response evaluation?. **Bulletin of the seismological society of America**, 84(5), 1350-1364.

Maufroy, E., E., Chaljub, N.P., Theodoulidis, Z., Roumelioti, F., Hollender, P.Y., Bard, F. de Martin, C., Guyonnet-Benaize y L., Margerin (2017). Source-related variability of site response in the Mygdonian basin (Greece) from accelerometric recordings and 3D numerical simulations. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 107(2), 787-808.

Montalva, G.A., N., Bastías y F., Leyton (2022). Strong ground motion prediction model for PGV and spectral velocity for the Chilean subduction zone. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 112(1), 348-360.

Montalva, G.A., F.J., Chávez-García, A., Tassara, y D.M., Jara Weisser (2016). Site effects and building damage characterization in Concepción after the Mw 8.8 Maule earthquake. **Earthquake Spectra**, 32(3), 1469-1488.

Motazedian, D., J.A., Hunter, A., Pugin y H. Crow (2011). Development of a VS30 (NEHRP) map for the city of Ottawa, Ontario, Canada. **Canadian Geotechnical Journal**, 48(3), 458-472.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. **Quarterly Reports Railway Technical Research Institute**, 30, 25-33.

Nogoshi, M. (1971). On the amplitude characteristics of microtremor, Part II. **Journal of the 481 seismological society of Japan**, 24, 26-40.

Oth, A., S., Parolai y D., Bindi (2011). Spectral analysis of K-NET and KiK-net data in Japan, Part I: Database compilation and peculiarities. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 101(2), 652-666.

Özer, C. (2017). Analysis of soil transfer function in Izmir metropolitan area, Turkey. **IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics**, 5(1), 63-70.

Pang, G., K.D., Kope, M., Mesimeri, K.L., Pankow, B., Baker, J., Farrell, J., Holt, J.M., Hale, P., Roberson, R., Burlacu, J.C., Pechmann, K., Whidden, M.M., Holt, A., Allam y C., DuRoss (2020). Seismic analysis of the 2020 Magna, Utah, earthquake sequence: Evidence for a listric Wasatch fault. **Geophysical Research Letters**, 47(18), e2020GL089798.

Pastén, C. (2007). **Respuesta sísmica de la cuenca de Santiago**. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Mención Ingeniería Geotécnica. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Poggi, V. y D., Fäh (2010). Estimating Rayleigh wave particle motion from three-component array analysis of ambient vibrations. **Geophysical Journal International**, 180(1), 251-267.

Pozo, I., G., Montalva y M., Miller (2023). Assessment of Kappa Values in the Chilean Subduction Zone for Interface and In-Slab Events. **Seismological Society of America**, 94(1), 385-398.

Pretell, R., N.A., Abrahamson y K., Ziotopoulou (2023). A borehole array data-based approach for conducting 1D site response analyses I: Damping and VS randomization. **Earthquake Spectra**, 87552930231173445.

Riepl, J., P.Y., Bard, D., Hatzfeld, C., Papaioannou y S., Nechtschein (1998). Detailed evaluation of site-response estimation methods across and along the sedimentary valley of Volvi (EURO-SEISTEST). **Bulletin of the Seismological Society of America**, 88(2), 488-502.

Rong, M., L.Y., Fu, Z., Wang, X., Li, N.S., Carpenter, E. W., Woolery y Y., Lyu (2017). On the amplitude discrepancy of HVSR and site amplification from strong-motion observations. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 107(6), 2873-2884.

Roten, D., K.B., Olsen, J.C., Pechmann, V.M., Cruz-Atienza y H., Magistrale (2011). 3D simulations of M 7 earthquakes on the Wasatch fault, Utah, Part I: Long-period (0–1 Hz) ground motion. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 101(5), 2045-2063.

Şafak, E. (2001). Local site effects and dynamic soil behavior. **Soil dynamics and earthquake engineering**, 21(5), 453-458.

Satoh, T., H., Kawase y S.I., Matsushima (2001). Differences between site characteristics obtained from microtremors, S-waves, P-waves, and codas. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 91(2), 313-334.

Shearer, P.M. y J.A., Orcutt (1987). Surface and near-surface effects on seismic waves—theory and borehole seismometer results. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 77(4), 1168-1196, 519.

Shiono, K., Y., Ohta y K., Kudo (1979). Observation of 1- to 5-sec microtremors and their application to earthquake engineering. Part VI: Existence of Rayleigh wave components. **Journal of the Seismological Society of Japan**, 32, 115-124.

Steidl, J. H., A.G., Tumarkin y R.J., Archuleta (1996). What is a reference site?. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 86(6), 1733-1748.

- Tao, Y. y E., Rathje (2020). Taxonomy for evaluating the site-specific applicability of one-dimensional ground response analysis. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 128, 105865.
- Theodulidis, N., P.Y., Bard, R., Archuleta y M., Bouchon (1996). Horizontal-to-vertical spectral ratio and geological conditions: The case of Garner Valley downhole array in southern California. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 86(2), 306-319.
- Withers, M., R., Aster, C., Young, J., Beiriger, M., Harris, S., Moore y J., Trujillo (1998). A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 88(1), 95-106.
- Zhu, C., F., Cotton, H., Kawase, A., Haendel, M., Pilz y K., Nakano (2022). How well can we predict earthquake site response so far? Site-specific approaches. **Earthquake Spectra**, 38(2): 1047–1075.
- Zhu, C., M., Pilz y F., Cotton (2020). Evaluation of a novel application of earthquake HVSR in site-specific amplification estimation. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 139, 106301.

ANEXO 3.1 SISMOS CONSIDERADOS

Tabla A.3.1 Detalle de sismos considerados

Fecha UTC	Latitud	Longitud	Profundidad (km)	Magnitud	Referencia
15-12-2018 10:18	-37,325	-71,761	106,600	4.2 MI GUC	8 km al O de Antuco
21-12-2018 5:44	-37,800	-73,404	42,200	4.2 MI GUC	31 km al SE de Lebu
24-12-2018 8:35	-35,794	-73,295	21,700	3.1 MI GUC	59 km al NO de Cobquecura
31-12-2018 2:53	-35,727	-72,984	37,700	3.5 MI GUC	48 km al NO de Cobquecura
03-01-2019 1:34	-36,693	-72,230	63,500	3.2 MI GUC	15 km al SO de Chillán
04-01-2019 13:47	-36,612	-72,932	47,200	3.4 MI GUC	26 km al NE de Concepción
05-01-2019 21:45	-36,184	-73,579	32,700	3.3 MI GUC	71 km al O de Cobquecura
06-01-2019 3:56	-35,729	-71,317	109,100	4.1 MI GUC	28 km al E de Linares
07-01-2019 18:06	-37,066	-74,312	36,000	3.9 MI GUC	84 km al NO de Lebu
08-01-2019 1:41	-37,063	-74,144	30,000	4.0 MI GUC	75 km al NO de Lebu
08-01-2019 3:35	-37,237	-74,061	28,400	3.7 MI GUC	55 km al NO de Lebu
08-01-2019 4:19	-37,229	-73,941	29,200	3.3 MI GUC	49 km al NO de Lebu
08-01-2019 4:45	-37,175	-74,191	32,100	3.1 MI GUC	68 km al NO de Lebu
08-01-2019 5:37	-37,035	-74,217	21,200	4.5 Mw GUC	81 km al NO de Lebu
08-01-2019 6:31	-37,209	-74,416	21,700	3.2 MI GUC	81 km al NO de Lebu
08-01-2019 17:40	-37,570	-73,662	15,000	4.0 MI GUC	4 km al N de Lebu
09-01-2019 8:42	-36,991	-73,415	45,000	3.5 MI GUC	26 km al O de Lota
09-01-2019 11:49	-36,457	-73,548	31,700	3.3 MI GUC	61 km al NO de Concepción
11-01-2019 8:29	-37,958	-74,256	29,800	4.4 MI GUC	65 km al SO de Lebu
13-01-2019 9:32	-37,056	-74,245	25,000	3.5 MI GUC	81 km al NO de Lebu
24-01-2019 8:06	-35,003	-71,808	49,000	4.1 MI GUC	21 km al SE de Vichuquén
28-01-2019 9:00	-35,616	-72,974	28,300	5.0 Mw GUC	60 km al N de Cobquecura
07-02-2019 7:03	-35,701	-73,347	16,500	3.7 MI GUC	69 km al NO de Cobquecura
07-02-2019 18:42	-37,241	-72,777	56,200	4.3 Mw GUC	7 km al NO de Laja
18-02-2019 13:33	-36,584	-73,061	25,700	3.2 MI GUC	27 km al N de Concepción
24-02-2019 8:49	-37,982	-73,916	55,900	3.2 MI GUC	47 km al SO de Lebu
02-03-2019 21:37	-36,074	-72,191	59,600	3.7 MI GUC	16 km al SE de Cauquenes
11-03-2019 7:02	-35,764	-73,069	20,800	3.6 MI GUC	48 km al NO de Cobquecura
21-03-2019 20:34	-36,185	-72,703	66,700	4.4 MI GUC	10 km al SE de Cobquecura
07-04-2019 6:50	-37,684	-74,095	27,800	3.4 MI GUC	39 km al O de Lebu
16-04-2019 8:02	-37,197	-72,007	88,600	3.3 MI GUC	9 km al S de Yungay
21-04-2019 10:00	-35,777	-71,846	84,600	5.0 Mw GUC	24 km al O de Linares
22-04-2019 7:52	-35,590	-72,535	26,500	3.0 MI GUC	31 km al SO de Constitución
28-04-2019 4:58	-35,771	-73,529	29,600	3.1 MI GUC	77 km al NO de Cobquecura
30-04-2019 3:39	-37,746	-72,917	36,300	3.2 MI GUC	19 km al O de Angol
03-05-2019 5:28	-35,849	-73,274	34,800	3.7 MI GUC	53 km al NO de Cobquecura
08-05-2019 8:14	-36,769	-73,399	20,900	3.7 MI GUC	32 km al O de Concepción
10-05-2019 7:04	-36,378	-73,356	26,500	3.0 MI GUC	57 km al NO de Concepción

Fecha UTC	Latitud	Longitud	Profundidad (km)	Magnitud	Referencia
17-05-2019 1:09	-36,946	-71,945	81,500	4.3 Mw GUC	20 km al NE de Yungay
17-05-2019 5:27	-35,063	-73,945	10,000	5.1 Mww GUC	142 km al O de Constitución
22-05-2019 22:42	-38,420	-72,178	76,900	4.1 MI GUC	25 km al SE de Victoria
25-05-2019 16:55	-36,231	-73,664	12,800	3.8 MI GUC	79 km al O de Cobquecura
03-06-2019 10:08	-36,847	-72,093	69,400	3.5 MI GUC	27 km al S de Chillán
12-06-2019 7:36	-37,386	-74,168	21,700	3.9 MI GUC	52 km al NO de Lebu
14-06-2019 6:49	-36,915	-71,862	97,900	3.1 MI GUC	27 km al NE de Yungay
17-06-2019 7:15	-37,442	-73,999	39,900	4.1 MI GUC	36 km al NO de Lebu
24-06-2019 4:42	-38,669	-73,183	34,800	4.5 Mw GUC	45 km al SE de Tirúa
26-06-2019 6:02	-37,728	-73,234	35,200	3.6 MI GUC	39 km al E de Lebu
13-07-2019 8:20	-35,701	-73,550	21,200	3.1 MI GUC	83 km al NO de Cobquecura
01-08-2019 7:24	-37,800	-72,430	60,900	3.2 MI GUC	24 km al E de Angol
01-08-2019 18:28	-34,246	-72,500	9,700	6.8 Mww GUC	48 km al O de Pichilemu
01-08-2019 20:01	-34,315	-72,423	20,700	5.7 Mww GUC	39 km al O de Pichilemu
28-08-2019 22:02	-36,702	-73,569	29,900	3.4 MI GUC	48 km al O de Concepción
05-09-2019 5:41	-36,087	-73,992	20,300	4.9 Mw GUC	108 km al O de Cobquecura
21-09-2019 6:12	-37,833	-73,942	24,300	4.2 MI GUC	35 km al SO de Lebu
23-09-2019 8:24	-36,049	-73,728	26,800	5.4 Mww GUC	84 km al O de Cobquecura
29-09-2019 15:57	-35,467	-73,181	31,400	6.6 Mww GUC	71 km al O de Constitución
29-09-2019 18:46	-35,547	-72,940	15,000	4.2 MI GUC	53 km al O de Constitución
29-09-2019 20:11	-35,526	-72,897	15,000	5.0 Mw GUC	49 km al O de Constitución