



Universidad Autónoma de Querétaro
 Facultad de Ingeniería.
 Maestría.

REPLANTEAMIENTO EN LA ESTIMACIÓN DE PERIODOS FUNDAMENTALES DEL
 SUELO PARA LA CIUDAD DE QUERÉTARO.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
 Maestro en Ciencias.

Presenta:
 Ing. Mario González Martínez

Dirigido por:
 M.C. Alejandro Clemente Chávez.
 Director

M.C. Ángel Figueroa Soto.
 Co-director.

SINODALES

M.C. Alejandro Clemente Chávez
 Presidente

M.C. Javier Francisco Lermo Samaniego.
 Secretario

Dr. Francisco Ramón Zúñiga Dávila Madrid
 Vocal

Dr. Omar Chávez Alegría
 Suplente

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras
 Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González
 Nombre y Firma
 Director de la Facultad

[Firma]
 Firma

[Firma]
 Firma

[Firma]
 Firma

[Firma]
 Firma

[Firma]
 Firma

[Firma]
 Firma

Dr. Irineo Torres Pacheco
 Nombre y Firma
 Director de Investigación y
 Posgrado

Centro Universitario
 Querétaro, Qro.
 Fecha
 México



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería.
Maestría.

REPLANTEAMIENTO EN LA ESTIMACIÓN DE PERIODOS FUNDAMENTALES DEL
SUELO PARA LA CIUDAD DE QUERÉTARO.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias.

Presenta:

Ing. Mario González Martínez

Dirigido por:

M.C. Alejandro Clemente Chávez.
Director

M.C. Ángel Figueroa Soto.
Co-director.

SINODALES

M.C. Alejandro Clemente Chávez
Presidente

Firma

M.C. Javier Francisco Lermo Samaniego.
Secretario

Firma

Dr. Francisco Ramón Zúñiga Dávila Madrid
Vocal

Firma

Dr. Omar Chávez Alegría
Suplente

Firma

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras
Suplente

Firma

Dr. Aurelio Domínguez González
Nombre y Firma
Director de la Facultad

Dr. Irineo Torres Pacheco
Nombre y Firma
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Fecha
México

Resumen

El presente trabajo presenta un replanteamiento en el proceso de la estimación del periodo fundamental del suelo (T_s) de la ciudad de Querétaro en comparación a lo realizado por Bustillos (2005). El replanteamiento consiste en el empleo de: 1) instrumentación con mayor certidumbre (sismógrafos) en la medición de ruido ambiental, 2) criterios recientes (2004) del proyecto SESAME (Site Effects Assessment Using Ambient Excitations) y 3) agrupación e interpretación de las funciones de transferencia empíricas por familias acorde a lo reportado por Lermo y Limaymanta (2007) e Ismael-Hernández et al. (2011) para diferenciar los tipos de suelo. La metodología empleada fue la técnica HVNR reportada por Lermo y Chávez-García (1993). El trabajo se realizó para un primer cuadrante de la ciudad de Querétaro. También una revisión y comparación a detalle de los registros de ruido electrónico y ambiental con el equipo TERRA (empleado en el trabajo de Bustillos (2005)) y SARA (empleado en este estudio) fueron realizadas. Los resultados permitieron clasificar e interpretar seis familias espectrales: zona rocosa, sedimentos con periodos $\approx 2s$, $1s$ con o sin respuesta en altas frecuencias y $0.2s$; además se hallaron grandes discrepancias con los resultados reportados por Bustillos (2005); la mayoría de ellas debidas al equipo de medición usado. En general, los resultados muestran congruencia con estudios recientes de Cruz-Jiménez et al. (2009), Clemente-Chávez et al. (2014) y con un análisis de registros sísmicos obtenidos de la estación JUR1 y CU-UAQ localizadas cerca del área de estudio con respecto a una mayor amplificación del suelo en bajas frecuencias (0.2-2.0 Hz) dentro de la zona del MVB (Mexican Volcanic Belt –franja central de México) en la cual Querétaro es incluida.

Palabras clave: efecto de sitio, microtremores, periodo fundamental, microzonificación sísmica, ruido electrónico, espectro de densidad de potencia.

Summary

This work submits a reassessment in the soil's fundamental period (T_s) estimation process for Queretaro in comparison with the work realized by Bustillos (2005). The reassessment consists in the use of: 1) instrumentation of greater certainty (seismometer) in the ambient noise measurement, 2) recent criteria (2004) of the SESAME project (Site Effects Assessment Using Ambient Excitations) and 3) grouping and interpretation of the empirical transfer functions by families according to Lermo and Lymaymanta (2007) and Ismael-Hernández et al. (2011) in order to differentiate the soils. The HVNR technique reported by Lermo and Chávez-García (1993) was used in this research. The work was performed in a first quadrant of Queretaro. A detailed review and comparison between the electronic and ambient noise recordings with equipment Terra and SARA (used in Bustillos's work (2005) and this study respectively) was also made. The results allowed a classification of six soil spectral families: rock and sediments with fundamental periods $\approx 2s, 1s$ with and without high frequency response *and* $0.2s$; huge discrepancies with Bustillos's results (2005) were also found; most of them were attributed to the measuring equipment. In general, the results show congruence with the recent studies of Cruz-Jiménez et al. (2009), Clemente-Chávez et al. (2014) and a seismic data analysis of JUR1 and CU-UAQ stations located near of the interest area about a soil amplification in low frequencies (0.2-2.0 Hz) inside the MVB zone (Mexican Volcanic Belt – central band of Mexico) where Queretaro is located.

Keywords: site effects, microtremors, fundamental period, seismic microzonation, electronic noise, power spectra density.

Contenido de Tesis

Capítulo 1, Introducción: Se describe la justificación, hipótesis y objetivos planteados para la ejecución del trabajo.

Capítulo 2, Revisión de Literatura: Se definen conceptos básicos de efecto de sitio y las técnicas para modelar este fenómeno. Además, se muestran los estudios previos correspondientes a la actividad sísmica en el eje neovolcánico (MVB) y se abordan de manera general los eventos más cercanos-recientes cerca del área de estudio (Zúñiga et al., 2003; Clemente-Chávez et al., 2013). Se hace referencia a un estudio previo de microzonificación sísmica del Valle de Querétaro (Bustillos, 2005) y de geología del Valle (Álvarez-Manilla et al., 2002; Pacheco, 2007). Todo lo anterior con el objetivo de contar con un panorama de las características del suelo.

Capítulo 3, Fundamentación Teórica: Se muestran las bases de las principales herramientas utilizadas para la elaboración de la tesis, entre ellas la Transformada de Fourier (TF) como la herramienta básica para el análisis de señal en el dominio de la frecuencia, la Técnica de cocientes espectrales H/V de ruido ambiental (HVNR) a fin de caracterizar el efecto de sitio y el Espectro de Densidad de Potencia (PSD) para categorizar los niveles de energía de una señal.

Capítulo 4, Metodología: Se detalla la utilización de las herramientas teóricas para el proceso de obtención, tratamiento y análisis de la señal para visualizar de manera profunda y detallada su utilización en la elaboración de este proyecto.

Capítulo 5, Procesamiento: Se muestra el resumen de los espectros HVNR y PSD obtenidos. Estos últimos se comparan con referencias a las curvas de Peterson (1993) y las de ruido instrumental para los equipos referenciados en esta tesis.

Capítulo 6, Resultados y Discusión: Se presentan los puntos importantes a observar en los espectros mostrados, así como interpretación de los mismos.

Capítulo 7, Conclusiones: Se plantean las aportaciones hechas por el trabajo, así como las recomendaciones para futuros trabajos relacionados con el tema de manera general y específicamente sobre el área de estudio.

Es importante mencionar los Apéndices del trabajo como una parte de peso en el mismo, debido a su relevancia para futuros desarrollos en esta zona.

Apéndice 1, Funciones de Transferencia Empíricas (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de registros sísmicos: Se muestran las FTE calculadas mediante la técnica de cocientes espectrales H/V de registros sísmicos (HVSR) y que se usarán para validar las FTE obtenidas con ruido ambiental en sitios categorizados como roca dentro del área de estudio. De igual manera se presentan los PSD de cada componente de registro para compararse con el nivel de ruido ambiental promedio de la estación a fin de analizar su influencia sobre la señal sísmica analizada.

Apéndice 2, Funciones de Transferencia Empíricas (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia de los registros de ruido ambiental: Se muestran las FTE calculadas mediante la técnica de cocientes espectrales H/V de registros de ruido ambiental (HVNR), los cuales muestran la respuesta dinámica del sitio describiendo para cada frecuencia su aumento o disminución de amplitud. Los PSD de cada componente en cada estación de registro se muestran con la finalidad de analizar y categorizar los niveles de ruido en el área de estudio, además de contrastar con el ruido electrónico del equipo utilizado y analizar su influencia sobre la señal analizada.

Apéndice 3 y 4, Ficha técnica del sensor SS-05 Sara y SSA-320 Terra respectivamente: Se muestran las fichas de los dos sensores referenciados en este documento.

Apéndice 5, Análisis de ruido electrónico del acelerógrafo Terra (SSA-320 / GSR-18) comparando registros con el sismógrafo Sara (SS-05 / SR-04): Se muestran los resultados obtenidos en pruebas para determinar el ruido electrónico del acelerógrafo Terra (SSA-320 / GSR-18) utilizado en el trabajo de microzonificación sísmica previo realizado por Bustillos (2005), que es útil para explicar la incompatibilidad de resultados entre el estudio previo y el actual en la zona de estudio común.

El presente trabajo de tesis muestra congruencia con los últimos datos obtenidos en el estudio del eje neovolcánico MVB útil para tomarse como parte de los reglamentos de construcción vigentes para el área de la ZMQ.

Apéndice 6, Análisis de la influencia de estratos profundos en el efecto de sitio de la zona metropolitana de Querétaro: Se analiza de manera breve y con un ejercicio teórico la influencia de los estratos suaves (sedimentarios) encontrados bajo estratos consolidados (anteriormente reportados por Carreón-Freyre (2005) y Pacheco (2007)) en la respuesta del sitio, los cuales inciden en la amplificación de frecuencias bajas.

Dedicatorias

A mis padres y abuelos, por ser parte de lo que soy y darme su ejemplo de vida y lucha como un regalo de motivación y entereza permanente.

A mi hermana, por siempre estar al pendiente y sentirme parte de sus logros.

A mi esposa e hijos, por ser mi razón de ser y apoyo en días difíciles.

Agradecimientos

Al CONACYT, por depositar su confianza en mí, permitiéndome estudiar de tiempo completo en un programa de Maestría que tiene como resultado final la entrega de este documento de tesis.

A la UAQ, por acogerme en sus instalaciones y darme los recursos para mi crecimiento intelectual y profesional.

Al M.C. Alejandro Clemente, por ser mi asesor de tesis y tomar seriamente su rol de mentor.

Al Ing. Rodrigo Rojas, por sus acertados comentarios y asesoría hacia este trabajo de tesis.

A mis padres, por motivarme a comenzar esta aventura que ahora concluye.

A mis compañeros de generación, por esas pláticas tan interesantes y por compartir su tiempo y experiencias.

A mis amigos, por brindarme ese apoyo incondicional que siempre está presente en los grandes proyectos de vida.

ÍNDICE

	Página
Resumen	i
Summary	ii
Contenido de Tesis	iii
Dedicatorias	vi
Agradecimientos	vii
ÍNDICE	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación.	2
1.2 Hipótesis y objetivo.....	3
1.2.1 Hipótesis.....	3
1.2.2 Objetivo general:	4
1.2.3 Objetivos particulares:	4
2 REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1 Efecto de sitio.	6
2.1.1 Técnicas para la estimación de efecto de sitio usando registros de ruido ambiental.	8
2.2 Estudios previos.	10
2.2.1 Actividad sísmica al centro del país.	10
2.2.2 Estimación del efecto de sitio en el Valle de Querétaro.	13
2.2.3 Geología en el Valle de Querétaro.	14
3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	20
3.1 Transformada de Fourier (TF).	20
3.2 Técnica de cocientes espectrales (HVNR).	25
3.3 Espectro de densidad de potencia (PSD).	28
4 METODOLOGÍA	31
4.1 Obtención de la señal.	31
4.2 Procesamiento.	37
4.2.1 Cálculo de la Función de Transferencia Empírica (FTE).	39
4.2.2 Cálculo del Espectro de Densidad de Potencia (PSD).	40
4.3 Análisis de señal.	42

5	PROCESAMIENTO.	47
5.1	Análisis espectral de los registros de sismos.	48
5.2	Análisis espectral de los registros de ruido.....	51
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	64
7	CONCLUSIONES.	68
	BIBLIOGRAFÍA	71
	APÉNDICE 1. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS Y ESPECTROS DE DENSIDAD DE POTENCIA DE REGISTROS SÍSMICOS.	76
	Sismos de la estación JUR1.	78
	Sismo en la estación CU-UAQ.....	87
	APÉNDICE 2. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS Y ESPECTROS DE DENSIDAD DE POTENCIA DE LOS REGISTROS DE RUIDO AMBIENTAL.	88
	Familia de sedimentos con $f_0 \approx 0.5$ y 3Hz y 0.33s	89
	Familia de sedimentos con $f_0 \approx 0.5$ 2s	93
	Familia de sedimentos con $f_0 \approx 1$ y 3Hz y 0.33s	98
	Familia de sedimentos con $f_0 \approx 1\text{Hz}$ 1s	100
	Familia de sedimentos con $f_0 \approx 5\text{Hz}$ 0.2s	102
	Familia de sedimentos en roca.	104
	APÉNDICE 3. FICHA TÉCNICA DEL SENSOR SS-05 SARA.	107
	APÉNDICE 4. FICHA TÉCNICA DEL SENSOR SSA-320 TERRA.	108
	APÉNDICE 5. ANÁLISIS DE RUIDO ELECTRÓNICO DEL ACELERÓGRAFO TERRA (SSA-320 / GSR-18) COMPARANDO REGISTROS CON EL SISMÓGRAFO SARA (SS-05 / SR-04).	110
	Antecedentes.	110
	Metodología.....	111
	Variantes de las características de la señal a analizar.	113
	Cálculo de la Transformada Discreta de Fourier (DFT).	114
	Variantes en el cálculo de las FTE.....	114
	Variantes en el cálculo del PSD.....	114
	Procesamiento.....	114
	Resultados y discusión.	124
	APÉNDICE 6. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE ESTRATOS PROFUNDOS EN EL EFECTO DE SITIO DE LA ZONA METROPOLITANA DE QUERÉTARO.	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Título	Página
4.1.	Características geológicas, espesor de sedimentos y periodo fundamental de la actual carta de isoperiodos en el Valle de Querétaro.	33
4.2.	Valores de polos y ceros utilizados para generar la respuesta del equipo Sara formado por un velocímetro modelo SS05 y un digitalizador de señal modelo SR04.	35
4.3.	Características de las entidades geológicas consideradas para modelar las Funciones de Transferencia Teóricas (FTT) de las Familias Espectrales (FE).	46
5.1.	Registros sísmicos utilizados para la generación de la FTE mediante la técnica HVSR.	49
5.2.	Distribución geográfica de los puntos de registro de ruido ambiental.	62
6.1.	Descripción e interpretación de cada Familia Espectral.	66
6.2.	Comparación entre las frecuencias fundamentales obtenidas en el estudio de Bustillos (2005) y el presente estudio.	67
A.1.	Registros sísmicos utilizados para la generación de la FTE mediante la técnica HVSR.	76
A.2.	Características de los registros simultáneos para la obtención del ruido electrónico del acelerógrafo Terra (SSA-320 / GSR-18).	112

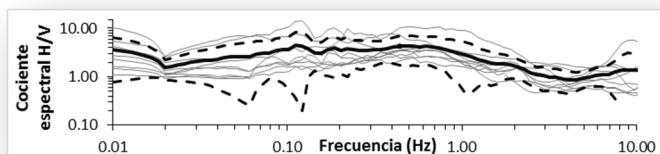
ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1.1.	Crecimiento de la mancha urbana en la Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ) fuera del Valle y decremento de la densidad habitacional en el tiempo (Poder ejecutivo del estado de Querétaro, 2010; CONCYTEQ, 2013).	5
2.1.	Situación tectónica, principales zonas de falla y sismos históricos del Eje Neovolcánico (MVB) (Clemente-Chávez et al., 2013)	12
2.2.	Ubicación del área de estudio dividida por cuadrantes. a) México, b) Estado de Querétaro ubicado en la parte central de México y delimitación del eje Neovolcánico (MVB) con línea punteada, c) Ubicación del valle de Querétaro y área de estudio dentro del estado de Querétaro, d) Polos de desarrollo de la Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ).	15
2.3.	Mapa de tipos de suelo en el Valle y ZMQ (Álvarez-Manilla et al., 2002)	16
2.4.	Columna estratigráfica simplificada por Pacheco (2007) para el Valle de Querétaro.	17
2.5.	Carta geológica del Valle de Querétaro simplificada por Pacheco (2007).	18
2.6.	Espesor de sedimentos en el Valle de Querétaro inferido a partir de secciones gravimétricas modeladas e interpretación de la litología de 80 pozos. (Pacheco, 2007).	19
3.1.	Señal sintética formada por 3 componentes sinusoidales de 1, 2 y 4 Hz de amplitud unitaria representadas en los dominios a) temporal y b) frecuencial.	21
3.2.	En el dominio de tiempo, x consiste de N puntos que van de 0 a $N-1$. En el dominio de la frecuencia, la DFT produce dos señales, la parte real <i>Re X</i> y la parte imaginaria <i>Im X</i> . Cada una de estas señales en dominio de frecuencia tiene una longitud de $N2 + 1$ puntos, y van de 0 a $N2$ (Traducida de Smith, 1999).	24
4.1.	Distribución de sitios de registro dentro del área de interés.	32

Figura	Título	Página
4.2.	Algunos aspectos del levantamiento de registros de ruido ambiental. a) GPSmap 62sc mca. GARMIN usado para el geo posicionamiento de los puntos de registro de ruido ambiental. b) Agujero para instalar el sensor para librar por ejemplo el ruido generado por viento suave (sólo en caso de requerirse). c), d) Acoplamiento artificial entre el suelo y el equipo mediante una cama de arena compactada a fin de generar una superficie útil para nivelación (sólo en caso de requerirse). e) Acoplamiento artificial para asentar el sensor mediante una placa de cristal (solo en caso de requerirse). f) Mediciones de registros de ruido ambiental. g) Composición y arreglo de sistema de medición compuesto por un sismógrafo Sara (velocímetro modelo SS05 y digitalizador modelo SR04), computadora Gateway con software Seismowin cargado para registro de datos, GPS, batería de 12V y cables para conexión.	34
4.3.	Diagrama de Bode que describe de la respuesta instrumental del equipo Sara formado por un velocímetro modelo SS05 y un digitalizador de señal modelo SR04.	35
4.4.	Ruido electrónico del equipo Sara formado por un velocímetro modelo SS05 y un digitalizador de señal modelo SR04. La gráfica muestra la capacidad del sensor para obtener señales útiles comparando con las curvas de ruido de Peterson (1993) (NLNM: New Low Noise Model y NHNM: New High Noise Model). Los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de los registros que tengan una energía por encima de la curva negra continua que indica el ruido electrónico del sensor (Elec. Sara) se consideran útiles.	36
4.5.	Diagrama de Flujo de la metodología para el tratamiento de la señal en la ejecución del presente trabajo de tesis.	38
4.6.	Diagrama de Flujo para la obtención de la Función de Transferencia Empírica (FTE) utilizado en el presente trabajo de tesis.	40
4.7a.	Diagrama de Flujo para la obtención del Espectro de Densidad de Potencia (PSD) utilizado en el presente trabajo de tesis.	41
4.8.	Funciones de Transferencias Empíricas obtenidas con la técnica H/V o HVNR en muchas partes del mundo. Parte izquierda FTE para un sitio con sus curvas de dispersión. Parte superior derecha, FTE para sitios en roca. Parte inferior derecha, FTE para sitios en sedimentos. (Lermo et al., 2013).	44
4.9.	Sección del subsuelo del Valle de Querétaro en el perfil Zaragoza sobre el agrietamiento 5 de Febrero, inferido con datos gravimétricos (Pacheco, 2007) en el cual se puede observar la existencia de sedimentos bajo los estratos rocosos.	45

Figura	Título	Página
5.1.	FTE obtenida del sismo del 01 / 05 / 2012 en el estado de Guerrero, Md = 5.6 registrado en la estación CU-UAQ.	49
5.2.	Análisis de sismos obtenidos en la estación JUR1. a) FTE obtenida mediante cocientes espectrales de 9 sismos (Clemente-Chávez et al., 2014). b) PSD de los eventos sísmicos utilizados para armar la FTE.	50
5.3.	Cociente espectral de ruido (HVNR) en estación JUR1. a) 08:00hrs, b) 17:00hrs. En ambos cocientes, se puede observar el efecto de oleaje en frecuencias inferiores a 0.2 Hz.	51
5.4.	Ejemplo de análisis de forma de dos Funciones de Transferencia Empíricas para categorizarlas en Familias Espectrales. Aunque las dos tienen una amplificación significativa alrededor de 1Hz, la estación 1A presenta una amplificación hacia las altas frecuencias (entre 3 y 5Hz) que la estación 13A no muestra; para este caso, la estación 1A y 13A quedarán en dos familias espectrales separadas.	52
5.5a.	A la izquierda se muestran las familias espectrales en sedimentos con $F_0 \approx 0.5\text{Hz}$ con y sin amplificación en 3Hz definidas por los registros en los lugares de medición. A la derecha se observan los modelos de corteza utilizados para generar la Función de Transferencia Teórica (FTT). Cabe mencionar que la amplificación en bajas frecuencias se genera debido a la existencia de estratos de sedimentos profundos medianamente consolidados, en este caso a aprox. 300m.	56
5.6a.	Espectros de densidad de potencia de las familias espectrales de sedimentos con $F_0 \approx 0.5\text{ Hz}$ con y sin amplificaciones a 3 Hz generadas en el área de estudio.	59
5.7.	Cruce de resultados de este estudio con la geología y topografía del área de estudio.	63
A.1a.	Análisis de evento ocurrido en Baja California Norte el día 04 de Abril de 2010 (Md = 7.2) registrado en la estación JUR1. En la parte superior se muestra la traza sísmica y en la inferior se muestra la Función de Transferencia Empírica (FTE) y los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de Cada componente (en negro el PSD del evento sísmico, en gris el PSD del ruido ambiental en la estación).	78
A.2a.	Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en el registro en esa banda de frecuencias.	89

Figura	Título	Página
A.3.	Localización de los puntos de control UAQ01 y UAQ02 a 90 y 600mts respectivamente de la avenida 5 de febrero. UAQ01 se encuentra al centro de un área sin tráfico circundante, mientras que UAQ02 se encuentra a un costado de vialidades secundarias	111
A.4.	Diagrama de Flujo para la obtención de la DFT de cada componente de análisis del ruido comparativo entre el sismógrafo Sara y el acelerógrafo Terra.	115
A.5a.	Comparativa entre las Funciones de Transferencia Empírica (FTE) de manera simultánea con el sismógrafo Sara (línea continua negra) y el acelerógrafo Terra (línea continua gris). Subrayados los picos que no cumplen con el criterio de claridad marcados por el proyecto SESAME (European Commission, 2004)	116
A.6a.	Comparativa entre los Espectros de Aceleración de Fourier (EAF) de las componentes de ruido ambiental registrados de manera simultánea con el sismógrafo Sara (línea continua negra) y el acelerógrafo Terra (línea continua gris).	119
A.7a.	Comparativa entre los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las componentes de ruido ambiental registrados de manera simultánea con el sismógrafo Sara (línea continua negra) y el acelerógrafo Terra (línea continua gris).	122
A.8.	Ejercicio del Apéndice. a) En la parte superior izquierda se muestra el modelo de corteza que considera los estratos superficiales asentados sobre roca sólida, mientras que en la superior derecha el correspondiente a una intercalación de material sedimentario en la roca que sirve de base para los estratos superficiales. b) Con línea continua color negro se muestra la FTT correspondiente al modelo de corteza que considera una base sólida, mientras que con color gris punteado la que considera intercalación de materiales suaves en la roca de la base.	129



1 INTRODUCCIÓN

La importancia que ha ganado el conocimiento de las características dinámicas del sitio haciendo una comparativa de la reglamentación de la Comisión Federal de Electricidad (Comisión Federal de Electricidad, 1993; 2008) se hace evidente en el uso de factores que dependen del periodo dominante del depósito (T_s) para el cálculo de los factores de comportamiento lineal y no lineal del suelo en la construcción de los espectros de diseño.

Las primeras clasificaciones de tipos de suelo para cimentación se establecieron en función de la composición y espesores de los estratos, de manera general se hizo la distinción entre tres tipos de suelo: suelo duro o roca, intermedio y blando (Seed et al., 1976; Philips y Aki, 1986; Su et al., 1992).

Aunque la amplitud, frecuencia, composición y duración del movimiento del suelo son afectados por las condiciones de la geología del sitio (Lozano et al. 2009), en una misma unidad geológica se pueden encontrar variaciones que evitan la caracterización de su comportamiento dinámico únicamente por su composición o espesores de estratos, es por esto que se requieren otro tipo de parámetros geotécnicos y geofísicos como son: la velocidad de las ondas de compresión y de cortante, el módulo de rigidez, de elasticidad transversal, el coeficiente de Poisson, la densidad, el amortiguamiento del medio, entre otros (Lermo y Limaymanta, 2007).

Dado que el conocimiento de estos nuevos parámetros permite establecer nuevas clasificaciones de los tipos de suelo, así como el incremento de la información cuantitativa que permite ajustar en mayor medida los modelos a la realidad, cada vez son más los métodos geotécnicos, geofísicos y de laboratorio que se desarrollan con estos fines.

Entre estos métodos, una herramienta sencilla, rápida y de bajo costo es el uso de vibración ambiental para la obtención de Funciones de Transferencia Empíricas (FTE) y como herramienta de prospección geofísica para la clasificación de suelos mediante la estimación de modelos dinámicos de corteza que permitan clasificar el efecto de sitio (Lermo y Limaymanta, 2007; Chávez-García y Tejeda-Jácome, 2010b).

1.1 Justificación.

En la actualidad las fuentes sísmicas que delimitan el peligro en México de acuerdo a su importancia y en orden ascendente con base en su periodo de retorno son (Ismael-Hernández et al., 2011):

- Sismos de subducción o de falla inversa (profundidades no mayores a 50Km).
- Sismos de falla normal o intraplaca (bajo el continente y con profundidades mayores que 50Km).
- Locales (superficiales inducidos por una falla en la corteza).

Tomando en cuenta lo anterior se considera un periodo de retorno alto para los sismos locales, sin embargo puede representar un riesgo potencial en zonas de alto crecimiento poblacional como lo es la zona centro del país (Por ejemplo, el municipio de Querétaro (2012) estima un crecimiento del 60% en el intervalo 2010-2030), considerando que pueden lograr mayores niveles de aceleración en el sitio (Zúñiga et al., 2003; Clemente-Chávez et al., 2013) que los predichos por las leyes

de atenuación estudiadas para los efectos sísmicos de la zona de subducción (Ordaz et al., 1989; García, 2006; Clemente-Chávez et al., 2012).

Considerando este riesgo, que el potencial sísmico del sistema de fallas al centro de México continúa siendo desconocido (Zúñiga et al., 2003; Clemente-Chávez et al., 2013; Clemente-Chávez et al., 2014) y que la atenuación del movimiento sísmico está en función de la relación fuente-trayectoria-sitio (Clemente-Chávez et al., 2012), surge la importancia de incrementar la información sísmica de la parte central de México.

En vista de este requerimiento de información, Bustillos (2005) elaboró una carta de isoperiodos y caracterización de sitio dentro del valle de Querétaro. Sin embargo, tras una breve revisión de los resultados, se han encontrado discrepancias reflejadas en formas atípicas de las Funciones de Transferencia Empíricas (FTE) atribuibles a los criterios empleados y al uso de un equipo acelerógrafo; equipos que en general han mostrado ser eficientes para el registro de movimientos fuertes como son los sismos pero poco eficientes para registrar movimientos de baja amplitud (ruido ambiental) (Tejeda-Jácome y Chávez-García, 2010a). Además de esta falta de sensibilidad en los equipos utilizados en el estudio previo de Bustillos (2005), el crecimiento difuso (incremento de la mancha urbana y reducción de la densidad habitacional) de la Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ) deja a las actuales áreas de potencial crecimiento fuera del alcance y sin información (Ver Figura 1.1).

1.2 Hipótesis y objetivo.

1.2.1 Hipótesis.

Con una densidad y cobertura mayores en puntos de medición, al trabajo de Bustillos (2005), además de instrumentación adecuada y registro bajo las consideraciones recientes (2004) del proyecto SESAME se podrá tener una mayor

certeza en la estimación de periodos fundamentales del suelo así como una mejor clasificación de zonificación sísmica basada en las respuestas espectrales del suelo (H/V) en la zona Nor-Oeste (primer cuadrante) de la Zona Metropolitana de Querétaro.

1.2.2 Objetivo general:

Determinar los periodos fundamentales del suelo en una zona de la Ciudad de Querétaro (denominado cuadrante I) con base en el uso de registros de ruido ambiental, con criterios del proyecto SESAME (European Commission, 2004) y aportaciones de Lermo y Limaymanta (2007) e Ismael-Hernández et al. (2011).

1.2.3 Objetivos particulares:

Determinar la densidad de potencia en la banda de frecuencias de interés para un óptimo análisis del espectro H/V, analizando si tiene suficiente energía para permitir la extracción de la señal sobre el ruido electrónico.

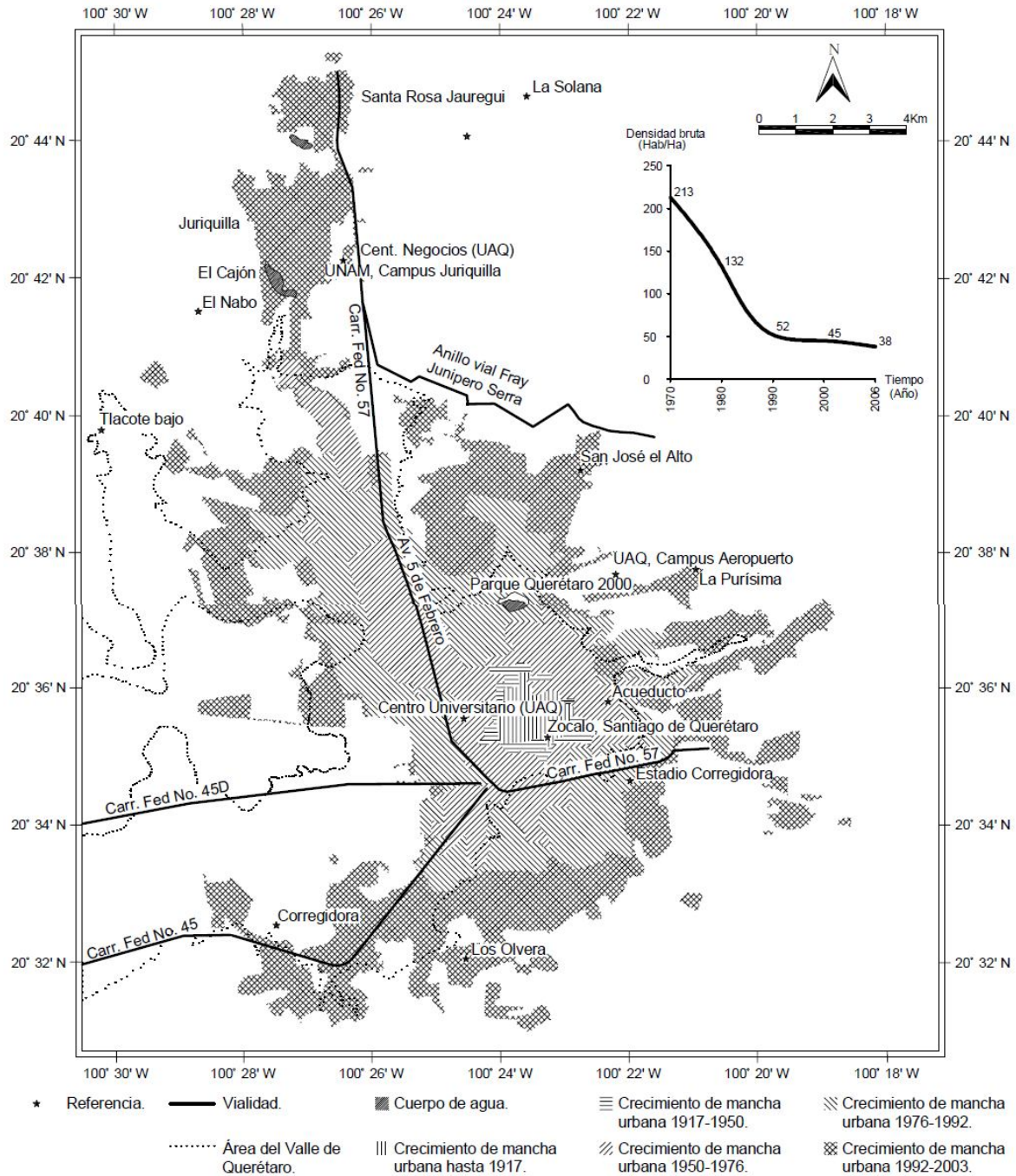
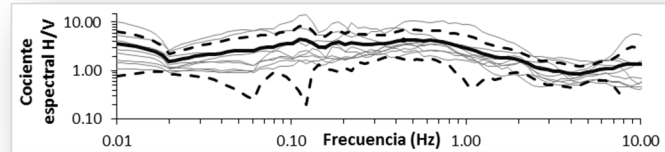


Figura 1.1. Crecimiento de la mancha urbana en la Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ) fuera del Valle y decremento de la densidad habitacional en el tiempo (Poder ejecutivo del estado de Querétaro, 2010; CONCYTEQ, 2013).



2 REVISIÓN DE LITERATURA

La revisión literaria que se presenta a continuación está enfocada en definir los conceptos básicos para caracterizar la respuesta dinámica del suelo, las técnicas para su estimación y algunos estudios previos enfocados particularmente al Valle de Querétaro, por ser esta nuestra área de estudio, con la finalidad de tener como referencia datos de naturaleza geológica y geotécnica que permita contar con una clasificación inicial a fin de optimizar los recursos para la generación de este trabajo de tesis, en busca de definir parámetros cuantitativos que definan el comportamiento dinámico del suelo.

2.1 Efecto de sitio.

Atendiendo al impacto que tienen los sismos sobre la sociedad, se ha reconocido en todo el mundo la importancia de la mitigación del riesgo relacionado con este fenómeno, la cual se puede dar mediante el desarrollo y aplicación de códigos y recomendaciones para diseño estructural que propicien en las obras de ingeniería la capacidad para soportar las acciones del fenómeno sísmico (Ismael-Hernández et al. 2011).

Con la finalidad de conocer de manera más detallada las acciones aplicadas por un evento sísmico (como uno de los grandes retos de la ingeniería sísmica y la sismología), sin duda se tiene el estimar el nivel de intensidad o peligro

sísmico que puede presentarse en una región de interés dada la ocurrencia de un evento descrito por su magnitud (relacionado con el nivel de energía liberada), amplitud, contenidos de frecuencia (relacionado con la fuente-trayectoria-sitio de propagación) y localización (distancia-profundidad de la fuente) (Ismael-Hernández et al. 2011).

Para los fines del presente trabajo, la descripción del evento sísmico se abordará exclusivamente en lo que corresponde al efecto de sitio definido como la respuesta del suelo ante el paso de la onda sísmica, relacionado directamente con las condiciones de geología, tipo de suelo, hidrología y geomorfología que afectan la amplitud, frecuencia, composición y duración del movimiento del suelo, lo cual se interpreta principalmente por el periodo resonante (o fundamental) y el máximo factor de amplificación (Lermo y Chávez-García, 1994; Lermo y Limaymanta, 2007, Lozano et al., 2009; Ismael-Hernández et al., 2011; Clemente-Chávez et al., 2014).

Para aproximar la evaluación del efecto de sitio antes definido se pueden nombrar técnicas teóricas (mediante aproximación numérica) y empíricas (mediante aproximación instrumental) (Lermo y Chávez-García, 1994; Bonnefoy-Claudet et al., 2006; Lermo y Limaymanta, 2007; Lozano et al., 2009; Chávez-García y Tejeda-Jácome, 2010b).

Las técnicas teóricas requieren del conocimiento de un modelo de corteza (velocidad de onda longitudinal y de cortante), el cual es posible definir mediante métodos de prospección geofísica de propagación de onda, en los que es necesario encontrar un estrato de alta impedancia al fondo con la finalidad de que los estratos superiores sean capaces de representar los depósitos de suelo responsables del efecto de sitio local (Lermo y Chávez-García, 1994; Chávez-García y Tejeda-Jácome, 2010b). Con el fin de definir el estrato de alta impedancia, se sugiere al lector referirse a reglamentos y normativa sísmica vigente como lo puede ser CFE (2008), el Código Internacional Eurocode8 (EC-8) o el Código Internacional (NEHRP).

Por otro lado, las técnicas empíricas se basan en registrar movimientos débiles (microsismos y microtemores) y fuertes (sismos) en los sitios de diferente geología local a fin de obtener la respuesta de suelos suaves respecto a la roca firme (Lermo y Chávez-García, 1994).

Aunque la comparación de estas técnicas teóricas y empíricas incrementa la confiabilidad de los resultados, existen muchos temas sin resolver como lo son la extrapolación de resultados a otros emplazamientos, la fiabilidad de las estimaciones realizadas con algunas técnicas, la aplicabilidad de modelos unidimensionales o por el contrario, la necesidad de utilizar modelos bidimensionales o de grado superior de propagación de ondas, etc. (Lermo y Limaymanta, 2007; Chávez-García y Tejeda-Jácome, 2010b).

Con todo esto, Lermo y Limaymanta (2007) destacan algunas observaciones generales que incluyen estudios empíricos de respuesta local (todas ellas localizadas en México y América Central), entre las que se destacan:

- La amplificación espectral depende de la frecuencia.
- Salvo condiciones especiales (ej. Distrito Federal), en promedio los factores de amplificación espectral no exceden un factor de 10 veces.
- En cualquier diseño sísmico en la región, es aconsejable considerar un factor mínimo de amplificación de dos a tres veces.
- Las frecuencias predominantes varían en los distintos emplazamientos, dependiendo del tipo de suelo. Sin embargo, la mayoría de amplificación ocurre en la banda de frecuencias de 1 a 10 Hz.

2.1.1 Técnicas para la estimación de efecto de sitio usando registros de ruido ambiental.

En la actualidad es aceptado que la estimación más confiable del efecto de sitio es aquella obtenida mediante el cociente de los espectros de registros sísmicos

simultáneos entre un terreno blando y un sitio de referencia libre de amplificaciones, sin embargo, en lugares donde la sismicidad es de moderada a baja, la cantidad de registros sísmicos para generar una muestra significativa aunado a la dificultad para obtener registros simultáneos en las estaciones requeridas pueden ser una limitante (Lermo y Chávez-García, 1994; Chávez-García y Tejeda-Jácome, 2010a).

Una de las alternativas propuestas para el análisis del efecto de sitio en lugares con sismicidad moderada o baja es el registro de ruido ambiental, cuyo concepto se introdujo inicialmente en Japón por Kanai and Tanaka (1954) y que posterior al evento de Guerrero-Michoacán (1985) recibió atención renovada por mostrar que la información provista por mediciones simples y de bajo costo son consistentes con observaciones de movimientos sísmicos (Lermo y Chávez-García, 1994; Bard, 1999; Flores y Aguirre, 2003; Lermo y Limaymanta, 2007), sin embargo, aunque han dado buenos resultados en la obtención del periodo fundamental del suelo sobre las capas de roca, no han sido concluyentes en dar una estimación adecuada del factor de amplificación (Lermo y Chávez-García, 1994; Bard, 1999).

El uso de ruido ambiental con la finalidad de describir el efecto de sitio se ha utilizado principalmente en cuatro diferentes formas, como sigue (Bard, 1999):

- Espectro absoluto: Se refiere a los primeros trabajos de Kanai et al. (1954; 1983) en donde se asocia directamente el espectro de Fourier de la componente horizontal de los registros de ruido ambiental con la respuesta del suelo.
- Cocientes espectrales con respecto a un sitio de referencia: En donde se asocia la respuesta del suelo con el cociente espectral entre las componentes horizontales de una estación temporal con las de una estación de referencia, basado en que el campo de ondas entrantes al sistema es uniforme dentro del área de medición.
- Cocientes espectrales H/V (HVNR por sus siglas en inglés Horizontal-Vertical Noise Ratio): En el cual se aprovecha la coincidencia entre el pico máximo

de menor frecuencia de la curva descrita por el cociente espectral H/V y la frecuencia fundamental resonante del suelo mostrada inicialmente por Nogoshi e Igarashi (1971) y que posteriormente Nakamura (1989) interpretara como un estimador confiable del efecto de sitio para las ondas transversales u ondas “S”.

- Inversión de un modelo de corteza mediante arreglos instrumentales: La cual básicamente se puede describir como una técnica de exploración geofísica que provee de manera indirecta la estimación del efecto de sitio.

Para mayor información sobre ventajas y desventajas de estas técnicas se recomienda revisar los documentos publicados por Lermo y Chávez-García (1994) así como el de Bard (1999).

2.2 Estudios previos.

A continuación se presentan algunos puntos relevantes de estudios en los que se involucra al Valle de Querétaro y la zona sismogénica a la que pertenece desde el punto de vista de actividad sísmica, estimación de efecto de sitio y geología con el fin de entender el antecedente histórico y algunas características ya estudiadas previamente en el área.

2.2.1 Actividad sísmica al centro del país.

El estado de Querétaro está localizado en el borde norte de la zona sismogénica enmarcada como el Cinturón Volcánico Mexicano (MVB, por sus siglas en inglés), el cual cubre una franja central de México con orientación E-W entre las coordenadas geográficas 19°-22° de latitud norte y 96°-106° de longitud oeste como se observa en la Figura 2.1 (Clemente-Chávez et al., 2013).

Dentro de esta franja (MVB), se han realizado estudios de los efectos de amplificación (e.g., Ordaz y Singh, 1992; Shapiro *et al.*, 1997; Furumura y Singh,

2002; Iida y Kawase, 2004), en algunos de los cuales (ej. Cruz-Jiménez *et al.*, 2009; Ferrer-Toledo *et al.*, 2004) se ha mostrado que la señal sísmica procedente del Pacífico Mexicano presenta comportamientos diferentes a la entrada del MVB de acuerdo a las diferentes direcciones de las zonas sismogénicas de subducción.

Entre estos comportamientos diferenciales y basado en una modelación numérica sobre el comportamiento de la señal sísmica al entrar en el MVB proveniente de la zona sismogénica de Guerrero, Cruz-Jiménez *et al.* (2009) mostraron que no hay efectos de amplificación sino más bien un decaimiento lento de las amplitudes en frecuencias alrededor de 0.5Hz, situación que de igual manera presentan Clemente-Chávez *et al.* (2014) para frecuencias de 0.3, 0.5 y 2Hz basados en datos observados en la estación ubicada en Juriquilla, propiedad del Centro de Geociencias de la UNAM. Este tipo de discrepancias se pueden atribuir a las distintas características de terrenos que atraviesan las ondas sísmicas entre la zona del Pacífico y el MVB, con ello podría entenderse bajo ciertas reservas, que quizás las discrepancias estén ligadas al tipo de trayectorias y emplazamientos analizados (García, 2006).

Otro tipo de estudio corresponde a los eventos ocurridos al interior del MVB, que aunque no son comunes, se tienen precedentes de grandes sismos con $M_w \geq 6$ y de los cuales vale la pena remarcar, dada la cercanía a la zona de estudio (ZMQ), los ocurridos en Sanfandila (Zúñiga *et al.*, 2003) y de manera reciente en Peñamiller (Clemente-Chávez *et al.*, 2013), mismos que se pueden identificar en la Figura 2.1.

Zúñiga *et al.* (2003) analizaron una secuencia sísmica localizada alrededor de 25Km al sureste de la ciudad de Querétaro y cerca de la sierra de Cués durante los primeros meses de 1998. El análisis de esta secuencia reportó un evento máximo de $M_w = 3.5$ de falla normal y que muestra ser representativo del sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (TSMFZ) con un azimut aproximado de 334° y buzamiento de 80° , el cual ha sido propuesto como la extensión sur de la provincia

de cuencas y sierras (*BR* por sus siglas en inglés) (Henry and Aranda-Gómez, 1992). Debido a la ubicación de los eventos al sur de esta provincia de manera consistente con la tectónica del MVB y en el punto en el que se intersectan los dos sistemas de fallas, pudiera marcar el contorno de dominios de esfuerzos entre el MVB y la provincia BR, donde el esfuerzo mínimo de compresión cambia abruptamente de E-W a N-S.

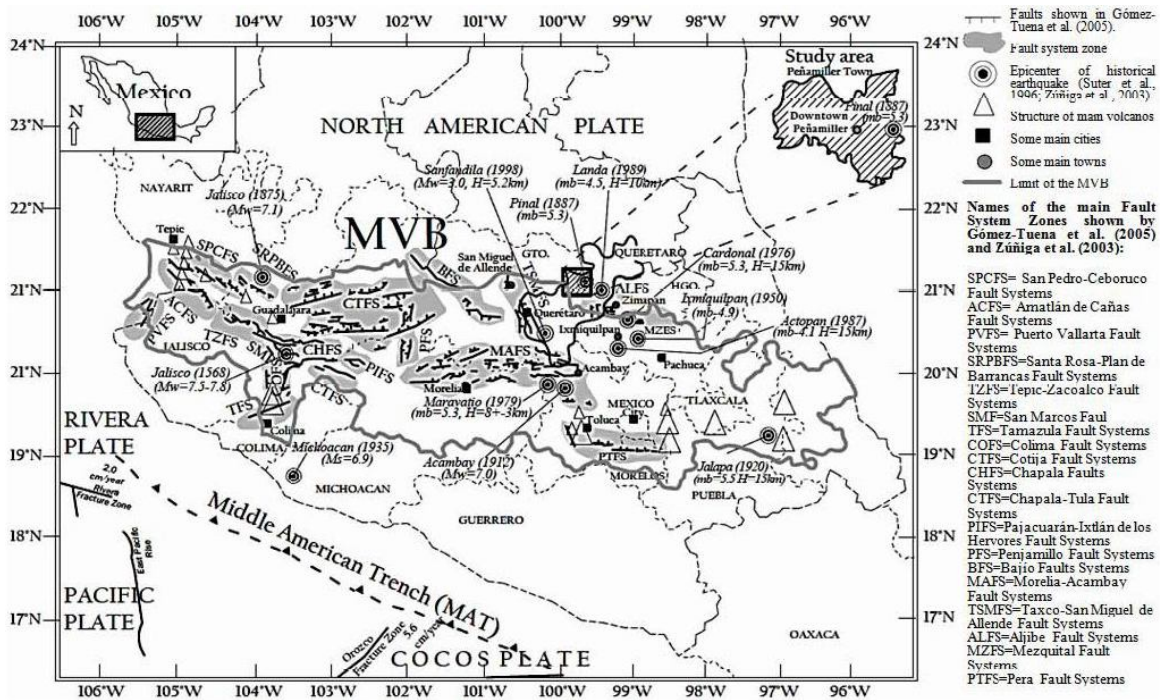


Figura 2.1. Situación tectónica, principales zonas de falla y sismos históricos del Eje Neovolcánico (MVB) (Clemente-Chávez et al., 2013)

Por otro lado, Clemente-Chávez et al. (2013) registraron una secuencia de veinticuatro sismos superficiales (5.6Km) de falla predominantemente normal durante finales del 2010 e inicios del 2011 a 7 Km de la ciudad de Peñamiller y 80 Km al noreste de la ciudad de Querétaro, con un azimut de 174° , registrando una magnitud máxima de $M_w = 3.5$ y causando un pico de aceleración superior a los 100 cm/s^2 en la componente horizontal. De manera similar a la secuencia de Sanfandila en 1998 (Zúñiga et al., 2003), la secuencia de Peñamiller (PES)

registrada por Clemente-Chávez et al. (2013) es consistente con la principal tendencia de extensión sureña de la provincia BR (Henry and Aranda-Gómez, 1992) como una falla activa.

Con base a la historia sísmica de la región se demuestra que las fallas son capaces de generar eventos destructivos como los de Jalisco en 1568 ($M_w = 7.5 - 7.8$), Jalisco en 1875 ($M_w = 7.1$), Acambay en 1912 ($M_w = 7.0$) entre otros que se pueden observar en la Figura 2.1, lo cual hace evidente la necesidad de conocer y estudiar el efecto de sitio en el área del centro del país (específicamente en la ZMQ).

2.2.2 Estimación del efecto de sitio en el Valle de Querétaro.

Bustillos (2005) realizó campañas de obtención de registros acelerográficos de microtemores en 138 sitios, 94% de los mismos al interior del Valle de Querétaro, delimitado según se muestra en la Figura 2.2.

Este estudio (Bustillos, 2005) propone a los sitios de registro de ruido ambiental en lugares cercanos a la ubicación de pozos para la extracción de agua a fin de utilizar sus datos de estratigrafía de los archivos de la Comisión estatal de Aguas. Con estos registros se obtuvieron las Funciones de Transferencia Empíricas (FTE) utilizando la técnica propuesta por Nakamura (1989) ó HVNR por sus siglas en inglés (Horizontal-Vertical Noise Ratio) y con los datos de estratigrafía del pozo se asignaron propiedades de velocidad de propagación de onda de cortante (V_s) y longitudinal (V_p), módulo de cortante y densidad con base a los valores propuestos por Clark (1966) a fin de generar un modelo elástico unidimensional o Función de Transferencia Teórica (FTT) basado en la propuesta de Zeevaert (1991).

De las FTE y FTT obtenidas en los puntos de registro, Bustillos (2005) consigue los periodos naturales de vibración del suelo para generar una carta de isoperiodos y revisa tres escenarios sísmicos considerando que las FTE y FTT obtenidas representan el comportamiento dinámico del suelo. Adicionalmente y con

el mismo principio del cociente espectral, obtiene los espectros de respuesta del sitio ante la acción de los sismos propuestos para 44 ubicaciones, concluyendo coeficientes sísmicos de 0.1 para suelos firmes ($f_0 < 0.4s$) y 0.2 para depósitos aluviales ($0.4s \leq f_0 \leq 1.0s$) (Zona A y B respectivamente).

2.2.3 Geología en el Valle de Querétaro.

A fin de conocer en mayor medida las características del suelo en el Valle de Querétaro y poder relacionar las propiedades dinámicas del mismo con alguna entidad geológica, se presentan a continuación el estudio de Álvarez-Manilla et al. (2002) y el de Pacheco (2007).

Álvarez-Manilla et al. (2002) realizó un muestreo para clasificar los tipos de suelo basado en la obtención de sus propiedades índice. Para los suelos transportados se determinó su peso volumétrico, pruebas de expansión y de colapso, además para los suelos antropogénicos se optó por la ejecución de sísmica de refracción. De este estudio se obtiene una carta de tipos de suelo en el Valle y Zona Metropolitana de Querétaro, el cual se puede observar en la Figura 2.3.

Por otro lado, Pacheco (2007) generó un perfil estratigráfico y una carta geológica simplificando la de Carreón-Freyre (2005) y centrando principalmente su atención en las propiedades geo-mecánicas (densidad y relación de esfuerzo-deformación) de las entidades geológicas (Ver Figura 2.4 y Figura 2.5). Además del perfil y de la carta geológica, se generó una carta que muestra el espesor de sedimentos sobre la entidad geológica Tmt AB (Derrames de lava de composición basáltica y andesítica del Mioceno Tardío) (Ver Figura 2.6).

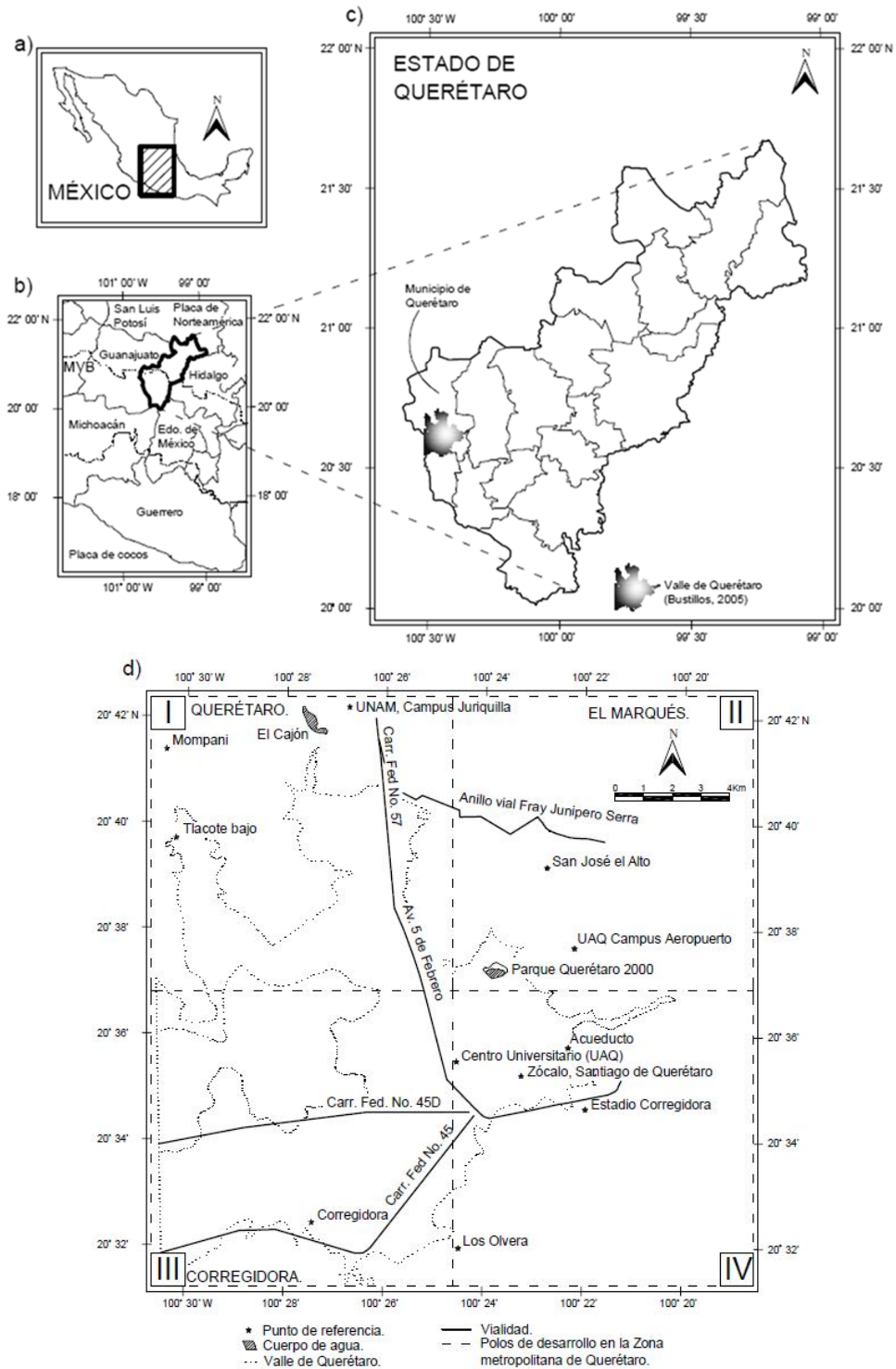
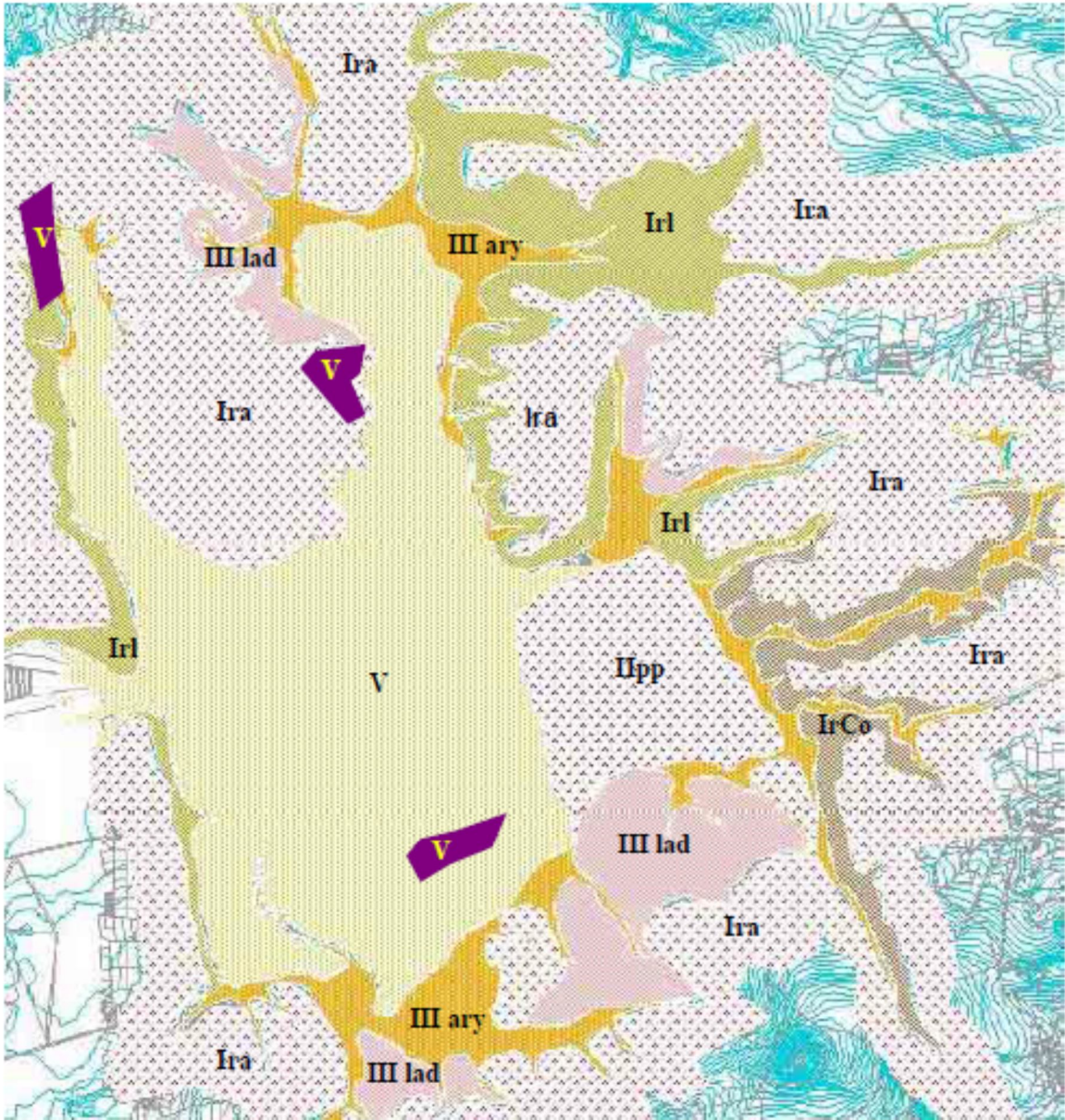


Figura 2.2. Ubicación del área de estudio dividida por cuadrantes. a) México, b) Estado de Querétaro ubicado en la parte central de México y delimitación del eje Neovolcánico (MVB) con línea punteada, c) Ubicación del valle de Querétaro y área de estudio dentro del estado de Querétaro, d) Polos de desarrollo de la Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ).



Ira: Suelos Residuales partes altas
Irl: Suelos Residuales en las laderas.
IrCo: Suelos de tipo Coluvión.
Ipp: Suelos en la zona Peniplana.

III lad: Suelos del tipo fluvial en ladera.
III ary: Suelos del tipo fluvial en arroyos
IV: Suelos del tipo Aluvial y Lacustre.
V: Suelos del tipo Antropogénico.

Figura 2.3. Mapa de tipos de suelo en el Valle y ZMQ (Álvarez-Manilla et al., 2002)

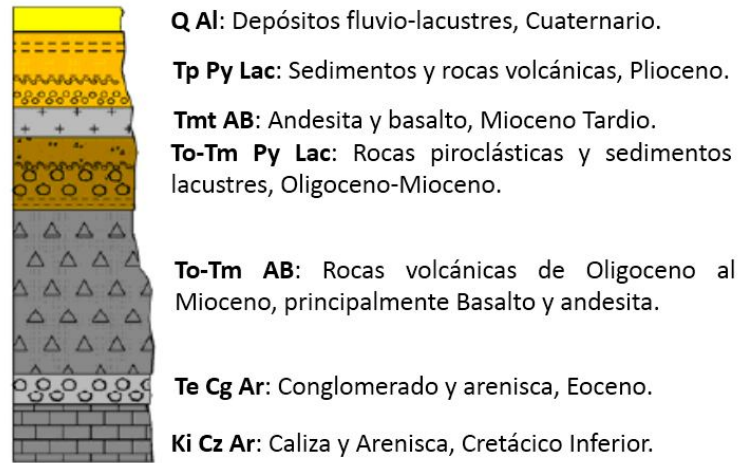
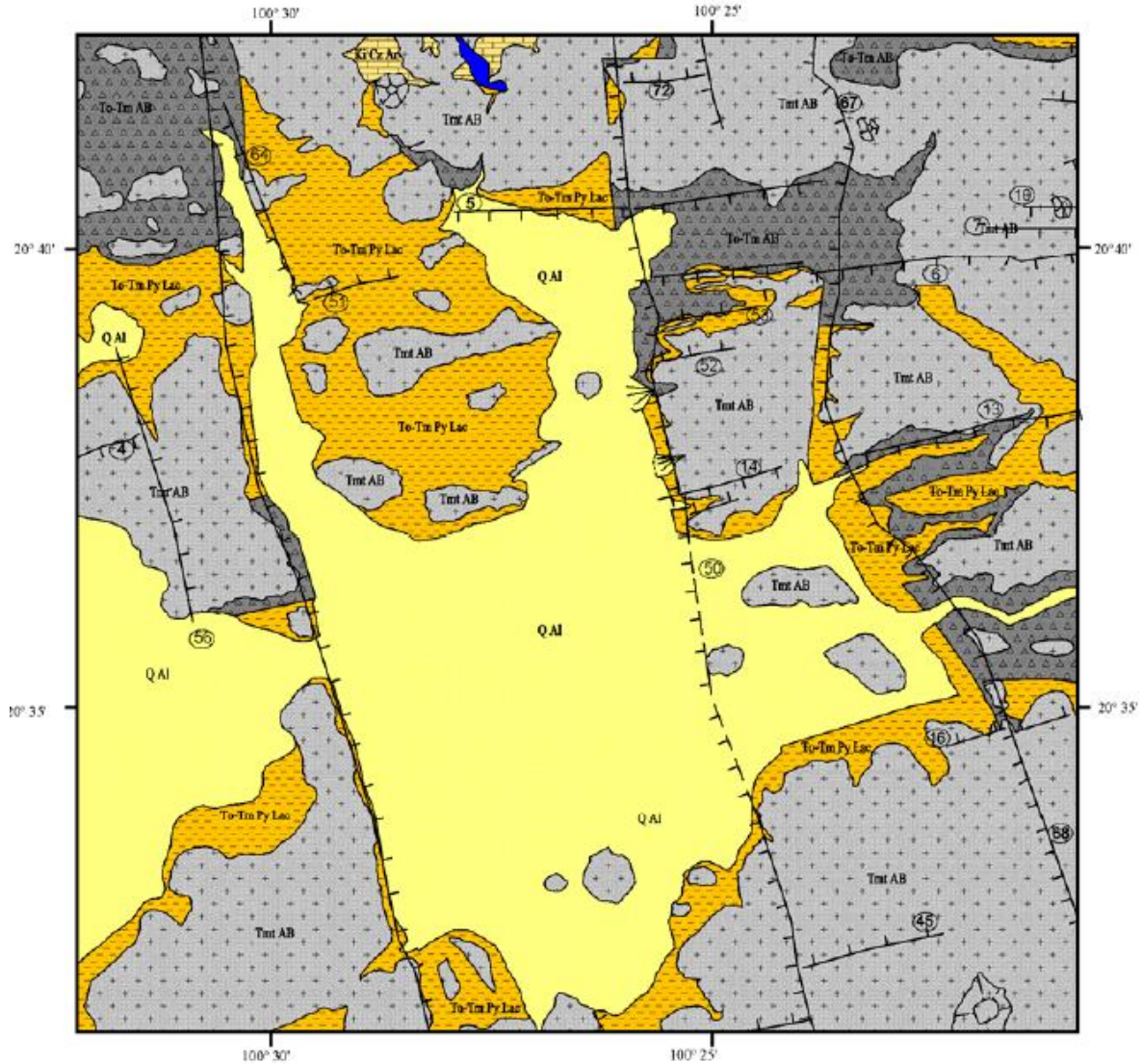


Figura 2.4. Columna estratigráfica simplificada por Pacheco (2007) para el Valle de Querétaro.



EXPLICACIÓN.








- | | |
|--|--|
|  Q Al: Rellenos aluviales del cuaternario: Arcilla, limo y arena fina. |  To-Tm AB: Andesita del Oligoceno con intercalación de toba. |
|  Tmt AB: Derrames de lava de composición basáltica y andesítica del Mioceno Tardío. |  Ki Cz Ar: Calizas del Cretácico Inferior. |
|  To-Tm Py Lac: Rellenos de sedimentos lacustres y piroclastos del Oligoceno y del Mioceno medianamente consolidados. |  Cuerpo de Agua. |
| |  Falla normal. |

Figura 2.5. Carta geológica del Valle de Querétaro simplificada por Pacheco (2007).

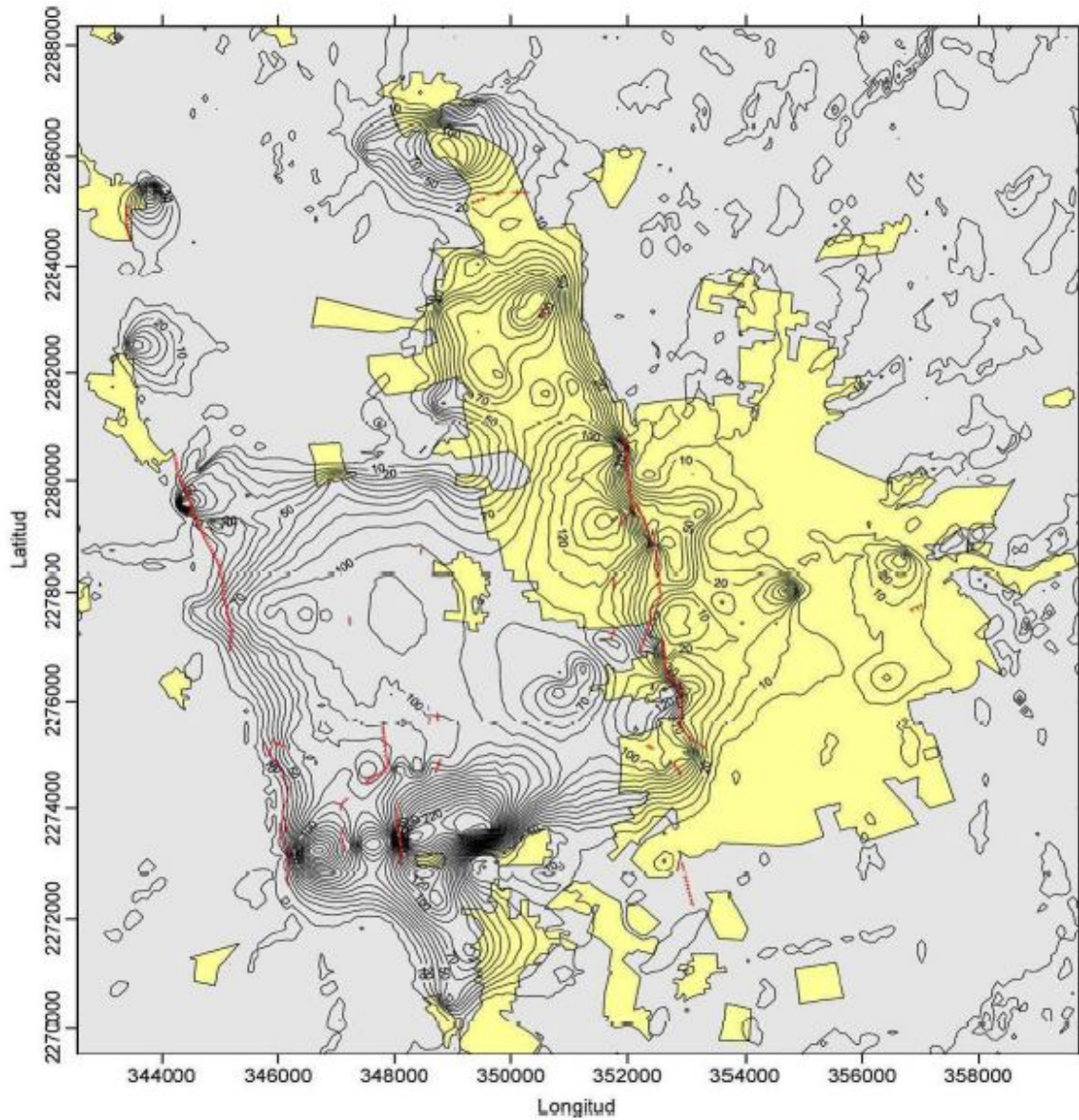
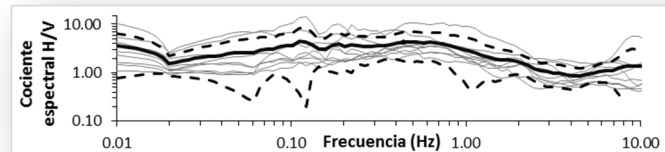


Figura 2.6. Espesor de sedimentos en el Valle de Querétaro inferido a partir de secciones gravimétricas modeladas e interpretación de la litología de 80 pozos. (Pacheco, 2007).



3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

Con la finalidad de comprender de mejor manera las herramientas a utilizar para la definición de los periodos fundamentales del suelo se procede a ampliar los conceptos básicos para la obtención de la Transformada de Fourier (TF) dada su importancia como herramienta básica para el análisis de la señal en el dominio de la frecuencia, así como los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) y las Funciones de Transferencia Empíricas (FTE), por ser estas las herramientas para obtener y validar los periodos de vibrar del suelo en el sitio.

3.1 Transformada de Fourier (TF).

La transformada de Fourier (TF) tiene como finalidad la descomposición de una señal como una suma de ondas seno y coseno (o exponenciales complejas relacionadas armónicamente) para facilitar su tratamiento, presentando un diferencial cero de energía (efecto de Gibbs) y teniéndose a su favor la característica de fidelidad sinusoidal (una entrada sinusoidal a un sistema garantiza producir una salida sinusoidal), en donde únicamente la amplitud y fase de la señal se puede cambiar, mientras la frecuencia y la forma de onda se conservará igual (Smith, 1999).

La descomposición de la señal en sus componentes sinusoidales mediante el uso de la herramienta matemática de la TF permite transformarla del dominio

temporal (indica cómo cambia la amplitud de la señal en el tiempo), al dominio de la frecuencia (permite conocer cuan a menudo cambia la amplitud) y viceversa. A la representación de estas amplitudes y fases en función de la frecuencia se le llama espectro de la señal (Ver Figura 3.1) (FCEFYN, 2013; Smith, 1999).

Este término de TF puede dividirse en cuatro categorías, resultado de los tipos básicos de señal que se pueden encontrar: señal continua y discreta, así como periódica y aperiódica (González-Martínez y Clemente-Chávez, 2013). Para el caso del presente estudio y dada la naturaleza de la señal a analizar (datos discretos y longitud finita), se utiliza la Transformada Discreta de Fourier (DFT, por sus siglas en inglés).

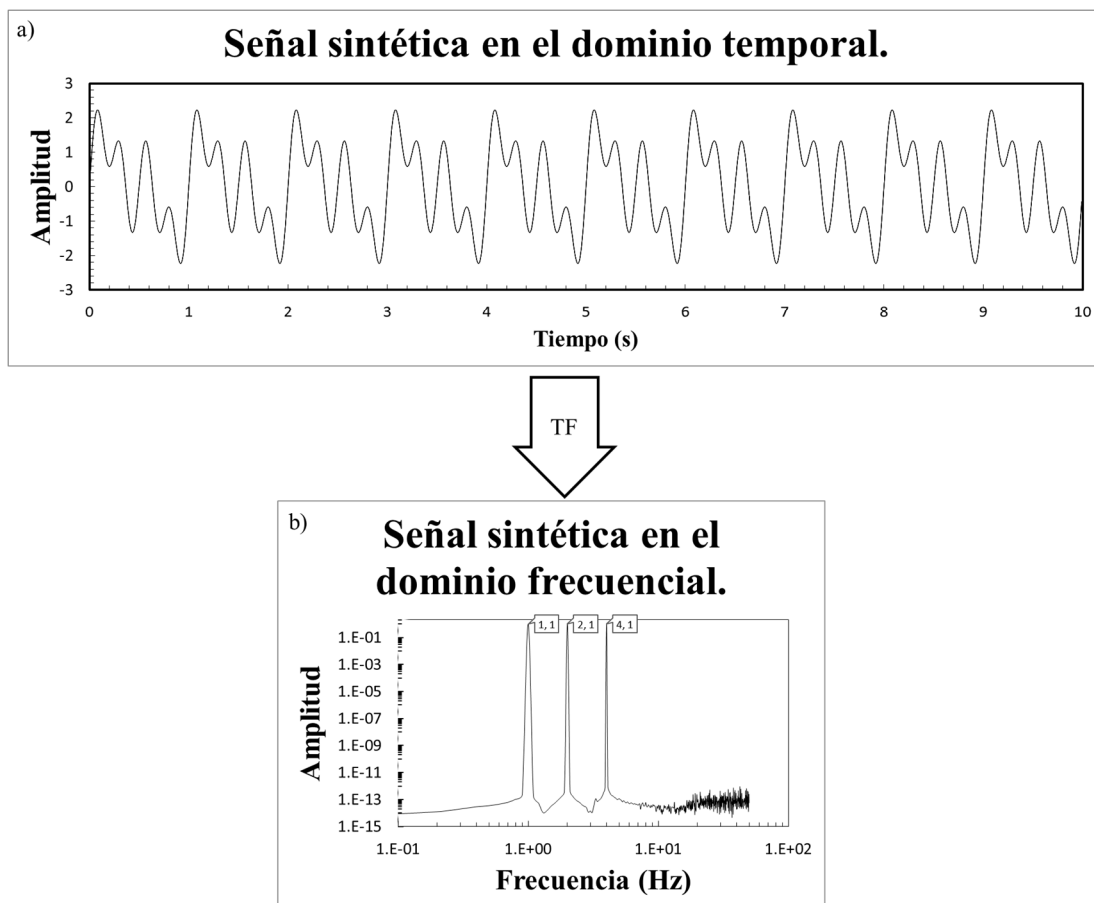


Figura 3.1. Señal sintética formada por 3 componentes sinusoidales de 1, 2 y 4 Hz de amplitud unitaria representadas en los dominios a) temporal y b) frecuencial.

La descripción de cualquier señal periódica compleja como la combinación lineal de señales seno y coseno en la cual asumimos que el conjunto de estas señales tienen frecuencias que son múltiplos de alguna frecuencia fundamental f_0 (o angular $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$), puede llevarse a cabo conociendo las propiedades de estas señales uni-frecuenciales (de una sola frecuencia) y de cómo están expresadas mediante las exponenciales complejas armónicamente relacionadas (FCEfyN, 2013).

Para lograr la representación de la señal en el dominio de la frecuencia, se tomará la ecuación continua de las Series de Fourier como sigue:

$$a_k = \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) \cdot e^{-j \cdot k \cdot \omega_0 t} \cdot dt$$

Ec. 1

Donde:

$x(t)$ = Señal continua en el dominio del tiempo.

a_k = Señal discreta en el dominio de su índice armónico (0,1,2,3...N-1).

T_0 = Periodo fundamental de la señal ($2\pi/\omega_0$).

ω_0 = Frecuencia angular fundamental de la señal ($2\pi f_0$).

Siguiendo con el proceso de análisis para una señal discreta y de longitud finita, para limitar $x(t)$ se toman N muestras durante un periodo a intervalos t_s , de forma que $N \cdot t_s = T_0$ y la función t se sustituirá por una función discreta $n \cdot t_s$ con lo que al calcular los coeficientes queda como sigue:

$$a_k = \frac{1}{N \cdot t_s} \cdot \sum_{n=\langle N \rangle} x[n] \cdot e^{-j \cdot k \cdot (2\pi \cdot f_0) \cdot n \cdot t_s} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=\langle N \rangle} x[n] \cdot e^{-j \cdot k \cdot (2\pi \cdot f_0) \cdot n \cdot (T_0/N)}$$

$$a_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=\langle N \rangle} x[n] \cdot e^{-j \cdot k \cdot (2\pi/N) \cdot n}$$

Ec. 2

Donde:

$x[n]$ = Señal discreta en el dominio del tiempo.

a_k = Señal discreta en el dominio de su índice armónico (0,1,2,3...N-1).

n = Constante que indica la posición en los intervalos de muestreo de la señal ($n \cdot t_s$).

Ω_0 = Frecuencia fundamental angular de la señal discreta.

N = Periodo fundamental de la señal discreta (número de datos de la señal discreta) ($2\pi/\Omega_0$).

Bajo este esquema se tiene la ecuación base para representar una señal digital en el dominio de la frecuencia, donde cuando existe un incremento de la fase para el k-esimo armónico, éste está dado por:

$$k\omega_0 t_s = k(2\pi \cdot f_0) \cdot (T_0/N) = k(2\pi/N)$$

siendo $\Omega_0 = \frac{2\pi}{N}$

Cabe mencionar que la relación $2\pi/\Omega$ es un número racional y que dado que la tasa de oscilación es $\Omega + 2\pi$, se tienen que $a_k = a_{k+rN}$ (siendo r un número entero – real), esto es N coeficientes distintos, lo cual hace referencia a que la respuesta en frecuencia de la señal discreta se considera periódica (FCEFyN, 2013).

En la descomposición de la señal, las componentes frecuenciales individuales son conocidas como armónicos y queda claro que dada esta equivalencia la transformada de Fourier se puede dividir en una parte real y una imaginaria (Ver Figura 3.2).

Hasta aquí, se indica la DFT mediante su índice armónico (k). Otra forma de ordenarlo es en función de la frecuencia; dado que sabemos que cada intervalo

de la DFT es $1/T_0 = 1/N \cdot t_s$, cambiamos los índices armónicos por la frecuencia correspondiente como sigue:

$$f(k) = \begin{cases} \frac{k}{N \cdot t_s}, & k < \frac{N}{2} - 1 \\ -\frac{N - k}{N \cdot t_s}, & k \geq \frac{N}{2} \end{cases}$$

Ec. 3

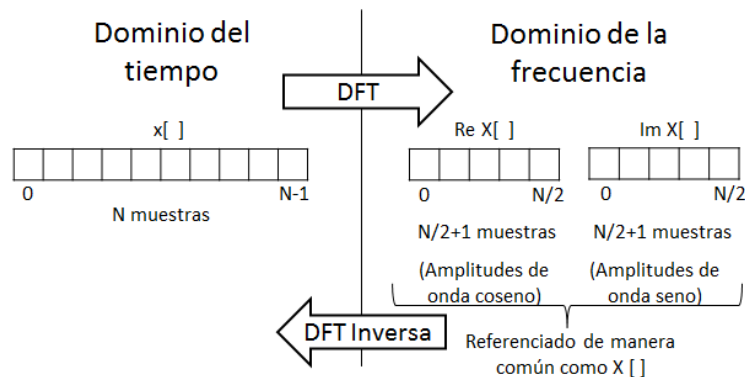


Figura 3.2. En el dominio de tiempo, $x[n]$ consiste de N puntos que van de 0 a $N-1$. En el dominio de la frecuencia, la DFT produce dos señales, la parte real ($\text{Re } X[k]$) y la parte imaginaria ($\text{Im } X[k]$). Cada una de estas señales en dominio de frecuencia tiene una longitud de $N/2 + 1$ puntos, y van de 0 a $N/2$ (Traducida de Smith, 1999).

De la Ec. 3 se observa que la máxima frecuencia detectable por la DFT es $f_s/2$ de acuerdo al teorema de muestreo (donde f_s es la frecuencia de muestreo), el cual dice que si se quiere detectar el espectro de una señal hasta una máxima frecuencia B , la frecuencia de muestreo deberá de ser al menos de $2B$ (Irizar-Picón, 1999). Debido a esto y a la propiedad de simetría que tiene la transformada de Fourier, se puede graficar únicamente la $f(k)$ correspondiente a los datos $N/2 - 1$ y duplicar la amplitud de los resultados.

3.2 Técnica de cocientes espectrales (HVNR).

Siguiendo el desarrollo de Nakamura (1989) y dividiendo los registros de ruido ambiental en ondas de cuerpo y superficiales para ambas componentes (horizontales y verticales) se dice que (Bard, 1999):

$$H(f) = H_c(f) + H_s(f) = A_c^H(f) \cdot R_c^H(f) + H_s(f)$$

Ec. 4

$$V(f) = V_c(f) + V_s(f) = A_c^V(f) \cdot R_c^V(f) + V_s(f)$$

Ec. 5

Donde:

$H(f), V(f)$ = Transformada de Fourier (TF) de la componente horizontal y vertical de registros de ruido ambiental.

$H_c(f), V_c(f)$ = TF de la componente horizontal y vertical de ondas de cuerpo.

$H_s(f), V_s(f)$ = TF de la componente horizontal y vertical de ondas superficiales.

$A_c^H(f), A_c^V(f)$ = Función de amplificación en la componente horizontal y vertical para las ondas de cuerpo.

$R_c^H(f), R_c^V(f)$ = TF en la componente horizontal y vertical de las ondas de cuerpo en un sitio de referencia (en roca).

Relacionando la componente horizontal y vertical de los registros de ruido ambiental mediante el cociente $H/V [S(f)]$ se obtiene:

$$S(f) = \frac{H(f)}{V(f)} = \frac{A_c^H(f) \cdot R_c^H(f) + H_s(f)}{A_c^V(f) \cdot R_c^V(f) + V_s(f)}$$

Ec. 6

Para fines de manejo algebraico de la expresión anterior se definirá la proporción de las ondas superficiales en base a las ondas de cuerpo en la

componente vertical como α y de igual manera el cociente de ondas superficiales como $S_s(f)$ como sigue:

$$\alpha = \frac{V_s(f)}{R_c^V(f)}$$

Ec. 7

$$S_s(f) = \frac{H_s(f)}{V_s(f)}$$

Ec. 8

Sustituyendo entonces las Ec. 7, Ec. 8 en la Ec. 6 se obtiene que:

$$S(f) = \frac{A_c^H(f) \cdot \frac{R_c^H}{R_c^V} + S_s(f) \cdot \alpha}{A_c^V(f) + \alpha}$$

Ec. 9

Tomando como base la Ec. 9, Nakamura (1989) toma tres supuestos para la utilización de registros de ruido ambiental en estaciones puntuales. El primero consiste en considerar que la componente vertical no es amplificada para la frecuencia fundamental de vibración (f_0^H), por lo que:

$$A_c^V(f_0^H) \approx 1$$

Ec. 10

El segundo supuesto considera que el cociente de la componente Horizontal y Vertical (H/V) en un sitio un sitio de referencia (en roca) es igual a la unidad en (f_0^H).

$$\frac{R_c^H(f)}{R_c^V(f)} = 1$$

Ec. 11

El tercer y último supuesto considera que puede omitirse el efecto de las ondas superficiales.

$$\alpha = \frac{V_s(f)}{R_c^V(f)} \approx 0$$

Ec. 12

$$S_s(f_0^H) \cdot \alpha \ll A_c^H(f_0^H)$$

Ec. 13

Con estos supuestos se tendría entonces que:

$$S(f_0^H) = A_c^H(f_0^H)$$

Ec. 14

Definiendo a la Función de Transferencia como el cociente espectral de la señal de salida y el de entrada (González-Martínez y Clemente-Chávez, 2013), se puede concluir que la relación H/V de registros de ruido ambiental corresponde a la función de transferencia o de amplificación de las ondas de cuerpo en el sistema dinámico. Sin embargo, el último supuesto de la interpretación de Nakamura (1989) se ha comprobado falso, por lo que la amplificación obtenida mediante esta técnica no puede considerarse como válida.

Aunque la amplificación resultante de esta técnica no es válida, el desvanecimiento de la componente vertical de las ondas Rayleigh exhibe un pico agudo alrededor de la frecuencia fundamental en sitios de impedancia alto (Bard, 1999). Sabiendo esto y considerando que la forma espectral describe el comportamiento dinámico del terreno en términos de los periodos de vibrar del mismo, se puede efectuar una clasificación atendiendo a esta propiedad dinámica.

A la forma espectral de este cociente se la denomina Función de Transferencia Empírica (FTE).

Es importante hacer mención que el uso de la técnica de cocientes espectrales H/V para el caso de registros sísmicos, en la parte intensa de la traza donde se identifican las ondas de cortante, ha tomado gran aprecio debido a que el tercer supuesto de Nakamura (1989) se considera válido.

3.3 Espectro de densidad de potencia (PSD).

Actualmente para categorizar el ruido sísmico se utilizan como base los modelos para el cálculo de las curvas límite de los niveles de ruido con base en la densidad espectral de potencia (PSD por sus siglas en inglés) propuestas por Peterson (1993) para el ruido bajo y alto (NHNM y NLNM).

Esta categorización es necesaria para un análisis óptimo de la curva HV con la finalidad de revisar la energía en la banda de frecuencias estudiadas a fin de asegurar que la energía sea suficiente para permitir la extracción de la señal del ruido instrumental en el caso de un análisis de señal de ruido o del ruido ambiental del sitio para el análisis de una traza sísmica. Todo esto nos permitirá entender la influencia de la calidad de los parámetros de registro y la confiabilidad en las diferentes bandas de frecuencia (European Commission, 2004; Chávez-García y Tejeda-Jácome, 2010a).

Para llevar a cabo esta categorización conviene definir la potencia de una señal periódica en el dominio del tiempo, la cual se define como (Chapra y Canale, 2001):

$$P = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f^2(t) dt$$

Ec. 15

Donde P es la potencia, T es el periodo fundamental y $f(t)$ es la señal función del tiempo.

Con la finalidad de expresar la potencia de una señal en el dominio de la frecuencia (espectro de potencia) se hace entonces referencia a la relación de Parseval, la cual establece que la energía total de una señal es igual a la energía total de su Transformada de Fourier (TF) por lo que se tiene:

$$P = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f^2(t) \cdot dt = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |a_k|^2$$

Ec. 16

Donde a_k representa la amplitud de la TF en el k-esimo armónico.

Sabiendo entonces el concepto de espectro de potencia, se define el de espectro de densidad de potencia (PSD por sus siglas en inglés) como la cuantía de la potencia que está presente en un ancho de banda, con lo que para convertir las amplitudes de potencia en una densidad espectral basta con dividir cada amplitud entre el ancho de banda representado por cada una como sigue:

$$PSD = \frac{|a_k|^2}{N}$$

Ec. 17

Donde la Ec. 17 representa el PSD en el centro del espectro y aunque en las esquinas se requiere una pequeña corrección por el ancho que representa, de manera general no se toma en cuenta por ser regularmente despreciable. Ya obtenido el PSD y a fin de compararse con la caracterización de Peterson (1993), comúnmente el ruido se muestra en decibeles (escala de proporción que relaciona el nivel medio de amplitud a su nivel de referencia) para este caso de velocidad respecto a 1 m/s, describiéndose la ecuación como sigue:

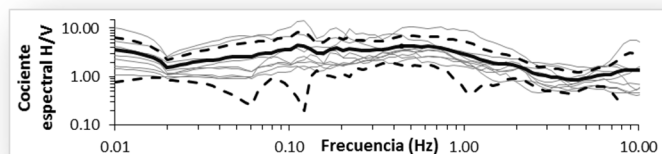
$$PSD[dB] = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{V^2/Hz}{(m/s)^2/Hz} \right)$$

$$PSD[dB] = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{V^2}{Hz} \right) - 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{\left(\frac{m}{s} \right)^2}{Hz} \right]$$

Ec. 18

Donde V es la velocidad de la señal.

IV



4 METODOLOGÍA.

La interpretación de ruido ambiental y/o trazas sísmicas se basa en la obtención, tratamiento y análisis de señal (conjunto de ondas propagadas en los estratos de suelo y registradas por un dispositivo receptor) de vibración. Estas tres etapas del proceso se ampliarán a continuación.

4.1 Obtención de la señal.

Para la obtención de la señal es indispensable la definición de las estaciones de registro temporal de ruido ambiental en el área de estudio, las cuales se eligen de manera racional y utilizando como referencia los estudios previos que se mencionaron en el Capítulo 2.2. Se genera un mallado que cubra las principales variantes de las características cualitativas antes descritas a fin de generar un panorama general.

Con este enfoque cualitativo, se puede decir que la amplitud, frecuencia, composición y duración del movimiento del suelo está ligado con las condiciones geológicas del sitio así como por los espesores de los estratos sobre el lecho rocoso, que aunque no es propiamente un parámetro cuantitativo que genere buena certidumbre, sí es uno que permite generar un escenario preliminar del comportamiento del área de estudio.

Con la finalidad de generar este escenario y comenzar el análisis del problema, se plantea la toma de mediciones de ruido ambiental en puntos estratégicos de características similares con base en las propiedades geológicas y los espesores de sedimentos sobre el lecho rocoso (Álvarez-Manilla et al., 2002; Pacheco, 2007).

Con el fin de ubicar estos puntos estratégicos, se realizó una superposición de las cartas geológicas, de isoperiodos, de espesor de sedimentos y delimitación del Valle de Querétaro (Álvarez-Manilla et al., 2002; Bustillos, 2005; Pacheco, 2007), enfocándose en el cuadrante II definido en el Capítulo 2.2.2 (Ver Figura 2.2), que corresponde al área de interés. La distribución y características de los lugares de registro quedan definidos en la Figura 4.1 y Tabla 4.1 respectivamente.

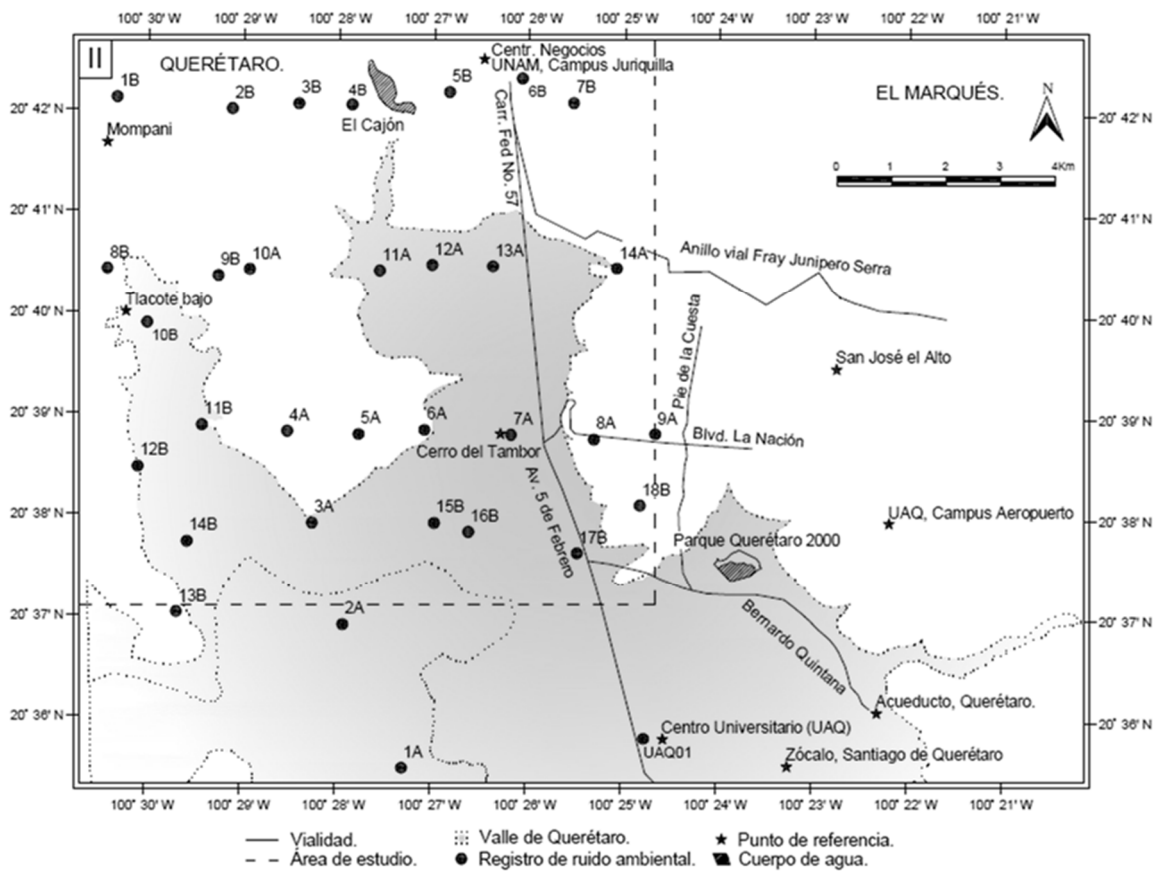


Figura 4.1. Distribución de sitios de registro dentro del área de interés.

Tabla 4.1. Características geológicas, espesor de sedimentos y periodo fundamental de la actual carta de isoperiodos en el Valle de Querétaro.

1	2	3	4	5	6	7
Punto	X (m)	Y (m)	Carta geológica simplificada (Pacheco, 2007).	Carta geológica (Álvarez-Manilla et al., 2002).	Carta de espesor de sedimentos (Pacheco, 2007).	F0 (Bustillos, 2005)
1 A	348370	2276941	Q Al	IV	110 m	1.42 Hz
2 A	347296	2279565	Q Al	IV	45 m	1.66 Hz
3 A	346742	2281434	To-Tm Py Lac	Ira	0 m	1.90 Hz
4 A	346293	2283110	Tmt AB	Ira	0 m	2.50 Hz
5 A	347397	2283050	To-Tm Py Lac	Ira	0 m	2.50 Hz
6 A	348797	2283124	To-Tm Py Lac	V / Ira	40 m	2.00 Hz
7 A	350376	2283033	Tmt AB	IV / III ary	120 m	2.15 Hz
8 A	351890	2282947	Tmt AB	Ira	0 m	3.33 Hz
9 A	353009	2283044	Tmt AB	Ira	0 m	--Hz
10 A	345614	2286076	To-Tm Py Lac	III lad / Ira	0 m	--Hz
11 A	347984	2286044	Q Al	IV	55 m	2.00 Hz
12 A	348942	2286148	Q Al	IV	120 m	1.60 Hz
13 A	350048	2286123	Q Al	IV / III ary	55 m	1.60 Hz
14 A	352309	2286082	To-Tm AB	Irl / III ary	0 m	3.33 Hz
1B	343200	2289216	To-Tm Py Lac	Ira	0 m	--Hz
2B	345301	2288997	Tmt AB	Ira	0 m	--Hz
3B	346515	2289086	Tmt AB	Ira	0 m	--Hz
4B	347486	2289064	Tmt AB	III lad / III ary	0 m	--Hz
5B	349266	2289290	Tmt AB	Ira	0 m	--Hz
6B	350593	2289538	To-Tm AB	Irl / Ira	0 m	--Hz
7B	351528	2289087	Tmt AB	Ira	0 m	--Hz
8B	343015	2286098	Tmt AB	IV / V	0 m	--Hz
9B	345041	2285963	To-Tm Py Lac	Ira	0 m	--Hz
10B	343740	2285099	Q Al	IV / Ira	70 m	2.5 Hz
11B	344735	2283228	Tmt AB	Ira	0 m	2.5 Hz
12B	343565	2282473	Q Al	IV	40 m	2.5 Hz
13B	344261	2279804	To-Tm AB	IV	0 m	2.5 Hz
14B	344459	2281104	Q Al	IV / Ira	0 m	2.25 Hz
15B	348971	2281427	Tmt AB	IV	55 m	1.66 Hz
16B	349596	2281264	Q Al	IV	80 m	1.66 Hz
17B	351578	2280875	Q Al	Irl	55 m	2.25Hz
18B	352725	2281742	Tmt AB	Ira	0 m	3.33 Hz
UAQ01	352785	2277467	Tmt AB	lpp	25 m	3.33 Hz

Donde para la carta geológica simplificada de Pacheco (2007):

Q Al: Rellenos aluviales del cuaternario: Arcillas, limo y arena fina.

Tmt AB: Derrames de lava de composición basáltica y andesítica del Mioceno Tardío.

To-Tm Py Lac: Rellenos de sedimentos lacustres y piroclastos del Oligoceno y del Mioceno medianamente consolidados.

To-Tm AB: Andesita del Oligoceno con intercalación de toba.

Ki Cz Ar: Calizas del Cretácico Inferior.

Donde para la carta geológica de Álvarez-Manilla et al. (2002):

Ira: Suelos Residuales en partes altas.

Irl: Suelos residuales en las laderas.

lpp: Suelos en la zona Peniplana.

III lad: Suelos del tipo fluvial en ladera.

III ary: Suelos del tipo fluvial en arroyos.

IV: Suelos del tipo Aluvial y Lacustre.

V: Suelos del tipo antropogénico.

Una vez definida la ubicación geográfica de las estaciones temporales de registro, la obtención de la señal de ruido ambiental se realiza de acuerdo a las recomendaciones del proyecto SESAME (European Commission, 2004) marcando algunas de las generalidades en la Figura 4.2.

Posteriormente, se obtuvieron registros de 40 minutos mediante el uso de un sismógrafo marca Sara formado por un velocímetro triaxial modelo SS05 y un digitalizador de señal modelo SR04 con una respuesta plana del sistema en el rango de 0.5 a 40Hz (Ver Figura 4.3). Los valores de polos y ceros que generan la función respuesta del sistema se muestran en la Tabla 4.2.

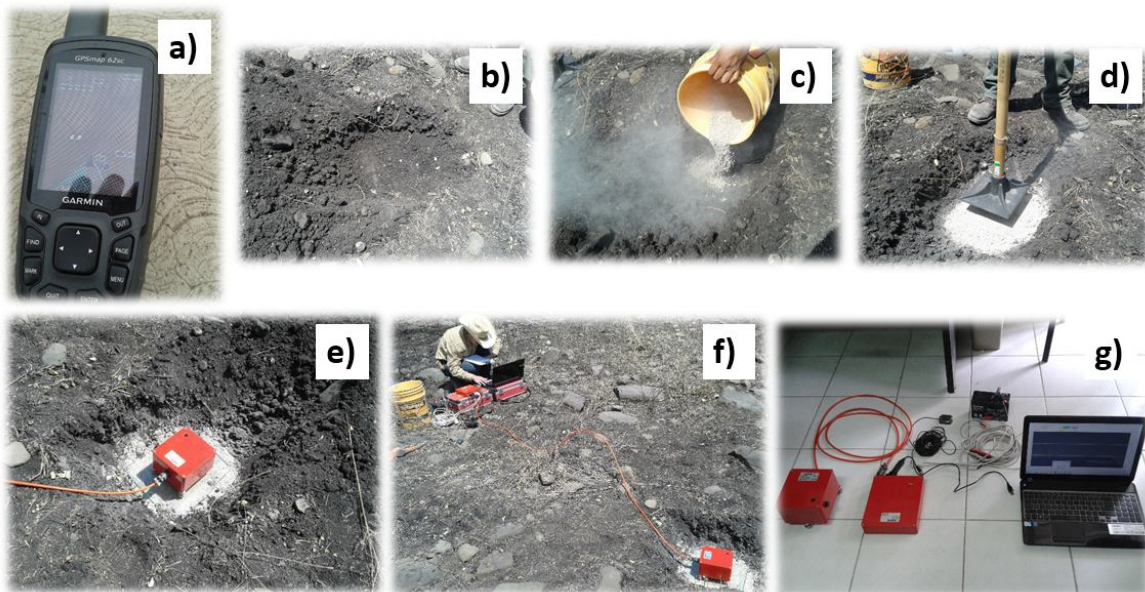


Figura 4.2. Algunos aspectos del levantamiento de registros de ruido ambiental. a) GPSmap 62sc mca. GARMIN usado para el geo posicionamiento de los puntos de registro de ruido ambiental. b) Agujero para instalar el sensor para librar por ejemplo el ruido generado por viento suave (sólo en caso de requerirse). c), d) Acoplamiento artificial entre el suelo y el equipo mediante una cama de arena compactada a fin de generar una superficie útil para nivelación (sólo en caso de requerirse). e) Acoplamiento artificial para asentar el sensor mediante una placa de cristal (solo en caso de requerirse). f) Mediciones de registros de ruido ambiental. g) Composición y arreglo de sistema de medición compuesto por un sismógrafo Sara (velocímetro modelo SS05 y digitalizador modelo SR04), computadora Gateway con software Seismowin cargado para registro de datos, GPS, batería de 12V y cables para conexión.

Tabla 4.2. Valores de polos y ceros utilizados para generar la respuesta del equipo Sara formado por un velocímetro modelo SS05 y un digitalizador de señal modelo SR04.

Parámetro		Valores	Unidades
z_n	Ceros	$0.00 + 0.00i$ $0.00 + 0.00i$	Rad/s
p_n	Polos	$-2.124 + 2.315i$ $-2.124 - 2.315i$ $-120.224 + 290.245i$ $-290.245 + 120.224i$ $-290.245 - 120.224i$ $-120.224 - 290.245i$ $-110.584 + 0.00i$	Rad/s
S_{sensor}	Sensibilidad del sensor	400	$\frac{V}{m/s}$
$S_{digitalizador}$	Sensibilidad del digitalizador	$4.1943e+06$	$\frac{Cuentas}{V}$
f_0	Frecuencia de normalización.	1	Hz

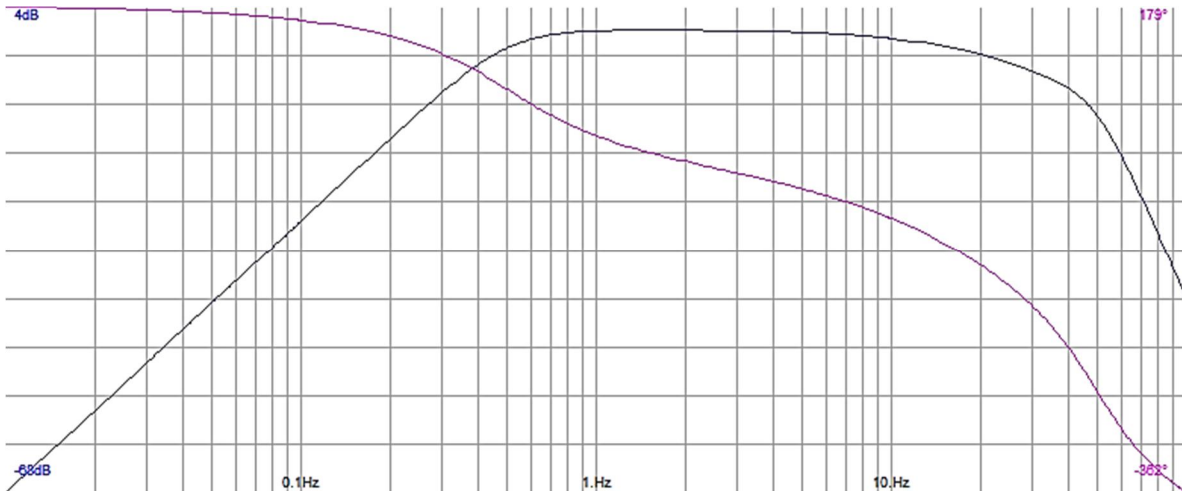


Figura 4.3. Diagrama de Bode que describe de la respuesta instrumental del equipo Sara formado por un velocímetro modelo SS05 y un digitalizador de señal modelo SR04.

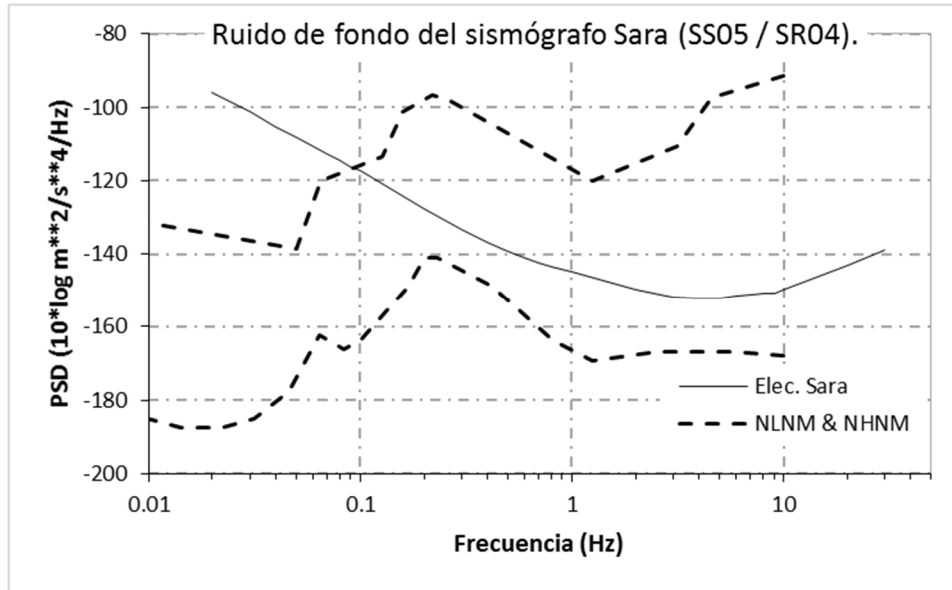


Figura 4.4. Ruido electrónico del equipo Sara formado por un velocímetro modelo SS05 y un digitalizador de señal modelo SR04. La gráfica muestra la capacidad del sensor para obtener señales útiles comparando con las curvas de ruido de Peterson (1993) (NLNM: New Low Noise Model y NHNM: New High Noise Model). Los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de los registros que tengan una energía por encima de la curva negra continua que indica el ruido electrónico del sensor (Elec. Sara) se consideran útiles.

Por otro lado, a fin de validar la Función de Transferencia Empírica (FTE) y visualizar la influencia de los efectos de oleaje en la zona categorizada como roca, se analizaron trazas sísmicas y registros continuos de ruido ambiental (obtenidas mediante un sismógrafo mca. Nanometrics mod. Trillium 120P) correspondientes a la estación sísmica JUR1 (localizada en el Centro de Geociencias UNAM campus Juriquilla).

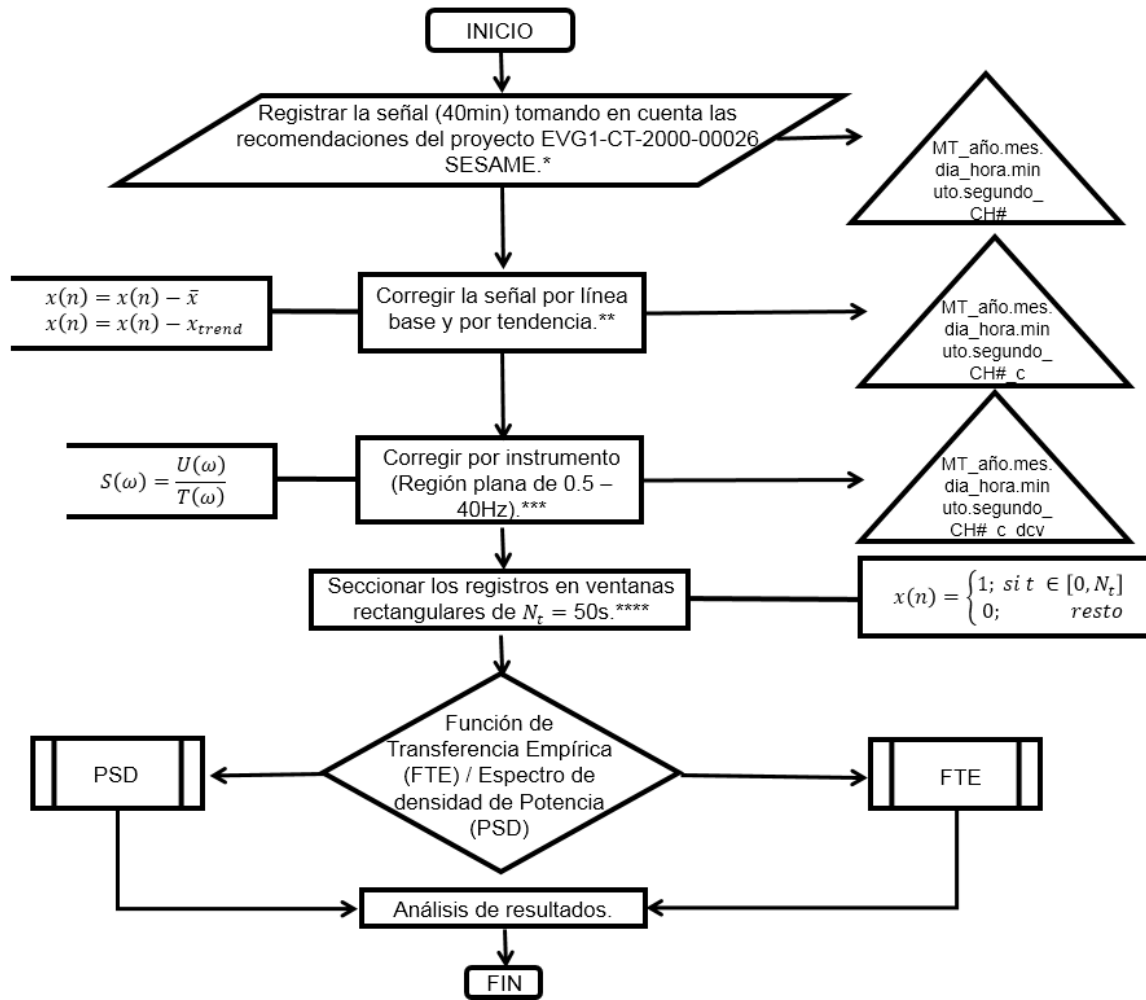
Los datos de la estación JUR1 analizados en este trabajo se deben a la aportación previa de Rocha (2011), que consistió en conformar una base de datos sísmicos de esta estación. Cabe mencionar que aunque la finalidad del trabajo fue reportar las aceleraciones máximas en el sitio, se utilizaron los registros de velocidad para mantener la coherencia con los registros de ruido ambiental.

De igual manera y a fin de validar la FTE en sitios de roca, se utilizó el registro sísmico reportado en CU-UAQ (mediante un acelerógrafo mca. Kinematics mod. Altus K-2) el día 01 de Mayo de 2012 correspondiente a la aportación de Clemente y Arroyo (2012), la cual pertenece al primer sismo registrado en la estación ubicada en un pozo a aprox. 10 mts del nivel del suelo en la división de posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campos Centro Universitario. Debido a que el registro obtenido en la estación CU-UAQ se encuentra en unidades de aceleración, se requirió integrar la traza sísmica a fin de igualar los registros y resultados a unidades de velocidad.

4.2 Procesamiento.

En la etapa de tratamiento de señal se hace la corrección por línea base y tendencia, así como la corrección por instrumento para obtener el registro del movimiento del suelo en unidades de velocidad (m/s) en sus tres componentes.

A fin de generar las Funciones de Transferencia Empíricas (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD), los registros de ruido ambiental se dividen en ventanas de 50s (Ver Figura 4.5) mientras que para los datos sísmicos se tomará exclusivamente una ventana que contenga la parte intensa del sismo cargada de ondas de cortante.



Referencias	
*	European Commission, 2004.
**	Carreño et al., 1999; Centro de información en salud y desastres, 2005.
***	Cordero-Calle y Hernán-Montes, 2003; Real-Pérez, 2010; Hjørleifsdóttir, 2012.
****	European Commission, 2004; Real-Pérez, 2010; Rengifo-Mora, 2013.

Donde:
 n = Constante que indica la posición en los intervalos de muestreo de la señal ($n \cdot t_s$).
 t_s = Periodo de muestreo.
 $x[n]$ = Señal discreta en el dominio del tiempo.
 \bar{x} = Media aritmética de la señal.
 x_{trend} = Línea de tendencia.
 N_t = Periodo fundamental de la señal discreta (número de datos de la señal discreta por ventana).
 $S(\omega)$ = Señal que entra al sensor.
 $T(\omega)$ = Respuesta del instrumento.
 $U(\omega)$ = Señal medida por el sensor.

Figura 4.5. Diagrama de Flujo de la metodología para el tratamiento de la señal en la ejecución del presente trabajo de tesis.

4.2.1 Cálculo de la Función de Transferencia Empírica (FTE).

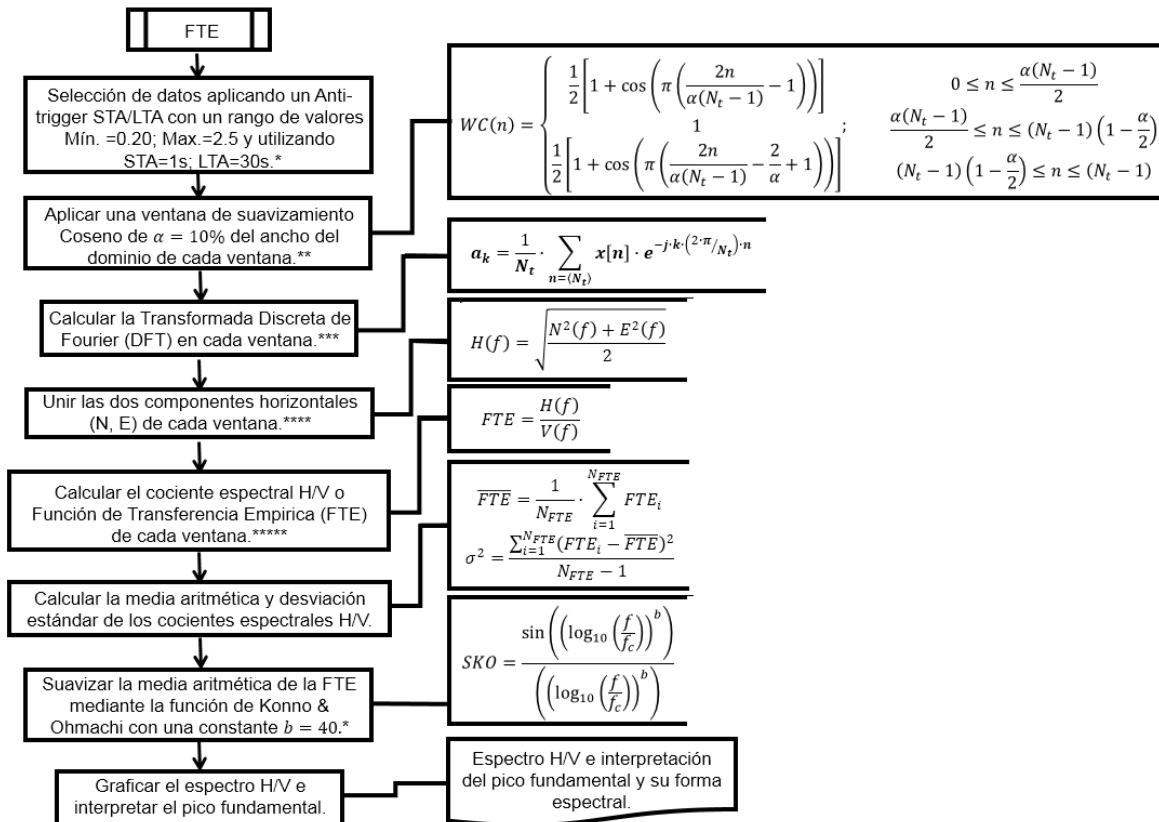
Para obtener la FTE como un espectro que define la forma del comportamiento dinámico y específicamente el periodo dominante de la estructura estratificada de suelo sobre la roca mediante la técnica HVNR (Capítulo 3.2), para el caso de este trabajo de tesis, se comienza con la selección de datos simultáneos en las 3 componentes mediante el uso de un Anti-trigger de cociente STA/LTA (Short Time Average / Long Time Average) con el fin de disminuir los transitorios. En este caso no se seleccionan ventanas antes de los diez primeros minutos de registro a fin de que el instrumento se estabilice.

Después se utiliza una ventana de suavizamiento de tipo Tukey (adelgazamiento tipo Coseno) del 10% del ancho del dominio de cada una de las ventanas de 50s previamente seleccionadas para posteriormente calcular la Transformada Discreta de Fourier (DFT) de cada componente.

Finalmente se realiza la unión de las componentes horizontales mediante el algoritmo de la media cuadrática para calcular la FTE de cada ventana, que posteriormente se promediará para obtener la FTE de la estación y su respectiva desviación estándar, mismas que se suavizarán mediante el uso de la función de Konno & Ohmachi (Geopsywiki, 2013) para su posterior análisis e interpretación.

El proceso anteriormente descrito tiene sus bases en el proyecto EVG1–CT– 2000-00026 SESAME (European Commission, 2004) y se ejecutará mediante el uso del software Geopsy versión 2.7.3 generado con estas mismas bases y que se describe de manera explícita en la Figura 4.6.

Por otro lado, para la obtención de la FTE mediante la técnica HVSR (Cociente espectral H/V de datos sísmicos) se seguirá un procedimiento similar, con la variante de que para la selección de datos se toma exclusivamente la ventana en la parte intensa del sismo cargada de ondas de cortante.



α = Ancho del dominio Coseno al inicio y al final de la ventana.
 σ = Desviación estándar.
 a_k = Señal discreta en el dominio de su índice armónico (0,1,2,3...Nt-1).
 b = Coeficiente de ancho de banda.
 f = Frecuencia analizada.
 f_c = Frecuencia central donde se realiza el suavizamiento.
 n = Constante que indica la posición en los intervalos de muestreo de la señal ($n \cdot t_s$).
 $x[n]$ = Señal discreta en el dominio del tiempo.
 Ω_0 = Frecuencia fundamental angular de la señal discreta.
 $E(f)$ = DFT de la componente Horizontal Este - Oeste.
 FTE = Función de Transferencia Empírica.
 \overline{FTE} = Media aritmética de la (FTE).
 FTE_i = FTE en la ventana "i".
 $H(f)$ = DFT de la componente Horizontal unida.
 $N(f)$ = DFT de la componente Horizontal Norte - Sur.
 N_{FTE} = Numero de ventanas promediadas de la FTE.
 N_t = Periodo fundamental de la señal discreta (número de datos de la señal discreta) $(2\pi/\Omega_0)$.
 SKO = Suavizamiento mediante la función de Konno & Ohmachi.
 $V(f)$ = DFT de la componente Vertical.
 $WC(n)$ = Ventana Coseno (Tukey window).

Referencias	
*	Geopsywiki, 2013
**	Oppenheim and Schafer, 1999; Smith, 1999; Bracewell, 2000; Geopsywiki, 2013.
***	Irizar-Picón, 1999; Smith, 1999; FCEFyN, 2013; González-Martínez y Clemente-Chávez, 2013.
****	Bard, 1999; González-Martínez y Clemente-Chávez, 2013; Geopsy wiki, 2013.
*****	Nakamura, 1989; Lermo y Chávez-García, 1994; Carreño, 1999; Bard, 1999; González-Martínez y Clemente-Chávez, 2013.

Figura 4.6. Diagrama de Flujo para la obtención de la Función de Transferencia Empírica (FTE) utilizado en el presente trabajo de tesis.

4.2.2 Cálculo del Espectro de Densidad de Potencia (PSD).

Como se mencionó en el Capítulo 3.3, para la categorización del ruido sísmico de una estación se hace uso del Espectro de Densidad de Potencia (PSD),

el cual para este caso se calculará mediante la metodología propuesta por Welch (1967) generando una rutina de cálculo en Matlab para cada una de las componentes del sensor triaxial.

El primer proceso para obtener el PSD en registros de ruido ambiental se aplica mediante una ventana de suavizamiento de tipo Tukey (adelgazamiento de tipo Coseno) del 10% del ancho del dominio de cada una de las ventanas de 50s (no se utilizarán los diez primeros minutos de registro a fin de que el instrumento tenga tiempo para estabilizarse) para posteriormente calcular la Transformada Discreta de Fourier (DFT) de cada componente.

Posteriormente se realiza el cálculo del PSD de cada ventana y se calcula la media aritmética para su posterior interpretación y análisis. Este procedimiento de manera explícita puede visualizarse en la Figura 4.7.

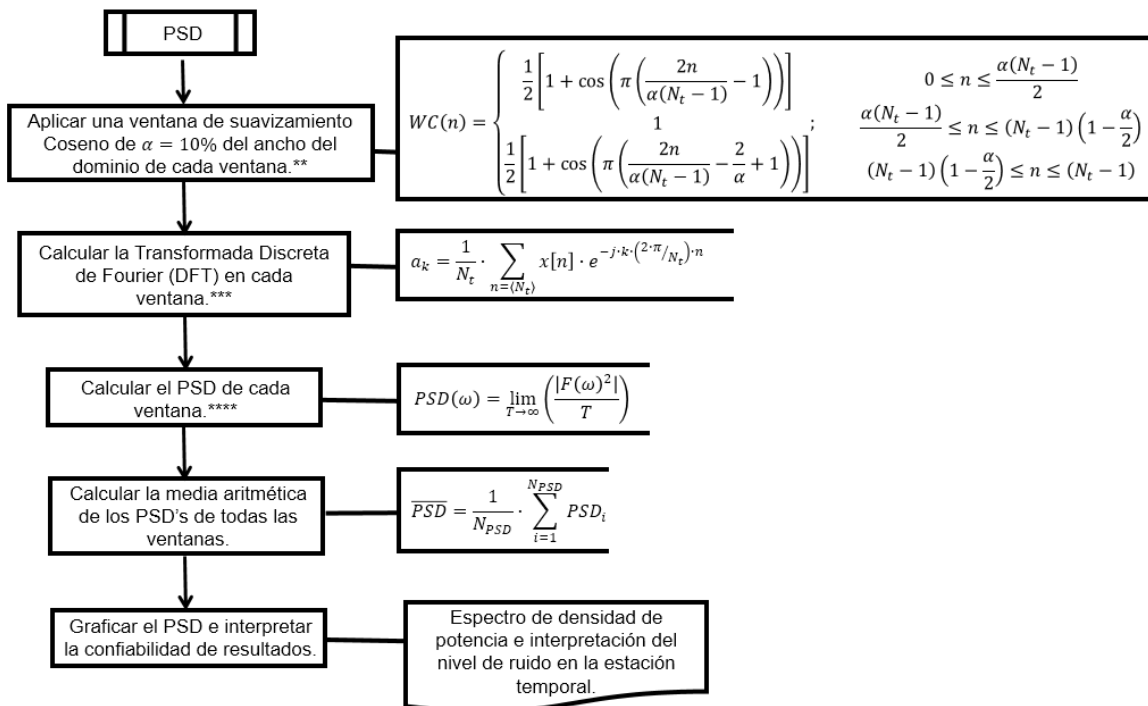


Figura 4.7a. Diagrama de Flujo para la obtención del Espectro de Densidad de Potencia (PSD) utilizado en el presente trabajo de tesis.

Referencias	
*	Welch, 1967.
**	Oppenheim and Schafer, 1999; Smith, 1999; Bracewell, 2000; Geopsywiki, 2013.
***	Irizar-Picón, 1999; Smith, 1999; FCEFyN, 2013.
****	Peterson, 1993; Smith, 1999; Chapra y Canale, 2001; Real-Pérez, 2010; Rengifo-Mora et al. 2013.

α = Ancho del dominio Coseno al inicio y al final de la ventana.
 a_k = Señal discreta en el dominio de su índice armónico (0,1,2,3...Nt-1).
 n = Constante que indica la posición en los intervalos de muestreo de la señal ($n \cdot t_s$).
 n_s = Punto donde se aplica el suavizado.
 t_s = Periodo de muestreo.
 $x[n]$ = Señal discreta en el dominio del tiempo.
 Ω_0 = Frecuencia fundamental angular de la señal discreta.
 F = Espectro de Fourier.
 N_{PSD} = Número de ventanas a promediar el PSD.
 N_s = Total de datos del subconjunto analizado.
 N_t = Periodo fundamental de la señal discreta (número de datos de la señal discreta por ventana) ($2^n / \Omega_0$).
 $PSD(\omega)$ = Espectro de densidad de potencia de la señal.
 PSD_i = PSD de la ventana "i".
 \overline{PSD} = Media geométrica del PSD.
 SPM_{PSD} = Suavizamiento por promedios móviles del PSD.
 T = Periodo fundamental de la señal.
 $WC(n)$ = Ventana Coseno (Tukey window).

Figura 4.7b. Cont. Diagrama de Flujo para la obtención del Espectro de Densidad de Potencia (PSD) utilizado en el presente trabajo de tesis.

Cabe hacer mención que para el análisis del PSD con datos sísmicos únicamente se utilizará la ventana que contiene la parte intensa del sismo y cargada de ondas de cortante, usada anteriormente para el cálculo de la FTE como se describe en el Capítulo 4.2.2.

4.3 Análisis de señal.

En la etapa de análisis, se estudiará la confianza del espectro H/V (FTE), así como los criterios de claridad marcados por el proyecto EVG1-CT-2000-00026 SESAME (European Commission, 2004) a fin de establecer la confiabilidad del pico de la frecuencia fundamental del estrato de suelo.

De igual manera, se validará que la señal de ruido ambiental tenga suficiente energía en las frecuencias de interés para ser extraída del ruido electrónico del equipo, a fin de analizar las frecuencias confiables en el registro mediante la comparación entre el PSD correspondiente al mínimo ruido registrable por el equipo y el obtenido en la estación temporal. Un ejemplo detallado de la interpretación para el PSD se muestra en el Apéndice 2.

Además de verificar las frecuencias confiables en el registro mediante el análisis del PSD de cada componente, debe tomarse en cuenta que para el análisis e interpretación de frecuencias menores a 0.5 Hz debidas a ondas oceánicas y condiciones meteorológicas a gran escala (Bonney-Claudet et al., 2006), particularmente en la banda entre 0.07 y 0.2 Hz, el cociente espectral HVNR presenta amplificaciones debidas a que las componentes horizontales son afectadas por las condiciones meteorológicas locales mientras que la vertical se mantiene independiente a las mismas (Aki and Richards, 2002).

Debido a la amplificación que es posible exhibir en las FTE obtenidas mediante la técnica HVNR relacionadas al efecto de oleaje (entre 0.07 y 0.2Hz) y a que las FTE obtenidas mediante el análisis de registros sísmicos no muestran una respuesta del suelo en bandas de frecuencia menores a 0.2Hz, para nuestro caso no se interpretarán como una amplificación real del efecto de sitio frecuencias menores a 0.2Hz.

Considerando que la banda de frecuencias a utilizar en la caracterización del efecto de sitio (entre 0.2 y 10 Hz) y basado en un resultado desarrollado por el proyecto SESAME donde se aplicó la técnica HVNR en diferentes lugares (zona de roca y valles aluviales) del mundo, se generaron Familias Espectrales (FE) tomando en cuenta el periodo fundamental y la forma espectral de la respuesta dinámica del suelo, en este caso representada por su Función de Transferencia Empírica (FTE).

El resultado desarrollado por el proyecto SESAME y mostrado en la Figura 4.8 expone tres gráficas; a la izquierda se muestra el resultado de aplicar la técnica HVNR en un sitio individual donde la FTE presenta tres curvas con líneas continuas oscuras, siendo la intermedia el promedio de varias ventanas y las otras dos la dispersión en la estimación; a la derecha se muestran dos gráficas que exponen el efecto de sitio para muchos sitios en roca y otra para muchos sitios en valles aluviales, siendo cada una de las líneas de diferentes colores la estimación del efecto de sitio para un punto. En las dos figuras de la derecha se hace evidente que

para las zonas en roca las amplitudes de la FTE no rebasan valores entre 1 y 2 veces, mientras que para las zonas con sedimentos algunos sitios rebasan valores de hasta 20 (Lermo et al, 2013).

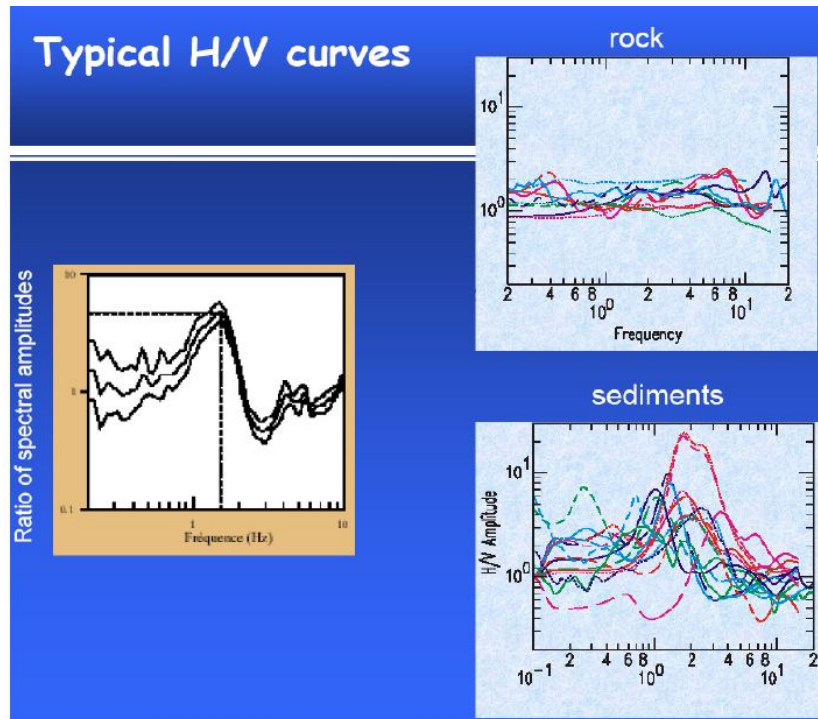


Figura 4.8. Funciones de Transferencias Empíricas obtenidas con la técnica H/V o HVNR en muchas partes del mundo. Parte izquierda FTE para un sitio con sus curvas de dispersión. Parte superior derecha, FTE para sitios en roca. Parte inferior derecha, FTE para sitios en sedimentos. (Lermo et al., 2013).

Para la interpretación y agrupación de las FTE en FE, se tomará un valor máximo espectral hacia bajas frecuencias (entre 0.2 y 1Hz) y otro hacia altas frecuencias (entre 1 y 10Hz). La FE en roca se corroborará mediante registros sísmicos de dos estaciones que se encuentran cercanas a la zona de estudio, mientras que las FE en zonas de sedimentos corroborarán sus efectos de sitio utilizando una Función de Transferencia Teórica (FTT) generada a través de un modelo cortical desarrollado a través del análisis de las secciones del subsuelo típicas reportadas por Pacheco (2007) (Ver Figura 4.9) obtenidas mediante el uso

de estratigrafías de pozos, así como de la inferencia de secciones mediante métodos gravimétricos.

La generación de los modelos de corteza para obtener la FTT que ayuda a describir cada FE se realizó utilizando los datos de velocidades de onda de cortante reportados por Pacheco (2007) (mediante estudios de refracción sísmica) para los estratos superficiales, mientras que para los más profundos se utilizaron las densidades promedio de cada entidad geológica (también reportadas por Pacheco (2007)) y se ligaron con su velocidad de onda de cortante con apoyo de la Tabla 1.1 del manual de CFE (2008). El estrato rocoso se consideró de la misma velocidad de onda de cortante que utiliza Zúñiga et al. (2003) y Clemente-Chávez et al. (2014) en la capa superficial de su modelo de corteza del eje neovolcánico (Ver Tabla 4.3).

Las FTT obtenidas como se describió en el párrafo anterior y utilizando el método de Haskell (1953) servirán para demostrar mediante un modelo unidimensional que estratos de sedimentos profundos generan amplificaciones en bajas frecuencias, tal como lo mencionó previamente Lermo et al. (2013) y como muestra de manera evidente el ejercicio del Apéndice 6.

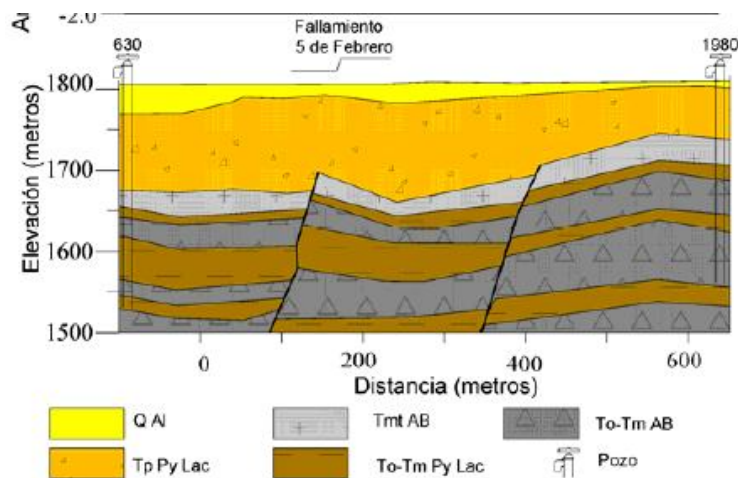
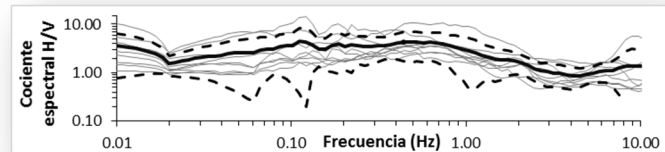


Figura 4.9. Sección del subsuelo del Valle de Querétaro en el perfil Zaragoza sobre el agrietamiento 5 de Febrero, inferido con datos gravimétricos (Pacheco, 2007) en el cual se puede observar la existencia de sedimentos bajo los estratos rocosos.

Tabla 4.3. Características de las entidades geológicas consideradas para modelar las Funciones de Transferencia Teóricas (FTT) de las Familias Espectrales (FE).

Entidad geológica	Descripción	Densidad promedio (gr/cm ³). (Pacheco, 2007)	Máximo espesor reportado (m). (Pacheco, 2007)	Velocidad de onda de cortante supuesta (m/s).
Q AI	Material granular compuesto por arcilla, limo y arena fina.	1.564	50	156 – 221 (Pacheco, 2007)
Tp Py Lac	Arcilla, arena, grava, toba piroclastos no consolidados intercalados con conglomerados.	1.537	300	265 – 676 (Pacheco, 2007)
Tmt AB	Derrames de lava de composición basáltica y andesítica. "Basalto Querétaro".	2.065	400	720 - 800 Tabla 1.1 (CFE, 2008)
To-Tm Py Lac	Secuencia de sedimentos lacustres y piroclastos medianamente consolidados.	1.769	450	360 - 500 Tabla 1.1 (CFE, 2008)
To-Tm AB	Rocas volcánicas principalmente derrames de andesita y basalto con intercalaciones de toba hacia la base.	2.61	--	2400 (Zúñiga et al., 2003; Clemente-Chávez et al., 2014)



5 PROCESAMIENTO.

En el presente capítulo se muestra un resumen de los resultados derivados del análisis de Funciones de Transferencia Empíricas (FTE) obtenidas a través de las trazas sísmicas obtenidas de la estación JUR1 y CU- UAQ, así como de los registros de vibración ambiental realizados en este estudio.

Las FTE obtenidas mediante registros de ruido ambiental se han agrupado en Familias Espectrales de acuerdo a su frecuencia fundamental y forma a fin de facilitar su interpretación.

Con la finalidad de validar e interpretar el efecto de sitio en las Familias Espectrales (FE) relacionadas con sedimentos, se han generado Funciones de Transferencia Teóricas (FTT) mediante un modelo unidimensional de propagación corregido por Haskell (1953) y con el apoyo del software Degtra A4 Ver. 3.2 desarrollado por M. Ordaz del Instituto de Ingeniería de la UNAM y C. Montoya Dulché del CENAPRED.

De manera similar, para la FE en roca, se han colocado sobrepuestas las FTE obtenidas de los datos sísmicos de las estaciones JUR1 y CU-UAQ a fin de observar su parecido en cuanto a forma.

Se muestra en la Figura 5.7, localizada al final de este capítulo, un cruce de información entre las FE obtenidas en este trabajo, la topografía y la geología del área a fin de mostrar la coherencia de los resultados.

5.1 Análisis espectral de los registros de sismos.

Con el objetivo de validar los resultados presentados en este trabajo generados a partir de registros de ruido ambiental, específicamente aquéllos identificados en roca, se presenta un análisis de los registros sísmicos obtenidos de la estación JUR1 y CU-UAQ obtenidos por Rocha (2011) y Clemente y Arroyo (2012) respectivamente.

En la Figura 5.1 se muestra la FTE obtenida mediante la técnica HVSR del sismo registrado el 01 de Mayo de 2012 en la estación CU-UAQ (Ver ubicación de la estación en la Figura 5.7 al final de este capítulo) la cual exhibe varios picos en 0.3, 0.7, 1, 1.78, 2.25, 3.12 y 6.28 Hz, todos con una amplitud < 2 , coherente con la Familia Espectral (FE) de roca que se busca validar. Para el registro de la estación CU-UAQ no se realizó un análisis del nivel de ruido ambiental mediante el PSD de la estación debido a que no se cuenta con suficientes registros continuos que permitan categorizar su influencia en las trazas sísmicas, para lo cual se recomienda contar con al menos una semana de registro continuo que permita visualizar el cambio de los niveles de ruido en el tiempo y/o antes del evento sísmico a analizar.

En la Figura 5.2a se observa la FTE obtenida del promedio de nueve registros sísmicos (Ver Tabla 5.1) en la estación JUR1 (Ver ubicación de la estación en la Figura 5.7 al final de este capítulo) categorizada como estación en roca (Clemente-Chávez et al. 2014), en la cual se observan varios picos que pudieran marcar la frecuencia fundamental del suelo en 0.64, 1.23, 1.55, 3.12 y 4.98 y 5.76 Hz todas ellas con una amplitud < 3 . Al igual que la estación anterior, esta amplitud es coherente con la FE en zona de roca que se quiere validar.

Por otro lado, en la Figura 5.2b se analiza el PSD de los registros sísmicos obtenidos de la estación JUR1, lo cual hace evidente una banda sobre el ruido ambiental entre 0.3 y 6 Hz con excepción del sismo correspondiente a Baja California Norte que muestra una potencia mayor a la del ruido ambiental únicamente en frecuencias < 2Hz. Con base en esto podemos tomar en cuenta la confiabilidad de la respuesta del terreno en esta banda de frecuencias (3-6 Hz) con base a los datos sísmicos con los que se cuentan.

Tabla 5.1. Registros sísmicos utilizados para la generación de la FTE mediante la técnica HVSR.

Estado	Fecha	Hora UTC (Hrs)	Magnitud (Md)	Zona
JUR1				
BCN	04/04/2010	22:40:42	7.2	23 Km al Sureste de Mexicali, BC
GRO	27/04/2009	16:46:27	5.7	26 Km al Noroeste de San Marcos, Gro.
	23/11/2009	01:56:48	4.6	28 Km al Suroeste de Zihuatanejo, Gro.
	14/04/2010	05:16:14	4.9	43 Km al Noroeste de Zihuatanejo, Gro.
	28/06/2010	11:04:32	4.4	Costa Guerrero-Michoacan.
HGO	17/04/2010	07:03:29	4.1	13 Km al Norte de Actopan, Hgo.
	18/05/2010	05:29:11	4.3	11 Km al Oeste de Actopan, Hgo.
	18/05/2010	05:32:37	3.6	10 Km al Norte de Actopan, Hgo.
	20/05/2010	21:11:03	3.9	Estado de Hgo.
CU- UAQ				
GRO	01/05/2012	16:37:59	5.6	40 Km al Suroeste de Cd Altamirano, Gro, México.

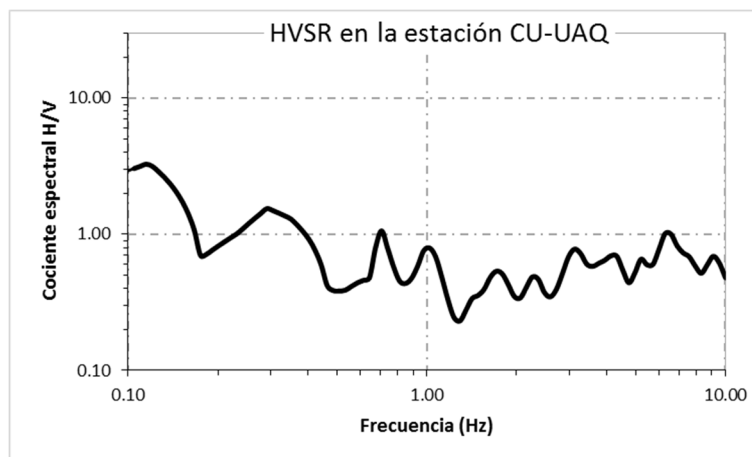


Figura 5.1. FTE obtenida del sismo del 01 / 05 / 2012 en el estado de Guerrero, Md = 5.6 registrado en la estación CU-UAQ.

Con la finalidad de que los datos puedan visualizarse desde otro punto de vista para estudios futuros, en el Apéndice 1 se muestran las trazas sísmicas, FTE y PSD de cada uno de los eventos utilizados para este estudio.

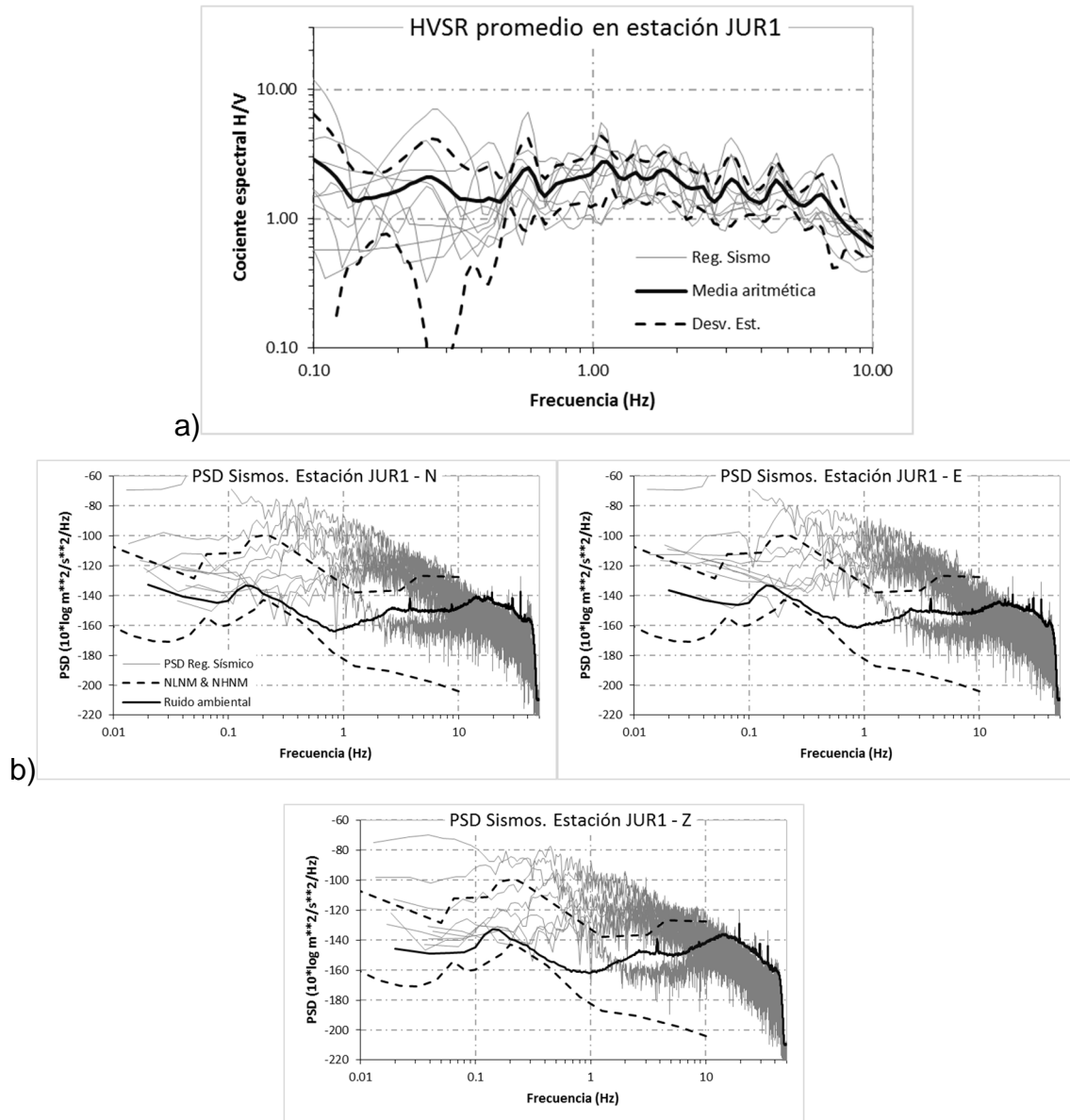


Figura 5.2. Análisis de sismos obtenidos en la estación JUR1. a) FTE obtenida mediante cocientes espectrales de 9 sismos (Clemente-Chávez et al., 2014). b) PSD de los eventos sísmicos utilizados para armar la FTE.

5.2 Análisis espectral de los registros de ruido.

Con el propósito de aclarar la banda de frecuencias influenciadas por el efecto del oleaje antes mencionado en el Capítulo 4.3, la Figura 5.3 muestra el cociente espectral HVNR de registros de ruido ambiental en la estación JUR1 tomando 20 minutos el día 15 (o el más cercano registrado) de cada mes en el lapso comprendido entre Abril 2009 y Junio 2010 registrados a las 08:00 y 17:00hrs UTC, en la cual se observa de manera clara el efecto del oleaje en el ruido ambiental para frecuencias menores a 0.2 Hz, esto reforzado claramente con la observación de que ninguna de las FTE mostradas por los datos sísmicos en la estación JUR1 presenta evidencia de la amplificación en este rango de frecuencias.

Con base en las observaciones del párrafo anterior, para las FTE obtenidas mediante la técnica HVNR de este estudio, se desecharán para fines interpretativos las amplificaciones que se muestren en frecuencias menores a 0.2Hz, interpretándose entonces como banda de interés para el efecto de sitio a las frecuencias entre 0.2 y 10 Hz.

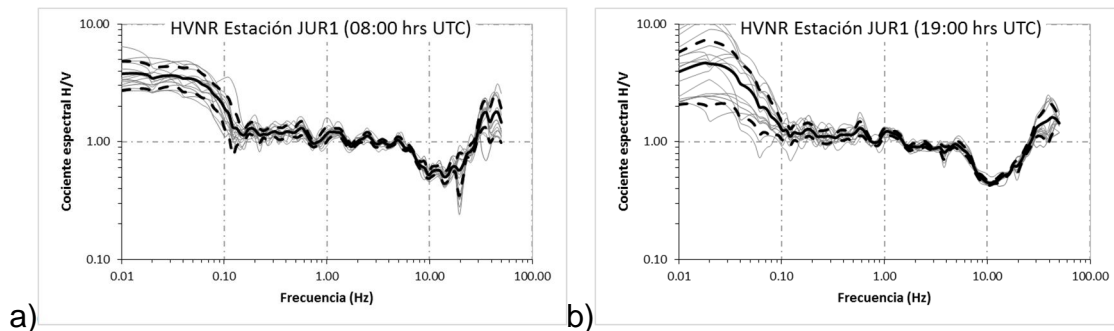


Figura 5.3. Cociente espectral de ruido (HVNR) en estación JUR1. a) 08:00hrs, b) 17:00hrs. En ambos cocientes, se puede observar el efecto de oleaje en frecuencias inferiores a 0.2 Hz.

Además del rango de frecuencias de análisis, para la interpretación de las FTE obtenidas con sismos / ruido ambiental y su agrupación en FE, se analizará la forma del espectro a fin de definir un número razonable de microzonas,

considerando sus niveles de amplificación en bajas ($< 1\text{ Hz}$) y altas ($> 1\text{ Hz}$) frecuencias (Lermo y Limaymanta, 2007; Lermo et al., 2013). Por ejemplo, comparando las estaciones 1A y 13A que se muestran en la Figura 5.4, se puede observar como a pesar de que las dos tienen una amplificación significativa alrededor de 1Hz, la estación 1A presenta una amplificación hacia altas frecuencias (entre 3 y 5Hz) que la estación 13A no muestra; para este caso, la estación 1A y 13A quedarán en dos familias espectrales separadas a pesar que su coincidencia en una amplificación máxima alrededor de 1Hz.

Tomando en cuenta el periodo fundamental de vibración del suelo como uno de los parámetros de diseño sísmico de las construcciones y la forma de cada FE que describirá el comportamiento dinámico del suelo, se realizará una clasificación de acuerdo a las propiedades dinámicas del terreno.

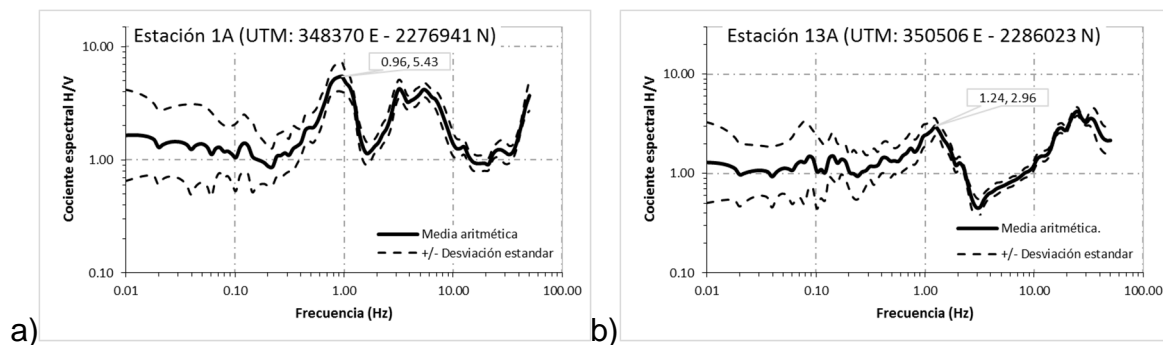


Figura 5.4. Ejemplo de análisis de forma de dos Funciones de Transferencia Empíricas para categorizarlas en Familias Espectrales. Aunque las dos tienen una amplificación significativa alrededor de 1Hz, la estación 1A presenta una amplificación hacia las altas frecuencias (entre 3 y 5Hz) que la estación 13A no muestra; para este caso, la estación 1A y 13A quedarán en dos familias espectrales separadas.

Con base en el criterio de forma para clasificar las FTE en FE se encontraron 6 familias dentro del área de estudio:

Sedimentos con $F_0 \approx 0.5$ y 3 Hz : Al analizar todas las FTE se pudo observar que muchas de ellas presentan sus máximos espectrales entre 0.3 a 0.75

Hz (de 1.33 a 3.33 segundos) y otra amplificación hacia las altas frecuencias entre 3 y 10Hz (de 0.1 y 0.33s), como se muestra en la parte superior de la Figura 5.5a, la cual también coincidió con zonas de mediana altitud y con rellenos medianamente consolidados de acuerdo al trabajo desarrollado por Pacheco (2007) para la zona del valle de Querétaro (Ver Figura 5.7), utilizando datos de perforación de pozos y métodos gravimétricos. Lo que muestra que la zona de transición con depósitos de suelos de material no consolidado presenta este comportamiento. Un modelo propuesto para esta zona se muestra en la parte superior derecha de la Figura 5.5a, donde se tiene un paquete de aproximadamente 100 metros espesor con velocidades de corte menor a los 300m/s y sedimentos consolidados (720m/s) hasta una profundidad de menos de 300m para después tener capas de material medianamente consolidado (360m/s) intercalada con capas de roca. Para este caso, los máximos espectrales hacia bajas frecuencias son los efectos asociados a estratos profundos de manera similar a lo ya analizado por Lermo et al. (2013).

Sedimentos con $F_0 \approx 0.5 \text{ Hz}$: Si ahora agrupamos las FTE con máximos espectrales entre 0.3 a 0.75 Hz (de 1.33 a 3.33 segundos), pero con una tendencia decreciente hacia las altas frecuencias ($> 1\text{Hz}$) como se muestra en la parte inferior de la Figura 5.5a, se observa que coinciden con zonas intermedias-altas cercanas a áreas de afloramientos de material consolidado (Basalto Querétaro) definido por el trabajo de Pacheco (2007) para la zona del valle de Querétaro (Ver Figura 5.7). El modelo propuesto para esta zona se muestra en la parte inferior derecha de la Figura 5.5a, en la cual se considera un paquete de aproximadamente 100 metros de espesor con velocidades de corte menor a los 300 m/s, seguido de una capa de material consolidado (800m/s) de 200m de profundidad y una capa de sedimentos medianamente consolidados (500m/s) de aprox. 50m. a una profundidad un mayor que 300m.

Sedimentos con $F_0 \approx 1 \text{ y } 3 \text{ Hz}$: Esta familia contiene máximos espectrales entre 0.75 y 1.5 Hz (de 0.66 a 1.33 segundos) y otra amplificación hacia las altas frecuencias entre 3 y 7 Hz (de 0.14 a 0.33 segundos) como se muestra en

la parte superior de la Figura 5.5b, la cual se encontró principalmente en zonas bajas y con rellenos medianamente consolidados de acuerdo al trabajo de Pacheco (2007) (Ver Figura 5.7). Lo que muestra que la zona del valle presenta este comportamiento. Un modelo propuesto para esta zona se muestra en la parte superior derecha de la Figura 5.5b, donde se tiene una pequeña capa (15m) de material no consolidado (221m/s) seguida de una capa de aprox. 85m de material consolidado para posteriormente dar lugar a una intercalación entre un estrato rocoso (2,400m/s) y estratos medianamente consolidados (360m/s) a una profundidad de aproximadamente 100m. Al igual en las familias anteriores, los máximos espectrales hacia bajas frecuencias son los efectos asociados a estratos más profundos de manera similar a lo presentado por Lermo et al. (2013).

Sedimentos con $F_0 \approx 1 \text{ Hz}$: Agrupando las FTE con máximos espectrales entre 0.75 a 1.5 Hz (de 0.66 a 1.33 segundos), pero con una tendencia decreciente hacia las frecuencias mayores a 2Hz como se muestra en la parte inferior de la Figura 5.5b, se observa que coinciden con zonas bajas cercanas a las orillas del valle en áreas de afloramientos de material medianamente consolidado definido por Pacheco (2007), para la zona del valle de Querétaro (Ver Figura 5.7). El modelo propuesto para esta zona se muestra en la parte inferior derecha de la Figura 5.5b, en la cual se considera un paquete de aproximadamente 130 metros de espesor con velocidades de corte de 800 m/s, seguido de una capa de material medianamente consolidado (500m/s) de 10m de espesor para posteriormente tener la capa de roca (2400m/s) a una profundidad de 140mts.

Sedimentos con $F_0 \approx 5 \text{ Hz}$: Agrupando las FTE con máximos espectrales entre 4.5 a 6.5 Hz (de 0.15 a 0.22 segundos), y sin respuesta en bajas frecuencias como se muestra en la parte superior de la Figura 5.5c, se observa que coinciden con zonas de altitud intermedia cercanas a áreas de afloramientos de material consolidado definido por Pacheco (2007), para la zona del valle de Querétaro (Ver Figura 5.7). El modelo propuesto para esta zona se muestra en la parte superior derecha de la Figura 5.5c, en la cual se considera un estrato de aproximadamente

40 metros de espesor con velocidades de corte de 800 m/s, seguido de la capa de roca (3,100 m/s).

Roca: Agrupando las FTE con máximos espectrales menores a 3 como se muestra en la parte inferior de la Figura 5.5c, se observa que coinciden con zonas principalmente altas y sobre terrenos altamente consolidados (Ver Figura 5.7). Para este caso se analizaron las FTE obtenidas mediante registros sísmicos en dos estaciones (CU-UAQ y JUR1) ya anteriormente categorizadas en otros trabajos como estaciones en roca, donde se observa la coherencia con los registros de ruido obtenidos en este estudio. De igual manera se sobrepondrá el cociente espectral del registro de ruido ambiental de la estación JUR1 anteriormente analizado en la Figura 5.3.

En la Figura 5.6, en color gris se muestran los niveles de ruido ambiental de cada componente obtenidos en las diversas estaciones de registro, en negro se muestra el promedio por componente del nivel de ruido ambiental para cada FE, la cual se puede comparar con los modelos de nivel de ruido obtenidos por Peterson (1993) mostrados con línea negra punteada y con el nivel de ruido electrónico del equipo Sara (Ver Apéndice 3) con línea negra continua y delgada. Se agrega además con línea gris punteada el ruido electrónico teórico mostrado por la ficha del acelerógrafo SSA-320 (Ver Apéndice 4) y con línea gris doble la experimental obtenida del acelerógrafo Terra (SSA-320 / GSR-18) (Ver Apéndice 5) a fin de comparar los niveles de ruido con la sensibilidad de este equipo utilizado en el estudio de zonificación previo en el valle realizado por Bustillos (2005).

Analizando la Figura 5.6 se hace evidente que salvo en algunas pocas excepciones el nivel de ruido del área de estudio no alcanza a igualar o superar el nivel de ruido electrónico del acelerógrafo Terra, por lo que los registros de Bustillos (2005) serían incapaces de mostrar alguna amplificación mediante la obtención de la FTE utilizando la técnica HVNR. En contraste, para el equipo Sara se puede observar que los registros horizontales cuentan con energía suficiente para ser

extraída del ruido instrumental a partir de frecuencias de 0.1Hz, mientras que para la componente vertical se logra dentro de un rango entre 0.4 y 1 Hz.

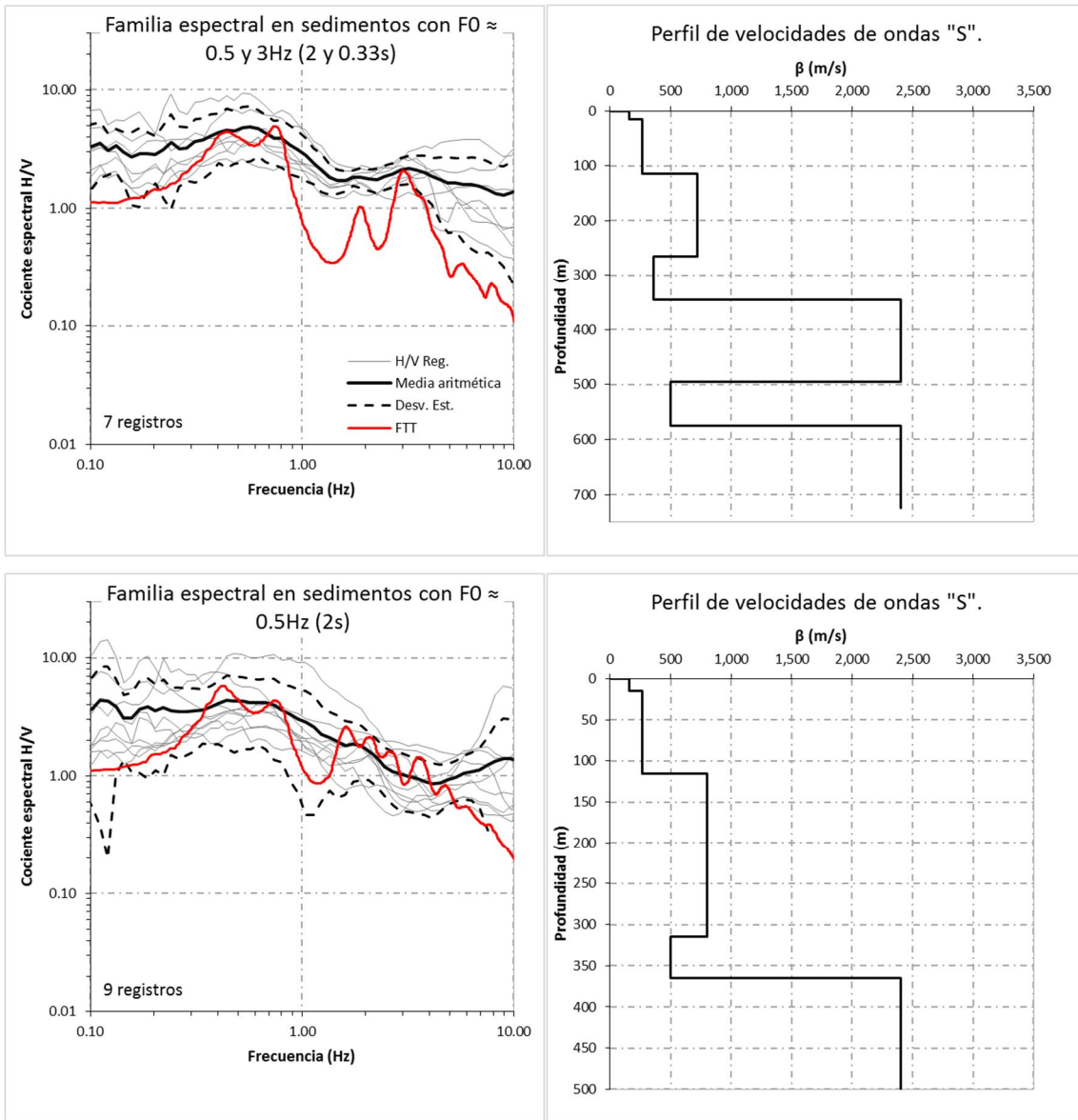


Figura 5.5a. A la izquierda se muestran las familias espectrales en sedimentos con $F_0 \approx 0.5Hz$ con y sin amplificación en $3Hz$ definidas por los registros en los lugares de medición. A la derecha se observan los modelos de corteza utilizados para generar la Función de Transferencia Teórica (FTT). Cabe mencionar que la amplificación en bajas frecuencias se genera debido a la existencia de estratos de sedimentos profundos medianamente consolidados, en este caso a aprox. 300m.

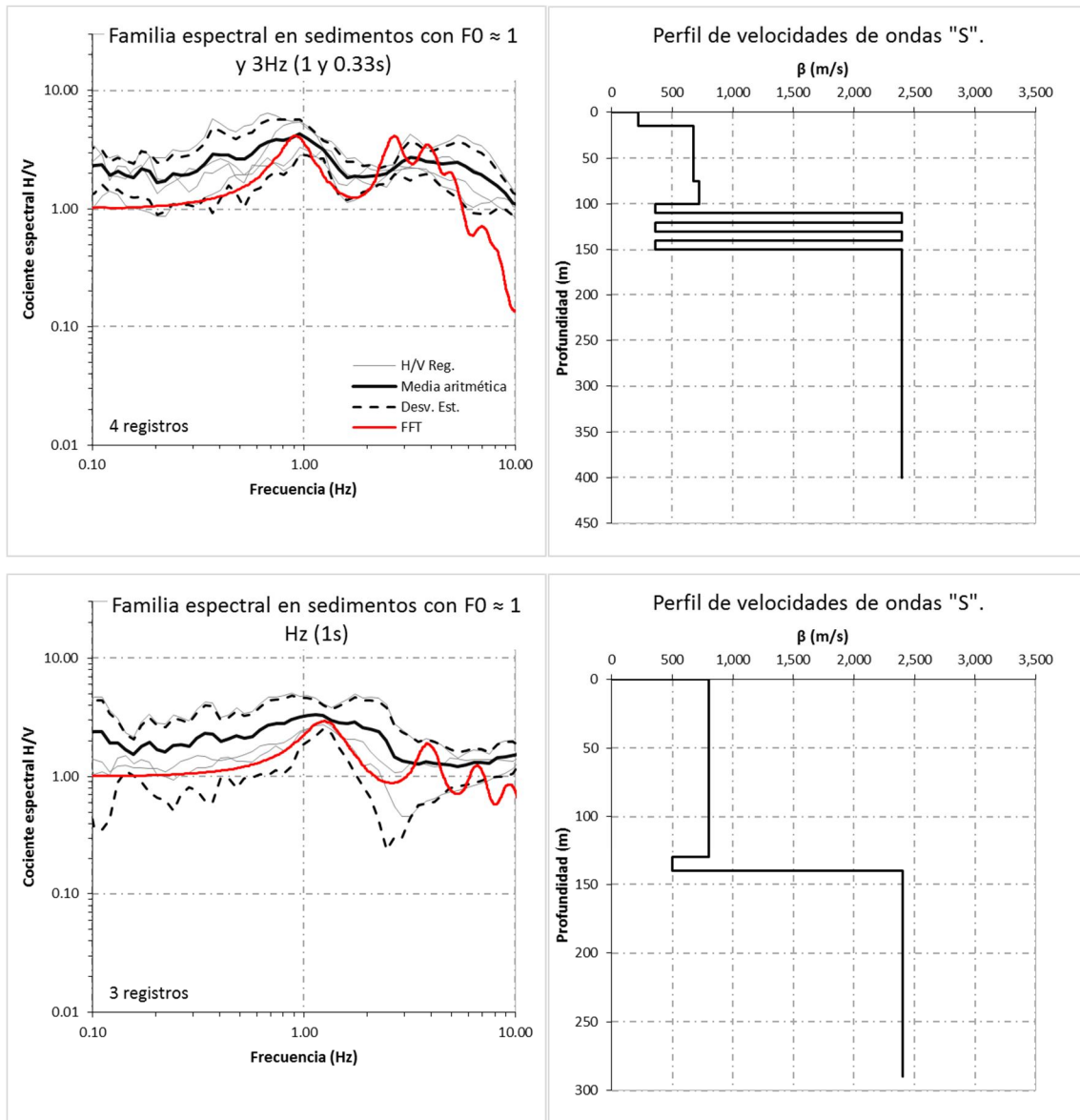


Figura 5.5b. A la izquierda se muestran las familias espectrales en sedimentos con $F_0 \approx 1$ Hz con y sin amplificación en 3 Hz definidas por los registros en los lugares de medición. A la derecha se observan los modelos de corteza utilizados para generar la Función de Transferencia Teórica (FTT). Cabe mencionar que la amplificación en bajas frecuencias se genera debido a la existencia de estratos de sedimentos profundos medianamente consolidados, en este caso a aprox. 100m.

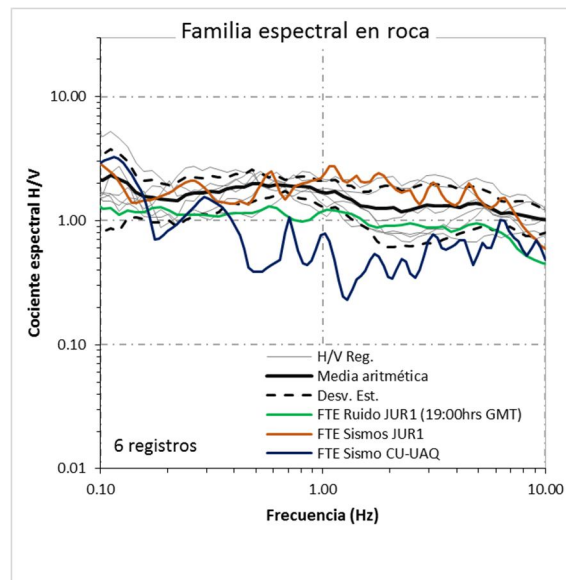
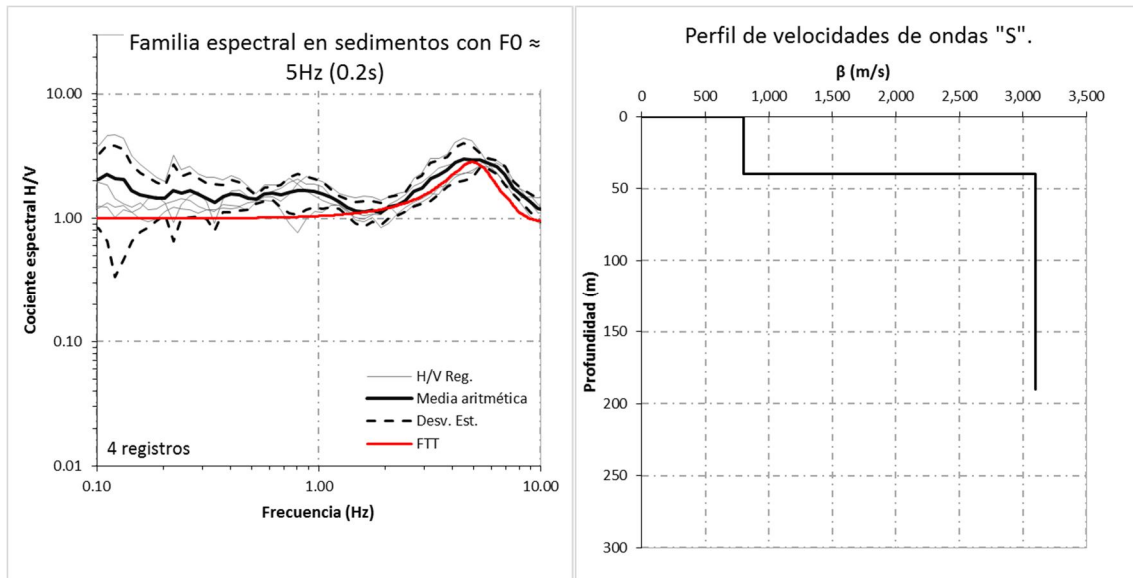


Figura 5.5c. A la izquierda se muestran las familias espectrales (FE) en sedimentos con $F_0 \approx 5\text{Hz}$ y en roca definidas por los registros en los lugares de medición. A la derecha se observa el modelo de corteza utilizado para generar la Función de Transferencia Teórica (FTT) de la FE con $F_0 \approx 5\text{Hz}$.

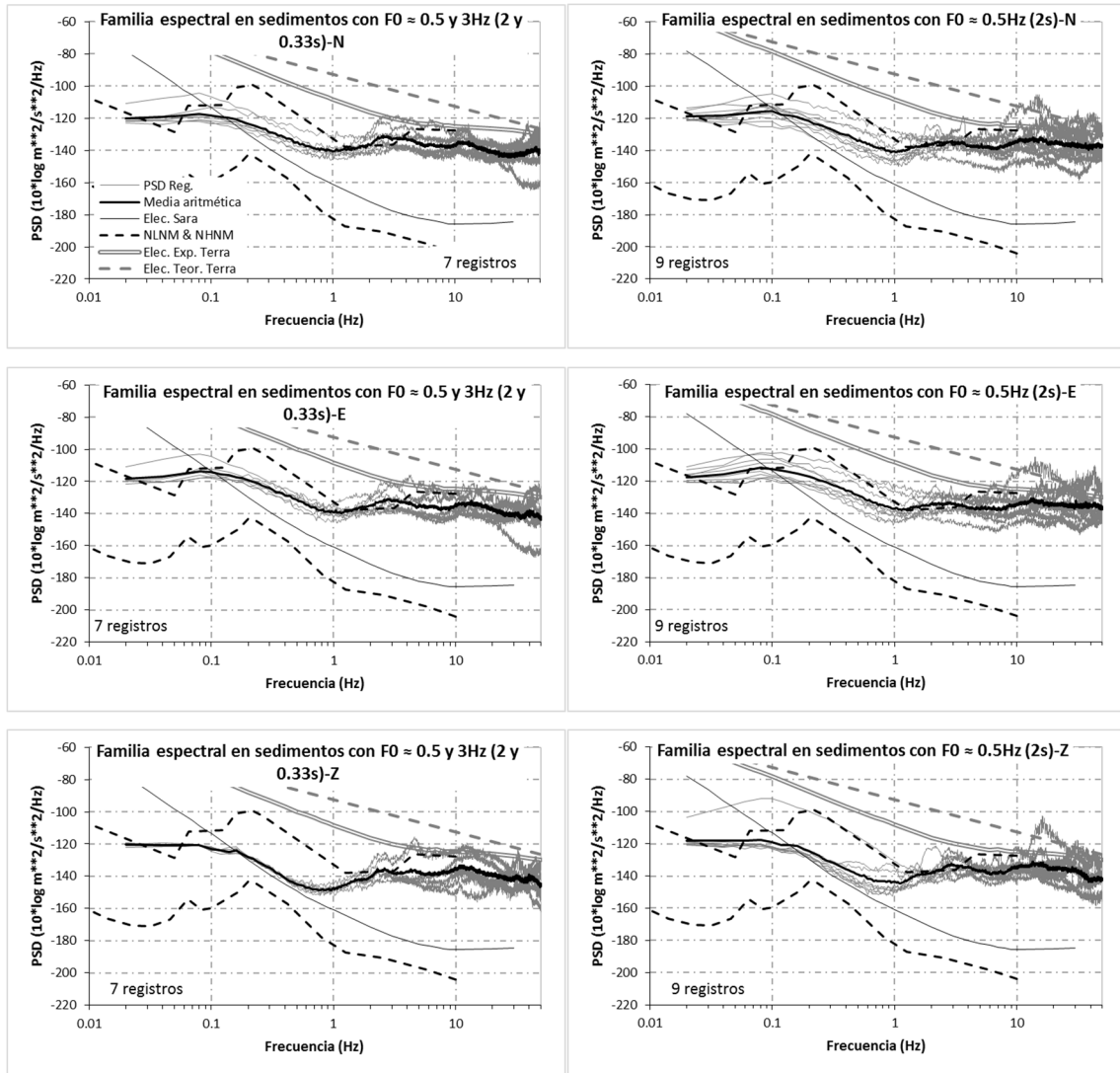


Figura 5.6a. Espectros de densidad de potencia de las familias espectrales de sedimentos con $F_0 \approx 0.5 \text{ Hz (2s)}$ con y sin amplificaciones a 3 Hz generadas en el área de estudio.

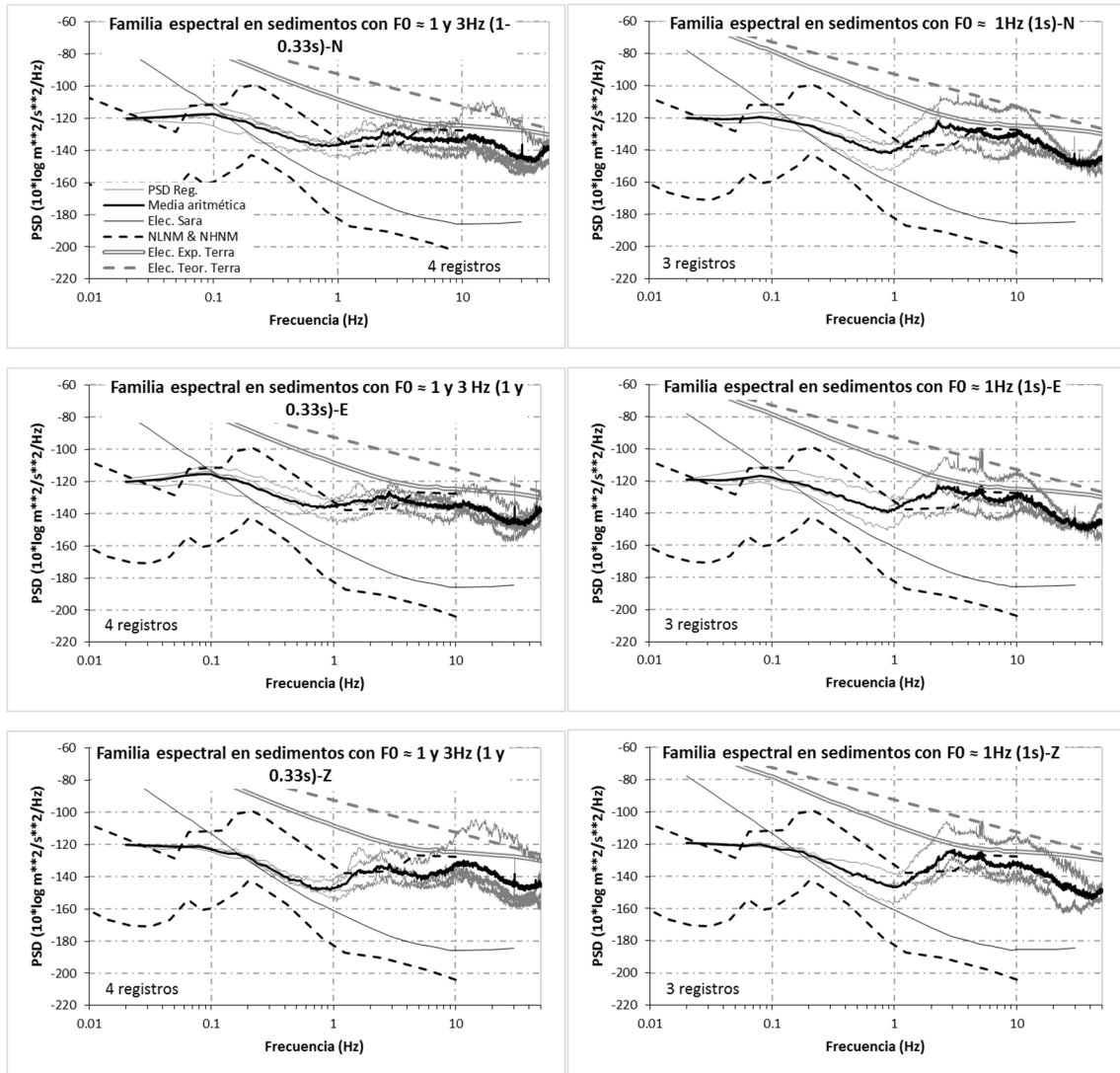


Figura 5.6b. Cont. Espectros de densidad de potencia de las familias espectrales para las zonas con sedimentos con $F_0 \approx 1 \text{ Hz}$ (1s) con y sin amplificaciones a 3 Hz generadas en el área de estudio.

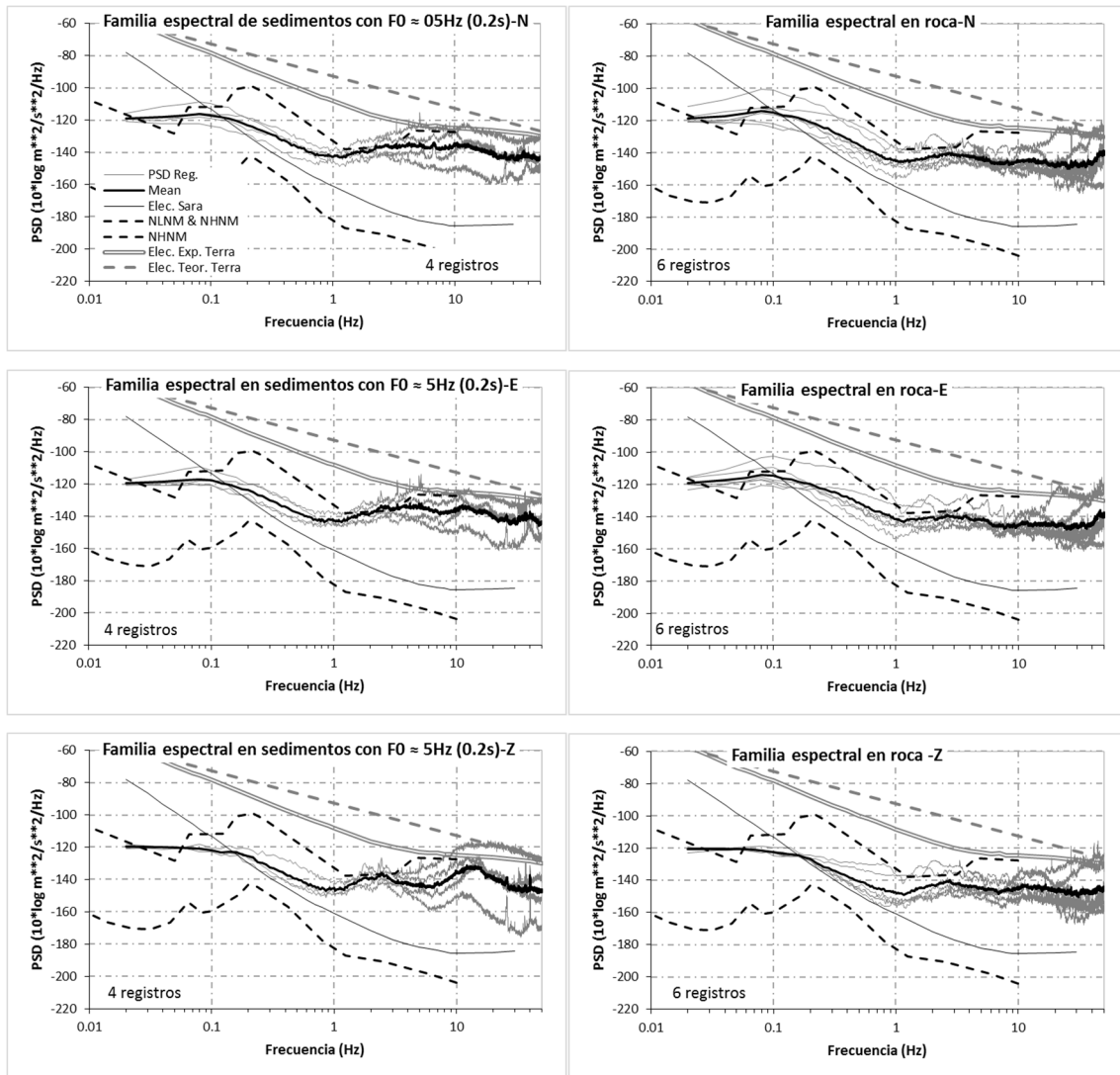


Figura 5.6c. Cont. Espectros de densidad de potencia de las familias espectrales para las zonas con sedimentos con $F_0 \approx 5 \text{ Hz}$ (0.2s) y en roca generadas en el área de estudio.

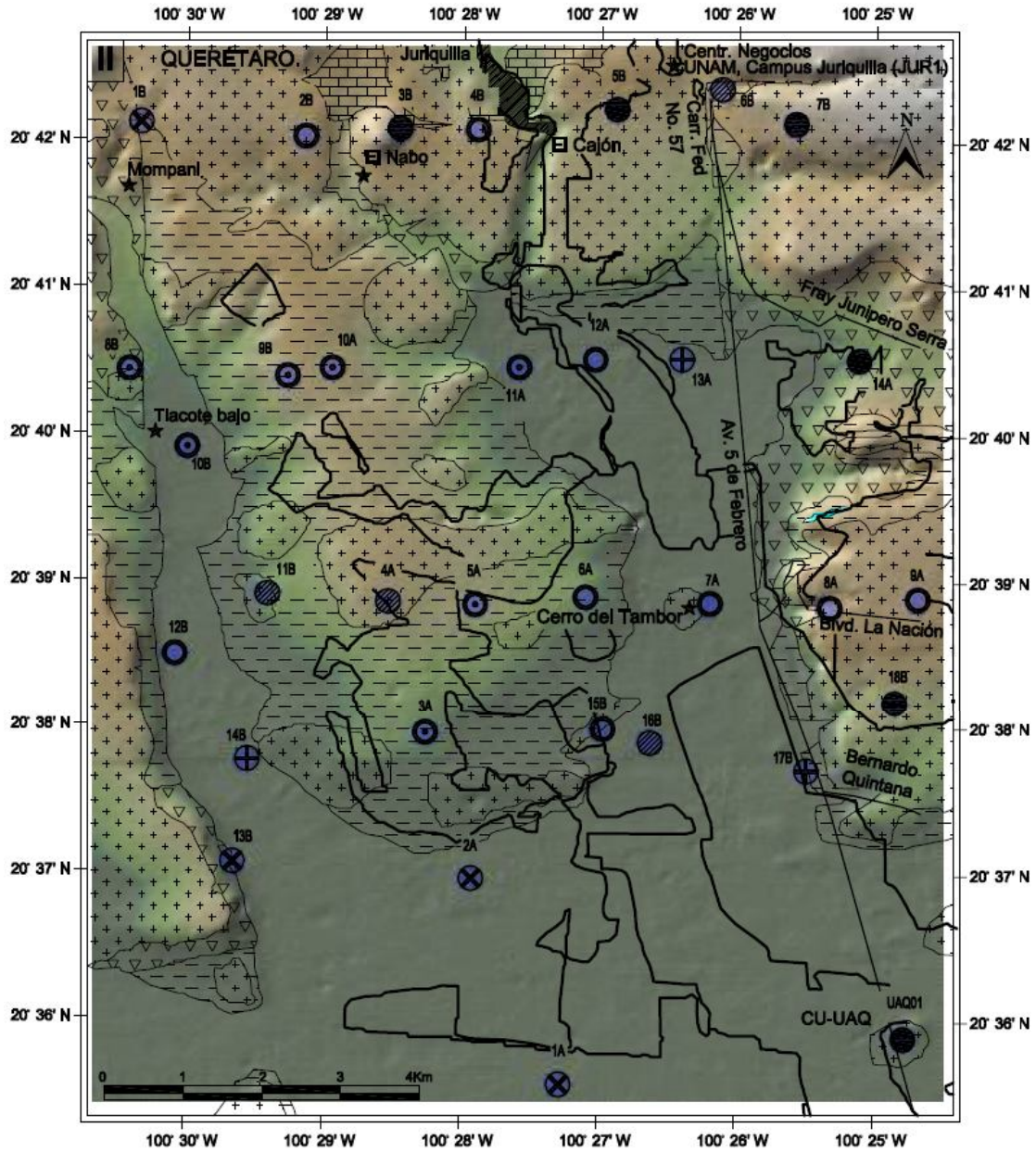
En la Figura 5.7 se muestra la distribución geográfica de los puntos de registro de ruido ambiental de este estudio y descritos en la Tabla 5.2 en conjunto con la geología propuesta por Pacheco (2007) y la topografía obtenida del software GeoMappApp 3.3.9 a fin de cruzar los resultados del presente estudio con trabajos previos.

Con el fin de poder realizar algún análisis posterior sobre algún área o estación particular, en el Apéndice 2 se muestran la FTE y los PSD de cada estación

de ruido ambiental. De igual manera, para aclarar la influencia de los estratos profundos en la respuesta de los suelos hacia las bajas frecuencias según lo mencionó Lermo et al. (2013), en el Apéndice 6 se muestra un ejercicio teórico utilizando un modelo unidimensional de propagación de ondas corregido por Haskell (1953) y con el apoyo del software Degtra A4 Ver. 3.2.

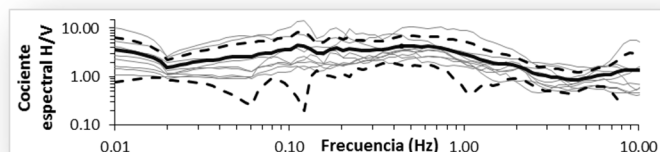
Tabla 5.2. Distribución geográfica de los puntos de registro de ruido ambiental.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Punto	X (m)	Y (m)	F0 (Hz)	A0	F1	A1	Punto	X (m)	Y (m)	F0 (Hz)	A0
Familia espectral de zona rocosa							Familia espectral de sedimentos con $F_0 \approx 5 \text{ Hz}$				
14 A	352309	2286082					4 A	346293	2283110	4.5	3.01
3 B	346515	2289086					6 B	350593	2289538	5.82	3.15
5 B	349266	2289290					11B	344735	2283228	6.34	2.81
7 B	351528	2289087					16B	349596	2281264	4.5	4.42
18B	352725	2281742									
UAQ01	352785	2277467									
Familia espectral de sedimentos con $F_0 \approx 0.5 \text{ y } 3 \text{ Hz}$							Familia espectral de sedimentos con $F_0 \approx 0.5 \text{ Hz}$				
3 A	346742	2281434	0.31	4.32	3.47	2.88	6 A	348797	2283124	0.74	4.25
5 A	347397	2283050	0.57	4.97	4.50	2.00	7 A	350376	2283033	0.52	3.67
10 A	345614	2286076	0.48	6.88	3.19	2.43	8 A	351890	2282947	0.40	3.96
11 A	347984	2286044	0.52	9.4	6.90	3.80	9 A	353009	2283044	0.40	2.9
8 B	343015	2286098	0.62	3.97	1.74	1.78	12 A	348942	2286148	0.68	2.64
9 B	345041	2285963	0.52	2.59	2.92	2.67	2 B	345301	2288997	0.62	3.55
10 B	343740	2285099	0.62	3.99	4.90	2.27	4 B	347486	2289064	0.48	10.85
							12 B	343565	2282473	0.37	7.56
							15 B	348971	2281427	0.57	4.22
Familia espectral de sedimentos con $F_0 \approx 1 \text{ y } 3 \text{ Hz}$							Familia espectral de sedimentos con $F_0 \approx 1 \text{ Hz}$				
1 A	348370	2276941	0.96	5.43	2.92	4.27	13 A	350048	2286123	1.24	2.96
2 A	347296	2279565	1.24	3.24	2.68	2.49	14 B	344459	2281104	0.88	5.08
1 B	343200	2289216	0.68	6.43	5.82	2.86	17 B	351578	2280875	1.24	2.72
13 B	344261	2279804	0.96	3.33	2.92	2.78					



★ Punto de referencia.
 ■ Cuerpo de agua.
 — Vialidad.
 — Mancha urbana.
 □ Q AI: Rellenos aluviales del cuaternario: Arcilla, limo y arena fina.
 □ Tmt AB: Derrames de lava de composición basáltica y andesítica del Mioceno Tardío.
 ● Registro correspondiente a la Familia Espectral en Roca.
 ○ Registro correspondiente a la Familia Espectral en sedimentos con $F_0 \approx 0.5\text{Hz}$.
 ⊕ Registro correspondiente a la Familia Espectral en sedimentos con $F_0 \approx 1\text{Hz}$.
 ■ Punto de registro.
 □ To-Tm Py Lac: Rellenos de sedimentos lacustres y proclastos del oligoceno y del Mioceno medianamente consolidados.
 □ To-Tm AB: Andesita del Oligoceno con intercalación de tobas.
 □ Ki Cz Ar: Calizas del Cretácico inferior.
 ● Registro correspondiente a la Familia Espectral en sedimentos con $F_0 \approx 5\text{Hz}$.
 ⊙ Registro correspondiente a la Familia Espectral en sedimentos con $F_0 \approx 0.5$ y 3 Hz.
 ⊗ Registro correspondiente a la Familia Espectral en sedimentos con $F_0 \approx 1$ y 3Hz.

Figura 5.7. Cruce de resultados de este estudio con la geología y topografía del área de estudio.



6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de los sismos registrados en la estación JUR1 tomados para generar la Función de Transferencia Empírica (FTE) de dicha estación muestra que la energía de los eventos sísmicos se encuentran de manera general fuera de la influencia del ruido ambiental del área en una banda de frecuencias entre 0.3 y 6Hz que corresponde a una buena parte de la banda de interés para el análisis sísmico, misma banda en la que se encuentran los picos fundamentales de pequeña amplitud en frecuencias bajas.

Al igual que en la estación JUR1, la FTE obtenida con el registro sísmico en la estación CU-UAQ muestra pequeñas amplificaciones en bajas frecuencias.

Debido al nivel de amplificación que presentan ambas estaciones sísmicas (JUR1 y CU-UAQ) en su FTE, considerando los datos que actualmente se tienen, se pueden considerar como ubicadas en roca y útiles como estaciones de referencia.

Por otro lado, las familias espectrales (FE) mostradas en la Figura 5.5 corresponden a las formas que describen de manera general la respuesta dinámica del terreno y se ligan de manera indirecta con el tipo de suelo y su estratigrafía. Con base en esta relación, se definieron cinco familias de sedimentos (amplitudes ≥ 3) y una familia de roca (amplitudes < 3).

Bajo el supuesto de que la velocidad de onda de cortante se encuentra en el rango definido en la Tabla 4.3, basado en las características generales de los cortes mostrados por Pacheco (2007) donde se muestran intercalaciones de sedimentos en la base de la roca, las FE se pueden definir de acuerdo a las características del arreglo en los estratos requeridos para generar la FTT que se ajuste a los datos empíricos obtenidos mediante el registro de ruido ambiental como se muestra en la Tabla 6.1.

Tomando en cuenta las observaciones realizadas en la Tabla 6.1 y con el antecedente de Lermo et al. (2013), se puede entender de manera general como los sedimentos en capas profundas ya reportadas por Pacheco (2007) generan una amplificación en frecuencias bajas (≤ 1 Hz), mientras los estratos superficiales generan principalmente una amplificación en frecuencias altas (> 1 Hz). Para ejemplificar este efecto se recomienda al lector revisar el ejercicio realizado en el Apéndice 6.

La falta de coincidencia en bajas frecuencias entre el trabajo previo de Bustillos (2005) y los resultados encontrados en las familias espectrales mostradas en la Figura 5.5 y resumidas en la Tabla 5.2 en el área de traslape dentro del Valle de Querétaro (Ver Tabla 6.2) se debe a la baja sensibilidad de los acelerógrafos principalmente en bajas frecuencias como puede observarse en la Figura 5.6a y b, en donde se observa de manera general que el PSD del ruido ambiental registrado queda por debajo del nivel de ruido electrónico especificado por el fabricante (Apéndice 4) para el acelerógrafo Terra (SSA-320 / FSR-18) utilizado por Bustillos (2005) y analizado en el Apéndice 5; además de los antecedentes que incluyen análisis de niveles de ruido electrónico (como ejemplo puede tomarse el trabajo de Evans et al. (2008) y el de Chávez-García y Tejeda-Jácome, (2010)).

Tabla 6.1. Descripción e interpretación de cada Familia Espectral.

Familia espectral.	Descripción
FE en sedimentos con F0 = 0.5 y 3Hz	La familia muestra que el promedio de las FTE obtenidas mediante el registro de ruido ambiental presenta una amplificación dominante a una frecuencia de 0.5 Hz (2 s) con una amplitud de 4.5 veces y una amplificación de la señal a los 3 Hz (0.33 s) con una amplitud de 3.0 veces, asociando las frecuencias bajas a depósitos profundos. Los registros que definen esta familia espectral se encuentran principalmente en puntos ubicados en zonas marcadas con estratos medianamente consolidados según el estudio de Pacheco (2007) y en una zona con altitud intermedia.
FE en sedimentos con F0 = 0.5Hz	La familia muestra que el promedio de las FTE obtenidas mediante el registro de ruido ambiental muestra una amplificación dominante a una frecuencia de 0.5 Hz (2 s) con una amplitud de 3.81 veces, asociando las frecuencias bajas a depósitos profundos. Los registros que definen esta familia espectral se encuentran principalmente en puntos ubicados en zonas marcadas con estratos medianamente consolidados pero en transición con zonas de afloramientos de materiales consolidados según el estudio de Pacheco (2007) y en una zona con altitud intermedia-alta.
FE en sedimentos con F0 = 1 y 3Hz	La familia muestra que el promedio de las FTE obtenidas mediante el registro de ruido ambiental muestra una amplificación dominante a una frecuencia de 1 Hz (1 s) con una amplitud de 3.92 veces y una amplificación de la señal a los 3 Hz (0.33 s) con una amplitud de 2.54 veces, asociando las frecuencias bajas a depósitos profundos. Los registros que definen esta familia espectral se encuentran principalmente en puntos ubicados en zonas marcadas dentro del valle según el estudio de Pacheco (2007) y en una zona con altitud baja.
FE en sedimentos con F0 = 1Hz	La familia muestra que el promedio de las FTE obtenidas mediante el registro de ruido ambiental muestra una amplificación dominante a una frecuencia de 1.23 Hz (0.81 s) con una amplitud de 2.92 veces, asociando las frecuencias bajas a depósitos profundos con presencia de igual manera en las demás familias. Los registros que definen esta familia espectral se encuentran principalmente en puntos ubicados en zonas marcadas en las orillas del valle según el estudio de Pacheco (2007) y en una zona con altitud baja.
FE en sedimentos con F0 = 5Hz	La familia muestra que el promedio de las FTE obtenidas mediante el registro de ruido ambiental muestra una amplificación dominante a una frecuencia de 4.5 Hz (0.22 s) con una amplitud de 3 veces. Los registros que definen esta familia espectral se encuentran principalmente en puntos ubicados en zonas marcadas con afloramientos de materiales consolidados según el estudio de Pacheco (2007) y en una zona con altitud intermedia.
FE en roca	La familia muestra que el promedio de las FTE obtenidas mediante el registro de ruido ambiental muestra una amplificación menor a 2 veces a lo largo de todo el espectro. Los registros que definen esta familia espectral se encuentran principalmente en puntos ubicados en zonas marcadas con afloramientos de materiales consolidados según el estudio de Pacheco (2007) y en una zona alta.

En contraparte, tomando como base el ruido electrónico del equipo Sara (SS05 / SR04), la Figura 5.6a y b muestra como los promedios que corresponden a registros en la componente horizontal cuentan con energía suficiente a partir de una frecuencia de 0.1 Hz, mientras que para la componente vertical se logra en un rango entre 0.4 y 1 Hz. Debido a esta implicación en la componente vertical se puede decir de manera general que las amplitudes de la Función de Transferencia Empírica

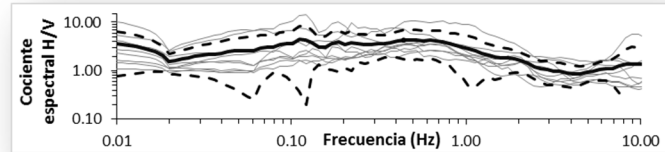
(FTE) inferiores a 1Hz son propensas a disminuirse dado el ruido electrónico de la componente vertical del instrumento.

Tabla 6.2. Comparación entre las frecuencias fundamentales obtenidas en el estudio de Bustillos (2005) y el presente estudio.

1	2	3	7	
Punto	X	Y	F0 (Bustillos, 2005)	F0 (Este estudio)
1 A	348370	2276941	1.42 Hz	0.96 Hz
2 A	347296	2279565	1.66 Hz	1.24 Hz
3 A	346742	2281434	1.90 Hz	0.31 Hz
4 A	346293	2283110	2.50 Hz	4.5 Hz
5 A	347397	2283050	2.50 Hz	0.57 Hz
6 A	348797	2283124	2.00 Hz	0.74 Hz
7 A	350376	2283033	2.15 Hz	0.52 Hz
8 A	351890	2282947	3.33 Hz	0.40 Hz
11 A	347984	2286044	2.00 Hz	0.52 Hz
12 A	348942	2286148	1.60 Hz	0.68 Hz
13 A	350048	2286123	1.60 Hz	1.24 Hz
10B	343740	2285099	2.5 Hz	0.62 Hz
11B	344735	2283228	2.5 Hz	6.34 Hz
12B	343565	2282473	2.5 Hz	0.37 Hz
13B	344261	2279804	2.5 Hz	0.96 Hz
14B	344459	2281104	2.25 Hz	0.88 Hz
15B	348971	2281427	1.66 Hz	0.57 Hz
16B	349596	2281264	1.66 Hz	4.5 Hz
17B	351578	2280875	2.25Hz	1.24 Hz

En congruencia con análisis recientes sobre el efecto de sitio en el Eje Neovolcánico (MVB), como el de Cruz-Jiménez et al. (2009) y Clemente-Chávez et al. (2014), los resultados muestran que la mayor parte de la amplificación generada por los efectos de sitio se encuentran en bajas frecuencias ($\leq 1\text{Hz}$). Como se pudo corroborar para nuestro caso mediante la modelación de Funciones de Transferencia Teórica (FTT) tomando como base las estratigrafías encontradas por Pacheco (2007) mediante un análisis gravimétrico y de análisis de pozos, esto es generado por la intercalación de sedimentos medianamente consolidados en los estratos profundos de roca.

VII



7 CONCLUSIONES.

Con un replanteamiento en el proceso de la estimación del periodo fundamental del suelo (T_s) de la ciudad de Querétaro, esto en comparación a lo realizado por Bustillos (2005), se encontraron varios aspectos relevantes:

- 1) Una identificación de seis familias espectrales (FE) de acuerdo a su periodo fundamental y forma espectral descritas por su estratigrafía con base a las Funciones de Transferencia Teóricas calculadas. Estas familias quedan descritas como sigue:
 - a. **FE en sedimentos con $F_0 \approx 0.5$ y 3Hz o FE inestable** para viviendas de 1 a 3 niveles. Estos periodos están asociados a la respuesta de los depósitos lacustres medianamente consolidados. Por otro lado, aun cuando se puede considerar zona estable para viviendas entre 4 y 8 niveles, no pasa lo mismo para viviendas mayores a 8 pisos, ya que si observamos la familia espectral, vemos que la FTE muestra una ausencia de máximos espectrales en una banda entre 1.2 y 3Hz (0.33 y 0.8seg), sin embargo se observan amplificaciones relativas hacia bajas frecuencias (0.2 a 1.2Hz o sea entre 5 y 0.8seg), llegando a observarse amplificaciones hasta de 9 veces. Como se vio estos efectos pueden estar asociados a depósitos más profundos que tienen presencia en esta zona y que fueron previamente inferidos por Pacheco (2007) (Ver parte superior de la Figura 5.5a).
 - b. **FE en sedimentos con $F_0 \approx 0.5$ o FE inestable** para viviendas de más de 7 niveles, periodos asociados a las capas profundas de la zona y encontrados en puntos ubicados con estratos medianamente consolidados pero en transición con zonas de afloramientos de materiales consolidados. Se consideran estables para viviendas de

menos de 8 niveles dado que como muestra la FE no se muestran amplificaciones hacia las altas frecuencias (mayores a 1.25Hz o sea menores a 0.8seg) principalmente inducidos por sedimentos superficiales (Ver parte inferior de la Figura 5.5a).

- c. **FE en sedimentos con $F_0 \approx 1$ y 3Hz o zona inestable** para viviendas entre 1 y 3. Estos depósitos responden principalmente en puntos ubicados en zonas marcadas dentro del valle de Querétaro y se presume tienen un espesor no mayor a 100m de sedimentos superficiales en nuestra área de estudio según el estudio de Pacheco (2007). Finalmente, aun cuando se puede considerar estable para viviendas entre 4 y 6 niveles, no pasa lo mismo para viviendas de entre 7 y 32 niveles ya que si observamos la familia espectral, vemos que la FTE muestra una ausencia de máximos espectrales para la banda entre 1.6 y 2.7 Hz (entre 0.37 y 0.62seg), sin embargo se observa amplificaciones relativas hacia las bajas frecuencias (0.31 a 1.6Hz o sea entre 0.62 a 3.22seg), llegando a observarse amplificaciones de hasta 5.6 veces. Como se vio estos efectos pueden estar asociados a depósitos más profundos (Ver parte superior de la Figura 5.5b).
- d. **FE en sedimentos con $F_0 \approx 1\text{Hz}$ o FE inestable** para viviendas de entre 4 y 19 niveles, periodos asociados a las capas profundas de la zona y encontrados en puntos ubicados en las orillas del valle y con altitud baja. Se consideran estables para viviendas menores de 4 niveles o mayores a 19, dado que como muestra la FE no se muestran amplificaciones hacia frecuencias mayores a 2.46Hz (o sea menores a 0.4seg) principalmente inducidos por sedimentos superficiales, ni hacia frecuencias menores a 0.52Hz (o sea mayores a 1.92s) inducidos por sedimentos profundos respectivamente.
- e. **FE en sedimentos con $F_0 \approx 5\text{Hz}$ o FE inestable** para viviendas de entre 2 y 4 niveles, periodos asociados a capas consolidadas superficiales y ubicados en zonas marcadas con afloramientos de material consolidado de altitud intermedia. Se consideran estables para viviendas de 1 o más de 4 niveles dado que como se muestra la FE no muestra amplificaciones hacia las bajas frecuencias (menores a 2.68 Hz o mayores a 0.37seg) inducidos por sedimentos profundos.
- f. **FE en roca o estable** para viviendas de cualquier nivel, donde las FTE presentan amplificaciones relativas <3 . Sin embargo, para esta zona se recomienda incrementar el monitoreo sísmico a fin de incrementar la certidumbre la respuesta dinámica del suelo en un mayor número de sitios con estas características.

- 2) El equipo acelerógrafo TERRA usado por Bustillos (2005) muestra un nivel de ruido electrónico superior al ruido ambiental de la ciudad de Querétaro en las frecuencias de interés (0.1 a 10Hz), lo cual invalida gran parte de los resultados reportados en su trabajo, principalmente en bajas frecuencias ($f < 1$ Hz) según se muestra en la Figura 24 y se explica en el Apéndice 5 y. Por otro lado, fue probado la obtención de buenos resultados en la estimación de Ts con el uso de acelerógrafos en zonas donde el ruido ambiental es alto, como lo mostrado en su trabajo de Chávez-García y Tejeda-Jácome (2010a, b).
- 3) Existe gran congruencia entre los resultados reportados en este estudio con respecto a lo obtenido en trabajos previos (Cruz-Jiménez et al., 2009; Clemente-Chávez et al., 2014) respecto a una mayor amplificación del suelo en bajas frecuencias (0.3-2.0 Hz) dentro de la zona del MVB.

Finalmente, aunque por la densidad de puntos de registro de este estudio no concluye la delimitación de microzonas para el municipio de Querétaro, muestra el comienzo para la presentación de una carta de comportamiento dinámico del suelo para la ciudad de Querétaro, aunado con sus nuevas áreas perimetrales de desarrollo poblacional. Aspectos que en general ayudan a fortalecer la información local para el diseño de edificios y en lo futuro ser incorporado oficialmente en el reglamento de construcción del Municipio de Querétaro.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez-Manilla A., A., G. E. I. Martínez Peña, A. Pérez Salazar y J. C. Vázquez Paulino. 2002. Caracterización de suelos y control espacial por medio de los sistemas de información geográfica; caso Valle de Querétaro. IMT, Publicación técnica No. 203. Sanfandila, Qro.
- Aki, K. and P. G. Richards. 2002. Quantitative seismology (2nd edition). University Science Books, Sausalito, California.
- Bard, P-Y. 1999. Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?. The effect of surface geology on seismic motion, Irikura, Kudo, Okada & Sasatani (eds): 1251-1279.
- Bonnefoy-Claudet, S., F. Cotton and P-Y. Bard. 2006. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. Earth-Science Reviews 79: 205-227.
- Bracewell, R.N. 2000. The Fourier Transform and its Applications (3rd edition). Mc. Graw Hill, Singapore.
- Bustillos P., J. M. 2005. Microzonificación sísmica del valle de Querétaro. Tesis de Maestría. UAQ, Facultad de Ingeniería.
- Carreño, E., B. Bravo, A. Suárez y J. M. Tordesillas. 1999. Registro y tratamiento de acelerogramas. Física de la tierra 11: 81 – 111.
- Carreón-Freyre, D., M. Cerca, L. Luna-González y F. J. Gámez-González. 2005. Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. Revista Mexicana de ciencias Geológicas Vol. 22, No. 1: 1-18.
- Centro de información en salud y desastres. 2005. 4 Corrección de línea base y filtrado (SPA01CLT). <http://desastres.unanleon.edu.ni/>, último acceso en Noviembre 2013.
- CONCYTEQ. 2013. Crecimiento Urbano (CQRN a partir de INEGI). http://www.concyteq.edu.mx/cqrn3/visor_ge.php?visor=ciudad, último acceso en Diciembre 2013.
- Chapra, S.C. y R. P. Canale. 2001. Métodos Numéricos para Ingenieros (3er edición). Mc Graw Hill, México, D.F.
- Chávez-García, F. J. and J. Tejeda-Jácome. 2010a. Site response in Tecoman, Colima, Mexico-I: Comparison of results from different instruments and analysis techniques. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 30: 711-716.
- Chávez-García, F. J. and J. Tejeda-Jácome. 2010b. Site response in Tecoman, Colima, Mexico-II: Comparison of results from different instruments and analysis techniques. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 30: 717-723.

- Clark, S. P., Jr. (Ed). 1966. Handbook of Physical Constants. Geol. Soc. Am. Mem. 97, New York, New York.
- Clemente A. y M. Arroyo. 2012. Primer estación sísmica de la Universidad Autónoma de Querétaro. Reporte técnico. UAQ, Facultad de Ingeniería.
- Clemente-Chávez, A., G. M. Arroyo, R. Zúñiga, A. Figueroa, M. A. Pérez y C. S. López. 2012. Relación de atenuación del movimiento del suelo para la aceleración máxima (PGA) sobre el cinturón volcánico mexicano (MVB); análisis por trayectoria: Guerrero-Querétaro. Revista de Ingeniería Sísmica No.87: 67-93.
- Clemente-Chávez, A., A. Figueroa-Soto, F.R. Zúñiga, M. Arroyo, M. Montiel and O. Chávez. 2013. Seismicity at the northeast edge of the Mexican Volcanic Belt (MVB) and activation of an undocumented fault: the Peñamiller earthquake sequence of 2010-2011, Queretaro, Mexico. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. No.13: 2521-2531.
- Clemente-Chávez, A., F.R. Zúñiga, J. Lermo, A. Figueroa-Soto, C. Valdés, M. Montiel, O. Chávez and M. Arroyo. 2014. On the behavior of site effects in central Mexico (the Mexican Volcanic Belt – MVB), based on records of shallow earthquakes that occurred in the zone between 1998 and 2011. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. No. 14: 1391-1406.
- Cordero-Calle, S. y U. Hernán-Montes. 2003. Deconvolución de sismogramas digitales por división espectral filtrado inverso y simulación de sismogramas digitales. Compendio de trabajos de investigación del Instituto Geofísico del Perú. V4: 131:146.
- Comisión Federal de Electricidad. 1993. Diseño por sismo, Cap. 3, Manual de Diseño de Obras Civiles. Comisión Federal de Electricidad, México.
- Comisión Federal de Electricidad. 2008. Diseño por sismo, Cap. 3, Manual de Diseño de Obras Civiles. Comisión Federal de Electricidad, México.
- Cruz-Jiménez, H, F. J. Chávez-García y T. Furumura. 2009. Differences in attenuation of ground motion perpendicular to the Mexican subduction zone between Colima and Guerrero: An explanation based on numerical modeling. Bulletin of the Seismological Society of America Vol. 99, No.1: 400-406.
- European Commission. 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. SESAME European research project WP12. Project No. EVG1 – CT – 2000-00026 SESAME.
- Evans, J.R., C. R. Hutt, J. R. Steim and R. L. Nigbor. 2008. Method for Calculating Self-Noise Spectra and Operating Range for Seismographic Sensors and Data Acquisitions Units. (Draft of 18 June 2008). Consensus accepted in Hutt, C.R., Nigbor, R.L., and Evans, J.R., eds.. 2009. Proceedings of the guidelines for seismometer testing workshop, Albuquerque, New Mexico, 9–10 May 2005 (“GST2”). U.S. Geological Survey Open-File Report, 2009–1055: 48 p.

- FCEFYN Universidad Nacional de Córdoba (Laboratorio de DSP). 2013. Procesamiento digital de señales. Transformada de Fourier y el algoritmo FFT. www.dsp.efn.unc.edu.ar/documentos/FFT.pdf, último acceso en Septiembre, 2013.
- Ferrer-Toledo, H, F. J. Chávez-García y M. Cárdenas-Soto. 2004. Ground motion in Central Mexico. Path effects due to the Transmexican Volcanic Belt. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada. August 1-6. Paper No. 948.
- Flores, H., J. Aguirre. 2003. SPAC Method: Another alternative to estimate site effect in Mexico city. *Geofísica internacional* Vol. 42 No.2: 227-236.
- Furumura, T., y S. K. Singh. 2002. Regional wave propagation from Mexican subduction zone earthquakes; the attenuation functions for inter-plate and in-slab events. *Bulletin of the Seismological Society of America* Vol. 92, No.6: 2110-2125.
- García, J. D. 2006. Estimación de parámetros de movimiento fuerte del suelo para terremotos interplaca e intraslab en México Central. Memoria para el grado de Doctorado. Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Complutense de Madrid.
- Geopsy Wiki. 2013. Geopsy: H/V and Spectrum Toolboxes: Processing Tab. http://www.geopsy.org/wiki/index.php/Geopsy:_H/V_and_Spectrum_Toolboxes:_Processing_Tab, último acceso en Septiembre 2013.
- González-Martínez, M. y A. Clemente-Chávez. 2013. Técnica de cocientes espectrales: Obtención de funciones de transferencia empírica (FTE) mediante el registro de vibración ambiental. 7o Coloquio de Posgrado: Avances de Jóvenes Investigadores DIPFI-UAQ. ISBN: 978-607-513-086-6.
- Haskell, N. A. 1953. The dispersion of surface waves in multilayered media. *Bulletin of the Seismological Society of America* Vol. 43: 17-34.
- Henry, C.D. and J.J. Aranda-Gómez. 1992. The real southern Basin and Range: mid-to late cenozoic extension in México. *Geology* 20: 701-704.
- Hjörleifsdóttir, V. 2012. Cursos: Análisis de registros sísmicos, Facultad de Ingeniería. <http://usuarios.geofisica.unam.mx/vala/cursos/Cursos.html>, último acceso en Diciembre 2013.
- Iida, M y H. Kawase. 2004. A comprehensive interpretation of strong motions in the Mexican Volcanic Belt. *Bulletin of the Seismological Society of America* Vol.94, No.2: 598-618.
- Irizar-Picón, A. 1999. 5º Curso - Tratamiento de Señal Digital. Capítulo 3: Series y Transformada de Fourier. Capítulo 6: Transformada Discreta de Fourier. <http://www.tecnun.es/asignaturas/tratamiento%20digital/tds5.html>, último acceso en Septiembre, 2013.

- Ismael-Hernández, E., J. Lermo, F.J. Sánchez-Sesma, J. Angulo, D. Vega, J. Martínez y A. Zúñiga. 2011. Estimación de intensidades sísmicas en la ciudad de Apizaco, Tlaxcala, para temblores profundos de fallamiento normal. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Aguascalientes, México.
- Kanai, K. and T. Tanaka. 1954. Measurement of the microtremor. Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ. Vol. 32: 199-209.
- Kanai, K. 1983. Engineering seismology. University of Tokyo Press. Tokyo. 251 pages.
- Lermo, J. and F.J. Chávez-García. 1994. Are Microtremors Useful in site Response Evaluation?. Bulletin of Seismological Society of America Vol. 84 No.5: 1350-1364.
- Lermo, J. and F. M. Limaymanta. 2007. Uso de las funciones de transferencia empíricas (HVNR) obtenidas con microtremores para construir mapas con la clasificación de los terrenos de cimentación para diseño sísmico. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Guerrero, México.
- Lermo, J., J.A. Martínez, J. Angulo, A.R. Zúñiga, R.D. Valle y L.A. Espinosa. 2013. Mapa de isoperiodos y clasificación de terrenos con fines de diseño por sismo para el Municipio de Puebla, Pue. Informe I de I—Nro.R901. Instituto de Ingeniería UNAM. Puebla, México.
- Lozano, L., M. Herraiz y S. K. Singh. 2009. Site effect study in central Mexico using H/V and SSR techniques: Independence of seismic site effects on source characteristics. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 29: 504-516.
- Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of RTRI No. 30: 25-33.
- Nogoshi, M.. and T. Igarashi, 1971. On the amplitude characteristics of microrremor (Part 2). Jour. Seism. Soc. Japan, 24: 26-40 (in Japanese with English abstract).
- Oppenheim, A.V., and R.W. Schafer. 1999. *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Ordaz, M., J. M. Jara y S. K. Singh. 1989. Riesgo sísmico y espectros de diseño en el Estado de Guerrero. Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Acapulco, México. Pp. D40-D56.
- Ordaz, M, y S. K. Singh. 1992. Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City. Bulletin of the Seismological Society of America Vol.82, No.1: 24-43.
- Pacheco M., J. 2007. Modelo de subsidencia del Valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales. Tesis de Doctorado. UNAM, Centro de Geociencias.

- Peterson, J. 1993. Observations and modeling of seismic background noise. U.S. Department of interior geological survey. Open file report 93-322. Albuquerque, New Mexico.
- Philips, W. S., K. Aki. 1986. Site amplification of coda waves from local earthquake in Central California. Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 76 No.3: 627-648.
- Poder Ejecutivo del Estado de Querétaro. 2010. Plan Querétaro 2010-2015. Plan estatal de desarrollo. Santiago de Querétaro, Qro.
- Real-Pérez, J. A. 2010. Caracterización de niveles de ruido en estaciones sismológicas del proyecto MASE. Tesis de licenciatura. UNAM, División de ingeniería en ciencias de la tierra.
- Rengifo-Mora, F. A., C. Y. Abil, L.E. Franco-Marín. 2013. Análisis cuantitativo del ruido sísmico en las estaciones sismológicas de la red sismológica nacional de Colombia. <http://bdrsnc.ingecominas.gov.co/publicaRSNC/>, último acceso en Noviembre 2013.
- Rocha U., E. 2011. Conformación de la base de datos sísmicos para los registros de la estación JUR1, Juriquilla Querétaro. Tesis de Licenciatura. UAQ, Facultad de Ingeniería.
- Seed H.B., R. Murarka, J. Lysmer and I. M. Idriss. 1976. Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source, and local site conditions for moderately strong earthquakes. Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 66 No. 4: 1323-1342.
- Shapiro, N. M., M. Campillo, A. Paul, S. K. Singh, D. Jongmans y F.J. Sánchez-Sesma. 1997. Surface-wave propagation across the Mexican Volcanic Belt and the origin of the long-period seismic-wave amplification in the Valley of Mexico. Geophysical Journal International Vol. 128, No.1: 151-166.
- Smith, S. W. 1999. The scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing (2nd edition). California Technical Publishing, San Diego, California.
- Su, F., K. Aki, T. Teng, Y. Zeng, S. Koyanagi, K. Mayeda. 1992. The relation between site amplification factor and surficial geology in Central California. Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 82 No.2: 580-602.
- Welch, P.D. 1967. The use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms. Reprinted from IEEE Trans. Audio and Electroacoust., vol. AU-15: 70-73.
- Zeevaert, W. L. 1991. Interacción suelo-estructura de cimentación. Limusa, México.
- Zúñiga, F. R., J. F. Pacheco, M. Guzmán-Speziale, G. J. Aguirre-Díaz, V. H. Espíndola y E. Nava. 2003. The Sanfandila earthquake sequence of 1998, Queretaro, Mexico: activation of an undocumented fault in the northern edge of central Trans-Mexican Volcanic Belt. Tectonophysics 361: 229-238.

APÉNDICE 1. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS Y ESPECTROS DE DENSIDAD DE POTENCIA DE REGISTROS SÍSMICOS.

A continuación se colocan las trazas sísmicas, así como las Funciones de Transferencia Empíricas (FTE) obtenidas de los nueve registros sísmicos registrados en la estación JUR1 y el obtenido en la estación CU-UAQ (Ver listado de eventos en la Tabla A.1) de la ventana cargada de ondas de cuerpo en la traza sísmica como se explicó previamente en el Capítulo 4.2.1. Se imprimirá exclusivamente la banda entre 0.1 y 10 Hz en vista de la banda de interés para cuestiones de efecto de sitio es entre 0.2 y 10Hz (Bonney-Claudet et al., 2006).

Tabla A.1. Registros sísmicos utilizados para la generación de la FTE mediante la técnica HVSR.

Estado	Fecha	Hora UTC (Hrs)	Magnitud (Md)	Zona
JUR1				
BCN	04/04/2010	22:40:42	7.2	23 Km al Sureste de Mexicali, BC
GRO	27/04/2009	16:46:27	5.7	26 Km al Noroeste de San Marcos, Gro.
	23/11/2009	01:56:48	4.6	28 Km al Suroeste de Zihuatanejo, Gro.
	14/04/2010	05:16:14	4.9	43 Km al Noroeste de Zihuatanejo, Gro.
	28/06/2010	11:04:32	4.4	Costa Guerrero-Michoacan.
HGO	17/04/2010	07:03:29	4.1	13 Km al Norte de Actopan, Hgo.
	18/05/2010	05:29:11	4.3	11 Km al Oeste de Actopan, Hgo.
	18/05/2010	05:32:37	3.6	10 Km al Norte de Actopan, Hgo.
	20/05/2010	21:11:03	3.9	Estado de Hgo.
CU- UAQ				
GRO	01/05/2012	16:37:59	5.6	40 Km al Suroeste de Cd Altamirano, Gro, México.

Cada FTE se acompaña con los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de cada componente de registro mostrada en línea negra continua, incluyendo los modelos alto (NHNM) y bajo (NLNM) de Peterson (1993) en línea punteada a fin de comparar la potencia generada por el sismo contra el ruido ambiental categorizado de la estación en línea gris (20 min por mes en el lapso entre Abril 2009 y Junio 2010 a las 19:00 hrs UTC). Para el registro de la estación CU-UAQ no se realizó este análisis por no tenerse datos de ruido de la estación suficientes como para poder categorizarla. Cabe mencionar que cuando el PSD del registro sísmico se encuentre cercano al orden de amplitud que el PSD del ruido de la estación, los

registros pierden certidumbre en esta banda de frecuencias por estar dominados por el ruido ambiental de la estación.

Como interpretación del gráfico de PSD se puede observar en el sismo de Baja California Norte (Figura A.1a) como la energía representada por el PSD de la componente Norte y Este del sismo sobrepasa al ruido ambiental en frecuencias $< 2\text{Hz}$ mientras que la componente Vertical lo hace en frecuencias $< 1.5\text{Hz}$. Por lo tanto, los picos exhibidos por la FTE en frecuencias superiores a 1Hz para este caso se encuentran dominados por el ruido ambiental del área.

Sismos de la estación JUR1.

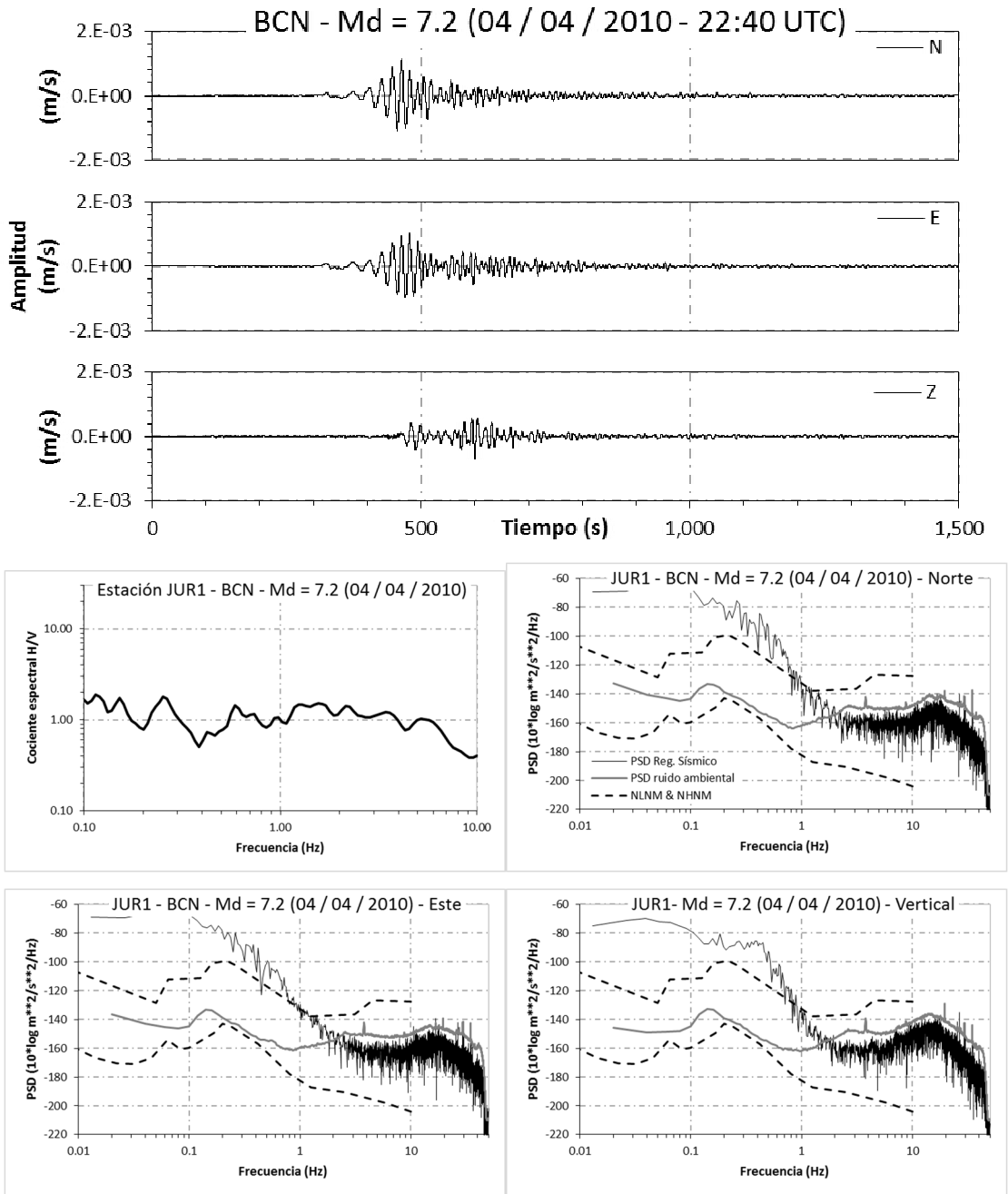


Figura A.1a. Análisis de evento ocurrido en Baja California Norte el día 04 de Abril de 2010 (Md = 7.2) registrado en la estación JUR1. En la parte superior se muestra la traza sísmica y en la inferior se muestra la Función de Transferencia Empírica (FTE) y los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de Cada componente (en negro el PSD del evento sísmico, en gris el PSD del ruido ambiental en la estación).

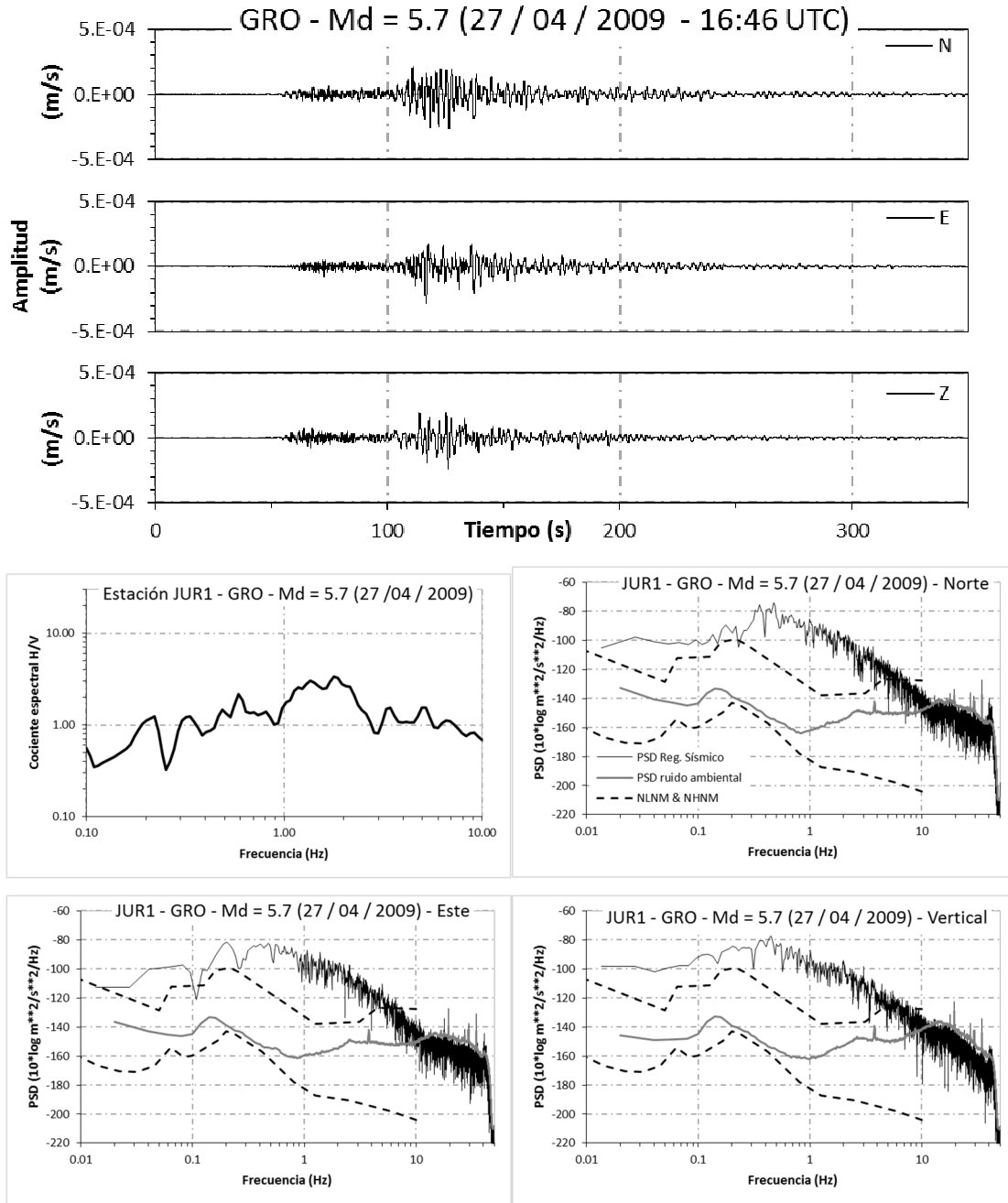


Figura A.1b. Análisis de evento ocurrido en Guerrero el día 27 de Abril de 2009 (Md = 5.7) registrado en la estación JUR1. En la parte superior se muestra la traza sísmica y en la inferior se muestra la Función de Transferencia Empírica (FTE) y los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de Cada componente (en negro el PSD del evento sísmico, en gris el PSD del ruido ambiental en la estación).

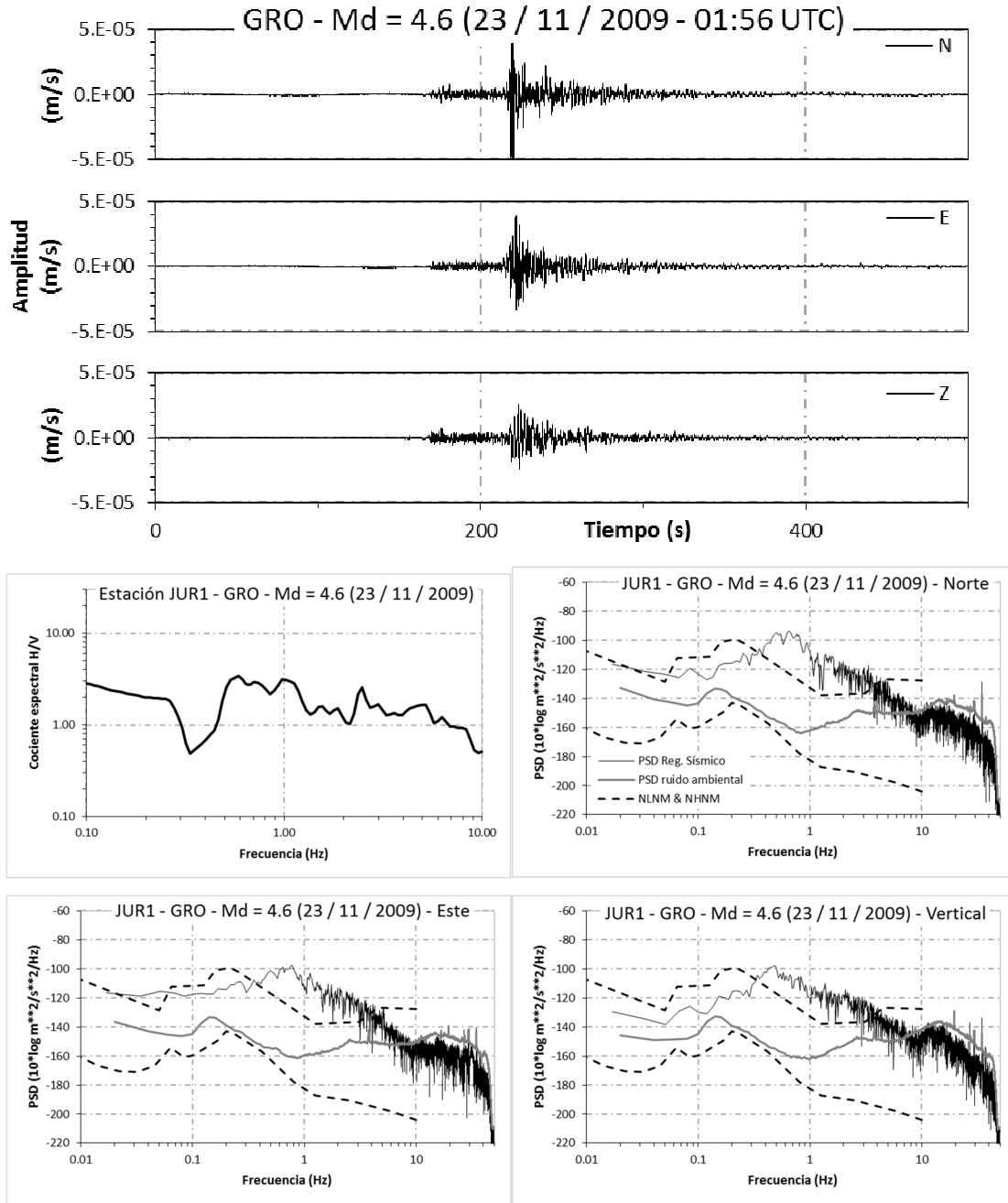


Figura A.1c. Análisis de evento ocurrido en Guerrero el día 23 de Noviembre de 2009 (Md = 4.6) registrado en la estación JUR1. En la parte superior se muestra la traza sísmica y en la inferior se muestra la Función de Transferencia Empírica (FTE) y los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de Cada componente (en negro el PSD del evento sísmico, en gris el PSD del ruido ambiental en la estación).

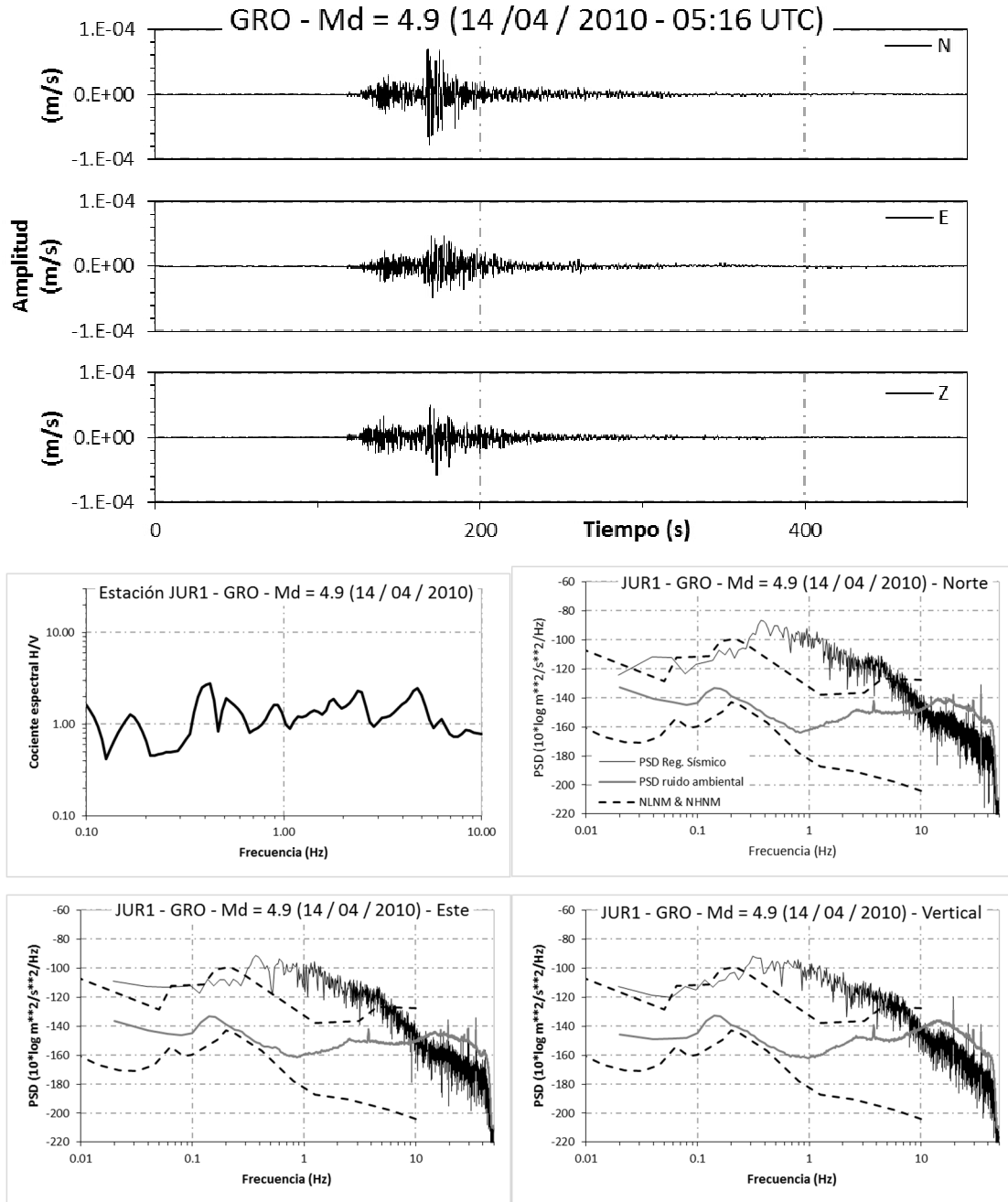


Figura A.1d. Análisis de evento ocurrido en Guerrero el día 14 de Abril de 2010 (Md = 4.9) registrado en la estación JUR1. En la parte superior se muestra la traza sísmica y en la inferior se muestra la Función de Transferencia Empírica (FTE) y los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de Cada componente (en negro el PSD del evento sísmico, en gris el PSD del ruido ambiental en la estación).

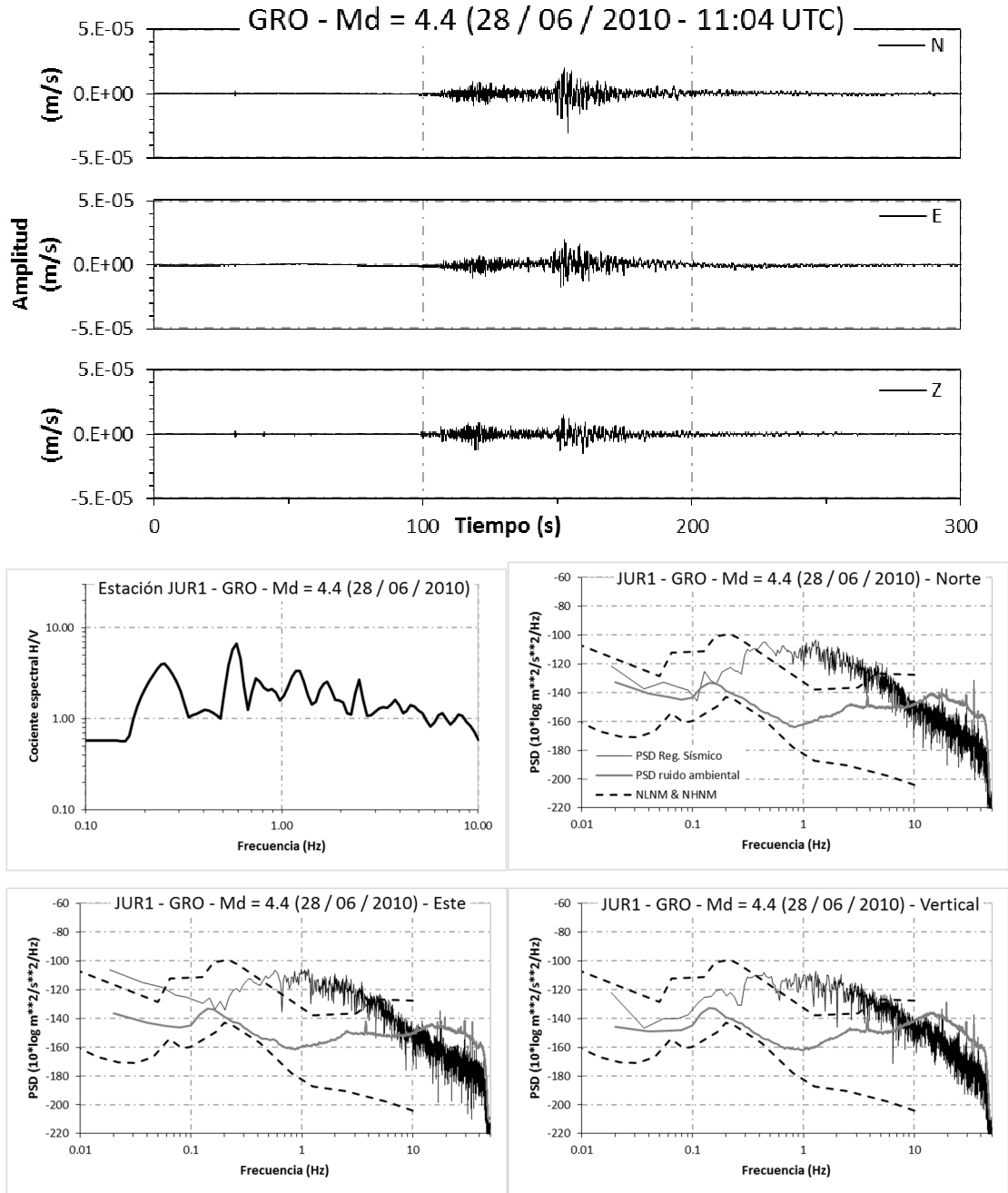


Figura A.1e. Análisis de evento ocurrido en Guerrero el día 28 de Junio de 2010 (Md = 4.4) registrado en la estación JUR1. En la parte superior se muestra la traza sísmica y en la inferior se muestra la Función de Transferencia Empírica (FTE) y los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de Cada componente (en negro el PSD del evento sísmico, en gris el PSD del ruido ambiental en la estación).

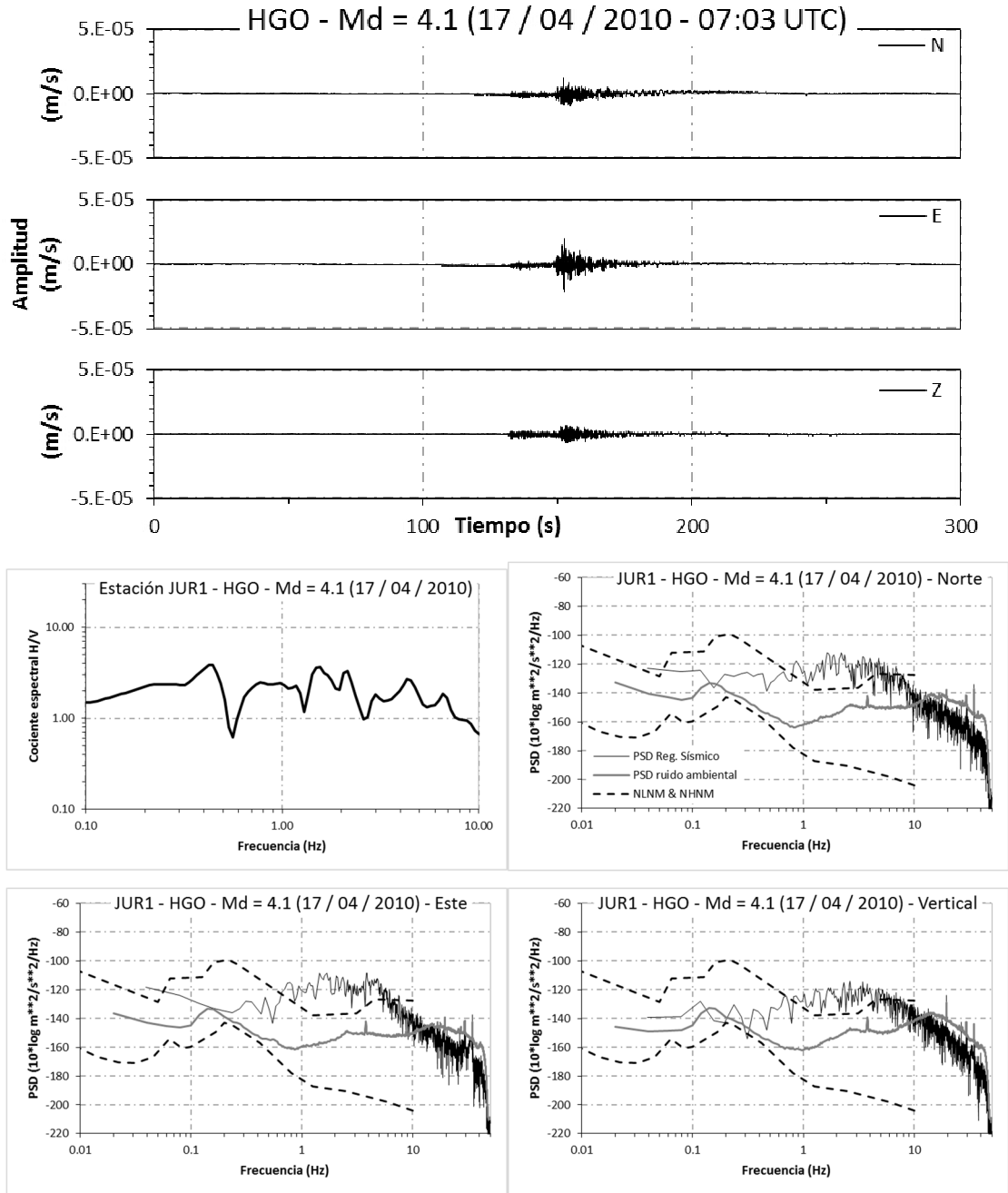


Figura A.1f. Análisis de evento ocurrido en Hidalgo el día 17 de Abril de 2010 (Md = 4.1) registrado en la estación JUR1. En la parte superior se muestra la traza sísmica y en la inferior se muestra la Función de Transferencia Empírica (FTE) y los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de Cada componente (en negro el PSD del evento sísmico, en gris el PSD del ruido ambiental en la estación).

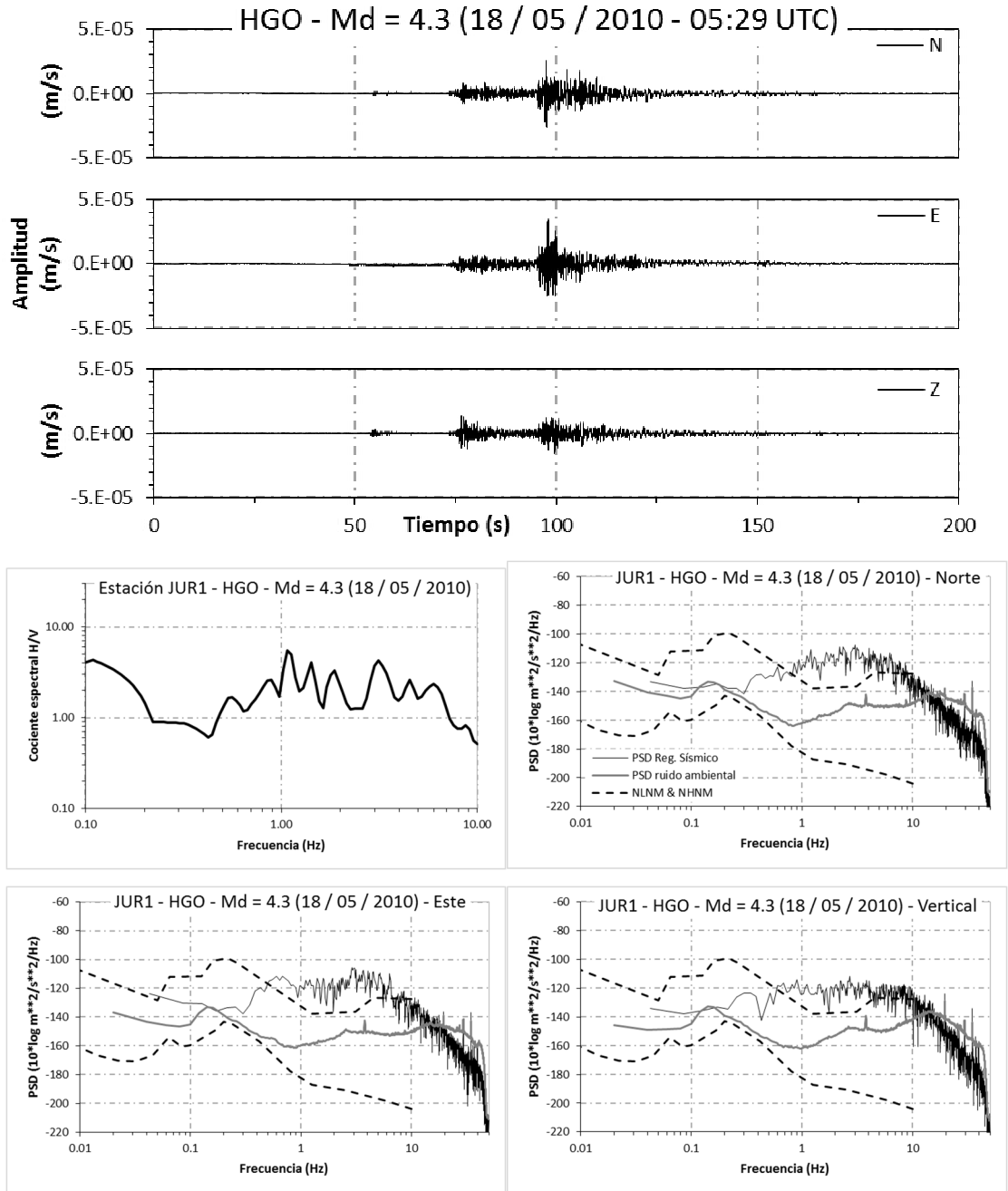


Figura A.1g. Análisis de evento ocurrido en Hidalgo el día 18 de Mayo de 2010 (Md = 4.3) registrado en la estación JUR1. En la parte superior se muestra la traza sísmica y en la inferior se muestra la Función de Transferencia Empírica (FTE) y los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de Cada componente (en negro el PSD del evento sísmico, en gris el PSD del ruido ambiental en la estación).

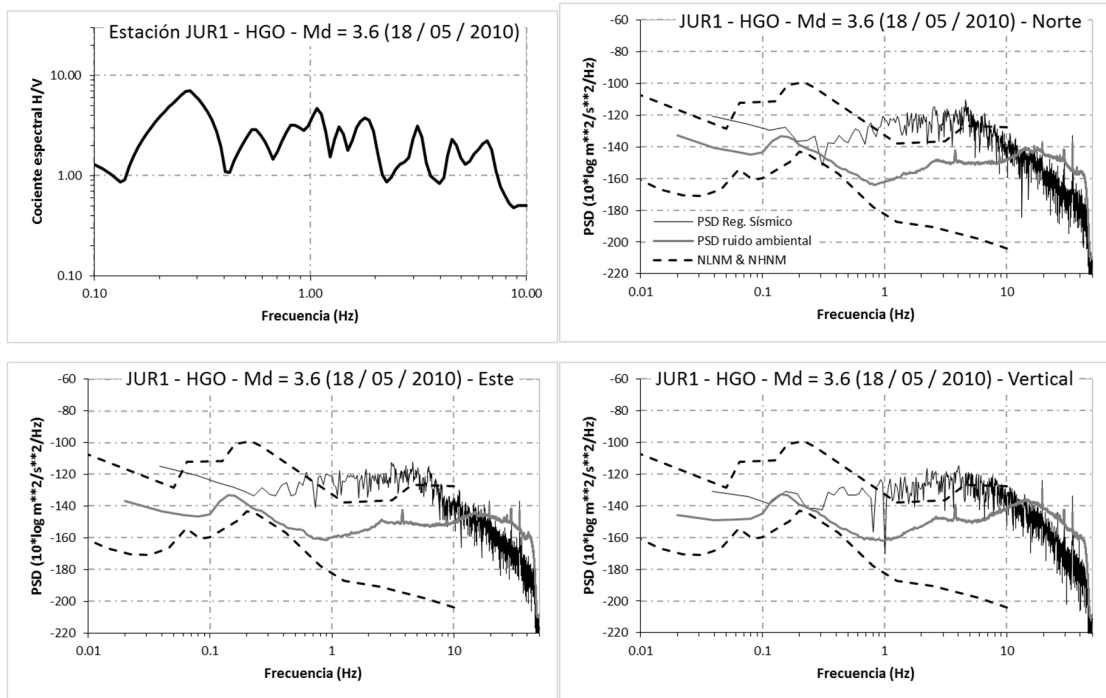
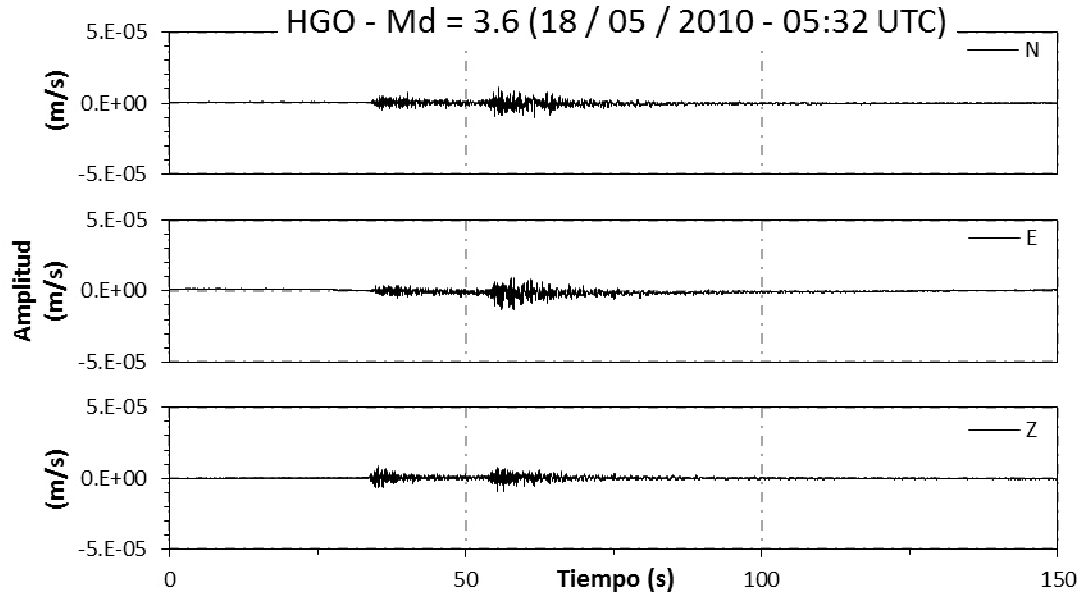


Figura A.1h. Análisis de evento ocurrido en Hidalgo el día 18 de Mayo de 2010 (Md = 3.6) registrado en la estación JUR1. En la parte superior se muestra la traza sísmica y en la inferior se muestra la Función de Transferencia Empírica (FTE) y los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de Cada componente (en negro el PSD del evento sísmico, en gris el PSD del ruido ambiental en la estación).

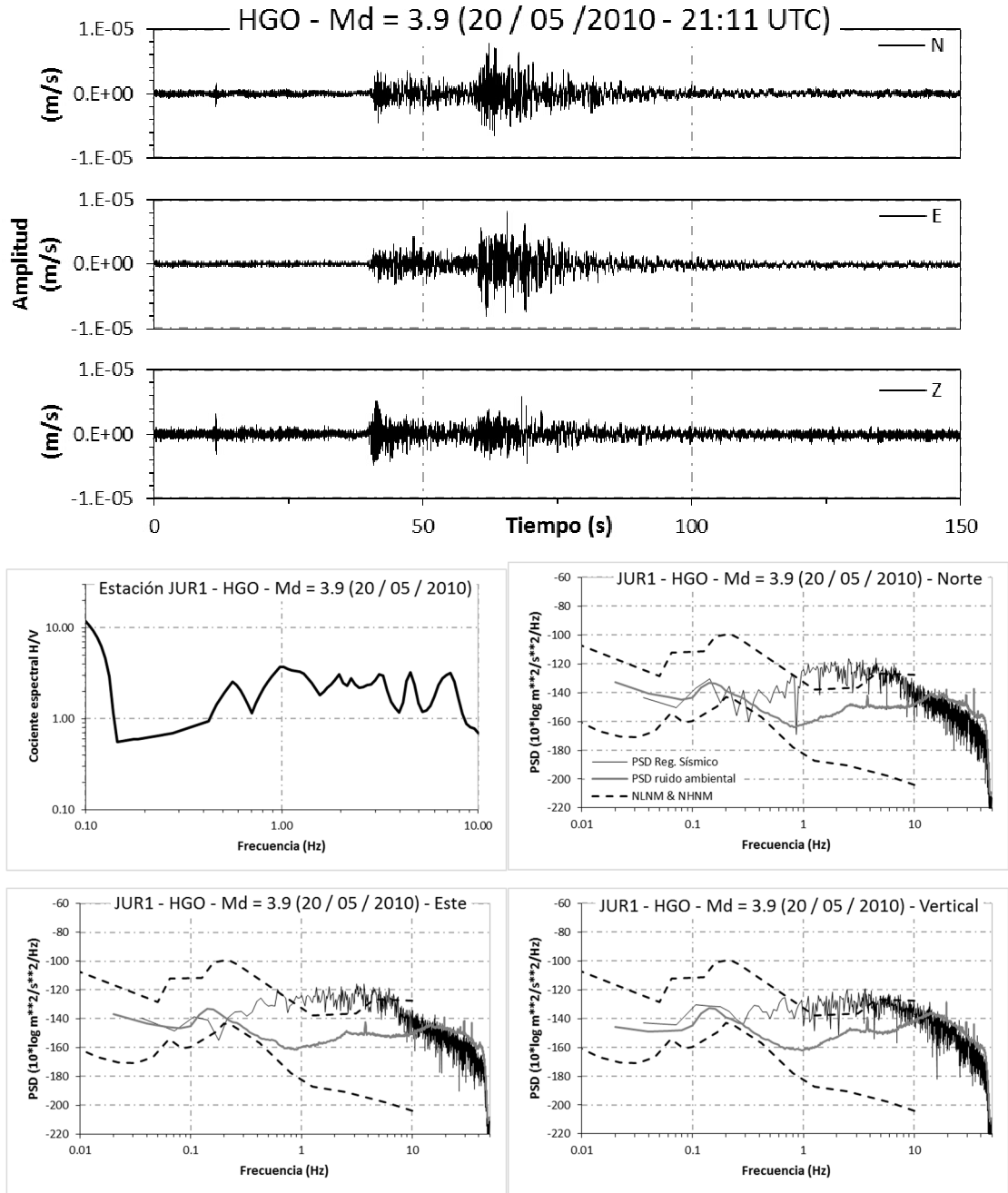


Figura A.1i. Análisis de evento ocurrido en Hidalgo el día 20 de Mayo de 2010 (Md = 3.9) registrado en la estación JUR1. En la parte superior se muestra la traza sísmica y en la inferior se muestra la Función de Transferencia Empírica (FTE) y los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de Cada componente (en negro el PSD del evento sísmico, en gris el PSD del ruido ambiental en la estación).

Sismo en la estación CU-UAQ.

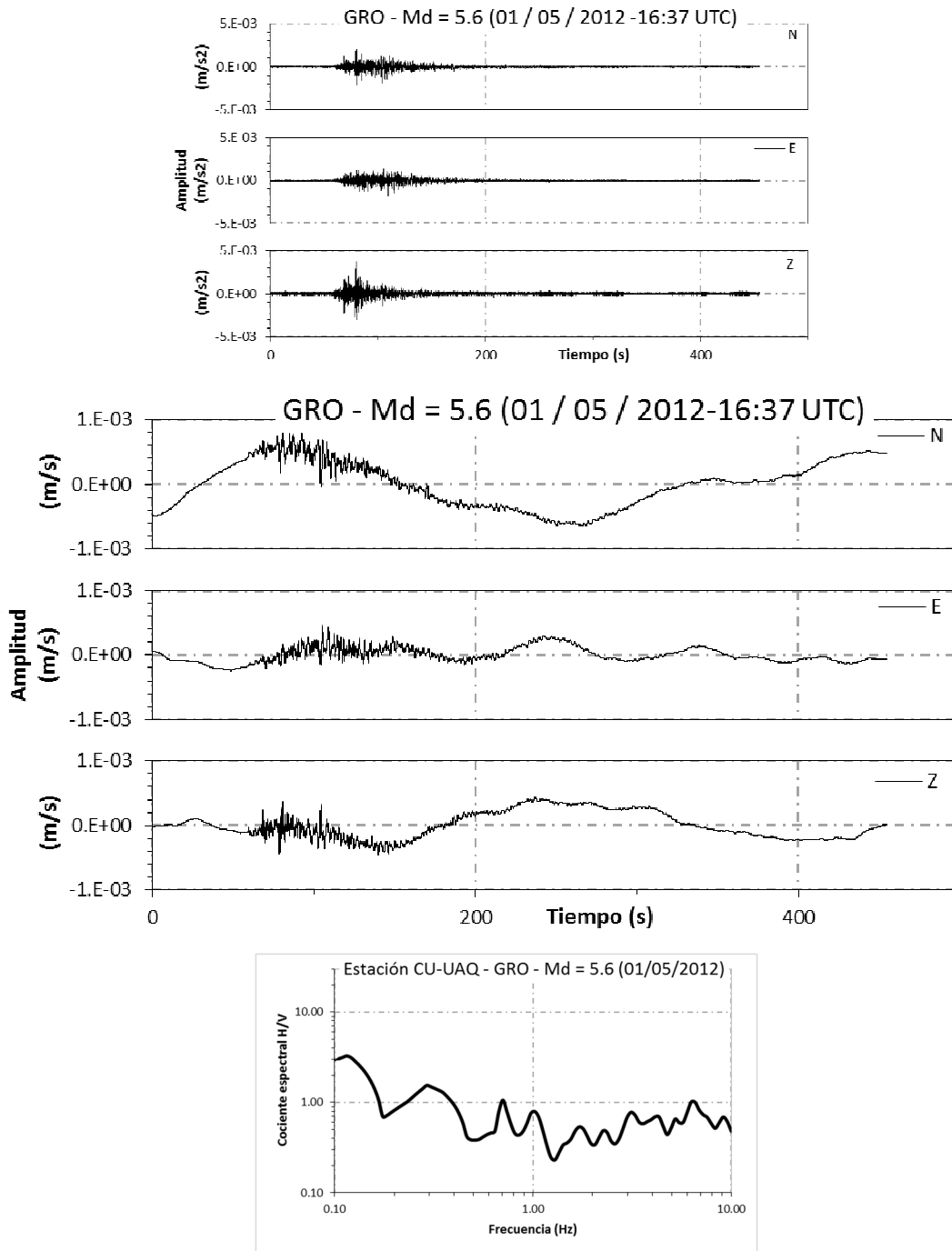


Figura A.1j. Análisis de evento ocurrido en Guerrero el día 01 de Mayo de 2012 (Md = 5.6) registrado en la estación JUR1. En la parte superior se muestra la traza sísmica en unidades de aceleración según la entrega el equipo Altus K-2, posteriormente se integra la señal para obtener la traza en unidades de velocidad y en la parte inferior se muestra la Función de Transferencia Empírica (FTE) del evento.

APÉNDICE 2. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS Y ESPECTROS DE DENSIDAD DE POTENCIA DE LOS REGISTROS DE RUIDO AMBIENTAL.

A continuación se colocan las Funciones de Transferencia Empíricas (FTE) obtenidas en cada estación mostrando con línea negra la media aritmética y con línea punteada la desviación estándar obtenida del proceso de ventaneo del registro de ruido como se explicó previamente en el Capítulo 4.2.1. Se marca la posición del pico que se considera define la frecuencia fundamental del sitio en el área de interés entre 0.2 y 10Hz (Bonney-Claudet et al., 2006).

Se acompaña cada FTE con los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de cada componente del registro mostrada en línea negra gruesa, incluyendo los modelos alto (NHNM) y bajo (NLNM) de Peterson (1993) en línea punteada a fin de comparar el nivel de energía del ruido ambiental registrado en la estación contra el parámetro global. El ruido electrónico del sismógrafo Sara (SS05 / SR04) se muestra en línea continua delgada con el interés de visualizar la certeza de los datos registrados por el equipo. Cabe mencionar que cuando el PSD del registro se encuentra cercano al orden de amplitud que el del ruido electrónico del instrumento los registros pierden certidumbre en ese rango de frecuencias por estar propensos al dominio del ruido instrumental.

Como interpretación del gráfico de PSD se puede observar en la Estación 3A (Figura A.2a) como la energía representada por el PSD de la componente Norte sobrepasa al ruido electrónico en frecuencias $> 0.1\text{Hz}$ mientras que la componente Este lo hace en frecuencias $> 0.2\text{Hz}$ y la Vertical para $> 0.7\text{Hz}$. Por lo tanto, el pico que exhibe la FTE de esta estación en 0.09 Hz se entiende reducido en magnitud debido a la influencia del ruido electrónico a esta frecuencia en la componente vertical. Cabe mencionar que debido a la influencia del oleaje en los registros de ruido ya mencionado previamente en el Capítulo 4.3, los picos que marcan la frecuencia fundamental se encontrarán en un rango entre 0.2 y 10Hz.

Familia de sedimentos con $f_0 \approx 0.5$ y 3Hz (2 y 0.33s).

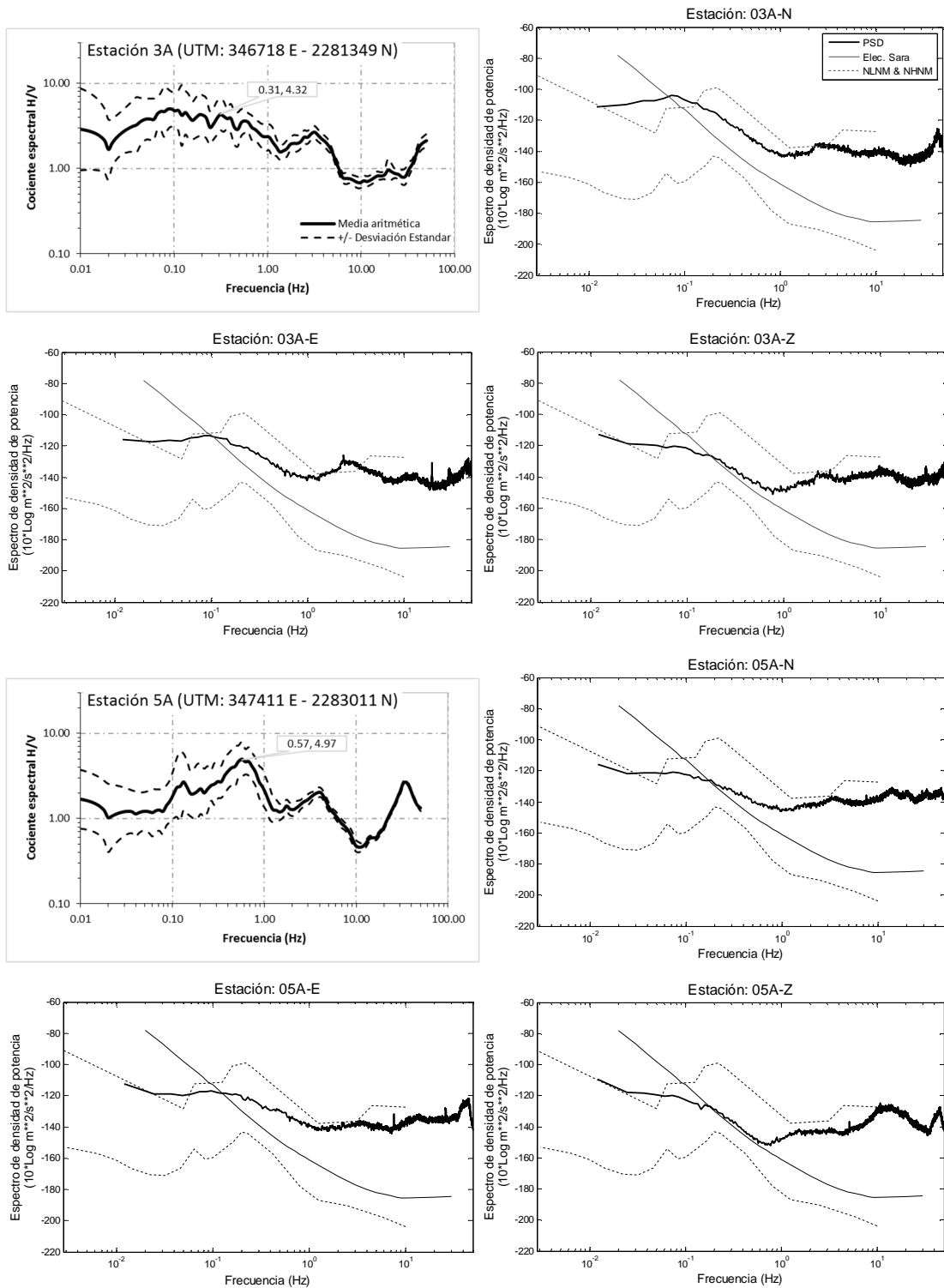


Figura A.2a. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en esa banda de frecuencias.

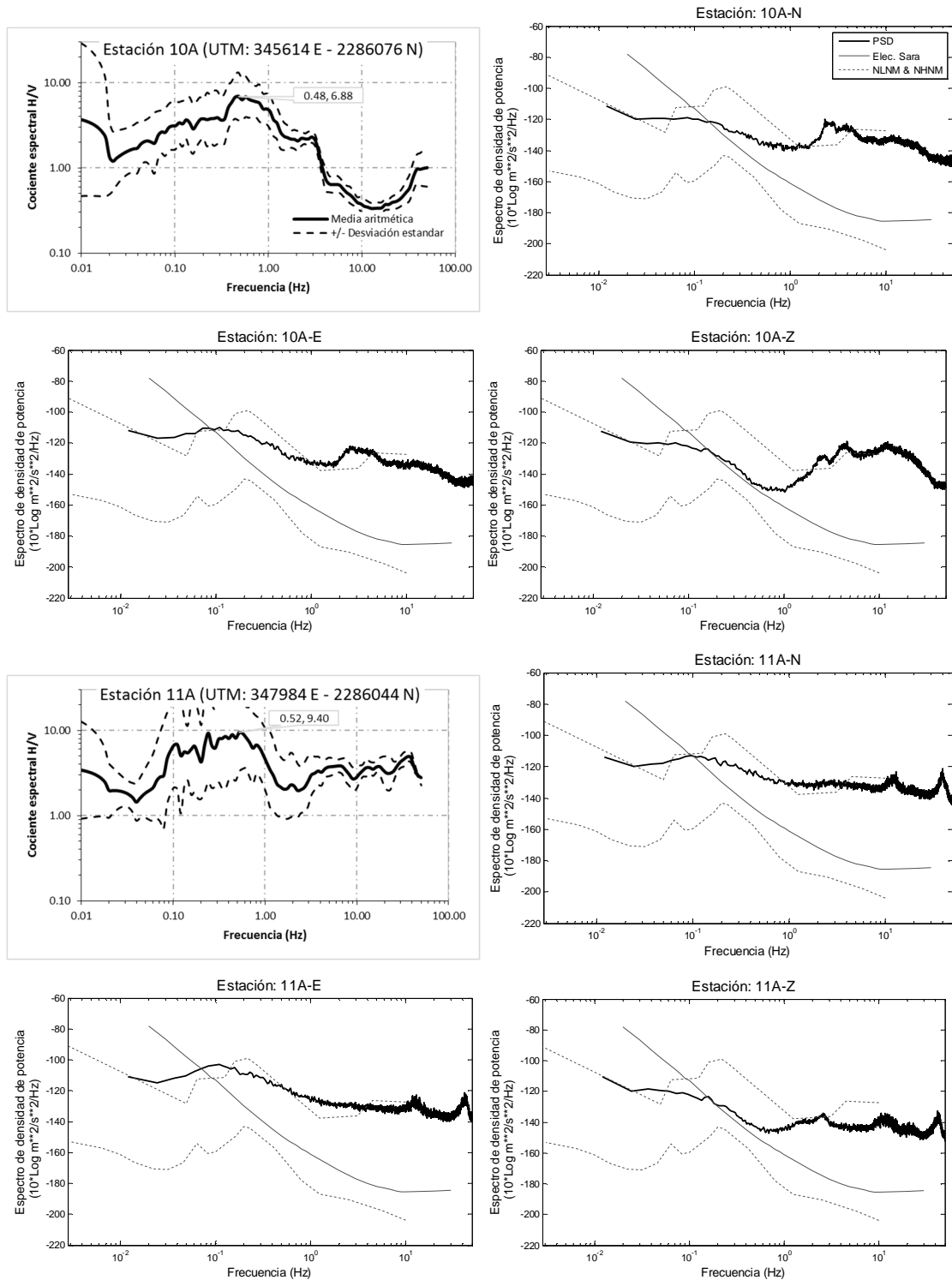


Figura A.2b. Cont. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en el registro en esa banda de frecuencias.

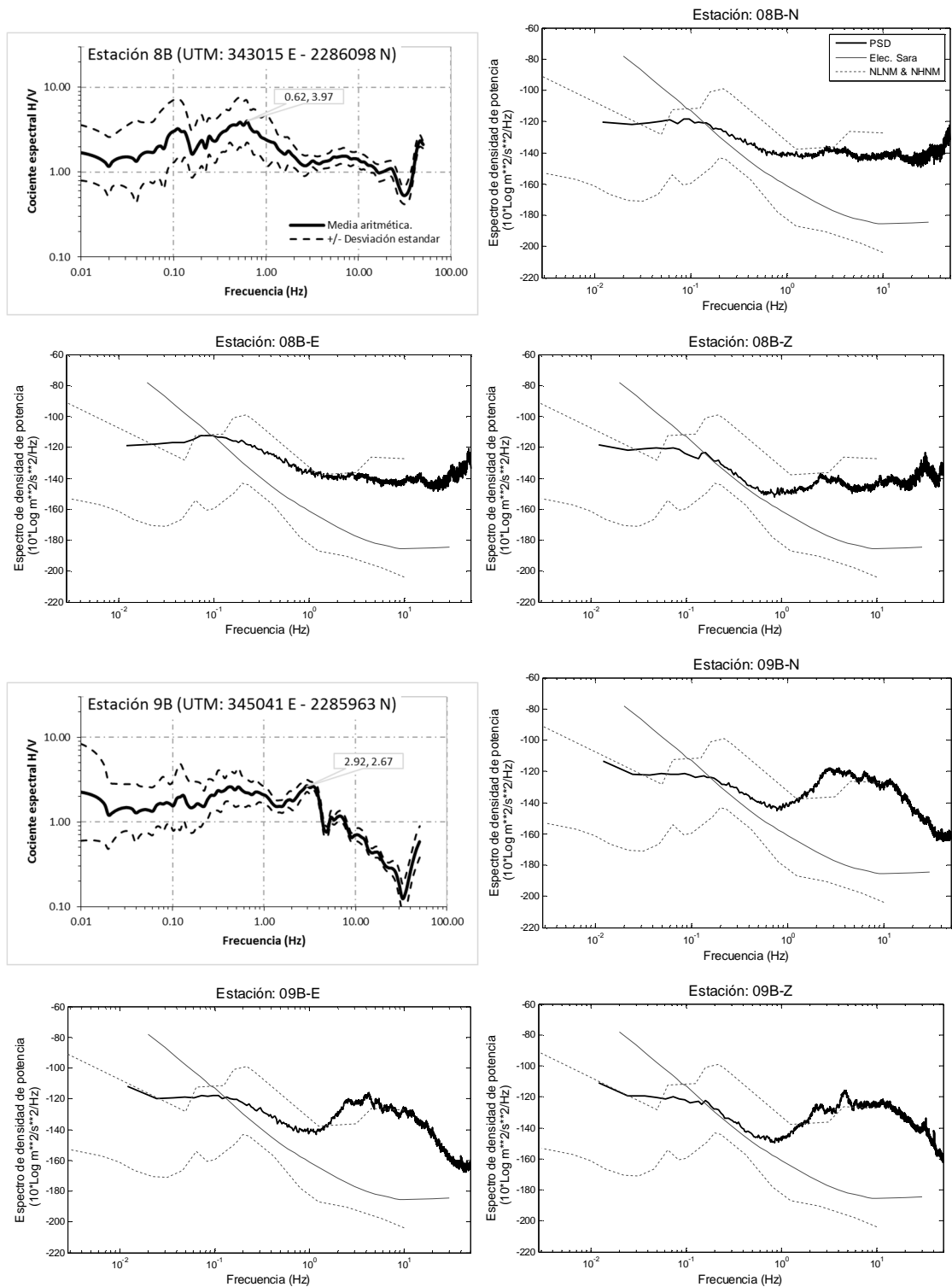


Figura A.2c. Cont. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en el registro en esa banda de frecuencias.

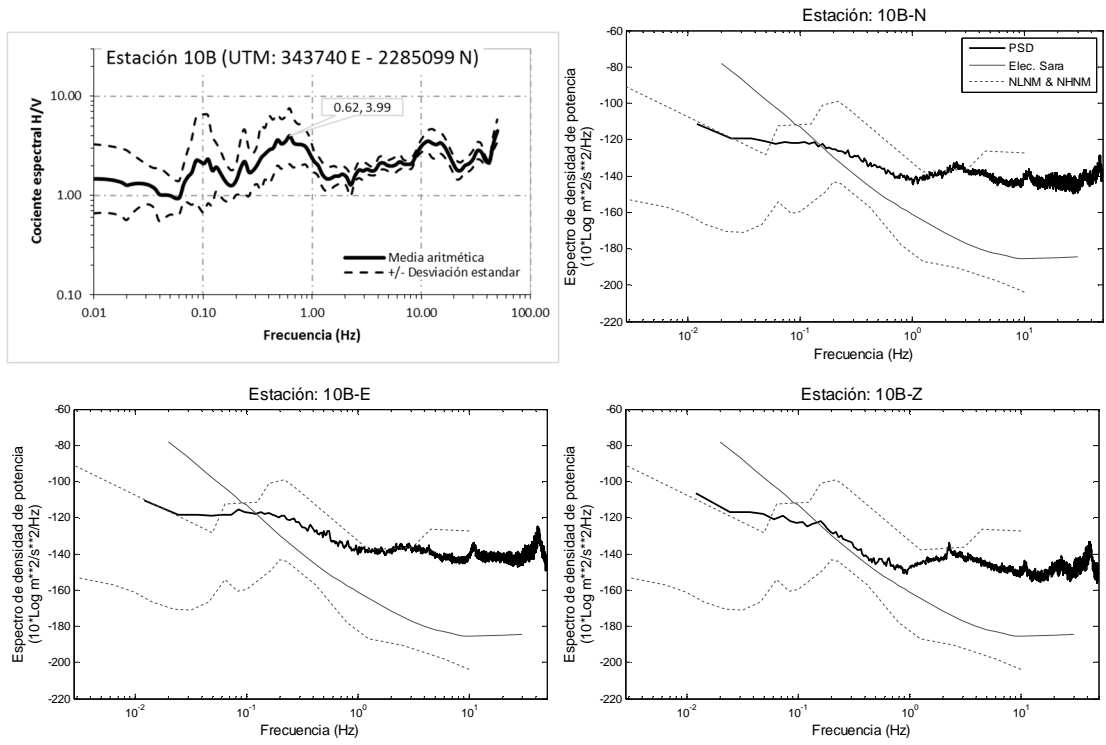


Figura A.2d. Cont. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en el registro en esa banda de frecuencias.

Familia de sedimentos con $f_0 \approx 0.5$ (2s).

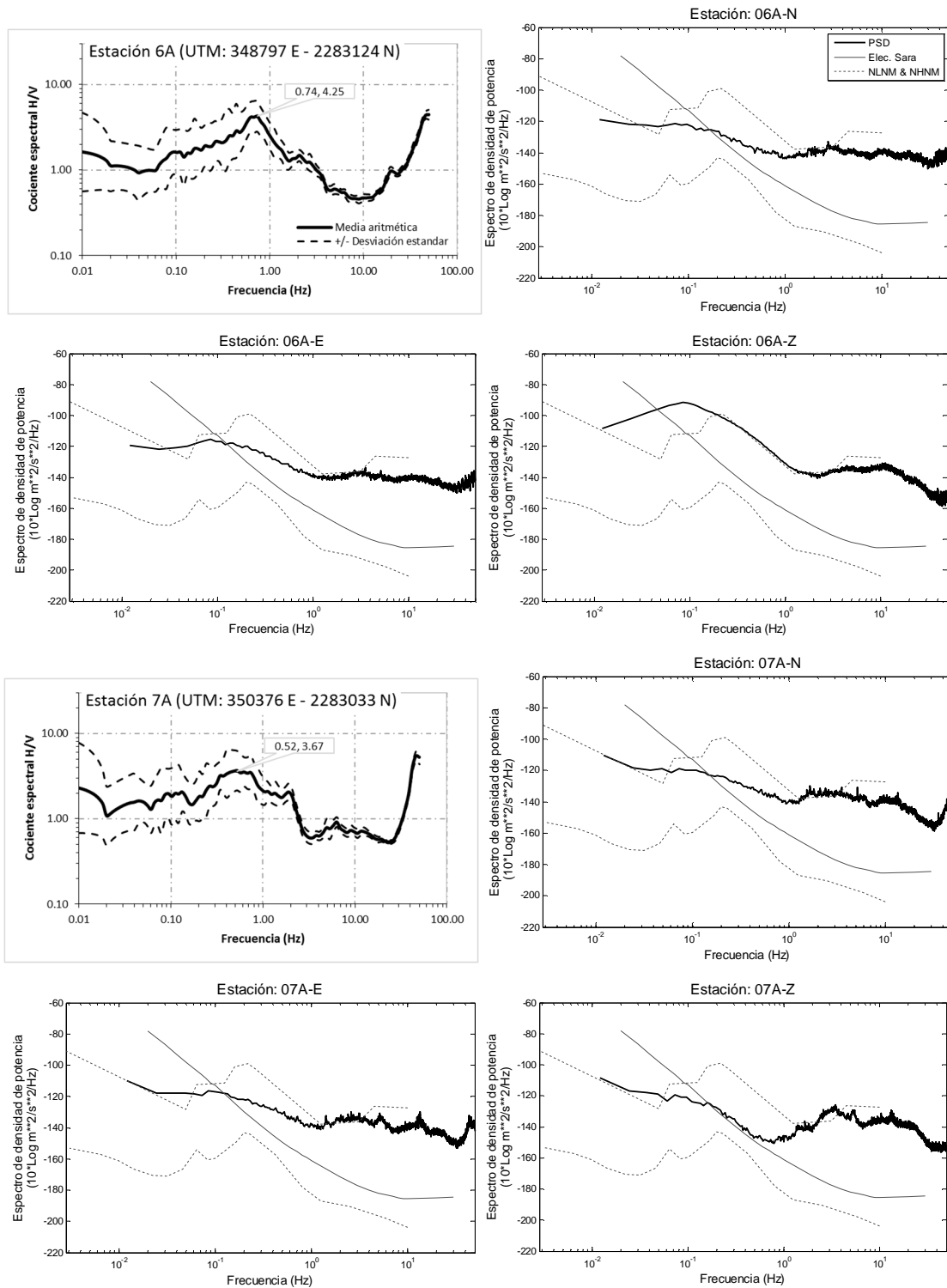


Figura A.2e. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en esa banda de frecuencias.

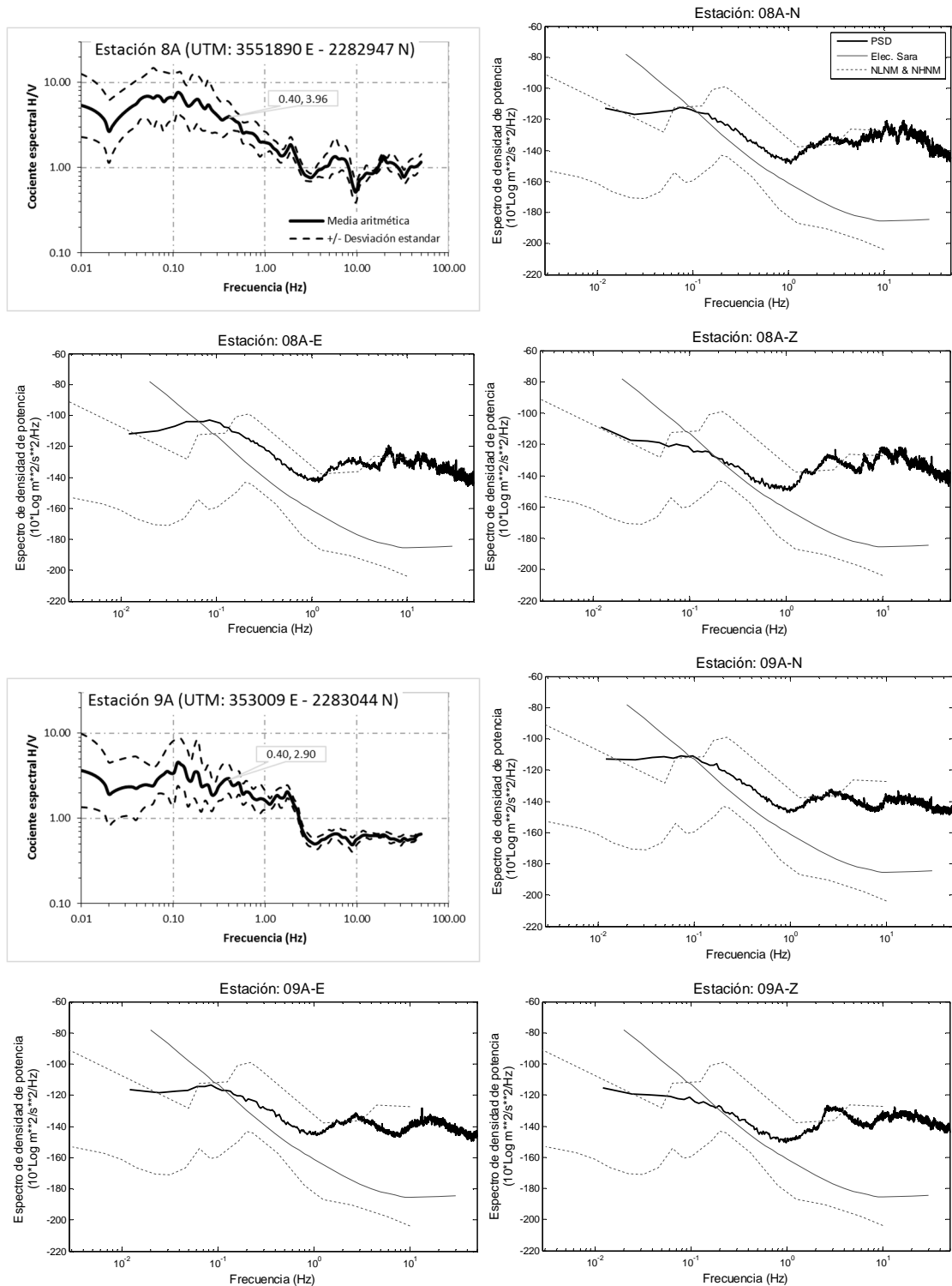


Figura A.2f. Cont. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en el registro en esa banda de frecuencias.

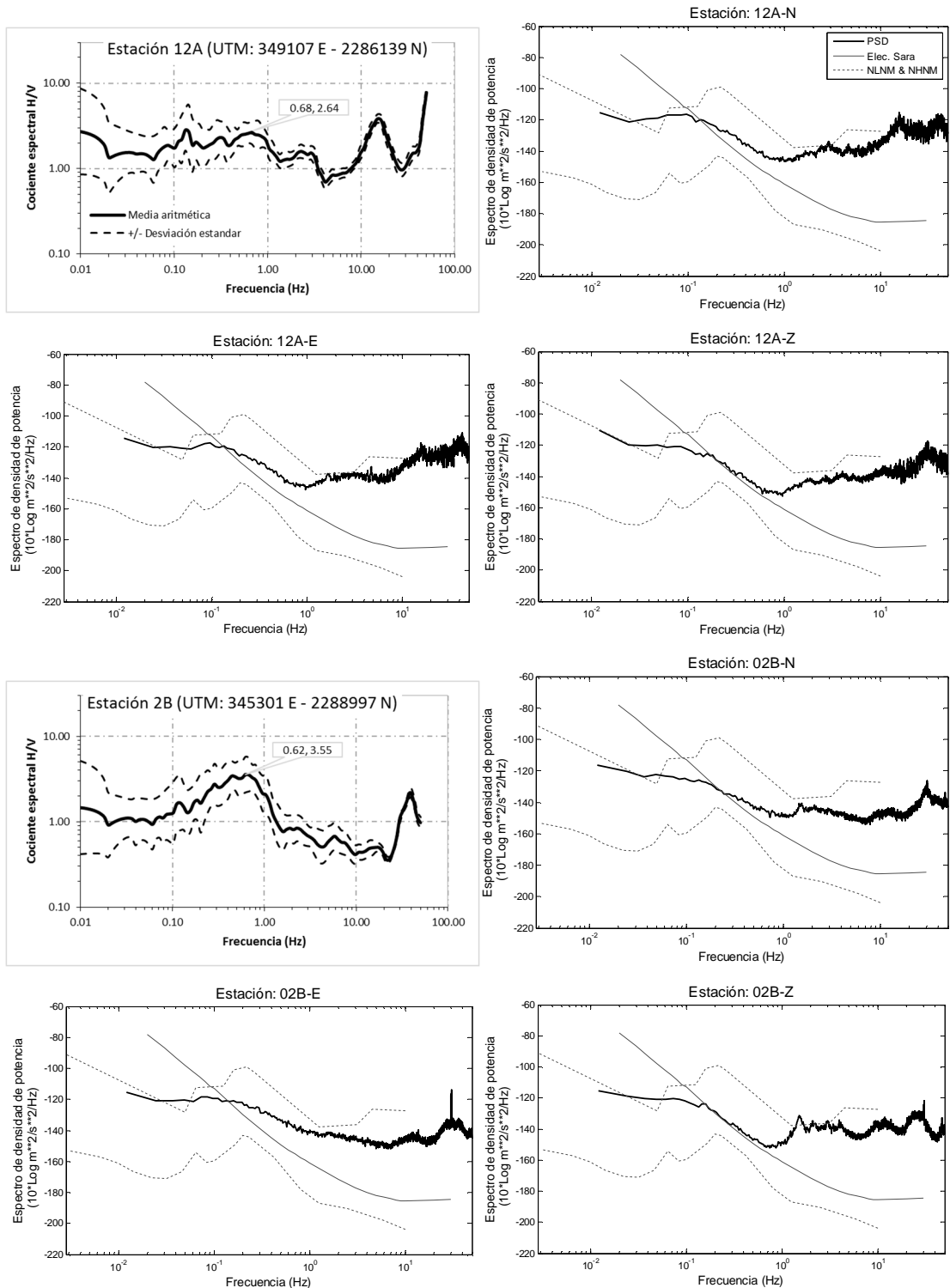


Figura A.2g. Cont. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en el registro en esa banda de frecuencias.

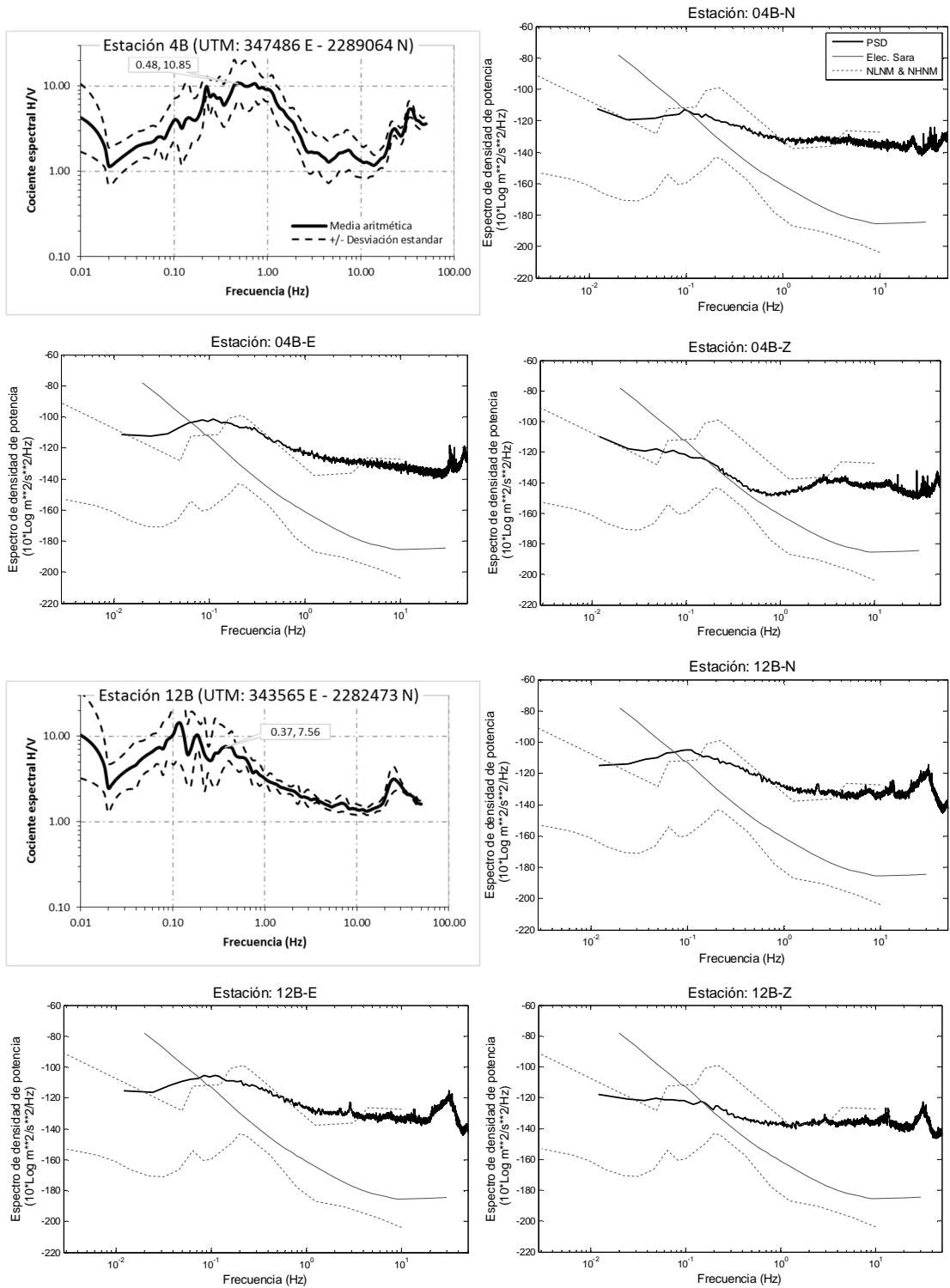


Figura A.2h. Cont. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en el registro en esa banda de frecuencias.

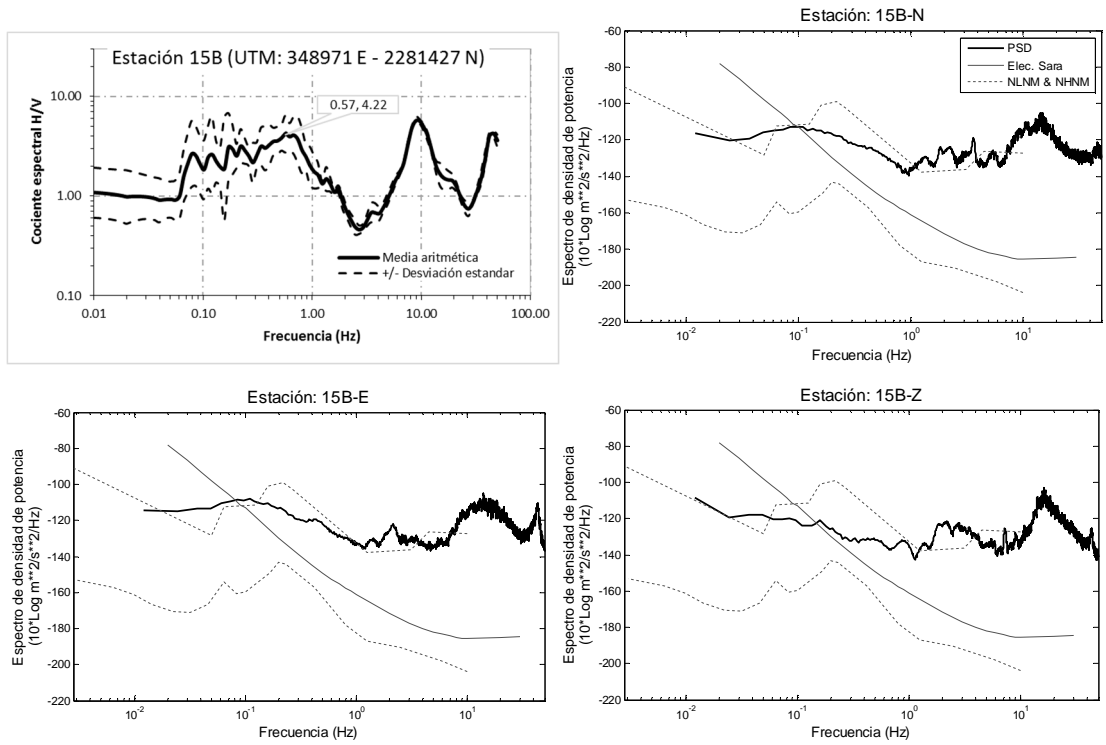


Figura A.2i. Cont. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en el registro en esa banda de frecuencias.

Familia de sedimentos con $f_0 \approx 1$ y 3Hz (1 y 0.33s).

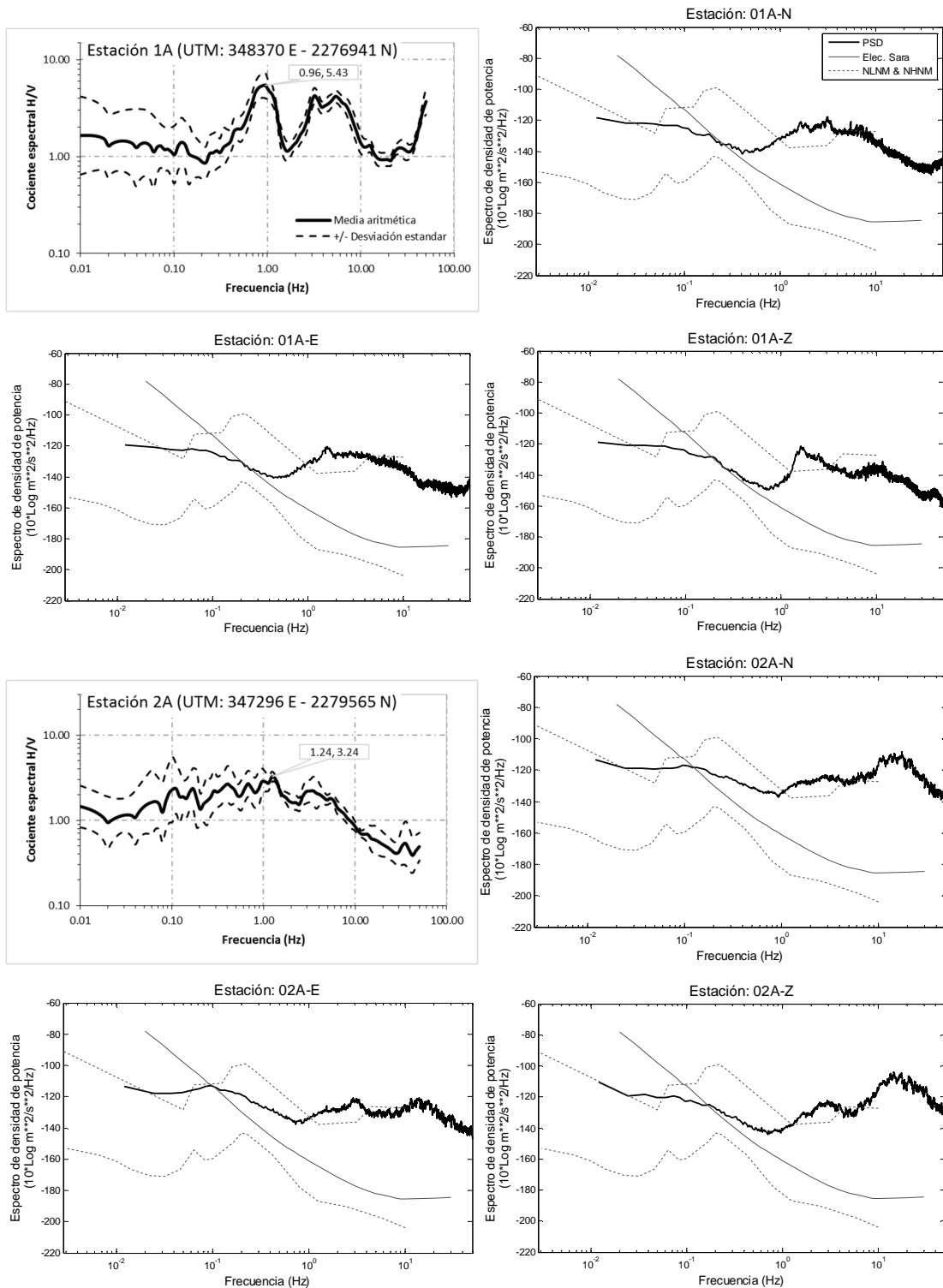


Figura A.2j. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en el registro en esa banda de frecuencias.

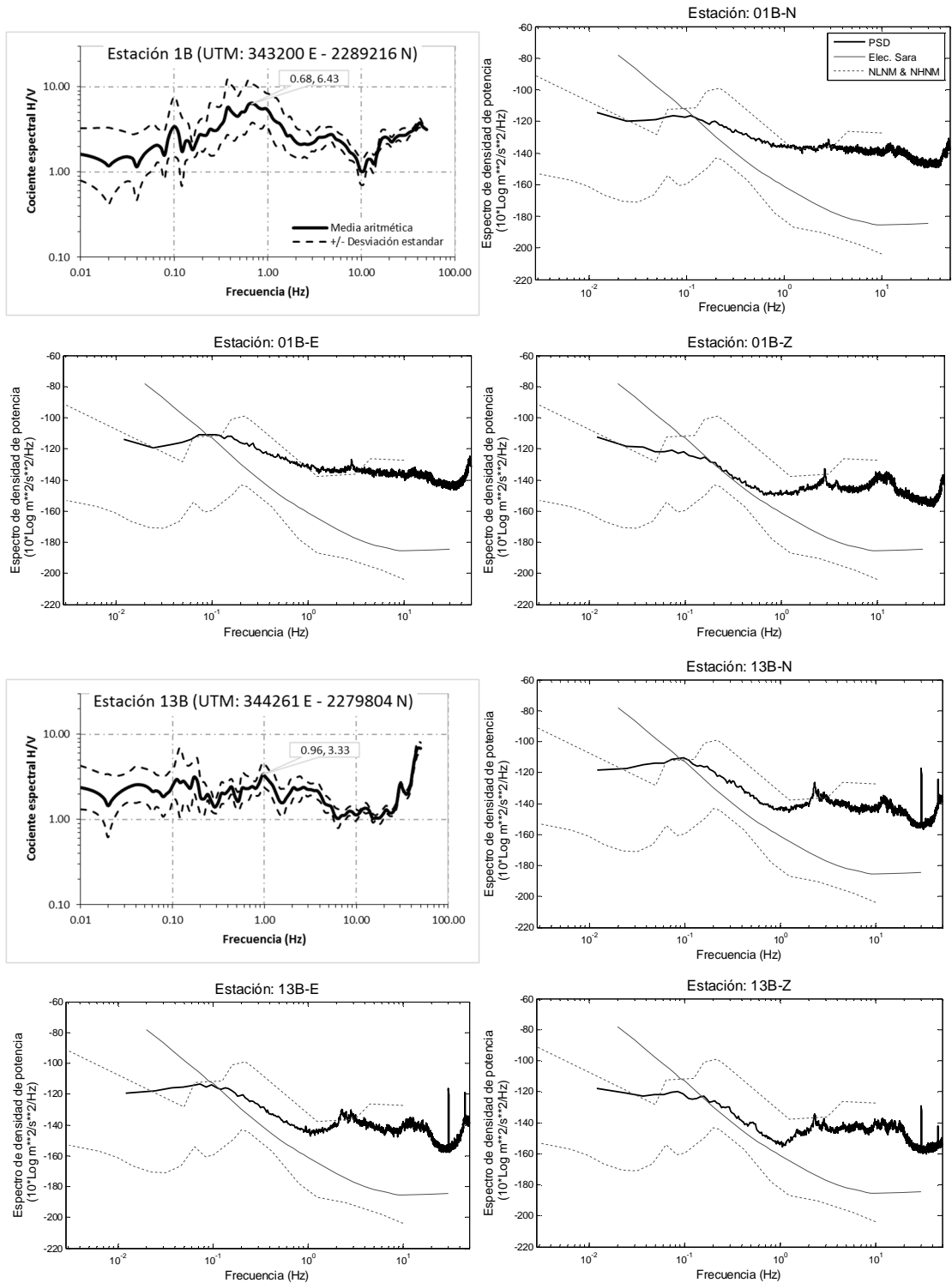


Figura A.2k. Cont. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en el registro en esa banda de frecuencias.

Familia de sedimentos con $f_0 \approx 1\text{Hz}$ (1s).

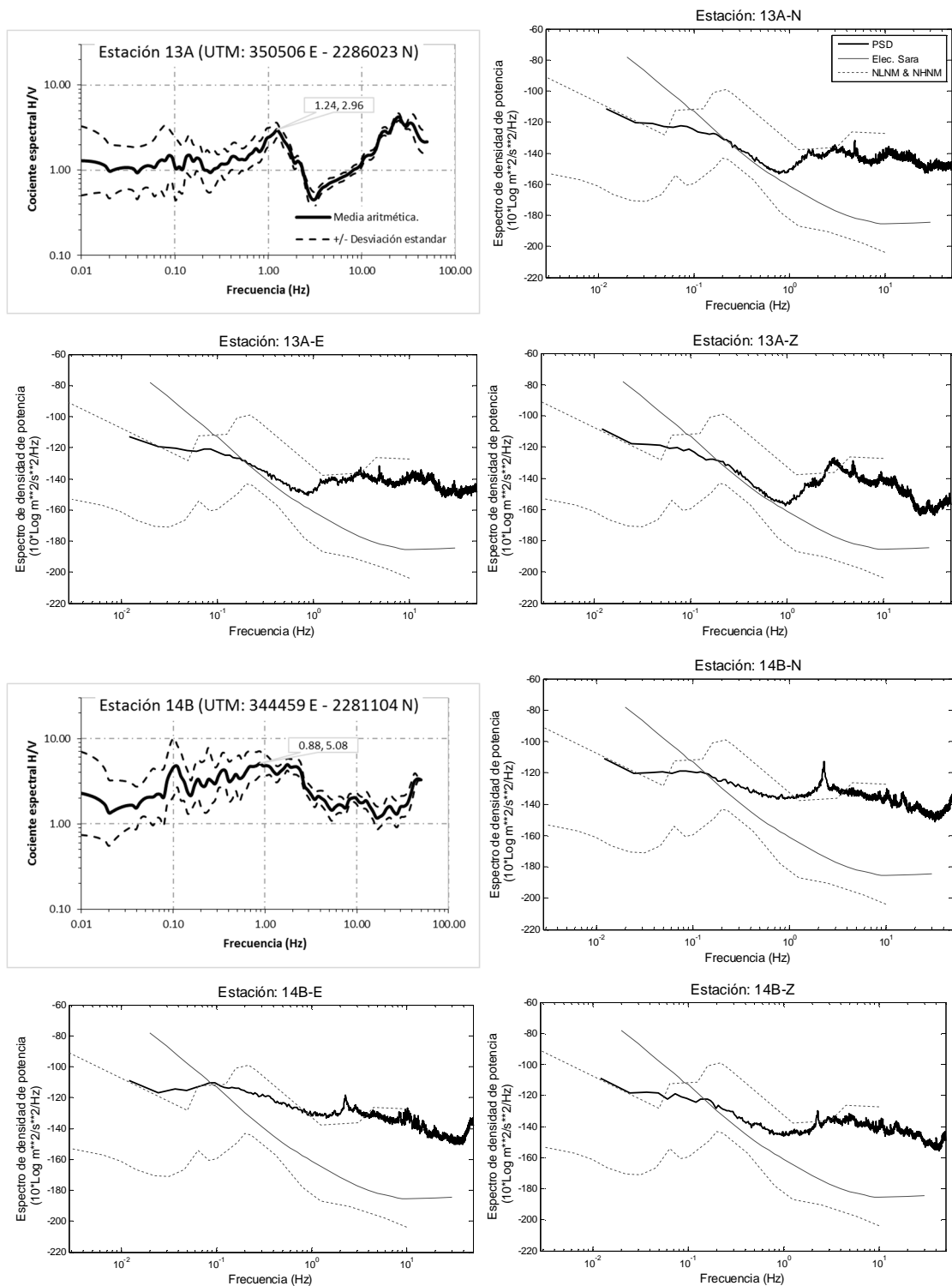


Figura A.2i. Cont. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en esa banda de frecuencias.

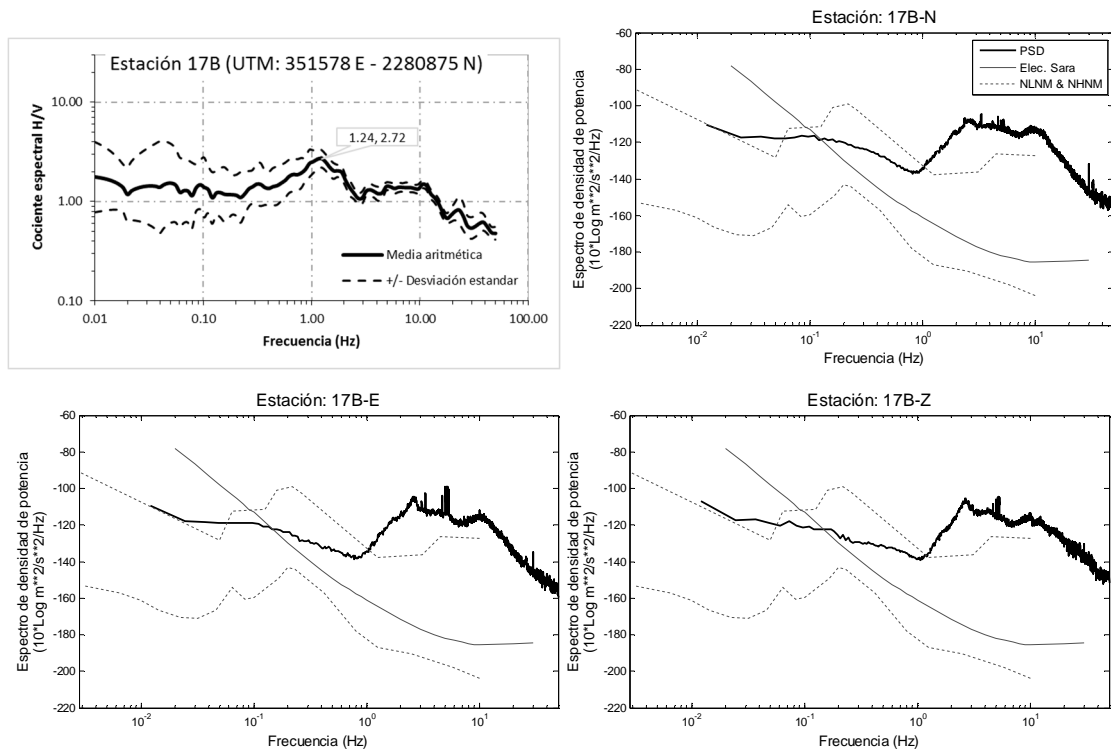


Figura A.2m. Cont. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en el registro en esa banda de frecuencias.

Familia de sedimentos con $f_0 \approx 5\text{Hz}$ (0.2s).

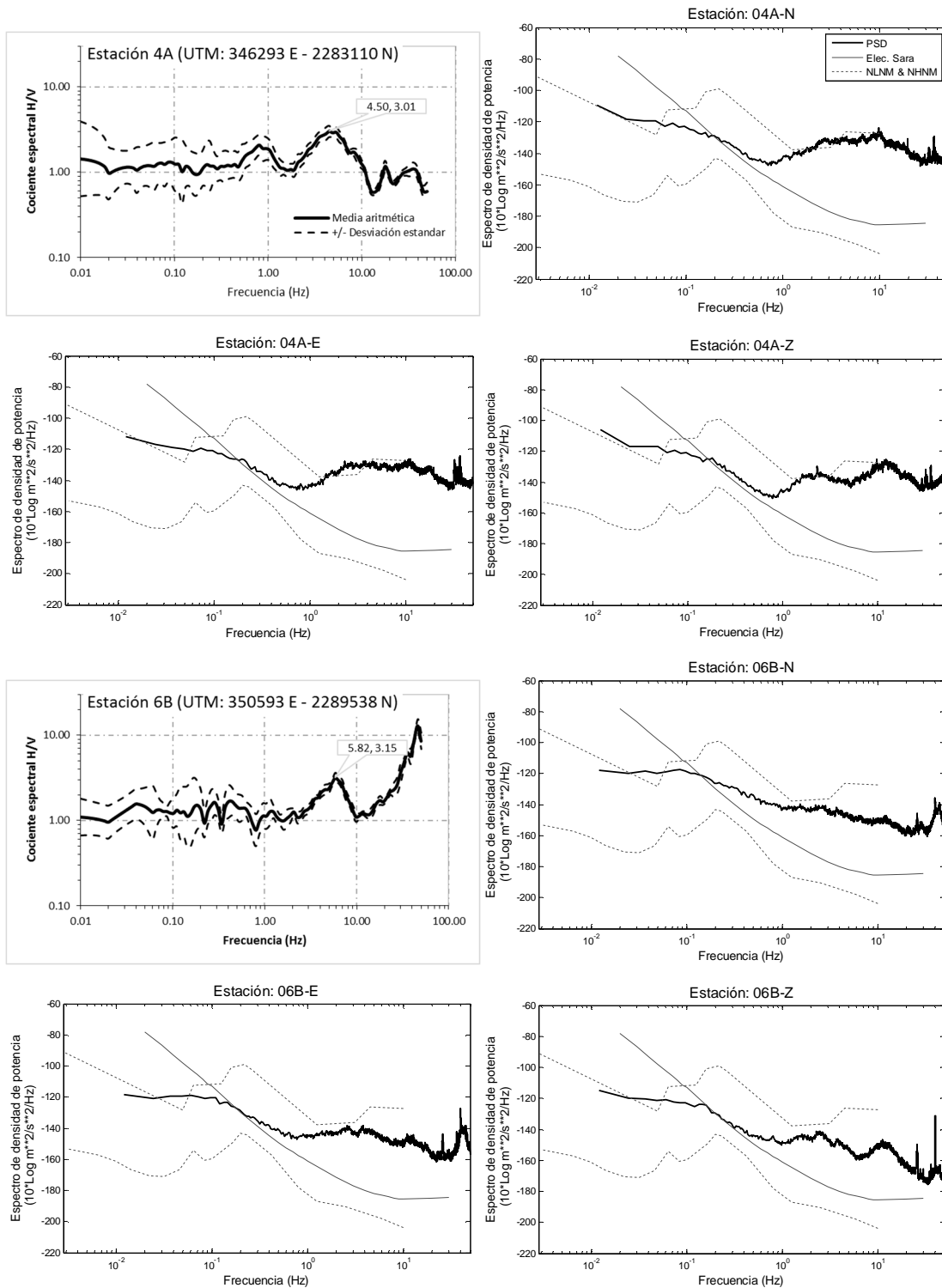


Figura A.2n. Cont. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en esa banda de frecuencias.

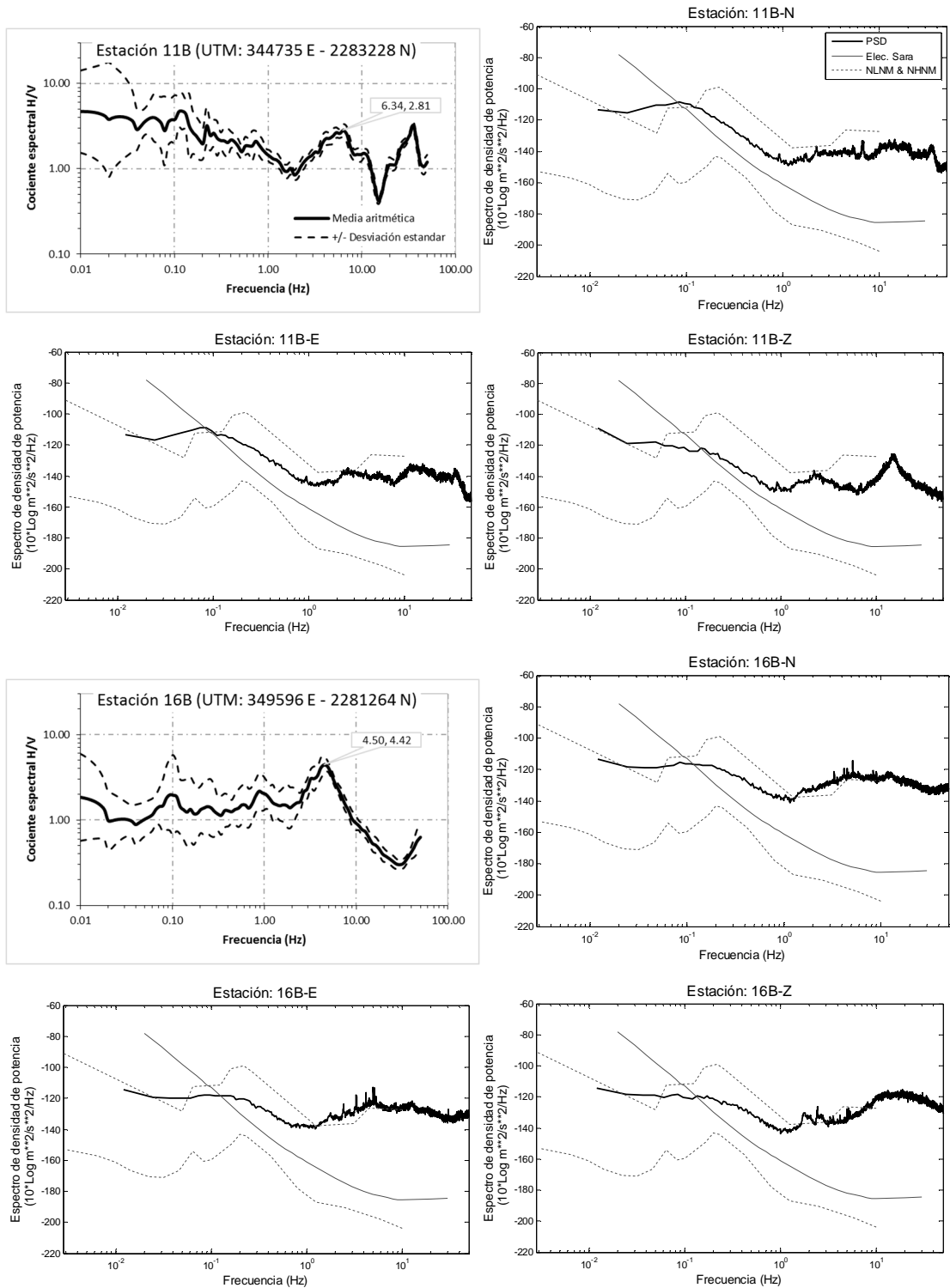


Figura A.2ñ. Cont. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en el registro en esa banda de frecuencias.

Familia de sedimentos en roca.

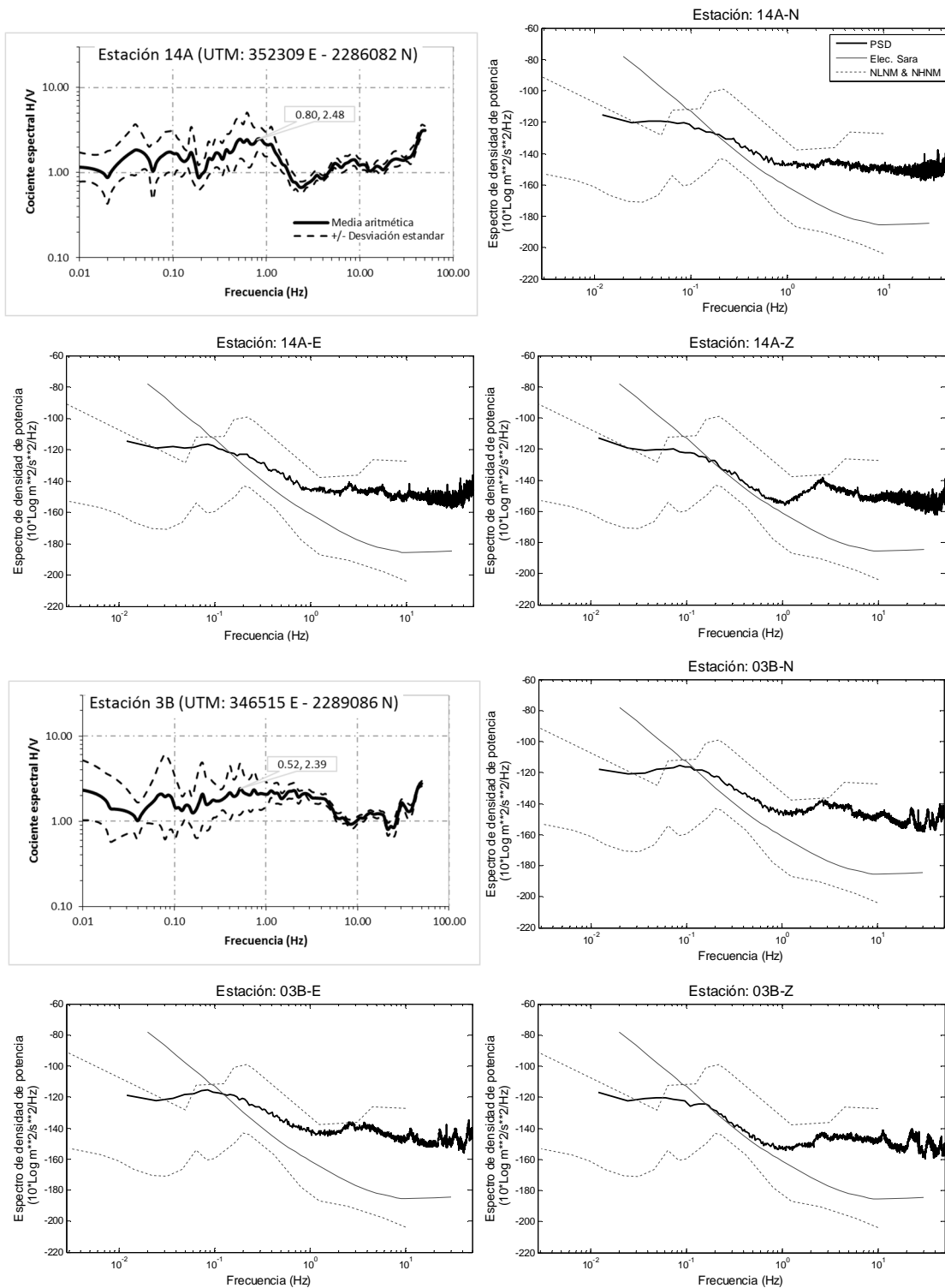


Figura A.2o. Cont. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en esa banda de frecuencias.

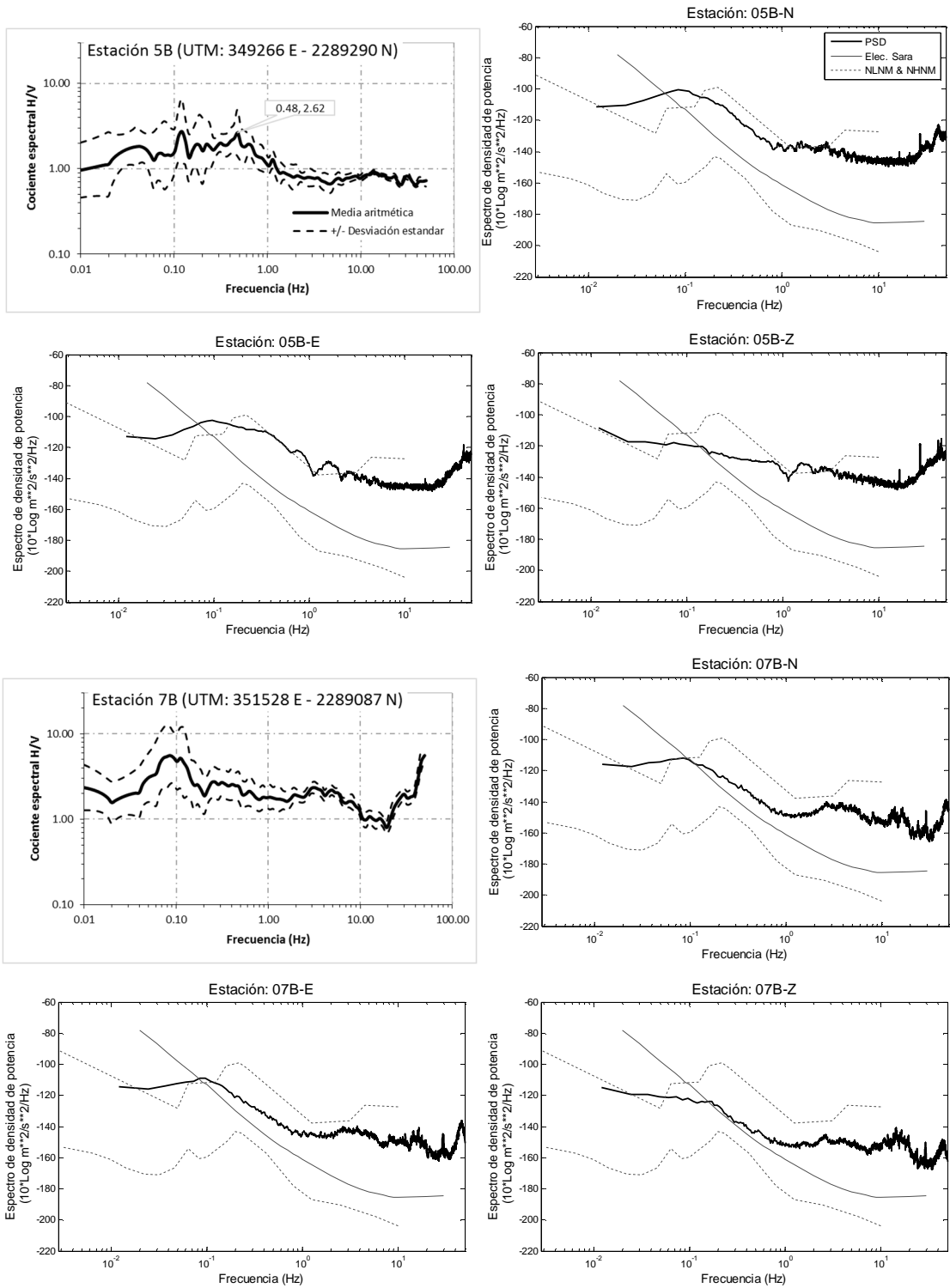


Figura A.2p. Cont. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en el registro en esa banda de frecuencias.

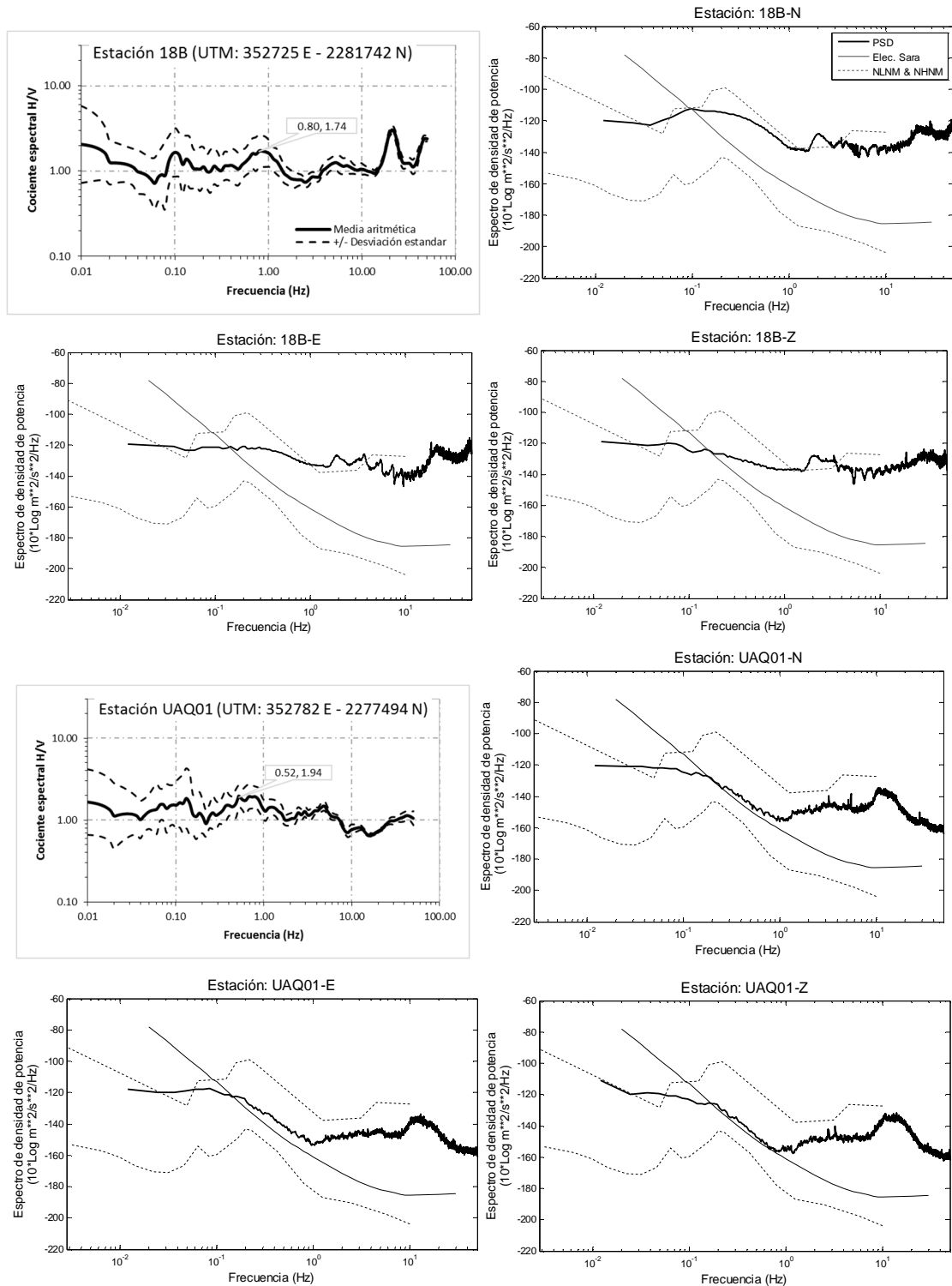


Figura A.2q. Cont. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) y Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las estaciones de registro. Cuando el PSD de la señal registrada se encuentra cercano al del ruido electrónico se pierde certidumbre en el registro en esa banda de frecuencias.

APÉNDICE 3. FICHA TÉCNICA DEL SENSOR SS-05 SARA.



SS05 VELOCITYMETER



The SS05 consists of three velocitymeter sensors (electrodynamics sensors) with precision electronics to obtain a flat-band pass from 0.5 to 40Hz.

This kind of sensor is a good alternative to sensors of 1Hz or less. It can be used to record earthquakes, volcanic activity, microseisms and perform HVSr surveys.

The sensors and electronics can be embedded in SRxx and SLxx instruments.

Simplicity

The SS05 is compact, reliable and easy to deploy and use. You do not need to worry about applying the proper damping. It comes from our lab with the calibration certificate and a well-defined transfer function expressed in poles and zeroes either in GSE or SEISMORESP format for instant use with SEISMOWIN or other restitution softwares.

Flexibility

Three differential high gain outputs allow it to be used with our digitizers as well with third party digitizers.

Energy

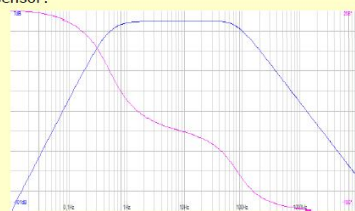
The unit has a very low power consumption so it does not impact on the power requirements of the seismic station where it is installed.

Precision

The SSxx sensors use highly reliable and stable electrodynamic components. Assembly in our case made from a solid block of aluminum milled with a high precision machining process guarantees perfect alignment between the elements.

Bode-plot

The following diagram shows the standard amplitude and phase of the 0.5Hz standard sensor:



Poles: -2.222 2.222
 -2.222 -2.222
 -3.142 0.000
 -355.431 355.431
 -355.431 -355.431

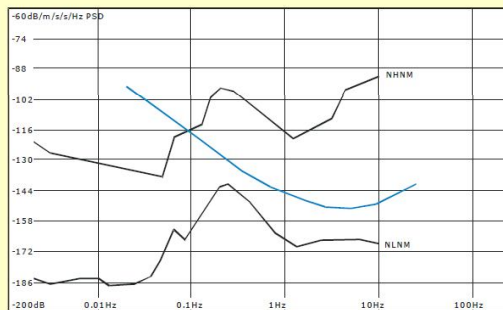
Zeros: 0.000 0.000
 0.000 0.000
 0.000 0.000

SS-05 Specifications

Number of channels: 3
 Assembly: Z, Y, X (Z vertical, Y north-south, X east-west)
 Orthogonality error: < 0.01%
 Levelling: manual with lockable feet
 Eigenfrequency: 0.5Hz
 Useable band*: 0.2 – 40Hz
 Band-pass: 0.5-40Hz (standard)
 0.5-80Hz (optional)
 0.5-315Hz (optional)
 Damping: 0.707
 Nominal sensitivity: 400 V/m/s
 Maximum allowed tilt: +/-5°
 Mass movement: 0.2mm p-p
 Dimensions: 180x170x90mm
 Weight: 2100g
 Cable length: standard 3 meters
 Connector: MIL-C 10-pin connectors*
 Compliance: CE regulations
 Protection grade: IP66 (IP68 upon request)
 Power supply: 9-16Vdc
 Power consumption: < 50 mA

Noise floor

This chart show the noise floor of the sensor.



* By useable band we mean the capability of the sensor to resolve useful signals within the Peterson curves (USGS-NLNM) when used with the SR04, SL06 or SL07 seismograph. They could be used with a wider bandpass with digitizers with better noise and sensitivity features; they might not give acceptable results with digitizers with a lower sensitivity and resolution.

Notice: SARA Electronic Instruments s.r.l. reserves the right to make changes in price, content, description, terms, etc. at any time without notice

SARA electronic instruments s.r.l.

06129 – Perugia – Via Armando Mercuri, 4 – ITALY

Phone: +39 075 5051014 – Fax: +39 075 5006315 - www.sara.pg.it - info@sara.pg.it

Reg. Trib. Perugia N-5718 – C.C.I.A.A. 109864 – C.F. e P.iva 00380320549 - N.Reg.RAEE: IT08020000001128

APÉNDICE 4. FICHA TÉCNICA DEL SENSOR SSA-320 TERRA.



SSA Series of Servo Accelerometers

The Terrascience Flex SSA Series of Servo Accelerometers™ offer an unparalleled combination of high performance and excellent stability. Housed in Terrascience's compact accelerometer package, the small size and convenient single bolt attachment allow the SSA-320 triaxial accelerometer to be installed with a footprint that is as small as, or smaller than most uniaxial force balance accelerometers.

The SSA-Series accelerometers provide industry standard analog

output of $\pm 2.5V$ full scale with options for $\pm 5V$ or $\pm 10V$ outputs. The performance of the SSA-Series includes exceptional linearity over a broad dynamic range, excellent bias stability, and virtually no hysteresis errors or offset drift problems associated with other force balance designs.

The sensing element contained in the SSA-Series is Terra's patented SA series design with over twenty thousand (**20,000**) units produced and installed worldwide in more than forty countries.



Over 20,000 units have been installed over the past 35 years in more than 40 countries around the world

SPECIFICATIONS

Applications:

Seismic and strong motion data acquisition systems, civil engineering, tilt & vibration measurements

Type:

SA-series force-balance accelerometer (US Pat# 4,088,027)

Dynamic range:

>120dB

Noise floor:

15 μ g RMS

Bias:

< $\pm 0.005g$

Linearity:

<0.05% FS

Hysteresis:

<0.04% FS

Cross-axis sensitivity:

<0.005g/g

Bias temp. stability:

< $\pm 40\mu g/^{\circ}C$

Gain temp. stability:

< $\pm 200\mu g/^{\circ}C$

Frequency Response:

DC-50Hz

Damping:

0.6-0.7

Output impedance:

<10 Ohms

Shock:

500g, 5 ms; 3000g, 0.1 ms

Self test:

1/8g step and impulse test

Supply voltage:

9-12VDC

Supply current:

5-9mA per axis

Operating temp:

-25 to + 85 $^{\circ}C$

WEIR-JONES GROUP OF COMPANIES

A: 2040 WEST 10TH AVENUE, VANCOUVER, B.C. CANADA

T: (+1) (604) 732.8821 W: www.weir-jones.com E: sales@weir-jones.com



SSA Series of Servo Accelerometers

The SSA-Series electronics employ surface mount technology and modular design with low power consumption of only 5mA per axis. Circuit cards and sensor elements are designed with connectors for easy removal and maintenance.

Typical applications include seismic monitoring applications, vibration measurements, and tilt sensing in both indoor and outdoor environments. The corrosion resistant aluminum package is NEMA 6P rated which provides submersion protection in up to six feet of water.

Terrascience provides full technical support for all of Terra Technology's accelerometers.

In addition, our manufacturing plant has a non-friction linear shake table which is used for on-site calibration. This calibration table together with our in house environmental chamber ensures the continued quality of our sensors.

All calibration and testing equipment that Terrascience utilizes are traceable to NIST in Gaithersburg, Maryland in the United States.

SPECIFICATIONS

Storage temp:

-40°C to +100°C

Humidity:

0-100% non-condensing

Housing:

NEMA 6P cast aluminum

Size:

2.5" x 2.9" x 6.4"

63mm x 74mm x 163mm

Weight:

SSA-120: 1.5lb (0.68kg)

SSA-220: 1.76lb (0.80kg)

SSA-320: 2.01lb (0.91kg)

Index of protection:

IP 65 with MS connector

IP 67 with cable inlet

Orientation:

Horizontal

Vertical

Inverted

Leveling:

3 screws; ±10° range

Connector:

10-pin MS connector

Lightning protection:

Built-in surge protection

Ordering Information

Specify number of axis

Sensor orientation

Full-scale range

Full-scale output

Frequency response

Operating temperature range

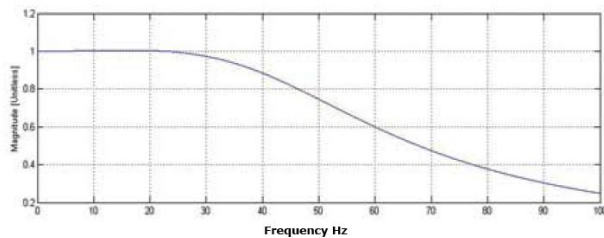
Radiation requirements

Connector type

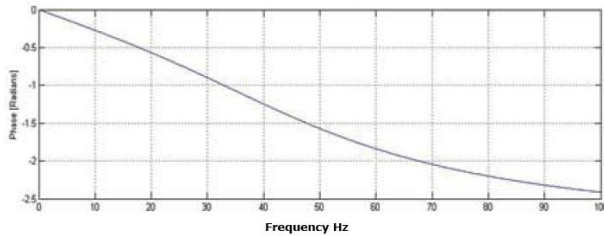
Other options

Magnitude Response

Damping Factor = 0.67 Cutoff Frequency = 50Hz



Phase Response



APÉNDICE 5. ANÁLISIS DE RUIDO ELECTRÓNICO DEL ACELERÓGRAFO TERRA (SSA-320 / GSR-18) COMPARANDO REGISTROS CON EL SISMÓGRAFO SARA (SS-05 / SR-04).

A fin de explicar la diferencia encontrada entre los iso-periodos reportados previamente por Bustillos (2005) y los del presente estudio, se genera el siguiente Apéndice que incluye un análisis comparativo entre las Funciones de Transferencia Empíricas (FTE) obtenidas de los registros de ruido ambiental medidos al interior de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) de manera simultánea entre el sismógrafo Sara (SS05/SR04) descrito en el Capítulo 4.1 y el acelerógrafo Terra (SSA-320 / GSR-18) con características mostradas en el Apéndice 4.

Se mostrará la diferencia entre la sensibilidad del sismógrafo y la del acelerógrafo en el registro de señales de baja amplitud.

Antecedentes.

Diversos estudios enfocados al registro e interpretación de movimientos de baja amplitud (microsismos y microtremores) para fines de zonificación sísmica enmarcan la preferencia en el uso de sismógrafos al de acelerógrafos (Bard, 1999; European Commission, 2004; Tejeda-Jácome y Chávez-García, 2010a), debido a la baja sensibilidad de los últimos principalmente en bajas frecuencias (dependiendo del lugar pueden ser menores a 2, 1.5 ó 1Hz) en lugares quietos (con ruido de baja amplitud).

Debido al problema de la sensibilidad en los equipos de medición se recomienda, para un análisis óptimo de las curvas H/V, revisar los espectros de densidad de potencia (PSD) en la banda de frecuencias en estudio con el fin de asegurar que la energía es suficiente para permitir la extracción de la señal sin la interferencia del ruido instrumental (European Commission, 2004).

Metodología.

Uno de los métodos para la obtención del ruido instrumental y que se utilizó en este estudio, es realizando registros de ruido en ambientes donde se sabe se tienen amplitudes francamente menores al ruido propio o electrónico del equipo y analizando sus PSD (Evans et al., 2008).

Con la finalidad de tener una muestra de amplitudes variadas, se fijaron dos estaciones temporales al interior de la UAQ (UAQ01 y UAQ02), situadas a aproximadamente 90 y 600 mts respectivamente de la vialidad 05 de Febrero, por considerarse la avenida de mayor tráfico en el área (Ver Figura A.3). Cabe hacer mención que UAQ01 se encuentra al centro de un área sin tráfico circundante mientras que UAQ02 se encuentra a un costado de vialidades secundarias.

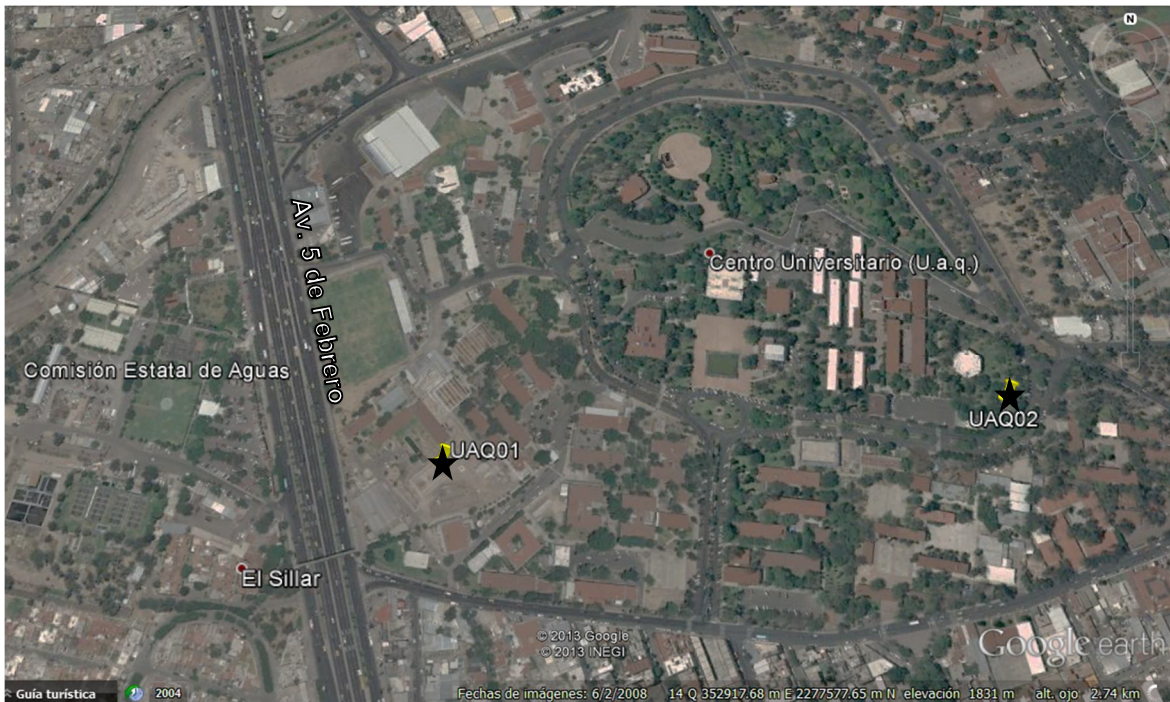


Figura A.3. Localización de los puntos de control UAQ01 y UAQ02 a 90 y 600mts respectivamente de la avenida 5 de Febrero. UAQ01 se encuentra al centro de un área sin tráfico circundante, mientras UAQ02 se encuentra a un costado de vialidades secundarias.

Se realizaron registros de manera simultánea con el sismógrafo Sara (SS05 / SR04) y el acelerógrafo Terra (SSA-320 / GSR-18) clasificándolos en registros de amplitud de ruido bajo, alto y ruido inducido.

Para nuestro caso se consideró como ruido de amplitud baja a aquél registrado en un horario de poco tráfico vehicular y en general de poca actividad humana en los puntos y alrededores de la estación temporal, mientras que el de amplitud regular se registró en un horario cercano al medio día a fin de simular un escenario común para la medición de ruido ambiental durante una campaña diurna.

Para el caso del ruido inducido, se generó golpeando desde una altura de entre 20 y 30cm utilizando un pisón de mango perfilado de 8"x8" en la base y 4.5 Kg marca TRUPER (Clave KR-1L) con una frecuencia aproximada de 1 golpe por segundo. El punto de golpeo se planteó a aproximadamente 1 mt de distancia de ambos sensores.

Tabla A.2. Características de los registros simultáneos para la obtención del ruido electrónico del acelerógrafo Terra (SSA-320 / GSR-18).

Tipo de ruido	X (m)	Y (m)	Estación	Fecha	Hora local (hrs)
Amplitud baja	352785	2277467	UAQ01	20/Febrero/2014	22:41
	353303	2277523	UAQ02	21/Febrero/2014	00:31
Amplitud regular	352785	2277467	UAQ01	11/Marzo/2014	13:24
	353303	2277523	UAQ02	11/Marzo/2014	15:22
Inducido	353303	2277523	UAQ02	11/Marzo/2014	15:34

La obtención y tratamiento de registros de ruido ambiental simultáneo del sismógrafo Sara y del acelerógrafo Terra se planteó bajo las bases anteriormente descritas en el Capítulo 4 con algunas variantes atribuibles a la forma y naturaleza de registro del acelerógrafo Terra.

Variantes de las características de la señal a analizar.

Debido a las características y de tipo de señal adquiridas entre el acelerógrafo Terra y el sismógrafo Sara, la señal a analizar requiere tratamientos previos a los que se presentan en el Capítulo 4 como sigue:

1. Dado que para descargarse sin problemas el acelerógrafo Terra requiere generar archivos separados de aproximadamente 4 min, se requirió unirlos por componente en registros que varían de 4 a 19 min. El análisis se realizó en secciones concurrentes entre ambos equipos.
2. Tomando en cuenta que el acelerógrafo Terra registró a una frecuencia de muestreo (F_s) de 200Hz, se procedió a convertir el registro en uno con F_s de 100Hz a fin de comparar señales de las mismas características.
3. Con la finalidad de tener un proceso estable y evitar algún error atribuible a la integración de la señal, el registro de velocidad del sismógrafo Sara se derivó para manejar ambas señales en unidades de aceleración (Carreño et al., 1999).
4. Debido a que no se cuenta con la respuesta completa del acelerógrafo Terra y el sensor marca una respuesta plana hasta aproximadamente 30Hz (dentro del área de interés para efecto de sitio mencionado por Bonnefoy-Claudet et al (2006)), se optó por realizar únicamente el producto entre el vector de la señal por el escalar 9.80665 para homologar las unidades en m/s^2 .

Cálculo de la Transformada Discreta de Fourier (DFT).

Debido a que la Función de Transferencia Empírica (FTE) es resultado directo de la DFT de cada componente, se obtuvieron los espectros mediante el proceso que se muestra en la Figura A.4.

Variantes en el cálculo de las FTE.

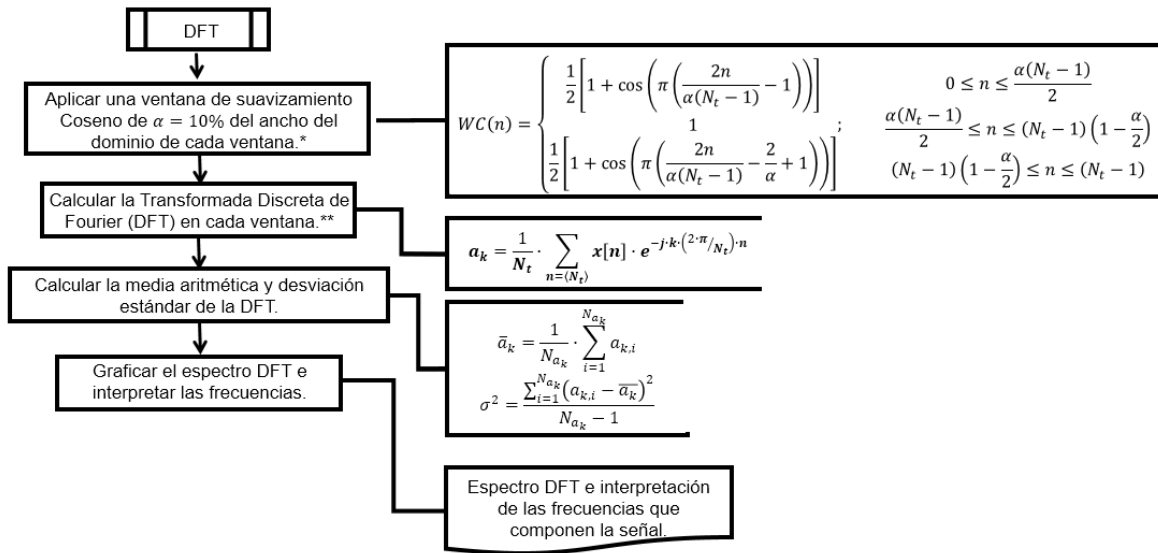
La obtención de la FTE se realiza de acuerdo al procedimiento antes descrito en el Capítulo Cálculo de la Función de Transferencia Empírica (FTE).4.2.1 con la variante de que el análisis se realizó con ventanas consecutivas y sin la aplicación del algoritmo anti-trigger a fin de poder analizar ventanas concurrentes en el tiempo de ambos equipos y poder realizar una comparativa de los registros en un mismo instante.

Variantes en el cálculo del PSD.

El cálculo del PSD se ejecuta de manera idéntica al Capítulo 4.2.2.

Procesamiento.

En el apartado siguiente, se muestran los espectros de Fourier, las FTE y los PSD obtenidos de los registros tomados de manera simultánea entre el sismógrafo Sara (línea continua negra) y el acelerógrafo Terra (línea continua gris) con la finalidad de evaluar los niveles de ruido sísmico del acelerógrafo Terra.



α = Ancho del dominio Coseno al inicio y al final de la ventana.
 σ = Desviación estándar.
 a_k = Señal discreta en el dominio de su índice armónico (0, 1, 2, 3... Nt-1).
 n = Constante que indica la posición en los intervalos de muestreo de la señal ($n \cdot t_s$).
 $x[n]$ = Señal discreta en el dominio del tiempo.
 \bar{a}_k = Media aritmética de la DFT.
 $a_{k,i}$ = DFT en la ventana "i".
 N_{a_k} = Número de ventanas promediadas de la DFT.
 N_t = Período fundamental de la señal discreta (número de datos de la señal discreta) ($2\pi/n_s$).
 $WC(n)$ = Ventana Coseno (Tukey window).

Referencias	
*	Oppenheim and Schafer, 1999; Smith, 1999; Bracewell, 2000; Geopsywiki, 2013.
**	Irizar-Picón, 1999; Smith, 1999; FCEFyN, 2013; González-Martínez y Clemente-Chávez, 2013.

Figura A.4 Diagrama de Flujo para la obtención de la DFT de cada componente en el análisis de ruido comparativo entre el sismógrafo Sara y el acelerógrafo Terra.

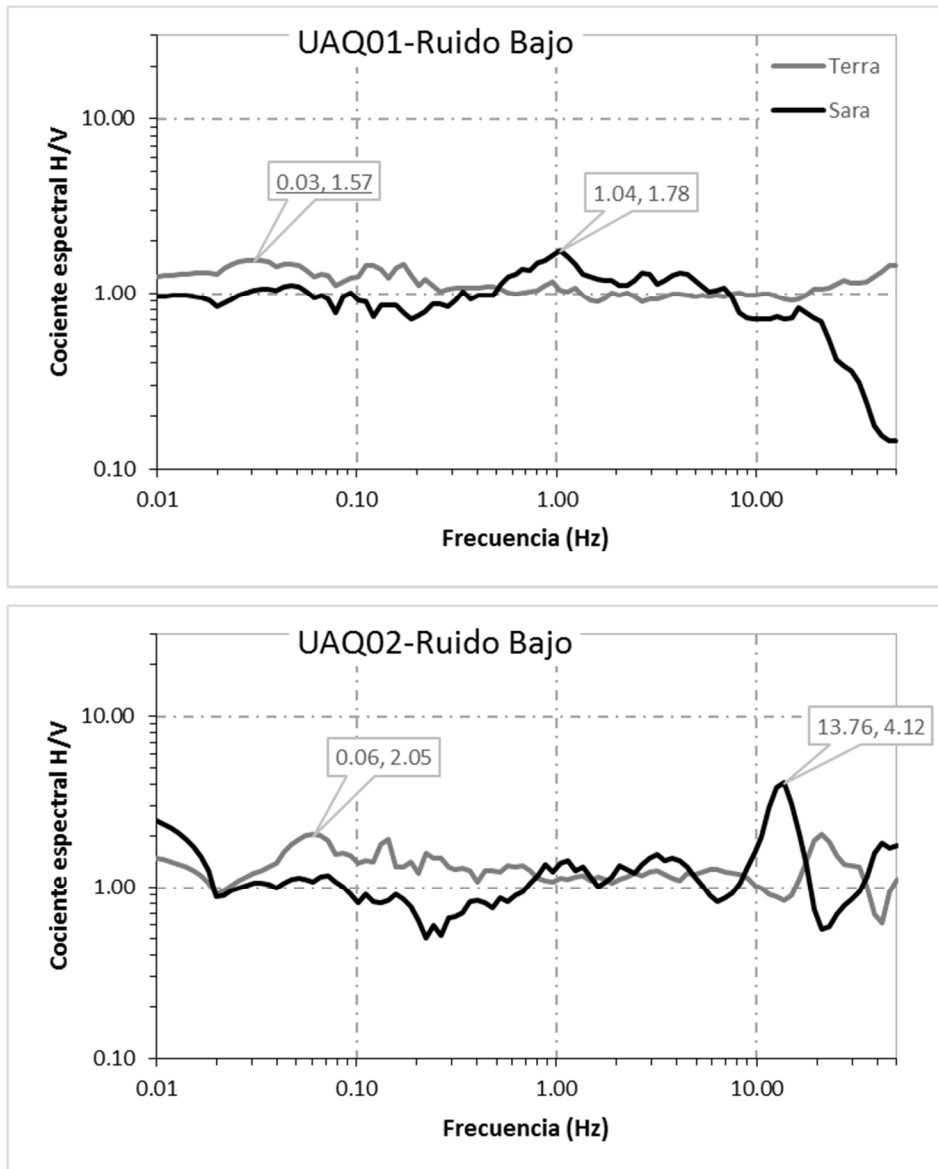


Figura A.5a. Comparativa entre las Funciones de Transferencia Empírica (FTE) de manera simultánea con el sismógrafo Sara (línea continua negra) y el acelerógrafo Terra (línea continua gris). Subrayados los picos que no cumplen con el criterio de claridad marcados por el proyecto SESAME (European Commission, 2004).

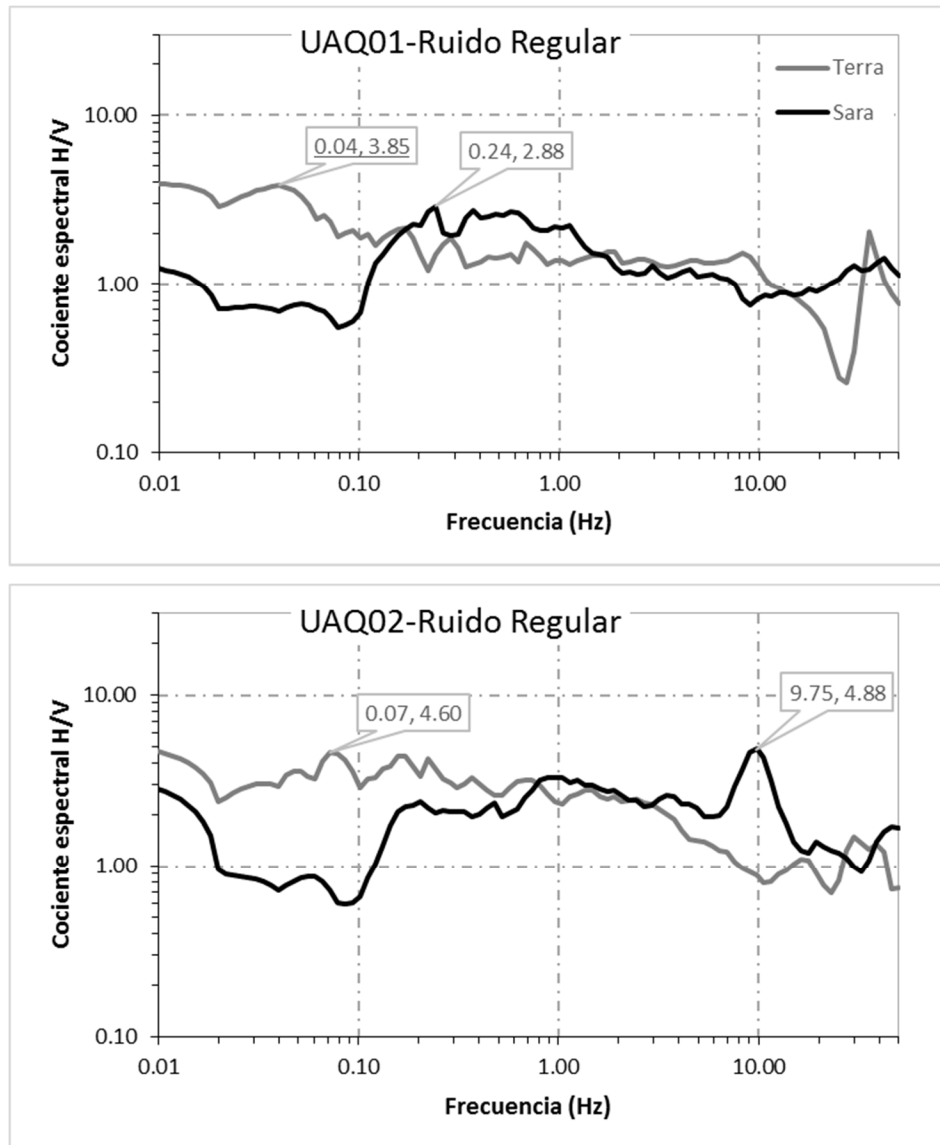


Figura A.5b. Cont. Comparativa entre las Funciones de Transferencia Empírica (FTE) de manera simultánea con el sismógrafo Sara (línea continua negra) y el acelerógrafo Terra (línea continua gris). Subrayados los picos que no cumplen con el criterio de claridad marcados por el proyecto SESAME (European Commission, 2004).

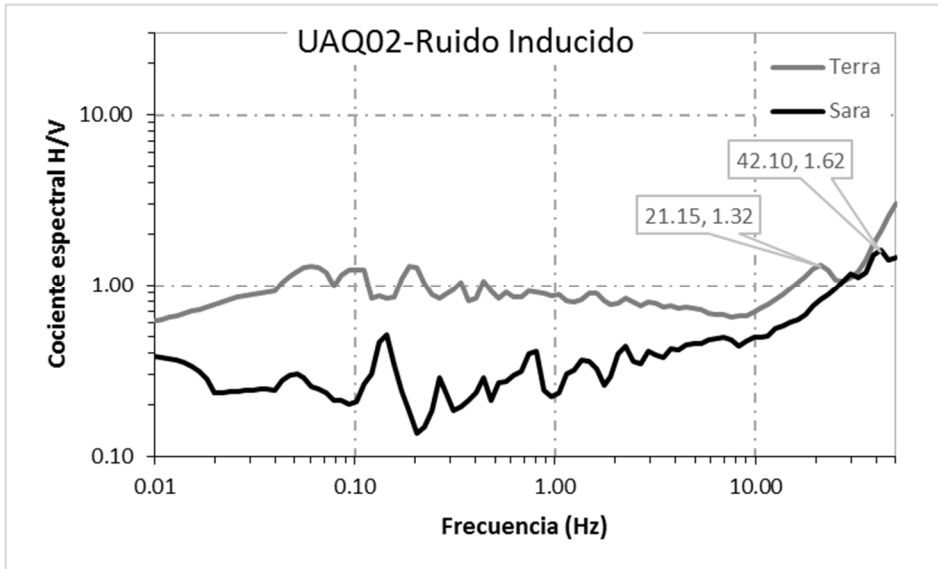


Figura A.5c. Cont. Comparativa entre las Funciones de Transferencia Empírica (FTE) de manera simultánea con el sismógrafo Sara (línea continua negra) y el acelerógrafo Terra (línea continua gris). Subrayados los picos que no cumplen con el criterio de claridad marcados por el proyecto SESAME (European Commission, 2004).

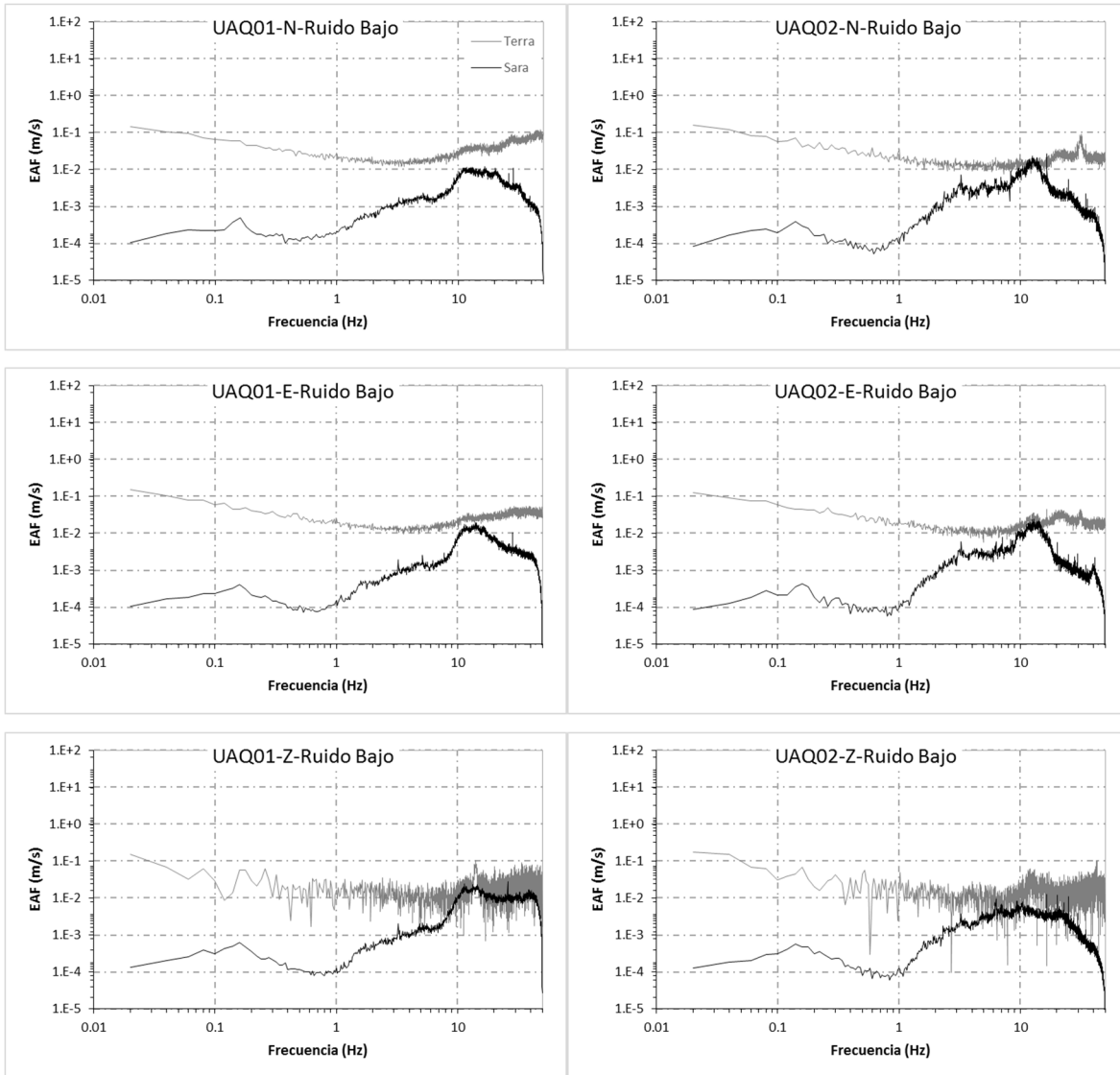


Figura A.6a. Comparativa entre los Espectros de Aceleración de Fourier (EAF) de las componentes de ruido ambiental registrados de manera simultánea con el sismógrafo Sara (línea continua negra) y el acelerógrafo Terra (línea continua gris).

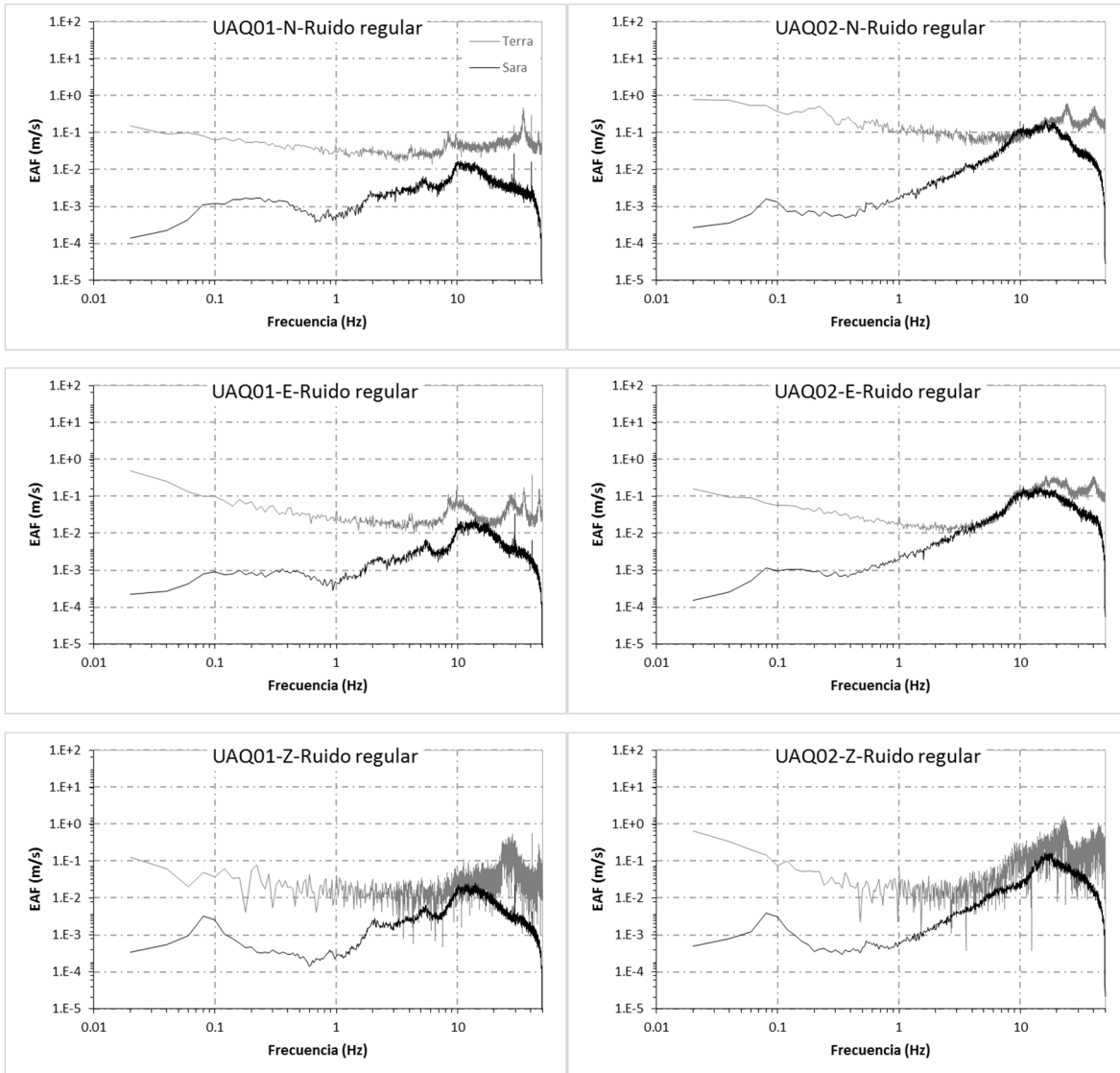


Figura A.6b. Cont. Comparativa entre los Espectros de Aceleración de Fourier (EAF) de las componentes de ruido ambiental registrados de manera simultánea con el sismógrafo Sara (línea continua negra) y el acelerógrafo Terra (línea continua gris).

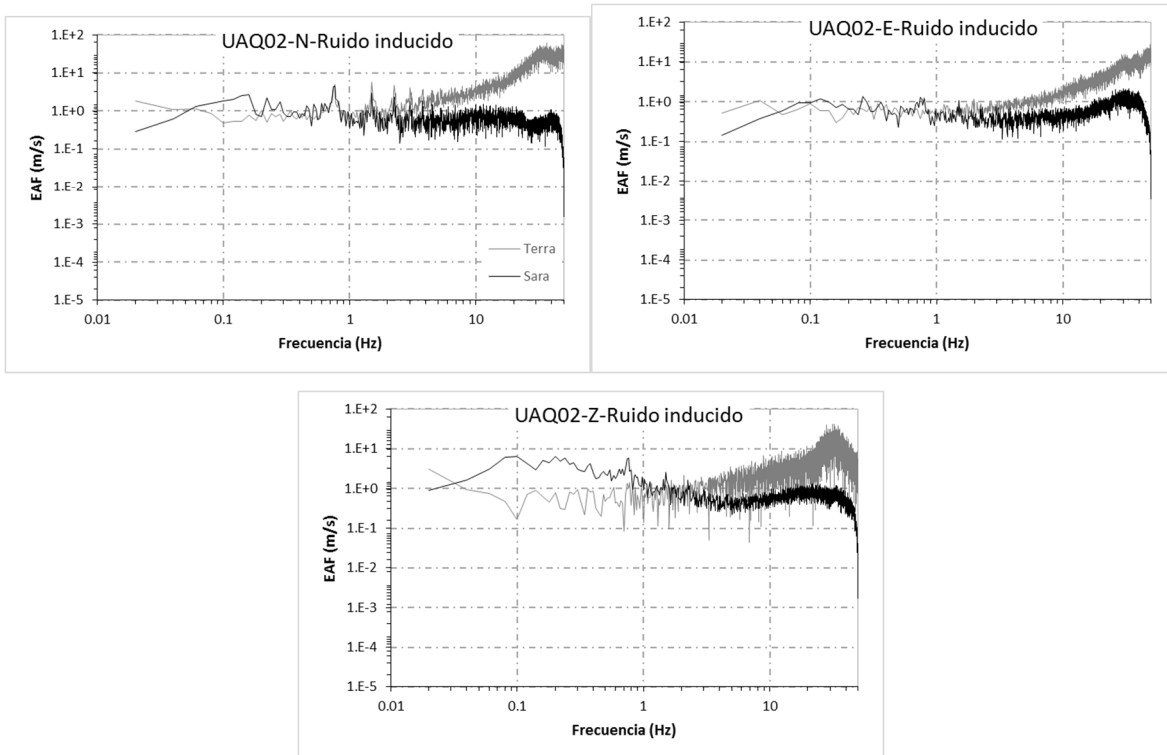


Figura A.6c. Cont. Comparativa entre los Espectros de Aceleración de Fourier (EAF) de las componentes de ruido ambiental registrados de manera simultánea con el sismógrafo Sara (línea continua negra) y el acelerógrafo Terra (línea continua gris).

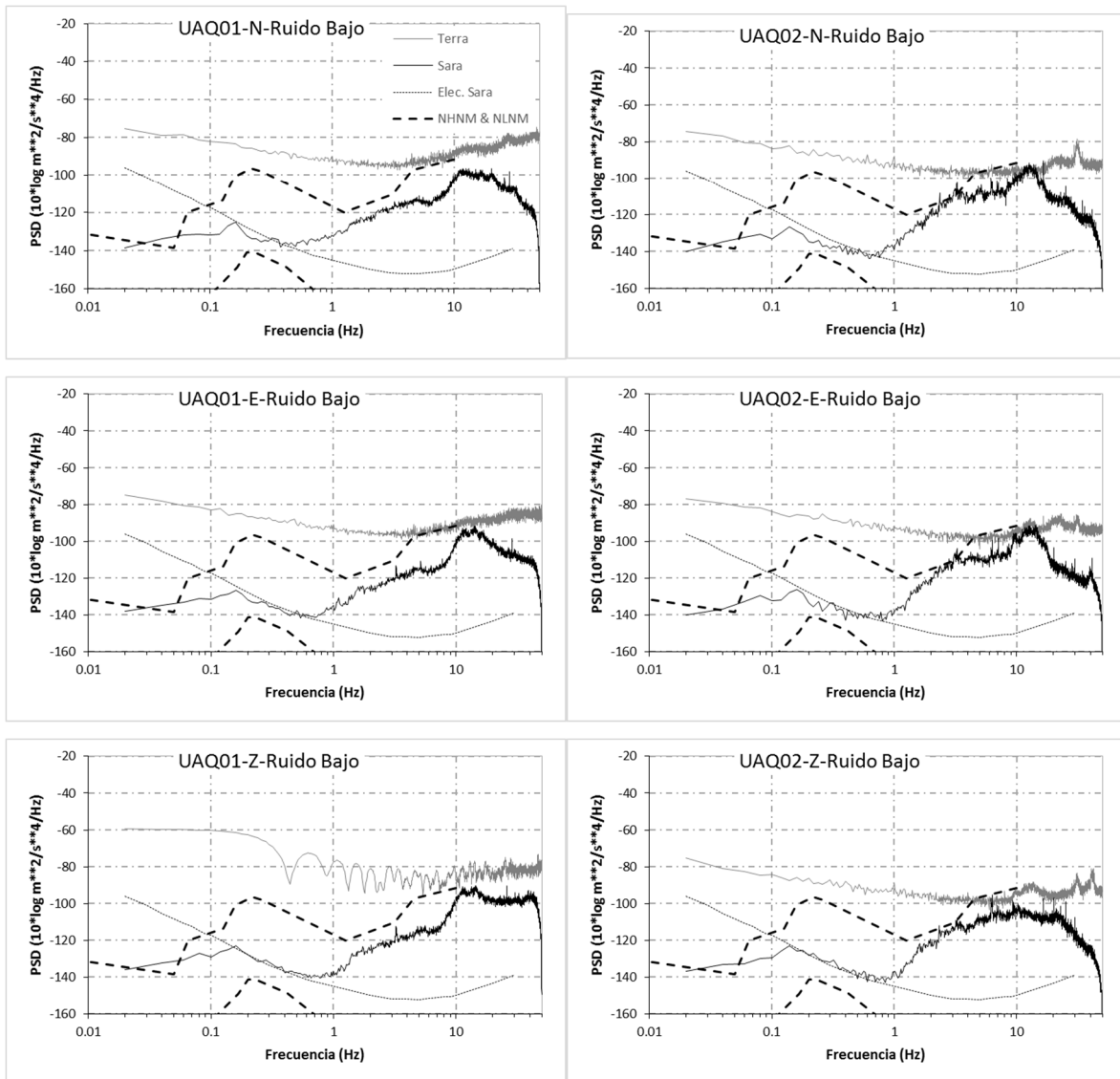


Figura A.7a. Comparativa entre los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las componentes de ruido ambiental registrados de manera simultánea con el sismógrafo Sara (línea continua negra) y el acelerógrafo Terra (línea continua gris).

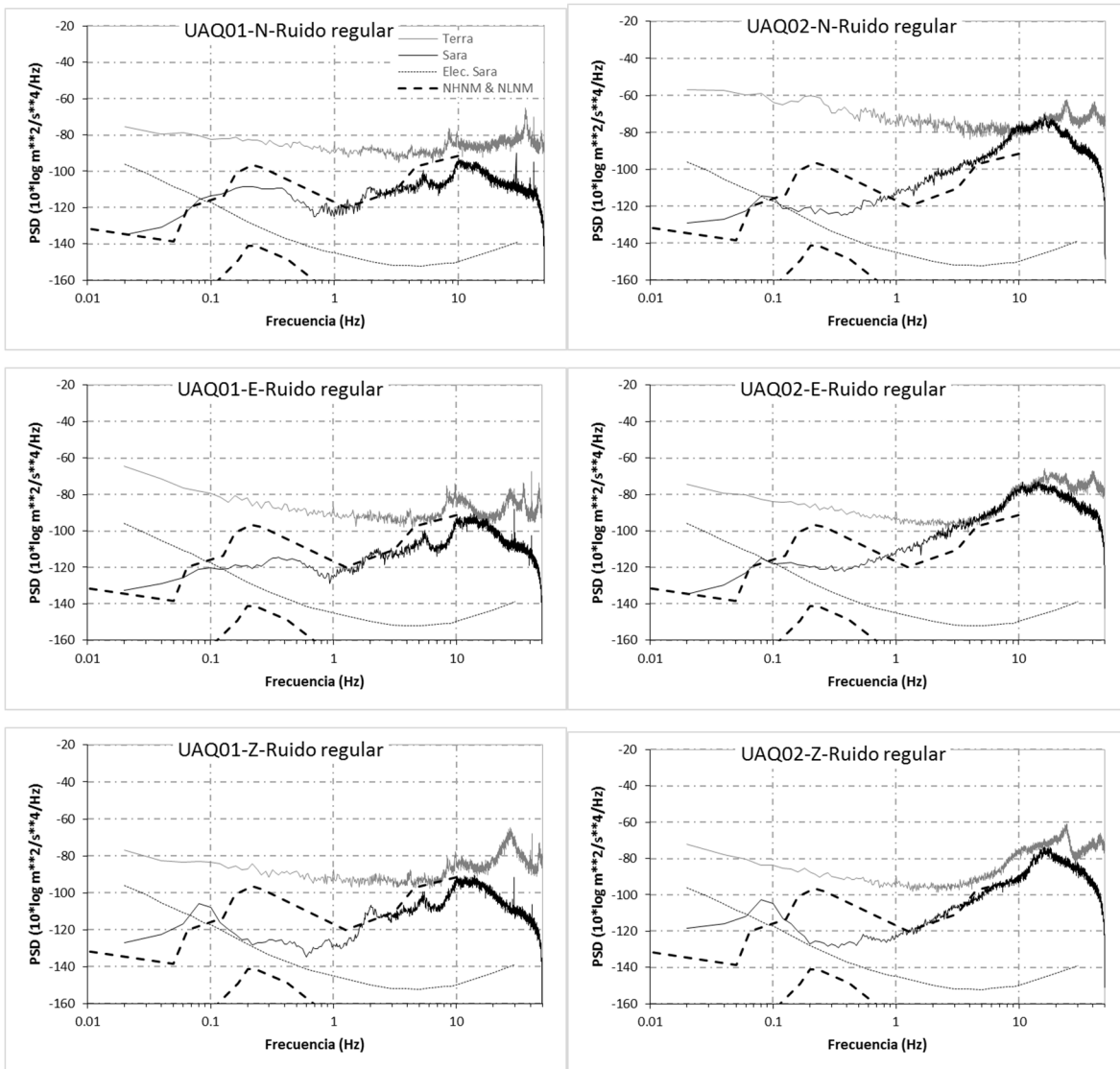


Figura A.7b. Cont. Comparativa entre los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las componentes de ruido ambiental registrados de manera simultánea con el sismógrafo Sara (línea continua negra) y el acelerógrafo Terra (línea continua gris).

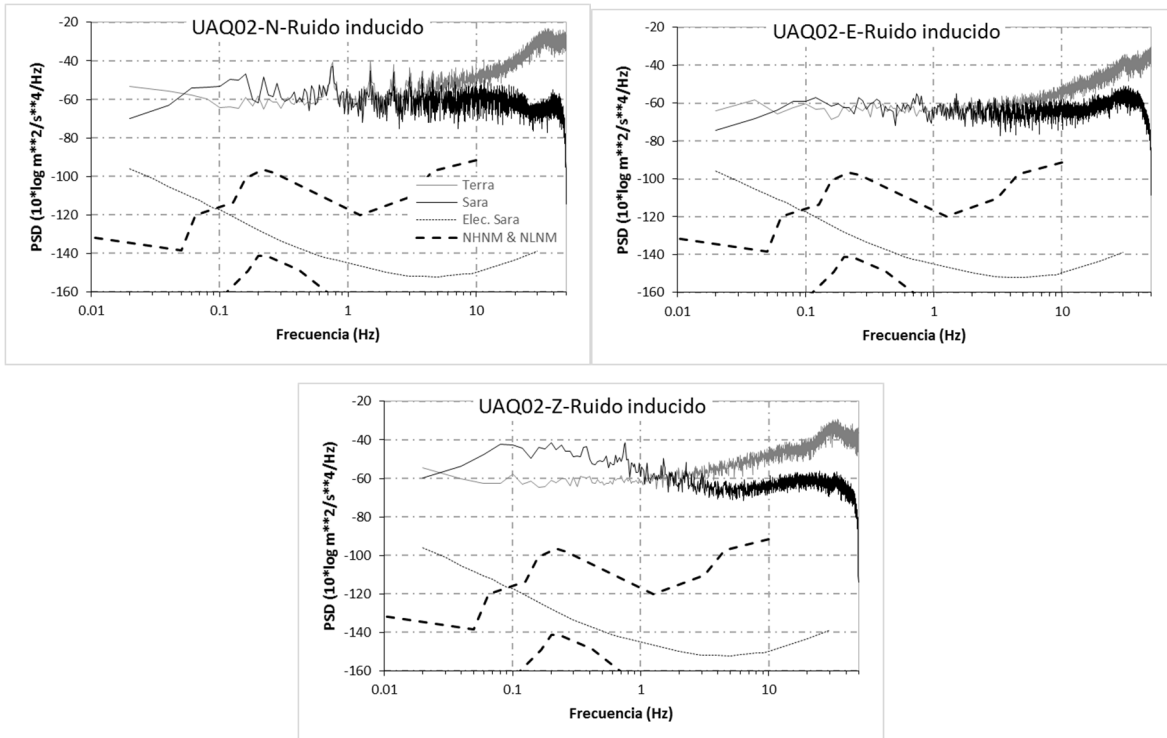


Figura A.7c. Cont. Comparativa entre los Espectros de Densidad de Potencia (PSD) de las componentes de ruido ambiental registrados de manera simultánea con el sismógrafo Sara (línea continua negra) y el acelerógrafo Terra (línea continua gris).

Resultados y discusión.

De manera general, en la Figura A.6a, b y c se puede observar que los Espectros de Aceleración de Fourier (EAF) correspondientes a la componente vertical del acelerógrafo Terra muestran una dispersión de las amplitudes mucho mayor a las generadas en las componentes horizontales, lo cual modifica los picos generados en las Funciones de Transferencia Empíricas (FTE) con respecto a los generados con los registros del sismógrafo Sara según se muestra en la Figura A.5a, b y c.

La FTE mostrada en la Figura A.5a para el registro UAQ01-Ruido bajo, obtenida con datos del sismógrafo Sara, muestra un pico que cumple con el criterio de claridad estipulado por el proyecto SESAME (European Commission, 2004) en

una frecuencia de 1.04Hz, mientras que para la FTE obtenida con datos del acelerógrafo Terra no se muestra ningún pico que cumpla con este criterio, sin embargo, se generan picos en bajas frecuencias atribuibles a la inestabilidad que muestra la componente vertical. El PSD de la estación mostrado en la Figura A.7a deja claro que el registro del equipo Terra para la estación UAQ01- Ruido bajo registra mayor energía en todas las frecuencias y en todas sus componentes comparadas con la señal registrada por el equipo Sara, atribuible al ruido electrónico marcado por la ficha técnica del sensor a un nivel de -76.64 dB ($15 \mu\text{g RMS} = 1.4715 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2 = -76.64 \text{ dB}$) (Ver Apéndice 4). Por lo tanto, este registro del acelerógrafo Terra puede considerarse como puramente de ruido electrónico y que su sensibilidad no es suficiente para registrar el ruido ambiental.

La FTE del registro UAQ02-Ruido bajo mostrada en la Figura A.5a muestra una tendencia a generar un pico en frecuencias superiores de 10 Hz, sin embargo, para el caso del equipo Terra su amplitud se observa diezmada. Analizando el PSD de esta estación mostrado en la Figura A.7a se muestra que en el rango entre 10 y 20Hz las componentes horizontales igualan su energía debido a que el ruido ambiental es del orden o mayor al ruido electrónico del instrumento Terra, sin embargo, en el registro de la componente vertical no se rebasa este nivel. Por lo tanto, se entiende el por qué el pico en altas frecuencias en la FTE del acelerógrafo Terra mostrado en la Figura A.7a es disminuido en magnitud y termina por no ser un pico dominante, marcando la frecuencia fundamental en un pico que está dominado por el ruido electrónico y generando una FTE que no es confiable.

En la FTE del registro UAQ01-Ruido regular mostrada en la Figura A.7b, el ruido electrónico opaca al registro de ruido ambiental según se observa con el análisis de los PSD de la estación mostrados en la Figura A.7b, con lo que se genera un pico que no cumple con las condiciones de claridad establecidas por el SESAME (European Commission, 2004) en bajas frecuencias, atribuible a la inestabilidad de la componente vertical evidente en su EAF mostrado en la Figura A.6b.

Para el caso de la FTE en el registro UAQ02-Ruido regular se observa el mismo caso que para la estación UAQ01-Ruido regular, ambas mostradas en la Figura A.5b, con la variante de las componentes horizontales igualan su EAF en un rango entre 2 y 15Hz como se muestra en la Figura A.6b. Debido al incremento de energía del ruido ambiental en este rango, se supera al ruido electrónico del acelerógrafo como se hace evidente tras el análisis de los PSD de la estación graficados en la Figura A.7b, sin embargo, la inestabilidad en la componente vertical termina por diezmar los picos a generarse en la FTE y termina por marcar unos picos en bajas frecuencias dominados por el ruido electrónico del equipo.

Revisando la FTE obtenida para el registro UAQ02-Inducido (Figura A.5c), se observan algunas similitudes de forma como lo son un espectro prácticamente plano y con un pico en frecuencias superiores a 10Hz. Analizando el EAF de cada componente de la estación (Figura A.6c) se pueden observar registros horizontales prácticamente idénticos en el rango de interés (0.2 a 10Hz) para los propósitos de la estimación de efecto de sitio (Bonney-Claudet et al., 2006). Observando los PSD de las componentes en la estación (Figura A.7c), es claro que el ruido ambiental registrado está sobre el nivel de ruido electrónico del sensor correspondiente al acelerógrafo Terra (-76.64dB), generándose registros idénticos en las componentes horizontales y confirmándose la inestabilidad de la componente vertical atribuible a una falta de calibración.

En la componente norte del registro UAQ01-Ruido bajo (Figura A.7a) se logró registrar el PSD del ruido puramente electrónico (sin interferencia de ruido ambiental) correspondiente al acelerógrafo Terra (SSA-320 / GSR-18), en el cual iguala al máximo registrado por Peterson (1993) en frecuencias superiores a 5Hz, lo cual refuerza la afirmación de la baja sensibilidad de los acelerógrafos en bajas frecuencias.

Dadas las observaciones anteriores, se puede concluir que la baja sensibilidad de los acelerómetros es un problema de sitios con ruido bajo o de baja

amplitud (menor al especificado por su ficha técnica), por lo tanto se recomienda su uso específicamente para mediciones de “strong motion” o movimientos fuertes.

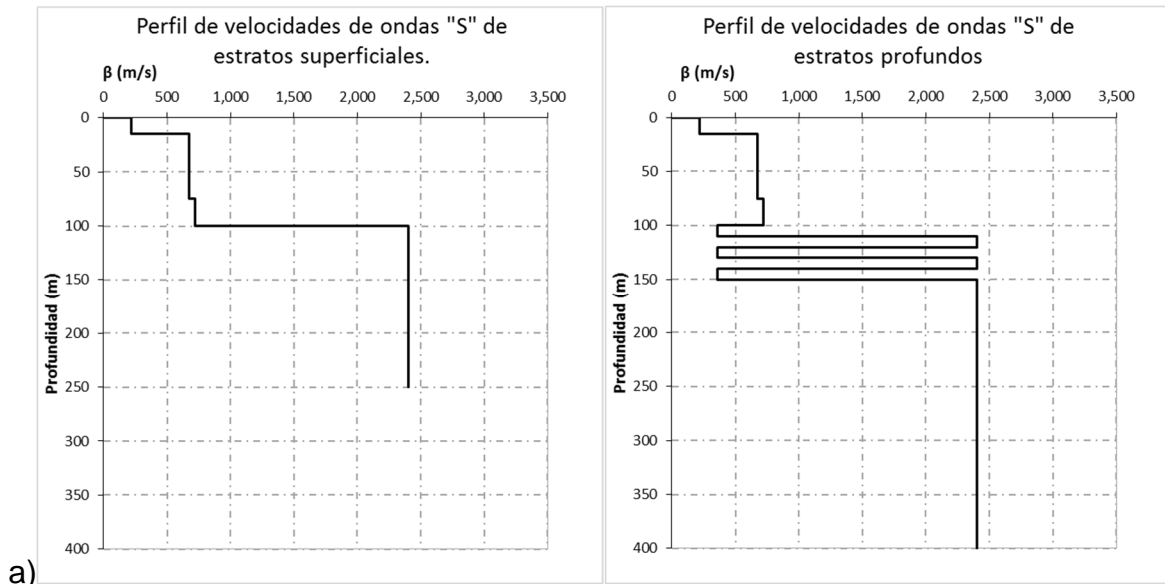
Para finalizar, se sugiere realizar un estudio con el equipo ya calibrado y reparar las fallas de conectividad a fin de generar registros continuos de mayor duración que sirvan como referencia en el caso de definir el ruido electrónico del equipo cumpliendo con el mínimo número de datos especificados por Evans (2008).

APÉNDICE 6. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE ESTRATOS PROFUNDOS EN EL EFECTO DE SITIO DE LA ZONA METROPOLITANA DE QUERÉTARO.

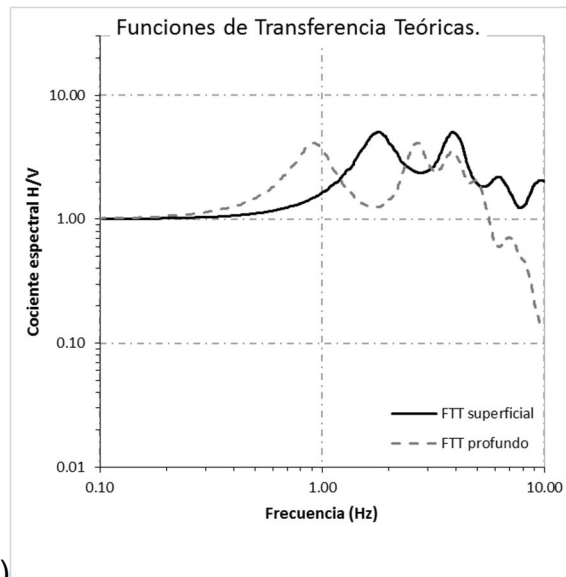
A fin de explicar la importancia de los sedimentos profundos en la respuesta a bajas frecuencias reportada por Lermo et al. (2013) y tomando en cuenta su existencia en el valle de Querétaro con base en los estudios previos de Carreón-Freyre (2005) y Pacheco (2007), quienes analizaron la estratigrafía y estructura geológica del valle de Querétaro basados en registros litológicos de pozos de aprovechamiento de agua y de secciones inferidas mediante métodos gravimétricos, se muestra a continuación un ejercicio teórico con dos modelos de corteza derivados de la Familia Espectral (FE) de sedimentos con $F_0 \approx 1$ y $3Hz$: el primero considera exclusivamente los sedimentos superficiales asentados sobre un lecho rocoso mientras que el segundo considera los mismos sedimentos pero sobre una intercalación de roca con sedimentos medianamente consolidados (mismo que corresponde a la condición dentro del valle de Querétaro) (Ver parte superior de la Figura A.8).

Posteriormente y aplicando la teoría de propagación unidimensional de ondas, así como utilizando el método de Haskell (1953) se obtienen las Funciones de Transferencia Teóricas (FTT), mismas que se muestran en la parte inferior de la Figura A.8, con línea continua color negro la correspondiente al modelo de corteza que no considera la intercalación de materiales medianamente consolidados en la base y con línea gris punteada la que corresponde al modelo de corteza que sí considera dicha intercalación.

Como muestran los resultados, se hace evidente que la intercalación de sedimentos o material suave en capas profundas tiende a generar una respuesta en el efecto de sitio hacia frecuencias bajas, misma que no es posible visualizar si el modelo considera exclusivamente los sedimentos más superficiales.



a)



b)

Figura A.8. Ejercicio del Apéndice. a) En la parte superior izquierda se muestra el modelo de corteza que considera los estratos superficiales asentados sobre roca sólida, mientras que en la superior derecha el correspondiente a una intercalación de material sedimentario en la roca que sirve de base para los estratos superficiales. b) Con línea continua color negro se muestra la FTT correspondiente al modelo de corteza que considera una base sólida, mientras que con color gris punteado la que considera intercalación de materiales suaves en la roca de la base.

Con base en las investigaciones previas del área de estudio provistas por Carreón-Freyre (2005) y Pacheco (2007) que muestran la existencia de estratos de

sedimentos profundos intercalados en la base de la roca, el antecedente provisto por Lermo et al. (2013) sobre la influencia de este tipo de sedimentos profundos en la generación de efectos de sitio en bajas frecuencias, el análisis simple del ejercicio generado en este Apéndice y la generación de las FTT para cada Familia Espectral (FE) de acuerdo al conocimiento previo de datos de velocidad de onda, densidades y espesores de cada entidad geológica, se reafirma la existencia de sedimentos profundos que generan como consecuencia una respuesta del suelo en bajas frecuencias.