



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES

VALIDACIÓN DEL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DE LOS COCIENTES
ESPECTRALES A PARTIR DE MICROTREMORES, PARA FINES DE MAPAS
SÍSMICOS DE INTENSIDAD

MODALIDAD DE GRADUACIÓN: TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ GONZÁLEZ

TUTOR PRINCIPAL
M. C. JAVIER FCO. LERMO SAMANIEGO, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR
DR. FRANCISCO JOSÉ SÁNCHEZ SESMA, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM
DR. EFRAÍN OVANDO SHELLEY, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM
DR. LEONARDO RAMÍREZ GUZMÁN, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM
DR. DANNY ARROYO ESPINOZA, PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. ENERO, 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. FRANCISCO JOSÉ SÁNCHEZ SESMA
Secretario: DR. EFRAÍN OVANDO SHELLEY
Vocal: M. C. JAVIER FRANCISCO LERMO SAMANIEGO
1^{er}. Suplente: DR. LEONARDO RAMÍREZ GUZMÁN
2^{do}. Suplente: DR. DANNY ARROYO ESPINOZA

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

M. C. JAVIER FRANCISCO LERMO SAMANIEGO

FIRMA

DEDICATORIA

A mí madre que me acompañó en esta nueva etapa, y a toda mi familia por brindarme su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Al Maestro Javier Lermo que me animó y apoyó a continuar en esta nueva etapa, así como por brindarme su amistad y confianza a lo largo de varios años.

A los Doctores Paco Sesma, Efraín Ovando, Dany Arroyo y Leonardo Ramírez por la dedicación para la revisión y aportación de sus comentarios para la mejora de éste trabajo.

Al Ingeniero Ángel Zúñiga por compartirme sus conocimientos y experiencia sobre la geología de la ciudad, plasmada en éste trabajo.

Al Doctor Mathieu Perton por su asesoramiento en cuanto a las técnicas recientes del tratamiento de señales.

A la Unidad de Posgrado y al Instituto de Ingeniería de la UNAM, así como al CONACYT, que han hecho posible la realización de mis estudios de maestría.

Y gracias a la vida que me ha dado y enseñado tanto...

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| RESUMEN | ix |
| ABSTRACT..... | x |
| RIASSUNTO | xi |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| ANTECEDENTES | 1 |
| OBJETIVOS..... | 2 |
| ALCANCES..... | 2 |
| ESTABILIDAD Y FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DE LOS COCIENTES ESPECTRALES H/V | 3 |
| 1.1. INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| 1.2. TÉCNICAS EMPÍRICAS PARA OBTENER EL COCIENTE ESPECTRAL (SSR, HVSR Y HVNR) Y FUNCIÓN TEÓRICA (FTT) PARA EVALUAR EL EFECTO DE SITIO | 7 |
| 1.2.1. Técnica Estándar (Standard Spectral Ratio, SSR)..... | 7 |
| 1.2.2. Técnica de Nakamura para sismos (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR) | 8 |
| 1.2.3. Técnica de Nakamura con registros de ruido ambiental (Horizontal to Vertical Noise Ratio HVNR o H/V).... | 9 |
| 1.2.4. Función de Transferencia Teórica (FTT)..... | 9 |
| 1.3. INSTRUMENTACIÓN..... | 10 |
| 1.4. MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE NAKAMURA (HVNR)12 | |
| 1.4.1. Método de la Media Cuadrática (MC) | 12 |
| 1.4.2. Método de Densidades Espectrales Direccionales (DED) | 12 |
| 1.5. COMPORTAMIENTO DEL COCIENTE HVNR CONFORME EL TIEMPO | 13 |
| 1.5.1. Comportamiento de los cocientes H/V en la ciudad de México..... | 18 |
| 1.6. VALIDACIÓN DE HVNR MEDIANTE LA COMPARACIÓN CON HVSR, SSR Y FTT | 20 |
| 1.7. ANÁLISIS Y TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES DE RUIDO AMBIENTAL: 1BIT Y BLANQUEADO ESPECTRAL..... | 26 |
| 1.7.1. Preparación de los datos para una estación individual | 26 |
| 1.7.2. Normalización temporal..... | 27 |
| 1.7.3. Aplicación de 1bit y spectral whitening a sismogramas de ruido ambiental para la ciudad de México | 28 |
| EVALUACIÓN DE LA AMPLIFICACIÓN EN LAS ESTACIONES EN ZONA DE LOMA PARA LA CUENCA DE MÉXICO | 34 |
| 2.1. INTRODUCCIÓN..... | 34 |
| 2.2. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES ACELEROGRÁFICAS EN ZONA DE LOMA (SUELOS DUROS O ROCA) Y SU CORRELACIÓN CON LA GEOLOGÍA..... | 35 |
| 2.3. EVALUACIÓN DEL EFECTO DE SITIO DE LAS ESTACIONES LOCALIZADAS EN ZONA DE LOMA | 40 |
| 2.4. CORRECCIÓN DE CUIP POR EFECTO DE SITIO | 44 |
| 2.5. PROPUESTA Y VALIDACIÓN DE CENA COMO ESTACIÓN DE REFERENCIA | 49 |

| | |
|--|------------|
| 2.5.1. Cálculo de acelerogramas sintéticos utilizando a CENA como estación base y los cocientes espectrales empíricos..... | 50 |
| CASOS DE APLICACIÓN: ESCENARIOS SÍSMICOS PARA LA CIUDAD DE MÉXICO..... | 54 |
| 3.1. SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985 (M _w 8.1) (TIPO: SUBDUCCIÓN)..... | 59 |
| 3.2. SISMO DEL 12 DE JULIO DE 1974 (M _c 3.5) (TIPO: LOCAL)..... | 65 |
| 3.3. SISMO DEL 15 DE JUNIO DE 1999 (M6.7) (TIPO: INTERPLACA)..... | 67 |
| 3.4. SISMO DEL 10 DE DICIEMBRE DE 2011 (M _w 6.5) (TIPO: INTERPLACA)..... | 71 |
| 3.5. SISMO DEL 20 DE MARZO DE 2012 (M _w 7.4) (TIPO: SUBDUCCIÓN)..... | 75 |
| ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 79 |
| CONCLUSIONES..... | 84 |
| REFERENCIAS..... | 86 |
| ANEXOS..... | 90 |
| ANEXO A..... | 91 |
| ANEXO B..... | 93 |
| ANEXO C..... | 96 |
| ANEXO D..... | 97 |
| ANEXO E..... | 104 |
| ANEXO F..... | 107 |
| ANEXO G..... | 115 |

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación de las estaciones temporales (círculos en negro) y estaciones permanentes (cuadros en negro) sobre los mapas geológicos de las distintas zonas estudiadas. Localización de los sismos registrados por las redes temporales, diferenciados con el número de evento, mismo que se muestra en la Tabla 1.1

Figura 1.2 Estadística de eventos sísmicos ocurridos en los últimos 14 años en el país (fuente: SSN)

Figura 1.3 Comparación entre cocientes espectrales obtenidos con sismógrafo (línea negra) y acelerógrafo (línea gris)

Figura 1.4 Comparación entre los cocientes espectrales calculados por medio de los métodos MC (izquierda) y DED (derecha) en intervalos de una hora en las estaciones MAT03, BHPP, TXAY y CHA05

Figura 1.5 Comportamiento de la amplitud en diferentes horas del día calculado para una día en ocho estaciones permanentes de la Red Acelerográfica de la ciudad de México, mediante el método de densidades espectrales direccionales (DED)

Figura 1.6 Comparación de cocientes espectrales: línea roja, método de Nakamura con sismos (HVSR); línea negra, método de Nakamura con ruido (HVNR); línea gris, técnica Estándar (SSR); línea azul, HVSR promedio

Figura 1.7 Correlación entre amplitudes obtenidas a partir de vibración ambiental (HVNR) y registros de sismo (HVSR, SSR). (Izquierda) Haghshenas *et al.*, (derecha) este estudio

Figura 1.8 Comportamiento de los cocientes espectrales con el método DED aplicando los blanqueados espectrales 1 bit (línea discontinua gris) y running-absolute-mean (r-a-m) para primer caso (línea azul) y segundo caso (línea negra) a sismogramas de ruido sísmico

Figura 1.9 Comparación entre la respuesta del suelo en función del tipo de sismo subducción (izquierda) y cortical (derecha) para siete estaciones de la RACM y con el cociente HVNR calculado mediante DED y r-a-m (línea negra)

Figura 2.1 Ubicación de las estaciones permanentes ubicadas solamente en zona de loma sobre el mapa geológico para la porción centro de la Cuenca de México (Mooser et al., 1996). Perfiles geológicos de la distribución estratigráfica en las diferentes zonas de loma

Figura 2.2 Perfil estratigráfico con dirección Norte-Sur (corte A-A') de la parte central de la cuenca (Mooser, 2013)

Figura 2.3 Corte estratigráfico con dirección Oeste-Este (corte B-B') de la parte poniente de la cuenca (Zúñiga, 2014)

Figura 2.4 Corte estratigráfico con dirección SW-NE (corte C-C') de la parte sur-poniente de la cuenca (Zúñiga, 2014)

Figura 2.5 Corte estratigráfico con dirección NW-SE (corte D-D') de la parte poniente de la cuenca (Zúñiga, 2014)

Figura 2.6 Corte estratigráfico con dirección SW-NE (corte E-E') de la parte sur de la cuenca (Zúñiga, 2014)

Figura 2.7 Corte estratigráfico con dirección SW-NE (corte F-F') de la parte sur-poniente de la cuenca (Zúñiga, 2014)

Figura 2.8 Corte geológico del Cerro de la Estrella (Zúñiga, 2014)

Figura 2.9 Curvas típicas de los cocientes H/V calculados sobre roca (SESAME, 2005)

Figura 2.10 Evaluación del efecto de sitio en las estaciones acelerográficas ubicadas en la zona de loma

Figura 2.11 Comparación del efecto de sitio presente en 4 estaciones acelerográficas mediante el mismo número de eventos analizados en cada estación

Figura 2.12 Acelerogramas del sismo del 10/12/2011 (M_w 6.5) registrado en CENA y CUIP para ambas componentes horizontales

Figura 2.13 Acelerogramas del sismo del 20/03/2012 (M_w 7.4) registrado en CENA y CUIP para ambas componentes horizontales

Figura 2.14 Colocación de un sismógrafo de banda ancha en las casetas de las estaciones acelerográficas CUIP (izquierda) y CENA (derecha) para el registro de ruido ambiental

Figura 2.15 Modelo de velocidades para la estación CUIP (superior izquierdo) y la estación CENA (superior derecho). Comparación entre FFT (línea en negro), HVSR promedio (línea en rojo) y HVNR (línea en azul)

Figura 2.16 Comparación de los espectros de respuesta reales y calculados a partir de los cocientes obtenidas con la técnica HVSR convolucionados mediante los registros de las estaciones CENA y CUIP, para el sismo del 20 de marzo, 2012 (M_w 7.4). Componente Este-Oeste

Figura 2.17 Ejemplo de la métrica usada en este estudio según Olsen y Mayhew (2010)

Figura 3.1 Localización de los cocientes espectrales, los cuales servirán para el cálculo de historias sísmicas según el sismo a estudiar

Figura 3.2 Familias espectrales para la zona urbana de la ciudad de México. Criterio que define las microzonas sísmicas a partir de su forma espectral y del rango de frecuencias del efecto de sitio

Figura 3.3 Localización de los eventos sísmicos usados para la generación de los escenarios sísmicos

Figura 3.4 Comparación de espectros de respuesta real y calculado para el sismo del 19 de septiembre de 1985 en SCT

Figura 3.5 Espectros de respuesta en seudoaceleración calculados con las seudo-Funciones de Transferencia Empíricas (1990) para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 19 de septiembre de 1985 (M_w 8.1)

Figura 3.6 Espectros de respuesta en seudoaceleración calculados con las seudo-Funciones de Transferencia Empíricas (2012) para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 19 de septiembre de 1985 (M_w 8.1)

Figura 3.7 Escenario sísmico para un periodo estructural de 2.0s. (edificios de 16-20 pisos), estimado excitando el terreno con el sismo del 19 de septiembre de 1985 en dos fechas diferentes: 1990 (izquierda) y 2013 (derecha), ambos obedeciendo la misma escala (cm/s^2)

Figura 3.8 Mapa de intensidades sísmicas propuesto para diferentes periodos estructurales para el sismo del 19 de septiembre de 1985, $M_w 8.1$ tipo subducción. Escala en cm/s^2

Figura 3.9 Mapa de intensidades sísmicas para diferentes periodos estructurales para el sismo del 19 de septiembre de 1985, $M_w 8.1$ tipo subducción (Fuente: IdeI, UNAM)

Figura 3.10 Espectros de respuesta en pseudoaceleración calculados con las pseudo-Funciones de Transferencia Empíricas (2012) para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 12 de julio de 1974 ($M_c 3.5$)

Figura 3.11 Mapa de intensidades sísmicas propuesto para diferentes periodos estructurales para el sismo del 12 de julio de 1974, $M_c 3.5$ tipo local. Escala en cm/s^2

Figura 3.12 Distribución de aceleraciones sísmicas para un periodo estructural de 0.1s (casa habitación de uno a dos pisos), estimado excitando el terreno con el sismo del 12 de julio de 1974, $M_c 3.5$ tipo local. Escala en cm/s^2

Figura 3.13 Espectros de respuesta en pseudoaceleración calculados con las pseudo-Funciones de Transferencia Empíricas (2012) para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 15 de junio de 1999 ($M 6.7$)

Figura 3.14 Mapa de intensidades sísmicas propuesto para diferentes periodos estructurales para el sismo del 15 de junio de 1999, $M 6.7$ tipo interplaca. Escala en cm/s^2

Figura 3.15 Mapa de intensidades sísmicas para diferentes periodos estructurales para el sismo del 15 de junio de 1999, $M 6.7$ tipo interplaca (Fuente: IdeI, UNAM)

Figura 3.16 Espectros de respuesta en pseudoaceleración calculados con las pseudo-Funciones de Transferencia Empíricas para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 10 de diciembre de 2011 ($M_w 6.5$)

Figura 3.17 Espectros de respuesta en pseudoaceleración de las estaciones acelerográficas de la red RACM para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 10 de diciembre de 2011 ($M_w 6.5$)

Figura 3.18 Mapa de intensidades sísmicas propuesto para diferentes periodos estructurales para el sismo del 10 de diciembre de 2011, $M_w 6.5$ tipo interplaca. Escala en cm/s^2

Figura 3.19 Mapa de intensidades sísmicas para diferentes periodos estructurales para el sismo del 10 de diciembre de 2011, $M_w 6.5$ tipo interplaca (Fuente: IdeI, UNAM)

Figura 3.20 Espectros de respuesta en pseudoaceleración calculados con las pseudo-Funciones de Transferencia Empíricas para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 20 de marzo de 2012

Figura 3.21 Espectros de respuesta en pseudoaceleración de las estaciones acelerográficas de la red RACM para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 20 de marzo de 2012 ($M_w 7.4$)

Figura 3.22 Mapa de intensidades sísmicas propuesto para diferentes periodos estructurales para el sismo del 20 de marzo de 2012, $M_w 7.4$ tipo subducción

Figura 3.23 Mapa de intensidades sísmicas para diferentes periodos estructurales para el sismo del 20 de marzo de 2012, $M_w 7.4$ tipo subducción (Fuente: IdeI, UNAM)

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Características de los sismos analizados en este estudio

Tabla 1.2 Tiempo de registro en las estaciones temporales para la obtención de los cocientes espectrales con acelerógrafo y sismógrafo

Tabla 1.3 Modelo estratigráfico unidimensional para el sitio MAT03

Tabla 1.4 Modelo estratigráfico unidimensional para el sitio BHPP

Tabla 1.5 Modelo estratigráfico unidimensional para el sitio TXAY

Tabla 1.6 Modelo estratigráfico unidimensional para el sitio CHA05

Tabla 1.7 Modelo estratigráfico unidimensional para el sitio TUX21

Tabla 1.8 Modelo estratigráfico unidimensional para la estación VIH01

Tabla 1.9 Modelo estratigráfico unidimensional para la estación IB22

Tabla 2.1 Parámetros de localización y características de los sismos analizados en la Figura 2.11

Tabla 2.2 Comparación de parámetros entre los registros reales para las estaciones ESTS, CENA y CUIP y corregidos mediante el método teórico (TEO) y por deconvolución (DEC) para el sismo del 10/12/2011, para ambas componentes

Tabla 2.3 Comparación de parámetros entre los registros reales para las estaciones ESTS, CENA y CUIP y corregidos mediante el método teórico (TEO) y por deconvolución (DEC) para el sismo del 20/03/2012, para ambas componentes

Tabla 2.4 Modelo estratigráfico unidimensional para la estación acelerográfica CUIP (superior) y CENA (inferior)

Tabla 2.5 Estadística de casos obtenidos para 10/Diciembre/2011 CENA / CUmod Componente EW

Tabla 2.6 Estadística de casos obtenidos para 10/Diciembre/2011 CENA / CUmod Componente NS

Tabla 2.7 Estadística de casos obtenidos para 20/Marzo/2012 CENA / Cumod Componente EW

Tabla 2.8 Estadística de casos obtenidos para 20/Marzo/2012 CENA / CUmod Componente NS

RESUMEN

En éste trabajo se presenta una metodología para la generación de mapas de amenaza sísmica. Para el cálculo de series de tiempo sintéticas se utiliza la Teoría de las Vibraciones Casuales. El mayor inconveniente de ésta teoría consiste en la confiabilidad de las funciones de transferencia empíricas. Sin embargo, se ha comprobado que siguiendo una serie de consideraciones en la adquisición y procesado del ruido sísmico que en éste trabajo se proponen, es posible estimar confiablemente la forma espectral, la frecuencia dominante pero sobretodo la amplificación relativa. Del análisis métrico realizado a los datos obtenidos, se ha calculado un ajuste de bondad entre 62 a 77 con respecto a los valores reales. Con estos valores de confiabilidad, se valida el método propuesto para la generación de mapas de amenaza sísmica.

Palabras claves:

Microtremores, factor de amplificación, amenaza sísmica

ABSTRACT

This work describes a methodology for generating seismic hazard maps. For the computation of synthetic ground-motion time series of the Theory of Casual Vibrations is used. The major drawback of this theory is the reliability of empirical transfer functions. However, following a series of considerations about the acquisition and processing of seismic noise, which are proposed in this work, it is possible to reliably estimate the spectral shape, dominant frequency but above all the relative amplification. From a metric analysis of the data obtained, we calculated a goodness-of-fit of 62-77 regarding the real values. With these values of reliability, the proposed generation seismic hazard maps method is validated.

Key-words:

Microtremors, amplification, seismic hazard

RIASSUNTO

In questo lavoro di tesi si presenta una metodologia per la creazione di mappe di pericolosità sismica. Per il calcolo delle accelerazioni sintetiche del suolo si fa l'uso della Teoria delle Vibrazioni Casuali. L'inconveniente principale di questa teoria è l'affidabilità delle funzioni di trasferimento empiriche. Tuttavia si è verificato che, tenendo in conto determinate considerazioni nell'acquisizione e nel processamento dei rumori sismici proposte in questo lavoro, è possibile stimare in modo affidabile la forma spettrale, la frequenza dominante ma soprattutto l'amplificazione relativa. Dall'analisi metrica dei dati ottenuti, si è calcolato la misura di bontà del fitting tra 62 a 77 per quanto riguarda i valori reali. Con questi valori di affidabilità, il metodo di mappe di pericolosità sismica proposto viene convalidato.

Parole chiave:

Rumori sismici, amplificazione, pericolosità sismica

*“El suelo natural nunca es uniforme,
sus propiedades cambian de punto a punto,
mientras que nuestro conocimiento de sus propiedades
se limita a los pocos sitios en que las muestras han sido recogidas”*

Karl Von Terzaghi

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

En los últimos años, a partir de la instalación de redes temporales en al menos 10 localidades en México así como en la ciudad de Panamá, con apoyo y colaboración del Instituto de Geociencias de la Universidad de Panamá, se han registrado una gran cantidad de sismogramas de ruido sísmico en diferentes ambientes geológicos, con una duración de semanas e incluso meses.

El registrar por grandes lapsos de tiempo ha permitido el registro de sismos de importante magnitud ($M > 6$) de diferentes fuentes y trayectorias sísmicas. Con ésta información se emplearon técnicas empíricas que ocupan información de sismo (HVSr y SSR) para la estimación de cocientes espectrales que de manera tradicional, se afirma que describen mejor el comportamiento dinámico de los suelos.

Al conocer los parámetros de frecuencia fundamental y amplificación relativa, se buscó la manera de estimar en base a la técnica de Nakamura con ruido sísmico (HVNR o H/V) resultados similares a los obtenidos con sismo. Lo anterior condujo a desarrollar una metodología que abarca desde el uso de ciertos sensores para la adquisición de datos, como consideraciones especiales en el procesado de las señales. Los resultados han mostrado que empleando la metodología que se propone en éste trabajo sí es posible tener una buena aproximación tanto en frecuencia pero sobretodo en amplitud entre las técnicas con sismo y ruido ambiental.

Con la confiabilidad de que los cocientes H/V describen de manera robusta el comportamiento dinámico del suelo, se han utilizado como *seudo-Funciones de Transferencia Teóricas* con el fin de calcular series de tiempo sintéticas para un sitio dado, y en base a estas generar escenarios de amenaza sísmica. Para dar validez a los resultados calculados con respecto a los valores reales observados, se ha empleado una métrica que de acuerdo a Olsen y Mayhew (2010), los resultados muestran un ajuste de bondad del 62 a 77.

Este estudio está dividido en cinco secciones. La primera parte aborda la evolución y estabilidad del cociente espectral H/V debido a varios factores como: longitud del registro, intervalo de tiempo analizado y diferentes métodos de evaluación, así como la aplicación de filtros avanzados. Posteriormente se realiza un comparativo entre la forma espectral, frecuencia y amplitud de los cocientes espectrales con microtemores (HVNR) y con sismos (HVSr, SSR), además se hace una comparación con respecto a Funciones de Transferencia Teóricas (FFT). En el segundo capítulo, se analiza la respuesta sísmica de las estaciones permanentes localizadas en la zona de loma dentro de la ciudad de México, para determinar cuál de ellas presenta el menor efecto de sitio. En el tercer capítulo se presentan cinco escenarios de amenaza sísmica para cuatro fuentes sismogénicas para la ciudad de México. En el cuarto capítulo se hace una discusión de resultados obtenidos en éste trabajo. Finalmente en el quinto capítulo se citan las conclusiones más relevantes del estudio.

OBJETIVOS

El objetivo principal que persigue ésta tesis consiste en proponer una nueva metodología para la generación de mapas de intensidad a partir de los cocientes espectrales H/V.

Los objetivos secundarios de este trabajo se listan a continuación:

- Se propone una metodología para el procesado de los registros de microtemores, con el objeto de estimar de manera confiable el factor de amplificación relativo.
- Se hace una revisión del efecto de sitio en las estaciones acelerográficas localizadas sobre la zona de loma en la ciudad de México, para determinar cuál de éstas será tomada como un sitio de referencia.
- Se postulan cinco escenarios sísmicos para la ciudad de México, donde se muestran la distribución de aceleraciones para diferentes fuentes sismogénicas.

ALCANCES

- Demostrar que mediante registros de ruido ambiental es posible estimar adecuadamente la forma espectral y la amplificación del suelo, equiparable con la obtenida mediante registros de sismo, siempre y cuando se realice se tomen en consideración ciertos aspectos, como un buen tratamiento digital de las señales sísmicas.
- Se propone a la estación CENA para ser tomada como una estación de referencia, puesto que los espectros de respuesta en aceleración calculados usando los registros de esta estación como señal de entrada, presentan un buen ajuste con respecto a los valores reales.
- Calcular una estación virtual empleando los registros de las estaciones CENA y CUIP, éste último corregido.
- Se espera que esta metodología pueda ser utilizada en cualquier ciudad del país para la generación de mapas de intensidad, sin la necesidad de tener información geotécnica, sondeos y/o perfiles de velocidad de ondas de corte, etc.

CAPÍTULO 1

ESTABILIDAD Y FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DE LOS COCIENTES ESPECTRALES H/V

Este capítulo consiste en garantizar la estabilidad del cociente espectral H/V obtenido en base a registros de ruido ambiental. Se hace una breve reseña introductoria de las técnicas empíricas para la obtención de los cocientes espectrales. A partir del apartado 1.3, se presentan las consideraciones necesarias que garantizan la estabilidad del cociente espectral H/V, así como una buena estimación de la amplitud.

En el apartado 1.7 se aplican un par de técnicas empleadas al tratamiento de señales de ruido sísmico con fines de tomografías sísmicas, pero en nuestro caso para el cálculo de cocientes espectrales H/V. Esto surge a razón de que en la literatura no existen trabajos que hablen sobre ello, siendo éste trabajo un aporte en presentar dichos resultados.

1.1. INTRODUCCIÓN

Es bien conocido que los movimientos sísmicos pueden incrementarse significativamente en la superficie de las cuencas sedimentarias. El contraste de impedancia del subsuelo y la geometría de la cuenca tienen una gran influencia sobre la amplificación de las ondas sísmicas tanto en el nivel de vibración como en el incremento de la duración del evento. También es ampliamente aceptado que las estimaciones más confiables de la amplificación de las capas superficiales se obtiene analizando registros de sismo. Por ejemplo, si un conjunto de eventos es registrado simultáneamente sobre terreno blando y en un sitio de referencia, libre de amplificación local, los cocientes espectrales proporcionan una estimación confiable de la función de transferencia en suelos blandos. Sin embargo, si la tasa de sismicidad es moderada o un sitio de referencia adecuado no se puede encontrar, se convierte en un método difícil de aplicar. Por esta razón, las alternativas basadas en registros de vibración ambiental han ganado popularidad.

Los registros de ruido, generalmente analizados utilizando el cociente espectral horizontal entre vertical (H/V), han demostrado ser confiables para determinar la frecuencia dominante de los depósitos de suelo blando. En cuanto a la amplificación máxima, los resultados han sido variados.

A razón de esto, se ha generado la controversia sobre la capacidad de los microtemores para estimar la amplificación relativa de un sitio. Son muchos los trabajos y autores que confirman la utilidad de los microtemores para inferir la frecuencia dominante de un depósito de suelo, pero desestiman ésta herramienta como un buen estimador de la amplificación (Bonneyoy-Claudet *et al.*, 2006).

Un grupo de investigación europeo con varios años de estudiar el campo de los microtemores, desarrolló un manual para la adquisición, procesado e interpretación de ruido sísmico en 2005. En dicho manual se menciona el procedimiento para la toma de registros de vibración ambiental, una

serie de recomendaciones en la duración del tiempo de registro para obtener la frecuencia fundamental mínima esperada para diferentes intervalos de frecuencias. Refiere, como mínimo, un rango de diez minutos para el registro de altas frecuencias (1 a 10 Hz) y de treinta minutos para el registro de bajas frecuencias (0.1 a 1 Hz). Sin embargo, no refieren el tiempo mínimo adecuado para estimar confiablemente el factor de amplificación. Lo cierto es que hasta hoy, no existe un consenso sobre el tiempo óptimo necesario de medición.

A partir de 2010 se han instalado diversas estaciones temporales en varios sitios de México y en la ciudad de Panamá. Lo anterior con el objetivo de obtener registros tanto de ruido ambiental como de sismos, y con esta información evaluar las funciones obtenidas con los métodos HVNR y HVSR.

En las campañas de adquisición de datos, se registraron sismos de diversas magnitudes, sin embargo para este trabajo se analizaron aquellos que presentan magnitudes mayores de $M_w 4.5$. Entre estos destacan los sismos del 10 de diciembre de 2011 ($M_w 6.5$) y del 20 de marzo de 2012 ($M_w 7.5$), que por sus características fueron percibidos con gran intensidad en la parte centro del país.

La ubicación de las redes temporales fue en los estados de Puebla, Tlaxcala, Chiapas, Tabasco, Veracruz y Distrito Federal. Así mismo se colocó una red temporal en la ciudad de Panamá. Cada sitio presenta diferentes niveles de ruido antropogénico y por su localización se encuentran bajo diferentes ambientes geológicos y geotécnicos. La Figura 1.1 muestra la localización de las estaciones temporales con puntos negros. En la Tabla 1.1 se enlista la información relacionada para los sismos incluidos en éste análisis.

Para la implementación de estas redes temporales se utilizaron sismógrafos triaxiales de banda ancha CMG-6TD con las siguientes características instrumentales: rango de frecuencia de 0.033 – 50 Hertz, digitalizador de 24 bits y con intervalo de muestreo configurado a 100 muestras/s.

Por último, matemáticamente se describe el grado de amplificación en función de algunas variables como: profundidad del estrato rocoso o estrato competente (H), la densidad del suelo y del estrato rocoso (ρ), frecuencia angular (ω) y las velocidades de onda de cortante de la roca ($v_{s,r}$) y el suelo ($v_{s,s}$), respectivamente. La amplificación puede concebirse como un parámetro de intensidad; éste se describe como el cociente entre las amplitudes de los desplazamientos horizontal en la superficie y en el estrato rocoso (v_0), en la superficie del suelo (v_s), y en el límite entre los materiales (v_B)

$$\left| \frac{\hat{v}_s}{\hat{v}_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2(\Omega) + \gamma^2 \cdot \sin^2(\Omega)}}$$

$$\left| \frac{\hat{v}_B}{\hat{v}_0} \right| = \frac{|\cos(\Omega)|}{\sqrt{\cos^2(\Omega) + \gamma^2 \cdot \sin^2(\Omega)}}$$

donde Ω es una frecuencia adimensional y γ es el cociente entre las impedancias específicas de dos materiales.

En tanto que: $\Omega = \frac{H}{\omega \cdot v_{s,s}}$, $\gamma = \frac{\rho_s \cdot v_{s,s}}{\rho_b \cdot v_{s,r}}$. El valor máximo del cociente entre v_s y v_0 es $\left| \frac{\hat{v}_s}{\hat{v}_0} \right|_{\max} = \frac{1}{\gamma}$

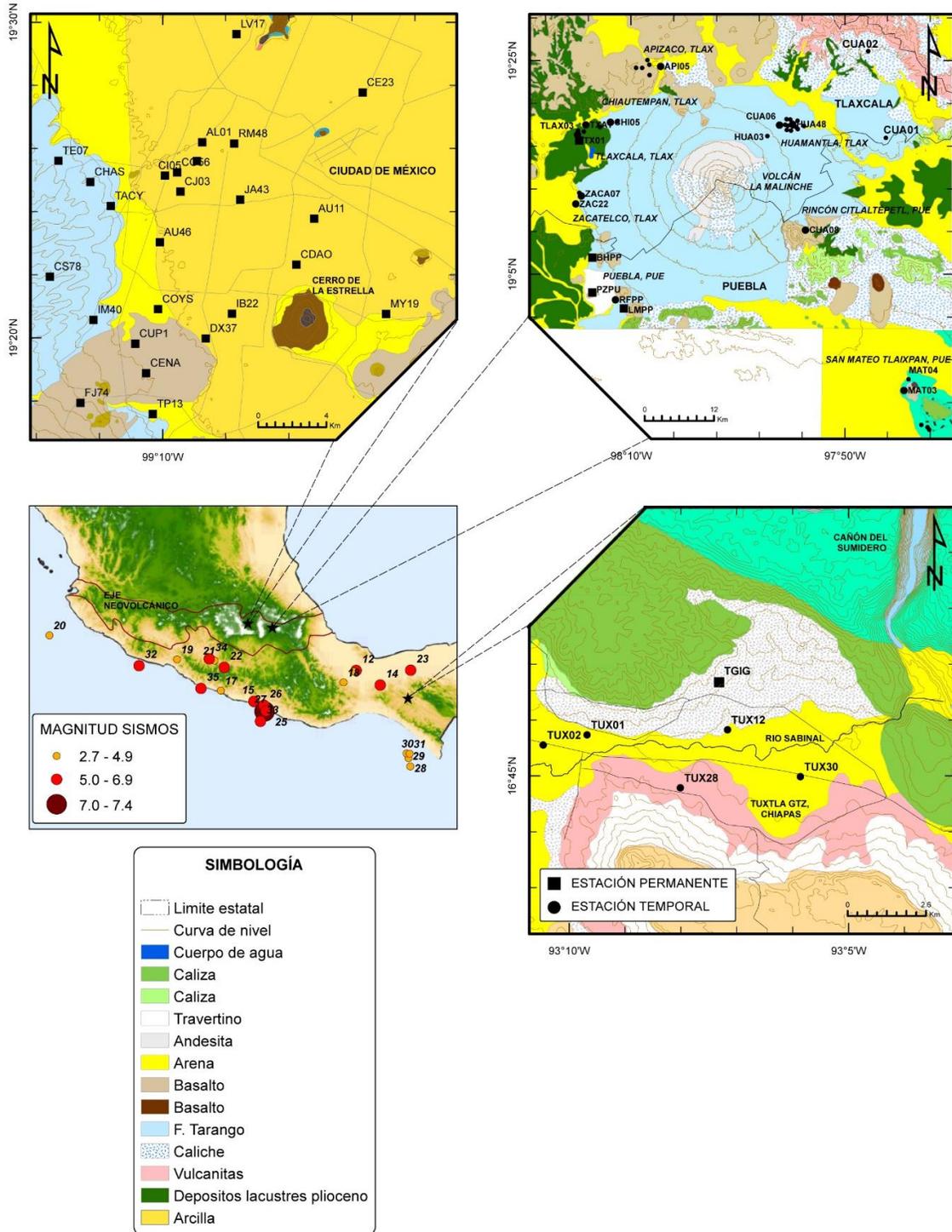


Figura 1.1 Ubicación de las estaciones temporales (círculos en negro) y estaciones permanentes (cuadros en negro) sobre los mapas geológicos de las distintas zonas estudiadas. Localización de los sismos registrados por las redes temporales, diferenciados con el número de evento, mismo que se muestra en la Tabla 1.1

Tabla 1.1 Características de los sismos analizados en este estudio (Fuente: SSN)

| Ev | Fecha | Hora local | Lat | Long | Prof (Km) | Mag. | Zona | Registrado en: |
|----|------------|------------|-------|---------|-----------|------|---|---|
| 1 | 15/06/1999 | 15:42:05 | 18.2 | -97.47 | 92 | 6.7 | LIMITE PUEBLA OAXACA | BHPP |
| 2 | 30/09/1999 | 11:31:14 | 15.89 | -97.07 | 12 | 7.4 | COSTA DE OAXACA | BHPP |
| 3 | 20/08/2000 | 03:24:20 | 17.43 | -94.39 | 219 | 4.7 | ISTMO DE TEHUANTEPEC | BHPP |
| 4 | 07/10/2001 | 21:39:20 | 16.98 | -100.16 | 10 | 6.1 | COSTA DE GUERRERO | BHPP |
| 5 | 27/04/2009 | 11:46:27 | 16.9 | -99.58 | 7 | 5.7 | 23 km al NOROESTE de SAN MARCOS, GRO | RFPP, AU11, CE23, DX37, IB22, JA43, RM48 |
| 6 | 22/05/2009 | 14:24:18 | 18.13 | -98.44 | 45 | 5.7 | 26 km al SURESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE | AU11, CE23, CJ03, IB22, JA43, RM48, MY19 |
| 7 | 15/08/2009 | 08:22:45 | 18.06 | -100.67 | 55 | 5.4 | 33 km al SUR de CD ALTAMIRANO, GRO | AU11 |
| 8 | 02/02/2010 | 22:59:42 | 17.97 | -98.2 | 59 | 4.7 | 31 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE | PZPU |
| 9 | 08/02/2010 | 18:47:40 | 15.9 | -96.86 | 37 | 5.8 | 23 km al ESTE de PUERTO ESCONDIDO, OAX | PZPU, AL01, AU11, CE23, CJ03, MY19 |
| 10 | 16/04/2010 | 05:01:07 | 16.14 | -98.41 | 10 | 5.1 | 45 km al SUROESTE de PINOTEPA NACIONAL, OAX | PZPU |
| 11 | 30/06/2010 | 02:22:27 | 16.22 | -98.03 | 8 | 6 | 13 km al SUR de PINOTEPA NACIONAL, OAX | PZPU, AL01, AU46, BL45, CE23, CI05, CJ03, CO56, COYS, IB22, JA43, LV17, RM48, TP13, MY19, LI33 |
| 12 | 25/02/2011 | 07:07:27 | 17.73 | -95.21 | 135 | 6 | 32 km al SUROESTE de SAYULA DE ALEMÁN, VER | API03, API05, API06, API07, API09, API10, CHA05, CHAU01 |
| 13 | 25/02/2011 | 07:07:27 | 17.73 | -95.21 | 135 | 6 | 32 km al SUROESTE de SAYULA DE ALEMÁN, VER | PZPU |
| 14 | 07/04/2011 | 08:11:22 | 17.2 | -94.34 | 167 | 6.7 | 83 km al SUROESTE de LAS CHOAPAS, VER | HUA01, HUA 02, HUA03, COYS |
| 15 | 05/05/2011 | 08:24:07 | 16.61 | -98.91 | 11 | 5.5 | 55 km al OESTE de OMETEPEC, GRO | HUA06, HUA10, HUA12, HUA13, HUA15 |
| 16 | 03/06/2011 | 09:21:25 | 17.69 | -95.31 | 135 | 4.9 | 35 km al SURESTE de J RODRIGUEZ CLARA, VER | HUA36, HUA43, HUA45, HUA46, HUA49 |
| 17 | 22/09/2011 | 21:59:18 | 17 | -100.1 | 5 | 4.8 | 2 km al SUROESTE de COYUCA DE BENITEZ, GRO | ZAC22, ALS04, ALS05, ALS06 |
| 18 | 23/09/2011 | 12:14:03 | 17.3 | -95.67 | 101 | 4.9 | 81 km al SUROESTE de J RODRIGUEZ CLARA, VER | ALS04, ALS05, ALS06 |
| 19 | 28/09/2011 | 23:17:42 | 18.13 | -101.69 | 8 | 4.9 | 56 km al NORTE de ZIHUATANEJO, GRO | MAT03 |
| 20 | 12/10/2011 | 05:54:37 | 19 | -106.3 | 5 | 4.7 | 198 km al SUROESTE de CIHUATLAN, JAL | MAT03 |
| 21 | 14/10/2011 | 07:25:39 | 18.09 | -100.33 | 45 | 3.9 | 26 km al SUR de ARCELIA, GRO | MAT04 |
| 22 | 10/12/2011 | 19:47:25 | 17.84 | -99.98 | 58 | 6.5 | 53 km al NOROESTE de ZUMPANGO DEL RIO, GRO | TLAX03, TLAX04, TLAX05, TLAX06, TX01, CUA01, CUA02, CUA06, AU11, AU46, CE23, CI05, CJ03, CO56, COYS, DX37, IB22, JA43, LV17, RM48, TP13, LI33 |
| 23 | 21/01/2012 | 12:47:15 | 17.74 | -93.24 | 16 | 6 | 86 km al SUROESTE de MAPASTEPEC, CHIS | ZACA04, ZACA07 |
| 25 | 20/03/2012 | 12:02:47 | 16.25 | -98.521 | 16 | 7.4 | 59 km al SUR de OMETEPEC, GRO | TX01, AU11, AU46, BL45, CI05, CJ03, CO56, DX37, IB22, JA43, LV17, RM48, TP13, MY19, LI33 |
| 26 | 01/04/2012 | 17:23:48 | 16.47 | -98.55 | 20 | 5 | 28 km al SUROESTE de OMETEPEC, GRO | TUX01, TXAY |
| 27 | 02/04/2012 | 12:36:42 | 16.27 | -98.47 | 10 | 6 | 45 km al OESTE de PINOTEPA NACIONAL, OAX | TX01, TXAY, TUX02 |
| 28 | 03/04/2012 | 17:56:56 | 14.26 | -93.25 | 17 | 4.1 | 127 km al SUROESTE de CD HIDALGO, CHIS | TUX12 |
| 29 | 04/04/2012 | 22:58:42 | 14.56 | -93.32 | 8 | 4.5 | 107 km al SUROESTE de MAPASTEPEC, CHIS | TUX12 |
| 30 | 06/04/2012 | 05:25:10 | 14.73 | -93.39 | 7 | 4.1 | 95 km al SUROESTE de MAPASTEPEC, CHIS | TUX12, TUX30 |

| | | | | | | | | |
|----|------------|----------|-------|----------|----|-----|---|--------------|
| 31 | 06/04/2012 | 10:38:48 | 14.72 | -93.28 | 16 | 4.9 | 90 km al SUROESTE de MAPASTEPEC, CHIS | TUX12, TUX28 |
| 32 | 11/04/2012 | 17:55:10 | 17.9 | -103.06 | 16 | 6.4 | 79 km al OESTE de LA MIRA, MICH | TXAY, TX01 |
| 33 | 29/09/2012 | 02:11:10 | 15.89 | -98.67 | 15 | 5.5 | 82 km al SUROESTE de PINOTEPA NACIONAL, OAX | TX01 |
| 34 | 15/11/2012 | 03:20:22 | 18.15 | -100.52 | 40 | 6.1 | 26 km al SURESTE de cd ALTAMIRANO, GRO | TX01 |
| 35 | 04/04/2013 | 19:58:48 | 17.08 | -100.82 | 17 | 5.3 | 26 km al SUROESTE de TECPAN, GRO | VER01, VER02 |
| 36 | 09/01/2014 | 04:35:34 | 8.99 | -79.7888 | -- | 2.7 | 4 km al NOROESTE de RÍO CONGO, PANAMÁ | PAN01 |

1.2. TÉCNICAS EMPÍRICAS PARA OBTENER EL COCIENTE ESPECTRAL (SSR, HVSR Y HVNR) Y FUNCIÓN TEÓRICA (FTT) PARA EVALUAR EL EFECTO DE SITIO

Esta sección tiene el propósito de resumir las características de las técnicas empíricas y teórica disponibles y comúnmente usadas para estimar la frecuencia fundamental de un depósito de suelo. En la literatura existen trabajos que explican detalladamente los fundamentos matemáticos que rigen a estas técnicas (Haskell, 1960, Borchardt, 1970, Nakamura, 1989, Lermo y Chávez-García, 1994, Mucciarelli, 1998). A continuación se presenta tan sólo una breve reseña de los métodos, indicándose las ventajas y desventajas de cada metodología.

1.2.1. Técnica Estándar (Standard Spectral Ratio, SSR)

Esta técnica fue introducida por Borchardt (1970), el cual considera que la estación de referencia ideal debe localizarse donde la roca aflora. Además, para fines de ingeniería sísmica debe cumplir con una velocidad de onda S mínima de 700 m/s.

También se menciona que una estación cuyo factor de amplificación es menor a 2 veces en un rango entre 0.2 a 10 Hz (rango de utilidad en ingeniería sísmica) puede ser considerada sin efecto de sitio.

Esta técnica consiste en realizar el cociente de los espectros de Fourier de las componentes horizontales de la estación localizada en suelo y la estación localizada sobre roca. Ésta técnica nos permite tener una idea de la amplificación del suelo con respecto a una referencia.

Las desventajas para el cálculo de la razón espectral estándar con este método son:

- Se requiere forzosamente una estación de referencia.
- Se deben obtener registros de sismos simultáneamente en las estaciones de suelo y en la de referencia.
- Dependiendo de las condiciones geológicas de una región, será viable o no designar a un sitio libre de amplificación local. Hablando en específico de la zona comprendida por el Eje Neovolcánico, que cruza por la mitad al país, la tarea de hallar un sitio que no presente efecto de sitio a causa de los depósitos volcánicos resulta ser una tarea bastante compleja.

- Es necesario el registro de sismos moderados y/o grandes comprendidos a partir de una magnitud $M_w \geq 5.0$, para una buena estimación del cociente espectral.

1.2.2. Técnica de Nakamura para sismos (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR*)

Para la evaluación del efecto de sitio con ésta técnica, basta con disponer de una sola estación en el sitio de interés, independientemente del tipo de suelo que sea éste: cohesivo, friccionante o roca. La técnica consiste en calcular el cociente de los espectros de Fourier de cada una de las componentes horizontales entre la vertical a partir de registros de sismo.

Las ventajas de esta técnica son:

- No requiere registros de sismos simultáneos en las estaciones de suelo blando y en el sitio de referencia.
- No requiere de una estación de referencia.
- Con el registro de sismos de mediana intensidad, $3.5 \leq M_w \leq 5.0$, es posible inferir la frecuencia dominante y el factor de amplificación de un sitio.
- Los sismos moderados y/o grandes, por la cantidad de energía liberada excitan las capas más profundas del subsuelo así como las más superficiales, ofreciendo mayor información de la disposición estratigráfica del medio, que se ve reflejada en la forma espectral del cociente HVSR.

Por otro lado, las desventajas de este método son:

- Sin embargo, la frecuencia con que ocurren sismos de magnitud $M_w \geq 5.0$ resulta ser menor de 30 veces por año. No obstante, llegan a haber años atípicos en el cual se tiene un aumento considerable en la ocurrencia, como fue en el caso de 2012 (Figura 1.2).
- Los tiempos de espera para el registro de estos eventos llegan a ser inciertos, por lo que lo hace un método poco favorable, al menos para trabajos de microzonificación sísmica.

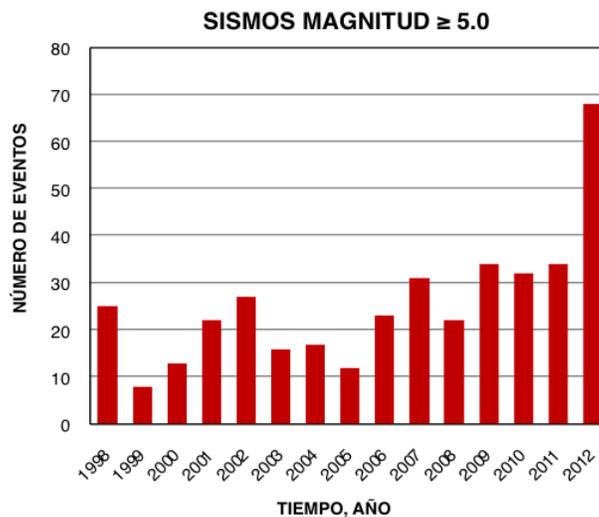


Figura 1.2 Estadística de eventos sísmicos ocurridos en los últimos 14 años en el país (fuente: SSN)

1.2.3. Técnica de Nakamura con registros de ruido ambiental (Horizontal to Vertical Noise Ratio HVNR o H/V)

De igual forma que el método HVSR, ésta técnica necesita de una sola estación para la evaluación del efecto de sitio en el sitio de interés. La técnica consiste en calcular el cociente de los espectros de Fourier de cada una de las componentes horizontales entre la vertical a partir de registros de ruido ambiental.

Las ventajas de este método son:

- No se requiere el registro de sismos, dado que la fuente de energía proviene de la propagación de ondas sísmicas generadas por la actividad antrópica así como por fuentes naturales.
- No se requiere de una estación de referencia.
- El bajo costo de la prueba, ya que se trata de un método no destructivo que se basa en una fuente pasiva.

1.2.4. Función de Transferencia Teórica (FTT)

Consiste en un método numérico, que consiste en obtener mediante el método unidimensional Thompson-Haskell (Thompson, 1950; Haskell, 1962) la función de transferencia teórica de un medio estratificado ante la incidencia oblicua de ondas de cuerpo.

Las desventajas de este método son:

- Rigurosamente no se obtiene una fiel representación del comportamiento del terreno (Sánchez-Sesma y Singh, 1986; CIS, 1989), principalmente porque la respuesta del terreno no es unidimensional, ya que para aplicar este método se supone que el subsuelo está formado por estratos horizontales paralelos de extensión infinita y se requiere conocer ciertas propiedades como son: espesor, densidad, velocidad de propagación de ondas y amortiguamiento de cada capa. Además, se obtiene una sola función de transferencia que representa ambos componentes horizontales y no muestra sensibilidad a los cambios con el azimut.
- Para aplicar este método es necesario contar con información geotécnica previa, para conocer el espesor de los estratos más superficiales.
- En necesario el ensaye de muestras de suelo inalteradas en laboratorio para estimar algunas propiedades como amortiguamiento, velocidad de cortante, densidad, aunque ésta última se puede determinar también a partir de muestras alteradas.
- Tener información sobre perfiles de velocidad de propagación de ondas compresionales y de cortante, las cuales se obtienen a partir de métodos geofísicos como son las técnicas de dispersión de ondas superficiales (MASW, SASW, SPAC, ReMi, tomografía sísmica, etc.), levantamiento de tendidos de refracción sísmica (TRS), pruebas de campo Downhole, Crosshole o bien sonda suspendida.

- Una limitante de la perforación de sondeos geotécnicos es la profundidad de exploración. En la práctica profesional es muy común perforaciones no mayores a los 30 metros, con lo cual no se garantiza construir factiblemente la FTT.
- El realizar la exploración geotécnica y/o geofísica conlleva a disponer de recursos financieros para solventar los gastos generados por cada exploración.

En la siguiente tabla se resumen las ventajas y desventajas de los métodos para evaluar efecto de sitio.

| MÉTODO | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|----------------|--|--|
| SSR | - Amplitud de la amplificación confiable | - Estación de referencia - Registro en roca y suelo - Estación libre de efecto de sitio |
| HVSR | - No necesita estación de referencia - Sismos de pequeña y mediana magnitud sirven para estimar la frecuencia fundamental | - La ocurrencia de sismos de mediana magnitud - Tiempos de espera inciertos en la ocurrencia de sismos |
| HVNR | - No necesita de registros de sismo para evaluar frecuencia fundamental - La fuente es el ruido sísmico | |
| TEÓRICO | | - No es una representación fiel del comportamiento del terreno - Se necesita información geotécnica y geofísica |

1.3. INSTRUMENTACIÓN

Un problema adicional con respecto a la estimación del efecto sitio usando registros de ruido se refiere al instrumento de registro. Se acepta generalmente que los sismómetros son más confiables que los acelerómetros para registrar las vibraciones ambientales. Sin embargo, a veces se han encontrado buenos resultados utilizando la vibración ambiental registrada con acelerógrafos.

Chávez-García y Tejeda-Jácome (2010) evaluaron la técnica HVNR para dos sitios ocupando diferentes arreglos instrumentales (K2-FBA, K2-Guralp, Etna-Episensor, SADC con geófonos de 4.5 HZ). Los resultados muestran que los sensores FBA y Episensor, para frecuencias menores a 1.5 Hz las estimaciones se vuelven inútiles. Concluyen que ésta deficiencia está relacionada con la amplitud de ruido sísmico (dependiente del sitio) y a la baja sensibilidad de los acelerógrafos. A pesar de ello, hoy en día, en México como en Latinoamérica el uso de acelerógrafos para mediciones de microtemores es recurrente y generalizado.

Con el antecedente, recientemente se realizó una prueba que consistió en el registro de ruido sísmico ocupando un acelerógrafo Kinematics ETNA y un sismógrafo Guralp 6TD. Ambos equipos se colocaron uno al lado de otro, teniendo el mismo tiempo de grabación (Tabla 1.2). En la Figura 1.3 se presentan las diferencias entre los cocientes espectrales calculados con ambos aparatos

en cinco sitios mencionados en la Tabla 1.2 (P32, P39, P43; P50 y la estación de la Red Acelerográfica de Puebla “PZPU”), dentro de la zona urbana de la ciudad de Puebla.

En las comparaciones mostradas de la Figura 1.3, se muestra con línea gris el cociente HVNR calculado con registros de ruido tomado con el acelerógrafo y en línea negra el cociente calculado con la misma técnica (HVNR) a partir de un registro de microtremores obtenido con el sismógrafo. Además se calculó el cociente promedio con la técnica de Nakamura con sismo (HVSR) a partir de cinco eventos registrados previamente en PZPU. Este cociente se muestra en línea roja.

En general se observa a simple vista una deficiencia en la respuesta del acelerógrafo a baja frecuencia, donde la estimación para frecuencias menores de 1.5 Hz es inútil, lo que concuerda con lo observado por Chávez-García y Tejeda-Jácome. Por el contrario, la respuesta del suelo obtenida con el sismógrafo en este rango de frecuencias es más resolutive. Esto se aprecia claramente en PZPU donde el máximo espectral presente en 0.4Hz concuerda con la respuesta obtenida con sismo usando la técnica HVSR. Analizando la respuesta en altas frecuencias, que comprende el rango de 1.0 a 10 Hz, se observa una estimación aceptable entre los cocientes espectrales a partir de los 2.0 Hz.

Tabla 1.2 Tiempo de registro en las estaciones temporales para la obtención de los cocientes espectrales con acelerógrafo y sismógrafo

| Sitio | Latitud | Longitud | Tiempo de registro |
|-------|---------|-----------|--------------------|
| P32 | 19.1149 | -98.2573 | 4 horas |
| P39 | 19.0965 | -98.2051 | 1 hora 30 min |
| P43 | 19.0620 | -98.1325 | 4 horas |
| P50 | 19.0274 | -98.2297 | 1 hora 30 min |
| PZPU | 19.0553 | -98.22700 | 1 hora 23 min |

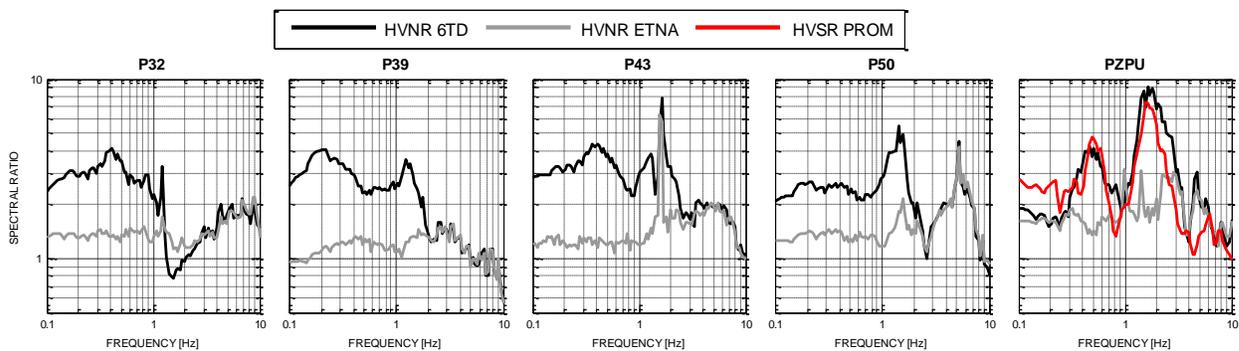


Figura 1.3 Comparación entre cocientes espectrales obtenidos con sismógrafo (línea negra) y acelerógrafo (línea gris)

1.4. MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE NAKAMURA (HVNR)

1.4.1. Método de la Media Cuadrática (MC)

Uno de los programas más utilizados en la actualidad para el tratamiento de señales sísmicas es GEOPSY, por las siglas en inglés GEOPhysical Signal database for noise arraY processing (SESAME, 2005). Este software tiene entre sus funciones el cálculo del método H/V. Esta técnica consiste en estimar el cociente espectral de los espectros de amplitud de Fourier de las componentes horizontales con respecto a la vertical de las vibraciones de ruido ambiental registradas en una sola estación (Nogoshi y Igarashi, 1971; Nakamura, 1989; Lermo y Chávez-García, 1993).

El algoritmo empleado por este programa para el cálculo del cociente H/V se compone de los siguientes pasos:

1. Leer la señal de ruido ambiental por cada componente.
2. Seleccionar las ventanas de tiempo estacionarias con el fin de evitar el ruido transitorio.
3. Cálculo y suavizado del espectro de amplitud de Fourier para cada ventana de tiempo.
4. Cálculo del espectro H promediando ambos espectros horizontales en cada ventana, utilizando el método estadístico de la media cuadrática (MC) (ec.1.1)

$$H(i) = \sqrt{\frac{H_N^2(i) + H_E^2(i)}{2}} \quad (1.1)$$

5. Calcular la relación H/V para cada ventana (ec. 1.2)

$$[H/V](i) = \frac{H(i)}{Z(i)} \quad (1.2)$$

Donde i es el número de ventana calculada.

6. Calcular el cociente promedio de H/V (ec. 1.3)

$$[H/V] = \frac{1}{n} \sum_1^n [H/V] \quad (1.3)$$

donde n es el número de ventanas calculadas.

Resumiendo, el cociente espectral obtenido con GEOPSY es el resultado de promediar todos los H/V, derivados a partir de la media cuadrática de las componentes horizontales entre la vertical de cada ventana de tiempo (a esta metodología se le denominará como “MC”)

1.4.2. Método de Densidades Espectrales Direccionales (DED)

Sánchez-Sesma *et al.*, (2011) han propuesto un método alternativo para el cálculo de la relación H/V. Estos retoman los primeros tres puntos anteriormente señalados, pero el cambio consiste en

obtener la sumatoria de todos los espectros de amplitud de Fourier para cada una de las componentes horizontal y vertical, como se muestra en las ecuaciones 1.4-1.6.

$$E_N = \sum_1^i [H_N(i)]^2 \quad (1.4)$$

$$E_E = \sum_1^i [H_E(i)]^2 \quad (1.5)$$

$$E_Z = \sum_1^i [H_Z(i)]^2 \quad (1.6)$$

El cálculo del cociente espectral promedio H/V está dado por la siguiente ecuación

$$[H / V] = \sqrt{\frac{E_N + E_E}{E_Z}} \quad (1.7)$$

Este método difiere sustancialmente en que tan sólo se realiza durante el cálculo un único promedio espectral, así como también por que se tiene que multiplicar por un factor de ponderación para que cada ventana de tiempo sea de igual energía. Esta metodología es conocida como el método de las densidades espectrales direccionales (DED).

Con el fin de validar éste método (DED), se compararán estos cocientes espectrales con los calculados con el método de la media cuadrática (MC). En el siguiente apartado se muestran algunos resultados obtenidos aplicando ambos métodos sobre sismogramas o registros de microtemores obtenidos con un sismógrafo triaxial digital de banda ancha.

1.5. COMPORTAMIENTO DEL COCIENTE HVNR CONFORME EL TIEMPO

El criterio para establecer el tiempo mínimo de registro de los microtemores es un tema aún sin conclusión. Con este fin, en este apartado se presentan una serie de pruebas para determinar el tiempo necesario de registro de microtemores para obtener una buena aproximación tanto de la forma espectral, así como de la frecuencia fundamental y del factor de amplitud correspondiente a esta. El procesado de las señales se realizó definiéndose ventanas de tiempo de 81.92s., sin traslape y no se aplicó taper ni suavizado. Al registro se le aplicó un filtro pasabanda Butterworth de 4 polos de 0.1 Hz a 30 Hz. El procesado de los datos se realizó mediante el programa Geopsy.

La primer prueba consistió en determinar la unidad mínima de tiempo para el cálculo del H/V. Se probó calcular este cociente con diferentes intervalos de tiempos. Se compararon los resultados variando el número en las ventanas de tiempo obtenidos con 3, 10, 15, 30 y 60 minutos. Sin embargo, como ya se mencionó, el uso de sismógrafos requiere de un tiempo aproximado de 60 minutos para la estabilización de los sensores. Se observó que conforme se analiza una mayor cantidad de datos se obtiene una evolución y definición de la forma espectral del cociente H/V. Esto quiere decir, una mayor resolución del ancho de banda, además de una evolución del nivel de amplitud correspondiente a éste.

Otra prueba consistió en calcular el cociente espectral analizando más de una hora de registro, con tiempo de registro de una hora y treinta minutos y dos horas. No se observaron variaciones importantes en la amplitud ni en su forma espectral, por lo que se determinó como unidad mínima de tiempo una hora de registro para el cálculo de H/V.

Con la interrogante de conocer si la amplitud se modificaría al tomar un mayor tiempo de registro, se calcularon cocientes con registros de 3 y 6 horas de duración, siguiendo el análisis propuesto por Sánchez-Sesma *et al.*, (2011). Al comparar los cocientes obtenidos con una, tres y seis horas se constató que el factor de amplificación del suelo permanece prácticamente constante. Sin embargo, se observó que mientras se trabaje con tiempos de registro mayores, se obtiene un cociente espectral H/V más suavizado y mejor definido hacia bajas frecuencias.

Es necesario mencionar que este análisis se realizó en cada una de las ciudades estudiadas (ver Figura 1.1). En general se observó que el comportamiento en la evolución en los cocientes espectrales es similar en todas las ciudades, independientemente de las características estratigráficas del suelo y del nivel de ruido presente en cada zona.

Para resumir, hasta este momento se concluye que con una hora de registro, siendo ésta la unidad de tiempo mínima, se puede calcular de manera estable el cociente H/V.

Una cuarta prueba consistió en observar si existen variaciones en la amplitud en función de la hora del día. Ante esta interrogante, se calculó un H/V por cada hora del día. Esto se justifica debido a que la energía de la vibración ambiental o los microtemores oscila durante el transcurso del día y esto podría originar variaciones en los resultados.

Además, retomando lo mencionado en el inciso anterior, se decidió emplear el método de densidades espectrales direccionales (DED) propuesto por Sánchez-Sesma *et al.*, (2011) como una alternativa en la obtención de cocientes espectrales. Dado que es una metodología reciente, se busca conocer sus alcances y limitaciones para el cálculo de los cocientes H/V.

Para esta prueba se han escogido cuatro sitios que presentan diferentes comportamientos modales, pasando por un sitio que presenta solamente el modo fundamental, hasta sitios con una estratigrafía más compleja, en donde se observa de dos a tres modos fundamentales, tanto en bajas como en altas frecuencias. Se ha puesto mayor interés en estudiar sitios con efectos en bajas frecuencias dado que Guillier *et al.*, (2007), afirman que en esta parte de los espectros se obtienen las máximas variaciones en el factor de amplitud. Todos estos comportamientos están relacionados a diferentes geometrías estratigráficas, litologías de los estratos y en la parte superficial por el tipo de suelo.

En la Figura 1.4 se confrontan los resultados obtenidos con ambas metodologías para las estaciones MAT03, BHPP, TXAY y CHA05 (véase la Figura 1.1 para la ubicación de estas cuatro estaciones). Se presenta en la columna izquierda los cocientes H/V calculados hora a hora durante un día completo ocupando el algoritmo de la media cuadrática (MC). Lo mismo ocurre en la columna derecha pero utilizando el método de densidades espectrales direccionales (DED). Se ha representado cada espectro con un color y una simbología diferente a fin de diferenciar la existencia

de algún patrón a una determinada hora. En el costado derecho se presenta la simbología utilizada para distinguir el cociente espectral H/V calculado para cada intervalo de tiempo.

De ésta lámina vamos a enfocarnos primeramente en analizar el comportamiento en la amplitud de los espectros de sitio, así como de la forma espectral. Se observa en general que: a) la variabilidad de los cocientes es poca, teniéndose en general un comportamiento constante en el factor de amplificación para cada máximo espectral tanto en bajas como en altas frecuencias, independientemente de la hora del día; b) el método DED resulta ser mucho más resolutivo, ya que permite resaltar y diferenciar pequeñas respuestas dentro del cociente espectral; c) la mejor obtención de la amplificación se tiene con el método DED, ya que este sobrevalúa alrededor de 2 veces los resultados obtenidos con el método MC.

Hasta el momento hemos puesto la atención en la variación de la amplitud, la recuperación de los diferentes modos, pero llegado a este punto se genera la pregunta, ¿qué tan válidos son los resultados obtenidos con microtemores y siguiendo ésta metodología? Una manera de validar los resultados obtenidos con microtemores es compararlos con los cocientes espectrales obtenidos con registros de sismo, usando la técnica de Nakamura (HVSr) (Lermo y Chávez-García, 1994). En la Figura 1.4 se muestra en línea gruesa roja el cociente HVSr, que se compara con los cocientes calculados hora a hora. Para poder hacer una mejor comparación, se presenta en línea negra discontinua (*HV mean*) el promedio de todos los cocientes espectrales.

Es necesario recordar que la energía de un sismo no tiene punto de comparación con la energía de los microtemores. La ventaja de registrar un sismo, es que este excita los estratos más profundos, así como los más someros, teniéndose una respuesta real del terreno. Se observa que para los cuatro sitios, el cociente HVSr se ajusta de buena manera a cada uno de los máximos espectrales del cociente HVNR. Por otro lado, pongamos atención en el cociente HVSr y *HV mean* calculado con las técnicas MC y DED. A simple vista se observa que el nivel de amplificación, obtenido con diferentes fuentes, ruido ambiental y sismo, es muy similar entre ambos cocientes. Sin embargo, el método DED presenta una mayor ventaja ya que define mejor los máximos espectrales.

Esto se aprecia claramente en la respuesta del sitio TXAY [DED] en el espectro dominante presente alrededor de 0.9 Hz con una amplitud de 4 veces, siendo muy similar a la respuesta con sismo. Mientras que en TXAY [MC] la amplificación es de 3 veces sin mostrar un espectro dominante bien definido. Lo mismo se observa en BHPP para la respuesta en 1.8 Hz, y en CHA05 en el espectro dominante en 0.8 Hz. Un aspecto a comentar es que el máximo espectral hacia altas frecuencias calculado con sismo no concuerda con el obtenido con ruido ambiental, esto puede explicarse a la heterogeneidad del suelo o a problemas instrumentales en el registro sísmico.

En forma global se observa que los HVNR calculados con DED presentan la mejor similitud con respecto a HVSr. En resumen, estos resultados muestran que el cociente HVNR presenta una gran robustez, esto es, delimita perfectamente el ancho de banda de la respuesta de cada modo, algo que no se puede obtener con el análisis de tan solo un sismo, pues para ello se requeriría de al menos seis sismos para tener una buena estimación de la forma espectral para el sitio a estudiar.

Es conveniente mencionar que los cocientes HVSR que se presentan en la Figura 1.4 fueron calculados con los sismos de subducción como el ocurrido el 02 de abril de 2012 en Pinotepa Nacional, Oax. M_w 6.0 (TXAY) y el 28 de septiembre de 2011 en Zihuatanejo, Gro. M_w 4.9 (MAT03). Este tipo de sismos se caracterizan por tener un mayor contenido de bajas frecuencias, esto es por la lejanía de la fuente donde las frecuencias altas decaen por trayectoria, permitiendo excitar los estratos más profundos. En el caso de las estaciones restantes, los sismos utilizados fueron de origen interplaca, como el ocurrido el 15 de junio de 1999 en Tehuacán, Pue. M_w 6.7 (BHPP) y el 25 de febrero de 2011 en Sayula de Alemán, Ver. M_w 6.7 (CHA05). Este tipo de sismos contienen gran energía hacia altas frecuencias.

Para tratar de explicar el comportamiento dinámico de los sitios que se han analizado, se elaboraron modelos teóricos mediante el método Thomson-Haskell (1962). Con información geológica (Lermo *et al.*, 2011, Lermo *et al.*, 2012) así como de las visitas realizadas en campo, se elaboraron los modelos que se presentan en las Tablas 1.3 a 1.6. En la Figura 1.4 se presenta con línea gris la Función de Transferencia Teórica (FFT) obtenida estos modelos propuestos.

La estación temporal MAT03 se localizó en el municipio de San Mateo Tlaixpan, Pue. En esta región se tienen formaciones de roca caliza y depósitos de arena. La estación BHPP forma parte de la red acelerográfica del estado de Puebla. Este sitio se ubica en la ciudad de Puebla y se localiza sobre un derrame basáltico, donde en los primeros metros la estructura es vesicular, el cual descansa sobre basalto masivo. Este basalto sobreyace en un estrato de toba de varios cientos de metros, presente en los alrededores del volcán La Malinche. Este depósito tobaceo se localiza en gran parte de los estados de Tlaxcala y Puebla.

La estación temporal TXAY se localizó en el ayuntamiento de la ciudad de Tlaxcala. En este sitio según los sondeos geotécnicos y empleando la Ecuación 1.9 se calculó la velocidad de cortante promedio para un estrato de arcilla arenosa y para un estrato de arena gruesa con intercalaciones de arcilla (Meneses, 1996, Navarro, 2000, Bernal, 2006). La estación temporal CHA05 se localizó en el municipio de Chiautempan, Tlaxcala. Se localizó en la zona de lomerío del volcán La Malinche. El modelo teórico se formuló con información litológica de pozo (SECODUVI, 2000).

Se observa que la respuesta teórica se ajusta bastante bien a los cocientes empíricos, reproduciendo cada uno de los modos principales tanto en frecuencia como en amplitud. Sin embargo, no siempre y difícilmente se podrá reproducir la respuesta empírica de manera exacta. Esto es un factor más que vuelve desfavorable al método Haskell. En MAT03 se aprecia por la forma espectral del espectro de sitio, la respuesta característica de un depósito de suelo residual (arena). Cuando la estratigrafía es muy sencilla, se puede reproducir fácilmente el modo fundamental tanto en frecuencia como en amplitud. MAT03 es un claro ejemplo de ello. No ocurre lo mismo para estratigrafías más complejas. Si se observa detalladamente las respuestas teóricas para las tres estaciones restantes, se observa que se reproducen una serie de oscilaciones que agrupadas reproducen la forma espectral del máximo en altas frecuencias. El efecto más profundo, entre 0.2 a 1.0 Hz, ha sido reproducido satisfactoriamente.

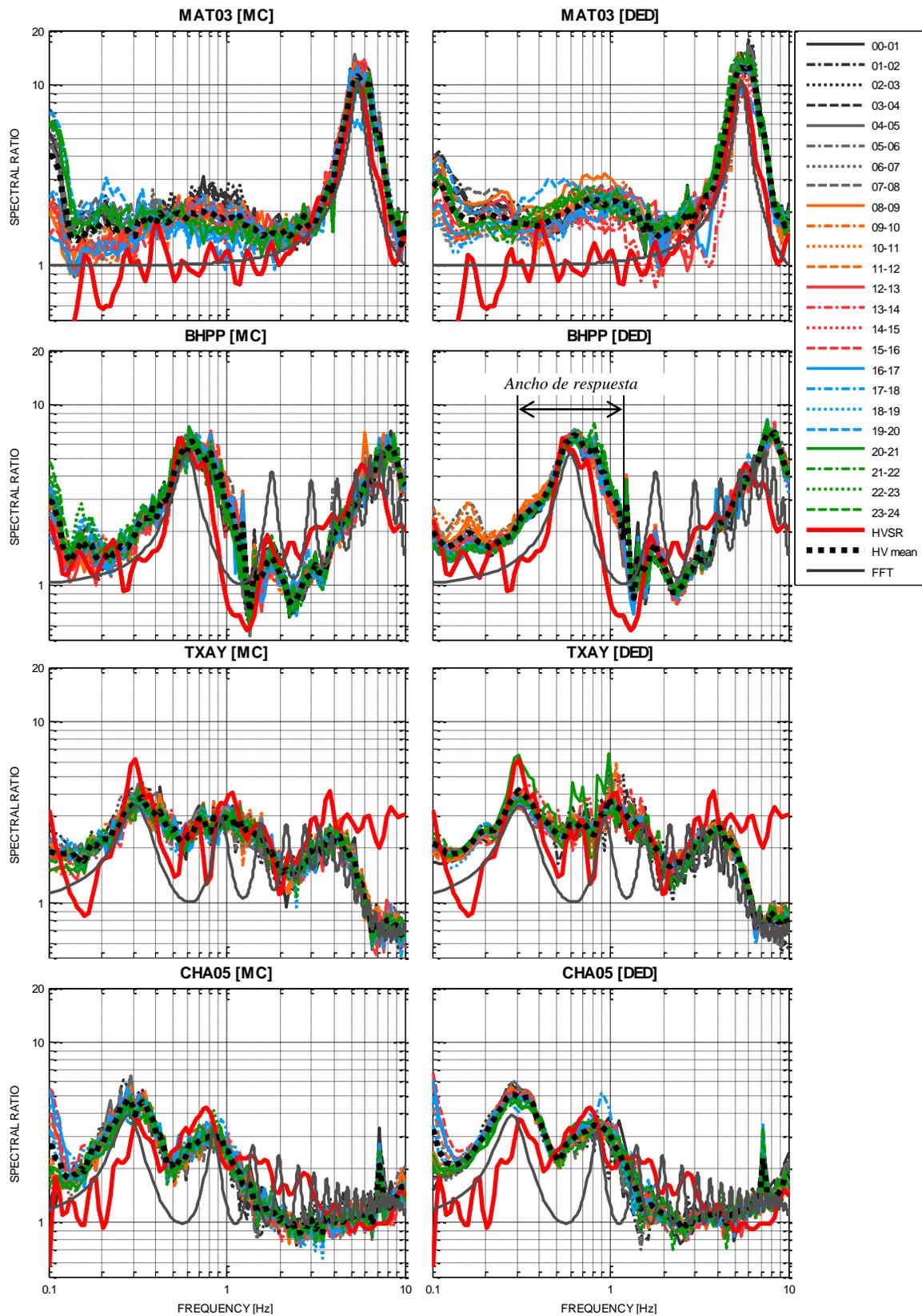


Figura 1.4 Comparación entre los cocientes espectrales calculados por medio de los métodos MC (izquierda) y DED (derecha) en intervalos de una hora en las estaciones MAT03, BHPP, TXAY y CHA05

Tabla 1.3 Modelo estratigráfico unidimensional para el sitio MAT03

| N | H (m) | ρ (t/m ³) | β (m/s) | ξ | Tipo suelo/roca |
|---|-------|----------------------------|---------------|-------|-----------------|
| 1 | 5.5 | 1.6 | 120 | 0.02 | Arena |
| 2 | -- | 2.7 | 1500 | 0.01 | Caliza |

Tabla 1.4 Modelo estratigráfico unidimensional para el sitio BHPP

| N | H (m) | ρ (t/m ³) | β (m/s) | ξ | Tipo suelo/roca |
|---|-------|----------------------------|---------------|-------|---------------------|
| 1 | 4 | 2.6 | 120 | 0.02 | Basalto (vesicular) |
| 2 | 180 | 2.8 | 440 | 0.02 | Basalto (masivo) |
| 3 | -- | 2.0 | 3000 | 0.01 | Toba |

Tabla 1.5 Modelo estratigráfico unidimensional para el sitio TXAY

| N | H (m) | ρ (t/m ³) | β (m/s) | ξ | Tipo suelo/roca |
|---|-------|----------------------------|---------------|-------|-------------------------------|
| 1 | 10 | 1.7 | 150 | 0.04 | Arcilla arenosa |
| 2 | 200 | 2.0 | 280 | 0.02 | Arena gruesa/Arcilla compacta |
| 3 | -- | 2.0 | 1000 | 0.01 | Toba |

Tabla 1.6 Modelo estratigráfico unidimensional para el sitio CHA05

| N | H (m) | ρ (t/m ³) | β (m/s) | ξ | Tipo suelo/roca |
|---|-------|----------------------------|---------------|-------|------------------------------|
| 1 | 2.7 | 2.0 | 105 | 0.03 | Toba alterada |
| 2 | 220 | 1.7 | 250 | 0.02 | Arena media/Arena con gravas |
| 3 | -- | 2.0 | 1000 | 0.01 | Toba |

1.5.1. Comportamiento de los cocientes H/V en la ciudad de México

Con el interés de conocer la variación en amplitud de los cocientes H/V para la ciudad de México, se ha calculado el espectro en intervalos de una hora para un día completo. Para ello se ha empleado el método DED, pues como se observó en el subcapítulo anterior es un método que ofrece mayor resolución y es más sensible a las variaciones de energía durante el día. Este ejercicio se realizó en ocho estaciones acelerográficas de la red CIRES, seis de ellas en zona de lago (AU11, CJ03, JA43, LV17, LI33, ME19), una en zona de transición (DX37) y una más en zona de loma (TP13). Los resultados se presentan en la Figura 1.5.

La ciudad de México se clasificó en tres zonas en función de las condiciones del subsuelo: Zona I (zona de loma) situado en la parte alta de la cuenca, sus suelos se caracterizan por altas resistencias y poca capacidad de compresión; la Zona II (zona de transición) tiene suelos compuestos por arenas y limos; y la Zona III (zona de lago) y comprendía los antiguos lagos de Texcoco y Xochimilco, con suelos de origen volcánico, muy blandos y altamente compresibles, alto contenido de agua y bajas velocidades de las ondas de cortante. Las mencionadas propiedades favorecen la amplificación de las ondas sísmicas.

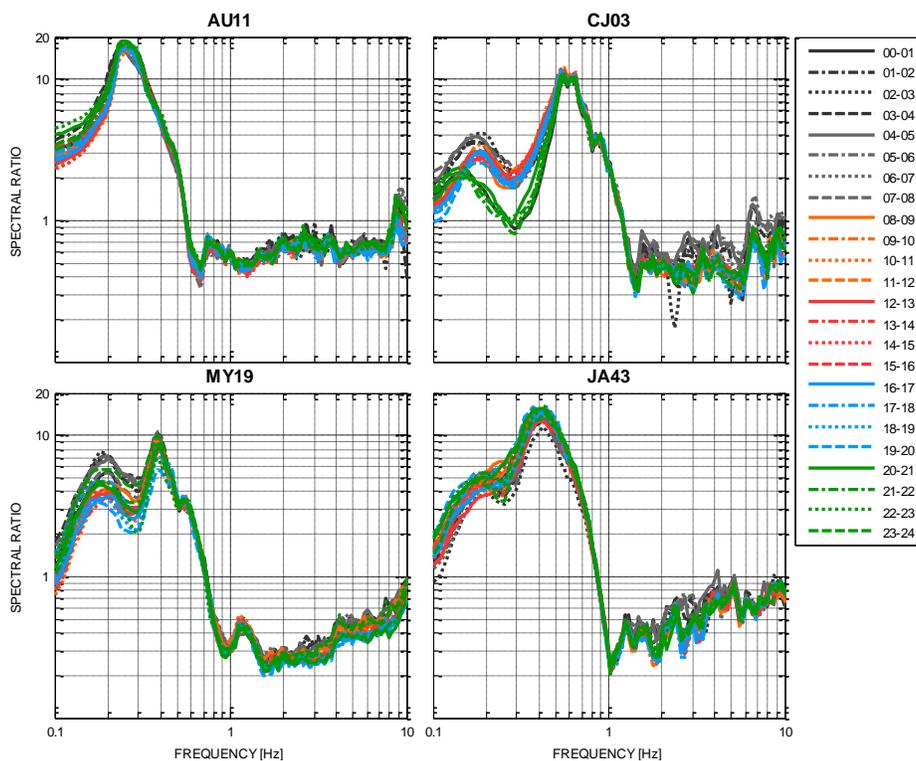
En estas imágenes se observa de manera general que las variaciones siguen presentando un comportamiento igual al que se venía observando en otras zonas de estudio, donde en horas de la madrugada se tienen las mayores amplitudes y en horas de mayor actividad humana, se tiene una disminución de éstas. Esto indica que las horas del día donde existe la energía más limpia y estable, son las horas comprendidas entre la media noche y hasta las 08 horas. Conforme aumenta la actividad antropogénica, toda la energía generada de tantas fuentes oscurece la energía del ruido de

fondo. Estos resultados nos indican que no cualquier hora del día es buena para estimar el cociente H/V eficazmente.

En éstas gráficas, se observa de manera clara en la amplitud en CJ03, donde entre las 20 – 24 horas se tiene un decaimiento de la respuesta del suelo comprendida entre 0.2 a 0.4 Hz, así como también decae el comportamiento hacia altas frecuencias. Si se observa en líneas grises, que son las horas comprendidas entre las 00 - 08 horas el comportamiento en altas frecuencias mejora sustancialmente. Esto mismo se verifica en LV17 y en DX37.

También es de llamar la atención que LI33 presenta un comportamiento aun mayor hacia bajas frecuencias. Nótese cómo entre las 08 horas y hasta altas horas de la noche, la energía en este rango de frecuencias oscila aún más, teniendo la respuesta del suelo en 0.18 Hz la mínima amplitud con un valor de 2 veces entre las 16 horas, y la máxima amplitud de ~8 veces hacia las dos de la mañana. Aquí es necesario resaltar y aclarar que la respuesta de LI33 en 0.18 Hz no está vinculada con el efecto de marea. Esta respuesta del suelo está vinculada a su localización espacial dentro de la ciudad, ya que ésta se encuentra en muy cerca de las faldas de la sierra de Santa Catarina, por lo que esta estación muestra un efecto bidimensional.

Un aspecto común de los cocientes H/V presentados, tanto para la zona de lago como transición, es la deamplificación de la respuesta comprendida entre ~0.8 Hz a 10 Hz. Este comportamiento se debe a que existe una capa de baja velocidad de entre dos capas de mayor velocidad. Recordemos que la arcilla de la Cuenca de México presenta valores de onda de corte muy bajos comprendidos entre 45 a 70 m/s.



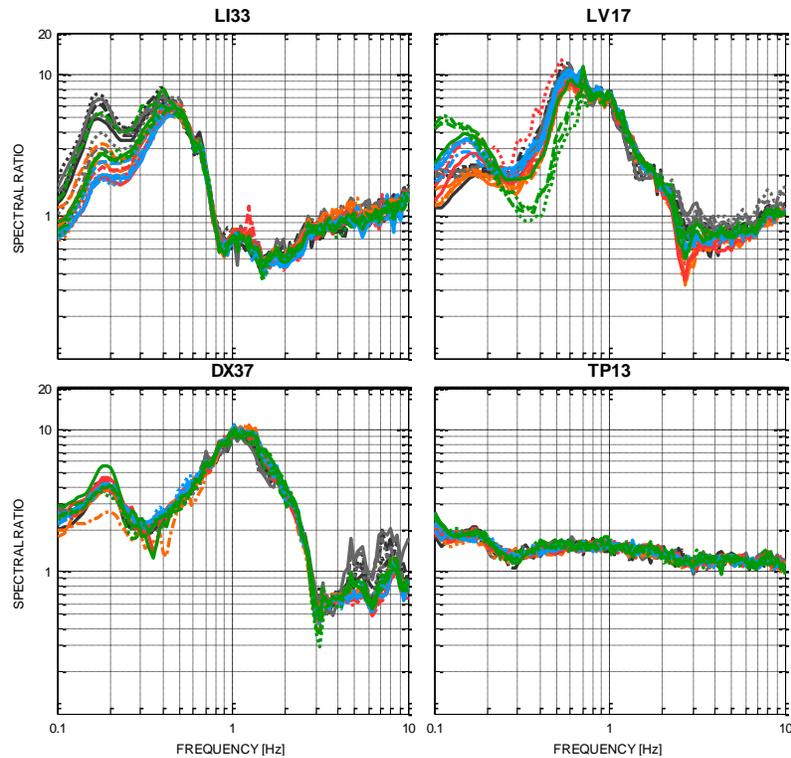


Figura 1.5 Comportamiento de la amplitud en diferentes horas del día en ocho estaciones permanentes de la Red Acelerográfica de la ciudad de México, mediante el método de densidades espectrales direccionales (DED)

1.6. VALIDACIÓN DE HVNR MEDIANTE LA COMPARACIÓN CON HVSR, SSR Y FTT

En este capítulo, vamos a insistir que los registros de microtremores con instrumentos triaxiales de velocidad de banda ancha, y con una duración de varias horas y con la metodología propuesta se puede estimar el factor de amplificación del mismo orden que los obtenidos con registros de movimientos fuertes y procesado con la técnica HVSR o SSR.

El mayor éxito de estas redes temporales mencionado en el inicio de este trabajo, fue el haber registrado un sismo de subducción de gran magnitud, del 20 de marzo de 2012 ($M_w 7.4$); así como otros de magnitud intermedia, como son los sismos del 10 de diciembre de 2011 ($M_w 6.5$) sentido considerablemente en la zona centro del país, y el del 11 de abril de 2012 ($M_w 6.4$). Estos sismos han dado paso a la validación de los cocientes H/V, obtenidas en campañas de vibración ambiental o registros de microtremores.

En cada estación se estimó la respuesta de sitio a partir de registros de los sismos en cuestión. La estimación se llevó a cabo con la aplicación del método de HVSR (Lermo y Chávez-García, 1994). Para constatar que el cociente HVNR (Lermo y Chávez-García, 1993) es un buen estimador del factor de amplificación, se efectuó la comparación de ambos cocientes espectrales. Así mismo se compara con respecto al cociente SSR promedio para las estaciones permanentes de la ciudad de México. En el cálculo de éste método se ocuparon las series de tiempo registradas en CUIP,

tomando a éste como sitio de referencia. Estas comparaciones se presentan en la Figura 1.6 donde en línea en rojo se presenta el espectro HVSR promedio, en línea negra el cociente HVNR y en línea gris la técnica SSR. Un aspecto a considerar es que los valores de amplitud calculados con el método SSR y con HVNR son muy similares para los sitios que se muestran. Este resultado es contundente, lo cual pone en tela de juicio lo planteado por Haghshenas *et al.*, 2008. Por otro lado, en el Anexo B se presentan los cocientes individuales HVSR, a partir de los cuales se calculó el cociente promedio HVSR que se presenta en la Figura 1.6.

Por otro lado, otra forma de validar los resultados de microtremores es mediante el cálculo de la Función de Transferencia Teórica (FTT), cuyo resultado es un modelo teórico del suelo basado en la propagación de ondas vertical en un medio estratificado y unidimensional, también conocido como Método Thomson-Haskell (1962). Éste método requiere características de los estratos como: espesor, velocidad de propagación de ondas, densidad y amortiguamiento. Se consideró el caso de incidencia vertical ($\gamma = 0$) de ondas S polarizadas horizontalmente ($\theta = 0$, ondas SH).

Con base en información geotécnica, conociéndose el espesor de los estratos de suelo y el número de golpes, se estimó la velocidad de onda de corte por medio de la correlación propuesta por Seed *et al.*, (1986),

$$V_s = C_1 * N^{0.17} * z^{0.2} * F^1 * F^2 \quad (1.9)$$

donde:

V_s = velocidad de onda de corte, (m/s)

$C_1 = 69$ (constante empírica)

N = número de golpes de la prueba SPT

Z = profundidad del suelos donde el número de golpes N fue tomado, (m)

F^1 = factor de edad: = 1 para edad del Holoceno (depósitos aluviales)

= 1.3 para edad del Pleistoceno (depósitos diluviales)

F^2 = factor del suelo que se define: Arcilla = 1.0, Arena fina = 1.09, arena media = 1.07, arena gruesa = 1.11, arena y grava = 1.15, grava = 1.45

Con información geotécnica reportada por Ordoñez-Alfaro (2013), De la Fuente (2014) y Lermo *et al.*, (1990) se calcularon los modelos teóricos para tres sitios. Estos modelos se cotejaron con las respuestas empíricas HVSR, HVNR, SSR. La línea negra representa la Técnica HVNR, en gris la técnica SSR, con línea roja el método HVSR y en línea azul discontinua la FTT. Los modelos estratigráficos usados se presentan en las Tablas 1.7 a 1.9.

La forma espectral de los cocientes espectrales empíricos y la FTT es muy similar, demostrando que las técnicas utilizadas para esta validación, se ajustan muy bien a las propiedades de los suelos superficiales, donde existe efecto de sitio claro. En conclusión, este resultado valida el uso de los microtremores para la estimación de los periodos de suelo así como del factor de amplitud, sin la necesidad de tener estudios geotécnicos.

Tabla 1.7 Modelo estratigráfico unidimensional para el sitio TUX21

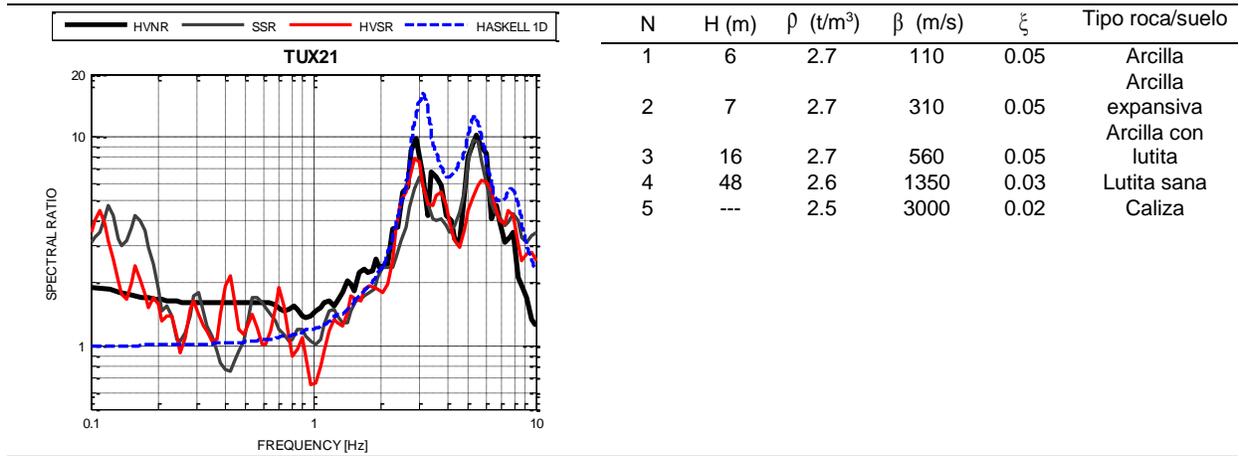


Tabla 1.8 Modelo estratigráfico unidimensional para la estación VIH01

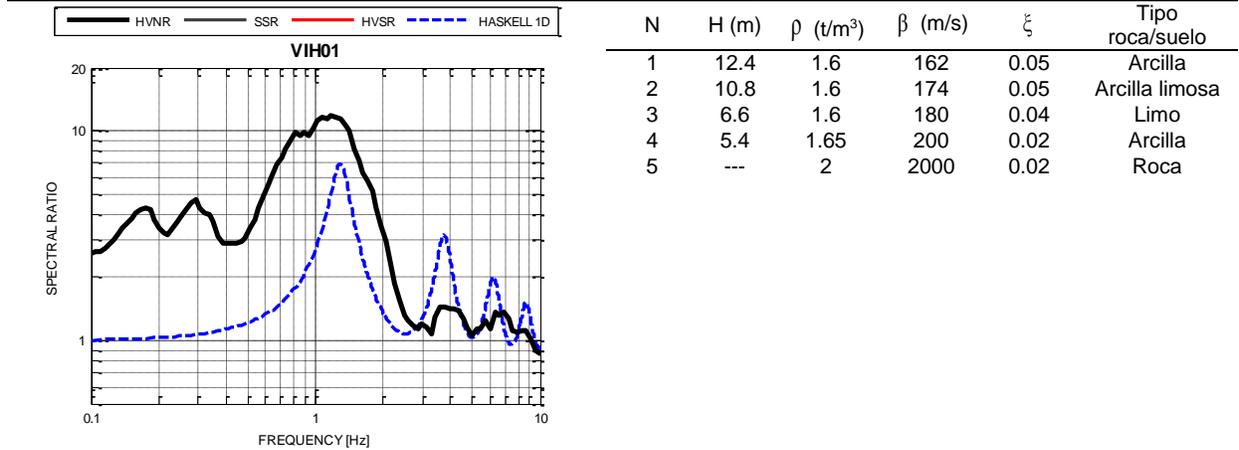
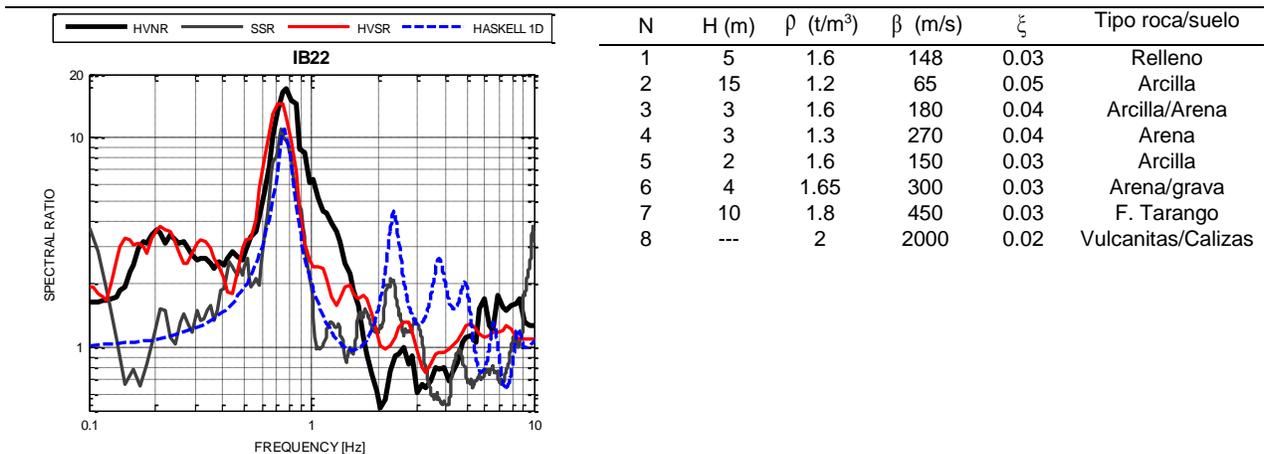


Tabla 1.9 Modelo estratigráfico unidimensional para la estación IB22



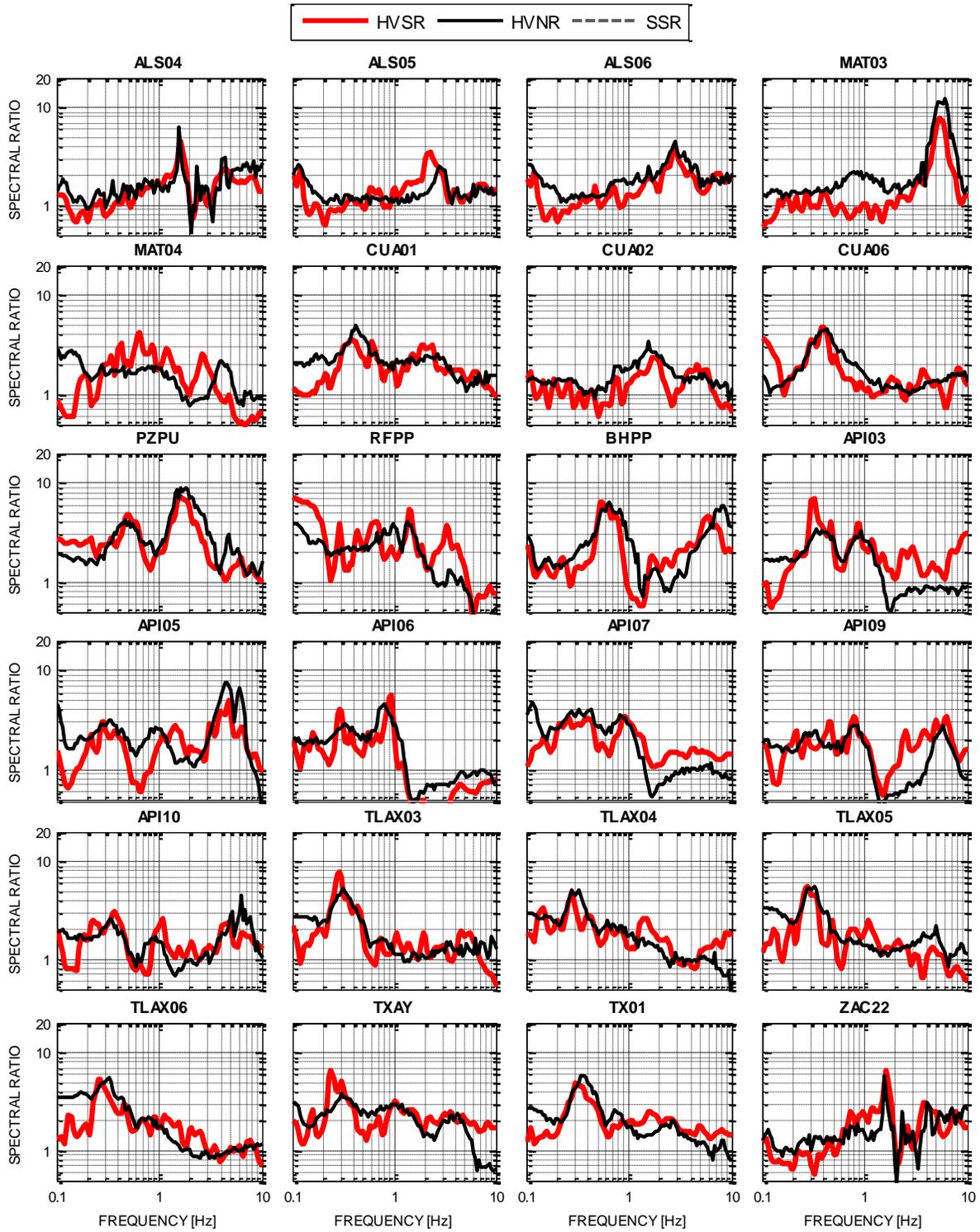


Figura 1.6 Comparación de cocientes espectrales: línea roja, método de Nakamura con sismos promedio (HCSR); línea negra, método de Nakamura con ruido (HVNR); línea discontinua gris, técnica Estándar (SSR)

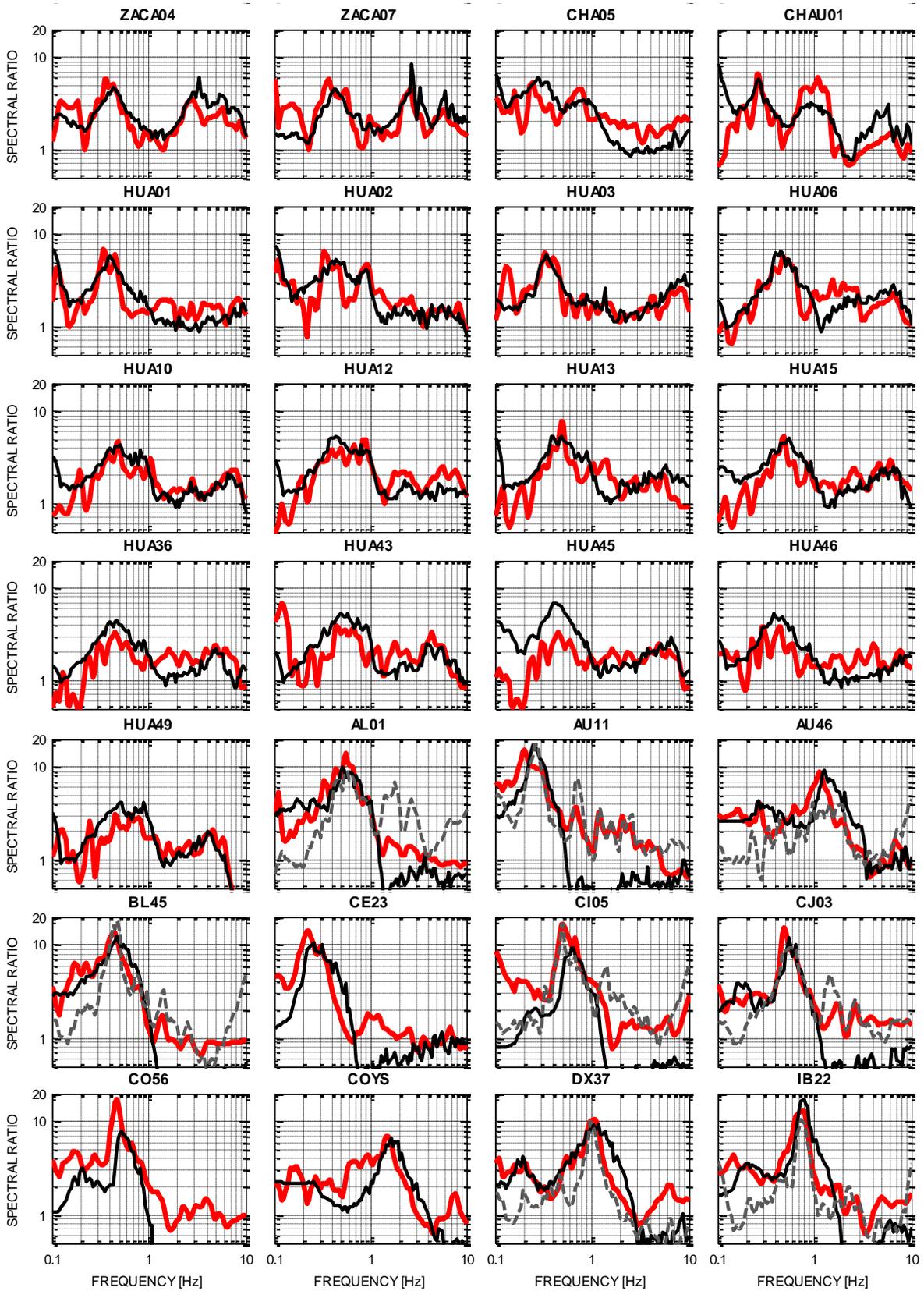


Figura 1.8 Continuación

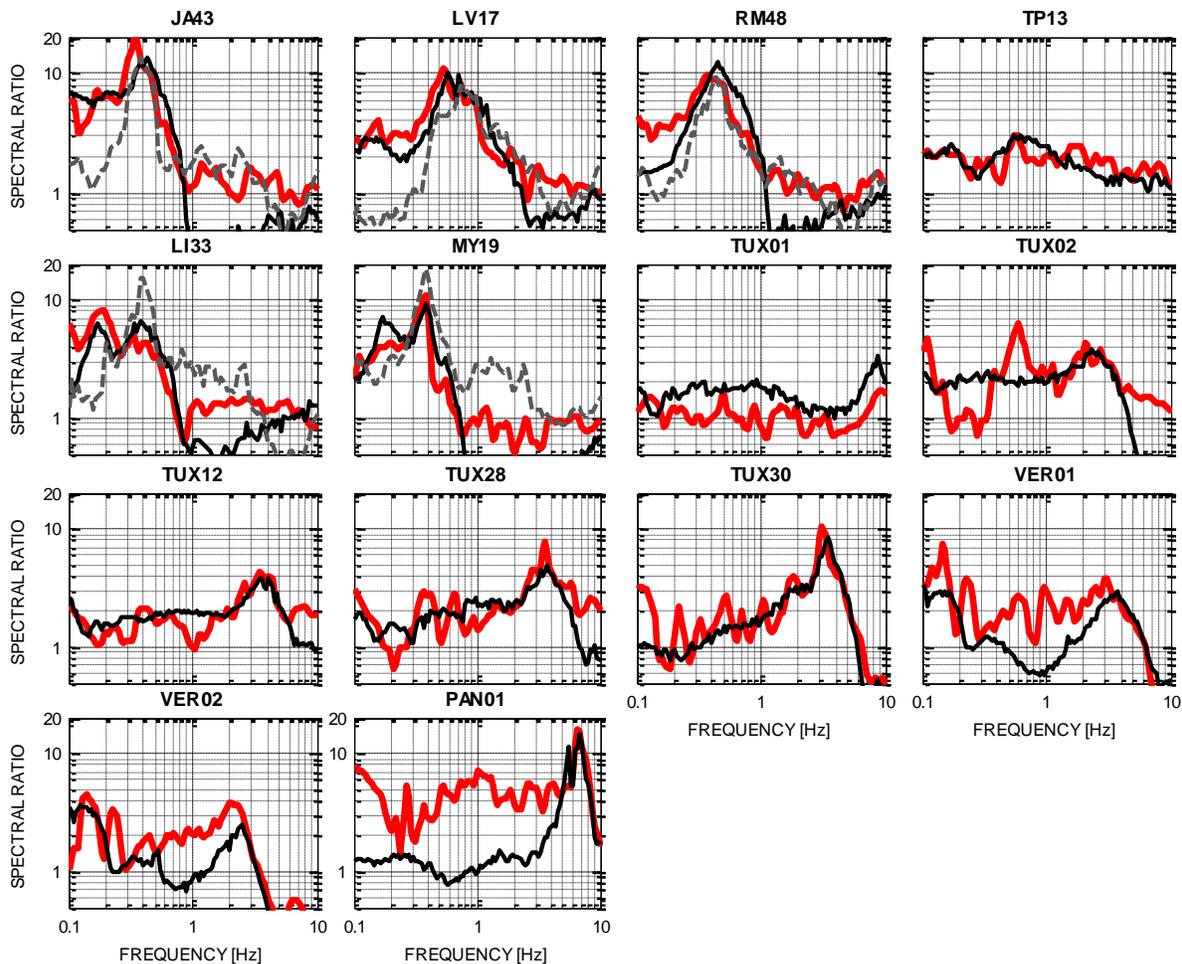


Figura 1.8 Continuación

Finalmente, en la siguiente imagen se presenta de forma resumida la comparación entre los valores de amplificación relativa (A_r) obtenidos con ruido ambiental (HVNR) y con sismos (HVSr) evaluados y presentados en la Figura 1.6. En esta imagen se observa que siguiendo la metodología propuesta en este capítulo, se puede estimar de manera aceptable la amplificación con sismo.

Por otra parte, en el lado superior derecho se compara la amplificación obtenida entre las técnicas HVNR y HVSr promedio, espectro mismo que se presentó en la Figura 1.8 con línea azul. Se observa una correlación aceptable en los valores de amplitud obtenidos con ambas técnicas. Este resultado se coteja con lo obtenido por Haghshenas *et al.*, (2008) (lado superior izquierdo de la figura). En su trabajo realiza una comparación con 72 datos entre las amplitudes obtenidas con ruido ambiental y las calculadas por medio de la técnica Estándar (SSR), con información obtenida en diversos sitios de Europa y Asia (izquierda).

Si se comparan ambos gráficos, se resalta una menor dispersión en los valores del factor de amplificación. Esto obedece a que siguiendo la metodología propuesta, se puede estimar de manera aceptable la amplitud del suelo sin necesidad tener un registro con sismo. Cabe resaltar que este

estudio abarca un mayor rango de amplitudes, siendo la máxima amplificación de 36 veces, mientras que Haghshenas *et al.*, (2008) presentan la máxima amplificación de 9 veces. Si nos concentramos en tan sólo este rango, la estimación resulta ser verdaderamente acertada.

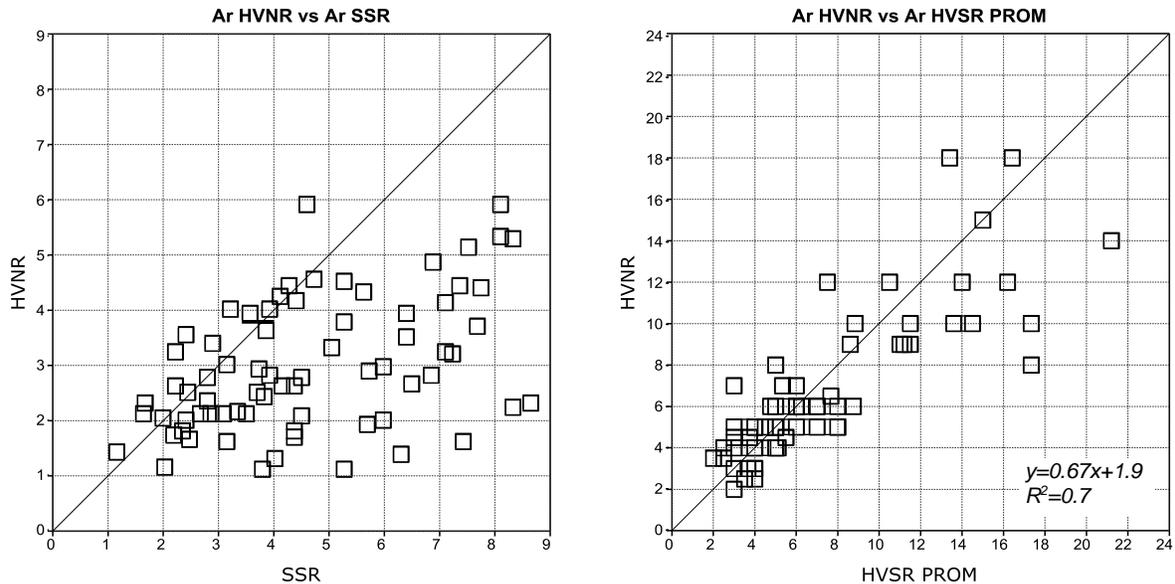


Figura 1.9 Comparación entre amplitudes obtenidas a partir de vibración ambiental (HVNR) y registros de sismo (HVSr) en éste estudio (izquierda) y Haghshenas *et al.*, 2008 (derecha)

1.7. ANÁLISIS Y TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES DE RUIDO AMBIENTAL: 1BIT Y BLANQUEADO ESPECTRAL

Como se comentaba en la introducción del trabajo, éste último subcapítulo se agregó a éste trabajo, ya que se desarrolló como una inquietud en el cálculo de cocientes espectrales pero empleando un par de normalizaciones que se ocupan en la elaboración de tomografías de ondas superficiales. En la literatura mundial no existen hasta el momento trabajos que refieran el empleo de éstas normalizaciones al cálculo de cocientes espectrales.

En el trabajo de Bensen *et al.*, (2007) y Lin *et al.*, (2008) se detalla lo relacionado con el uso de estas normalizaciones para la obtención de tomografías sísmicas. Cabe mencionar que éste tratamiento va dirigido y aplicado a las ondas de Rayleigh y Love y hasta las ondas de cuerpo.

1.7.1. Preparación de los datos para una estación individual

La primera fase del procesamiento de datos consiste en la preparación de datos de forma de onda de cada estación individual. La finalidad de esta fase es acentuar la necesidad de eliminar las señales de sismos, efectos de la marea e irregularidades instrumentales que tienden a oscurecer el ruido ambiental de banda ancha.

El oscurecimiento por sismo regularmente es el más severo por encima del periodo de 15 s, así que este paso del procesamiento de los datos es más importante a períodos más largos que en la banda de los microsismos (~ 5 a ~ 17 s). Además, debido a la amplitud espectral de los picos de ruido ambiental en la banda de microsismos, los métodos tienen que ser ideados para extraer del ruido ambiental los periodos más largos de los registros sísmicos.

Los pasos que componen ésta fase es: la eliminación de la respuesta del instrumento, corrección por línea base y de tendencia y filtrado de los sismogramas, normalización en el dominio del tiempo y blanqueado espectral. Algunos de los pasos, como la normalización temporal y blanqueo espectral, imponen modificaciones no lineales a las formas de onda, por lo que el orden de las operaciones es significativo.

1.7.2. Normalización temporal

El paso más importante en la preparación de los datos de una sola estación es lo que llamamos normalización temporal. La normalización en el dominio del tiempo es un procedimiento para reducir el efecto de terremotos, irregularidades instrumentales y fuentes de ruido no estacionarios cercanos a la estación de registro. Los terremotos son uno de los impedimentos más importantes para el procesamiento automatizado de datos. Se producen de manera irregular y, a pesar de que los tiempos aproximados y las ubicaciones de los grandes terremotos se llegan a conocer en los catálogos, los sismos pequeños en gran parte del mundo no figuran en los catálogos globales. Además, el tiempo de llegada de las fases de ondas superficiales en períodos cortos no es muy bien conocido. Por lo tanto, la eliminación de las señales sísmicas debe ser adaptada a los datos.

Bensen *et al* (2007) hacen mención de cinco tipos de normalizaciones temporales que son aplicados a señales de ruido sísmico. Sin embargo, para los fines de este trabajo, tan solo haremos mención a dos de ellos. El primer método y más agresivo se llama normalización "de un bit", que sólo conserva el signo de la señal original mediante la sustitución de todas las amplitudes positivas con un 1 y todas las amplitudes negativas con un -1. Este método se ha demostrado que aumenta la relación señal-ruido (SNR) cuando se emplean en experimentos acústicos en el laboratorio (Larose *et al.*, 2004) y se ha utilizado en una serie de estudios sísmicos tempranos de ondas de coda y el ruido ambiental (Campillo y Paul 2003; Shapiro y Campillo 2004; Shapiro *et al.*, 2005; Yao *et al.*, 2006).

El segundo método de normalización se llama *running-absolute-mean* y ha sido propuesto por Bensen *et al.*, (2007). Este método calcula la media móvil del valor absoluto de la forma de onda en una ventana de tiempo normalizada de longitud fija y pondera la forma de onda en el centro de la ventana por el inverso de este promedio. Es decir, dada una serie de tiempo discreta d_j , calculamos la ponderación de la normalización para el punto de tiempo n como:

$$w_n = \frac{1}{2N+1} \sum_{j=n-N}^{n+N} |d_j| \quad (1.8)$$

por lo que el dato normalizado se convierte $\tilde{d}_n = d_n / w_n$. El ancho de la ventana de normalización $(2N + 1)$ determina que tanto se conserva la información de amplitud. Una ventana de una muestra $(N = 0)$ es equivalente a un bit de normalización, mientras que una ventana de tiempo muy largo se acercará a una señal original re-escalada como $N \rightarrow \infty$. Los autores mencionan que después de probar con varios anchos de ventana de tiempo, encontraron que aproximadamente la mitad del máximo periodo del filtro pasabanda trabaja bien y que esta longitud se puede variar considerablemente y aún producir resultados similares.

El objetivo de emplear ambas normalizaciones es el de observar la potencialidad de cada método para el cálculo de los cocientes espectrales.

1.7.3. Aplicación de *Ibit* y *spectral whitening* a sismogramas de ruido ambiental para la ciudad de México

En este apartado aplicaremos dos métodos de normalización, *Ibit* y *running-absolute-mean* a los sismogramas de ruido ambiental para las ocho estaciones que se presentaron en el subcapítulo anterior. La forma de calcular los cocientes espectrales se hará mediante el método de densidades espectrales direccionales. Para la obtención del cociente espectral aplicando el método *Ibit* los pasos son los siguientes:

- a. Cambio de la señal original, por la unidad ya sea positivo o negativo, dependiendo de los valores del registro.
- b. Cálculo de los espectros de Fourier para cada ventana de tiempo para las componentes horizontales y vertical, con un mismo tiempo de inicio y duración.
- c. Con estos espectros normalizados, se procede a realizar el cociente espectral.

Para la aplicación del *running-absolute-mean* se realizaron dos pruebas que consistieron en lo siguiente:

1. Primer caso
 - a. Se obtuvieron los espectros de Fourier de la ventana de tiempo para las componentes horizontales y vertical, con un mismo tiempo de inicio y duración. De estos se computa la suma del módulo elevado a la segunda potencia de cada espectro, a la cual se aplica la raíz cuadrada, denominado E .
 - b. A este nuevo espectro se le aplica *running-absolute-mean*, teniéndose un nuevo espectro E_{RAM} . Es necesario mencionar que se asignó a N una longitud igual a un cuarto de la longitud de ventana de tiempo. Se designó este valor ya que después de una serie de pruebas en el que se fue variando N , éste presentó el mejor desempeño en la obtención del cociente espectral.
 - c. Posteriormente se realiza el cociente espectral E / E_{RAM} , obteniéndose un espectro normalizado, E_n .
 - d. En seguida se realiza la multiplicación espectral entre el espectro de Fourier para cada ventana de tiempo y el espectro E_n .
 - e. Con estos espectros normalizados, se procede a realizar el cociente espectral.

2. Segundo caso

- a. Se obtuvieron los espectros de Fourier de la ventana de tiempo para las componentes horizontales y vertical, con un mismo tiempo de inicio y duración. A estos espectros se le aplica *running-absolute-mean*, teniéndose tres espectros.
- b. Con estos espectros normalizados, se realiza el cociente espectral.

En la Figura 1.8 se muestran los resultados obtenidos con los diferentes tratamientos mencionados. Con línea gris se presenta el cociente H/V obtenido con el método *1 bit*, en líneas color azul y negra se presenta el cociente obtenido empleando *running-absolute-mean* mediante el primer caso y el segundo caso, respectivamente.

En general se observa que:

1. Empleando el método *1bit* existe una disminución considerable en los valores del cociente espectral. En el caso de las estaciones LV17, LI33 y DX37 se presenta una mala estimación de la frecuencia fundamental y una recuperación errónea de la forma espectral. Por otro lado, se logra resolver la deficiencia en la deamplificación de los espectros en altas frecuencias.
2. Aplicando *running-absolute-mean* con el primer caso, se tiene una buena recuperación de la forma espectral, frecuencia y amplitud relacionada a éste. Sin embargo no se logra resolver la deficiencia en la deamplificación de los espectros de sitio obtenidos con registros de ruido ambiental.
3. Aplicando *running-absolute-mean* con el segundo caso, se obtienen mayores valores del cociente espectral. Además, se resuelve el problema de la deamplificación del cociente hacia altas frecuencias, presentando un comportamiento muy similar a la obtenida empleando *1 bit*.

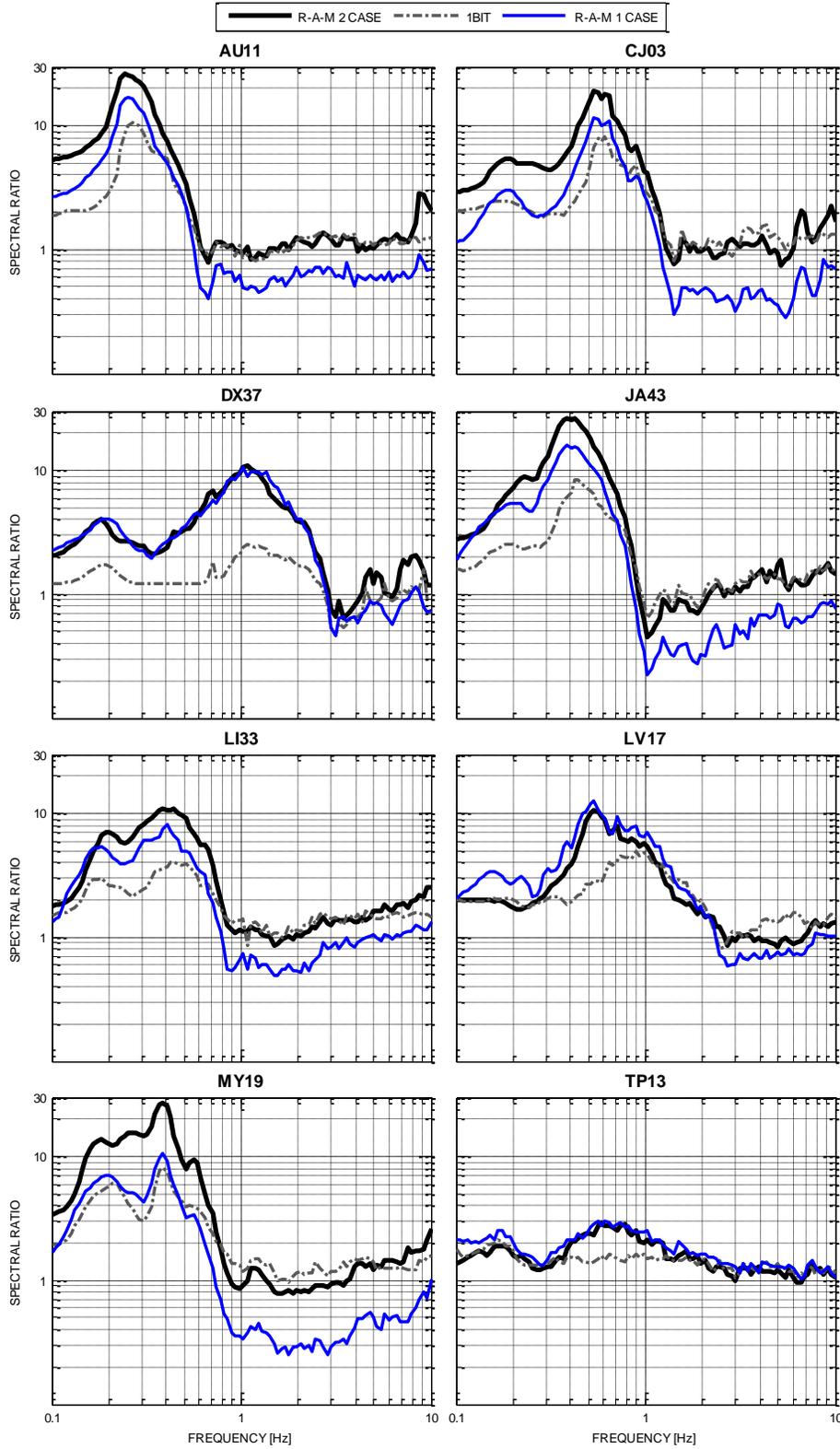


Figura 1.8 Comportamiento de los cocientes espectrales con el método DED aplicando los blanqueados espectrales 1 bit (línea discontinua gris) y running-absolute-mean (r-a-m) para primer caso (línea azul) y segundo caso (línea negra) a sismogramas de ruido sísmico

Sin embargo, llegado a este punto surge la pregunta, ¿qué tan válido es el resultado de emplear *running-absolute-mean* mediante el segundo caso? Para tener una idea más confiable de ello, se comparó éste cociente con respecto al espectro obtenido con la técnica HVSR, pero se hizo una discriminación entre los registros de sismo, en función del epicentro estando éste en zona de subducción y aquellos localizados dentro del continente (corticales).

Esta diferenciación depende del tipo de fuente, pues el contenido de frecuencias es diferente, predominando las bajas frecuencias para los sismos de subducción, y las altas frecuencias para sismos corticales. Dependiendo del contenido de energía, las capas del suelo presentarán un diferente comportamiento sobretodo en sus modos secundarios.

En la Figura 1.9 se presenta un comparativo entre la respuesta promedio del suelo para los sismos de subducción e interplaca (línea roja) y el cociente H/V calculado empleando el *running-absolute-mean* (r-a-m) para segundo caso (línea negra) para siete estaciones dentro del Distrito Federal. En el Anexo A se presentan los espectros individuales HVSR obtenidos para varios temblores y que han sido diferenciados con un diferente estilo de línea. En línea gris discontinua se ha calculado el cociente promedio HVSR. De igual forma, se ha sobrepuesto el cociente H/V calculado empleando el *running-absolute-mean* (r-a-m) para segundo caso (línea negra).

De estas imágenes podemos mencionar que:

1. Se observa que para el caso del Distrito Federal, dependiendo del tipo de fuente la respuesta del suelo se modifica hacia altas frecuencias. En las imágenes se distingue un levantamiento de la forma espectral para sismos corticales. Esta respuesta se ha indicado con línea delgada punteada en color negro para su fácil observación dentro de las mismas (Anexo A).
2. Para sitios en zona de lago se estima una mayor amplitud del cociente HVSR para sismos de subducción. En tanto que para sitios en zona de transición como lo es DX37, la máxima amplitud se obtiene con sismos corticales.
3. Comparándose la respuesta de los cocientes HVSR y HVNR,
 - a. Queda de nuevo comprobado que la estimación tanto de frecuencia como amplitud y de la forma espectral entre los cocientes HVSR y HVNR son muy parecidos.
 - b. Aplicando *running-absolute-mean* además de solventarse el problema de la deamplificación en altas frecuencias, el comportamiento del espectro H/V es muy similar y en algunos casos se ajusta de igual modo al obtenido con sismo, como se observa en LI33 y MY19.
 - c. El espectro H/V trata de revelar los modos secundarios inclusive aquellos que se desenmascaran con registros de sismos de fuente cortical, como se mira en la respuesta alrededor de 6 Hz en DX37.
4. Finalmente, si se continua evaluando el cociente H/V de la forma tradicional con el método de la Media Cuadrática (programa Geopsy) y sin aplicar un blanqueado espectral, para la zona de lago y transición se continuará obteniendo deamplificaciones y una estimación menor de los valores de amplitud de la razón espectral, lo cual no es conveniente si es con el fin de la generación de mapas de intensidad.

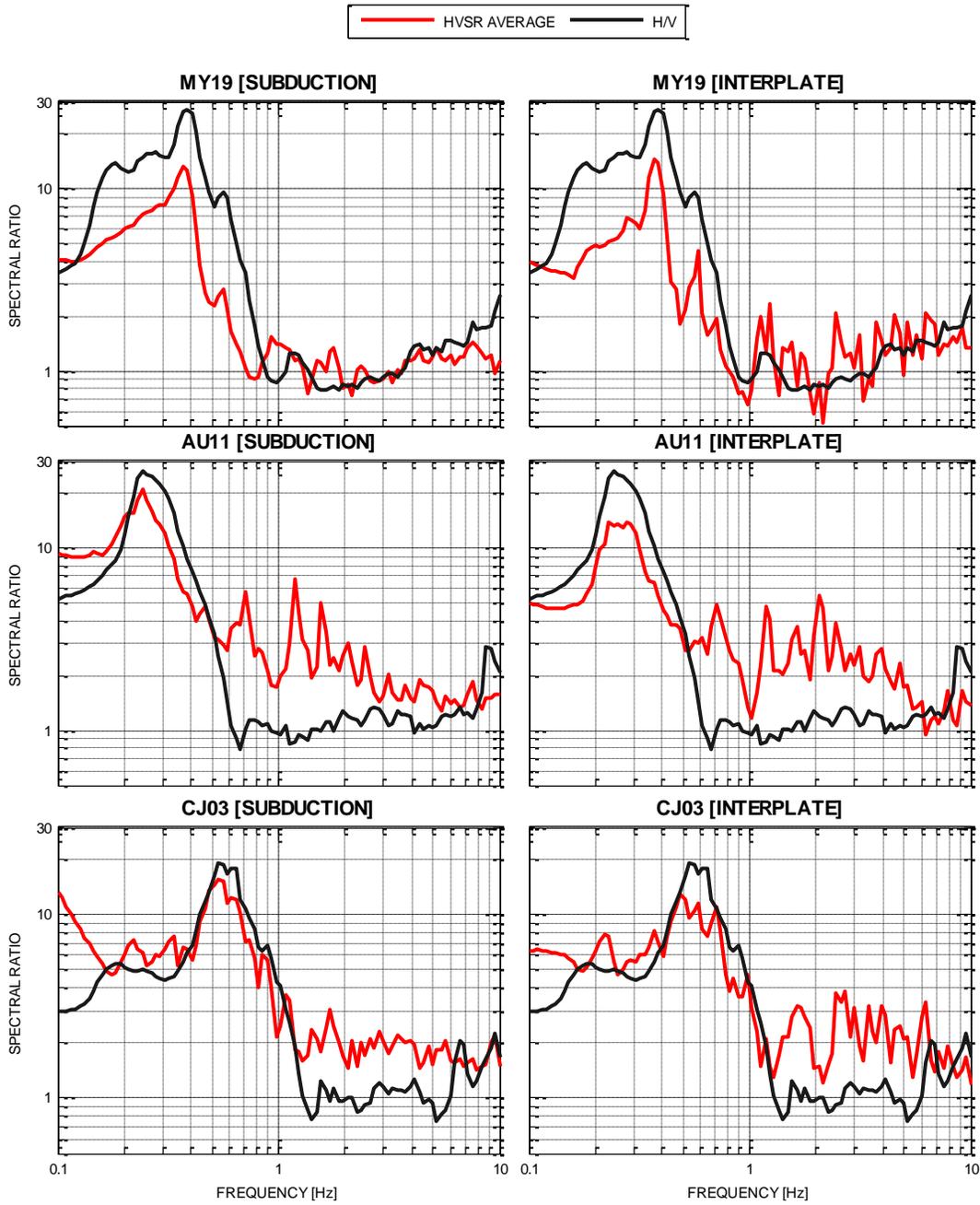


Figura 1.9 Comparación entre la respuesta del suelo en función del tipo de sismo subducción (izquierda) y interplaca (derecha) para siete estaciones de la RACM y el cociente HVNR calculado mediante DED y r-a-m (línea negra)

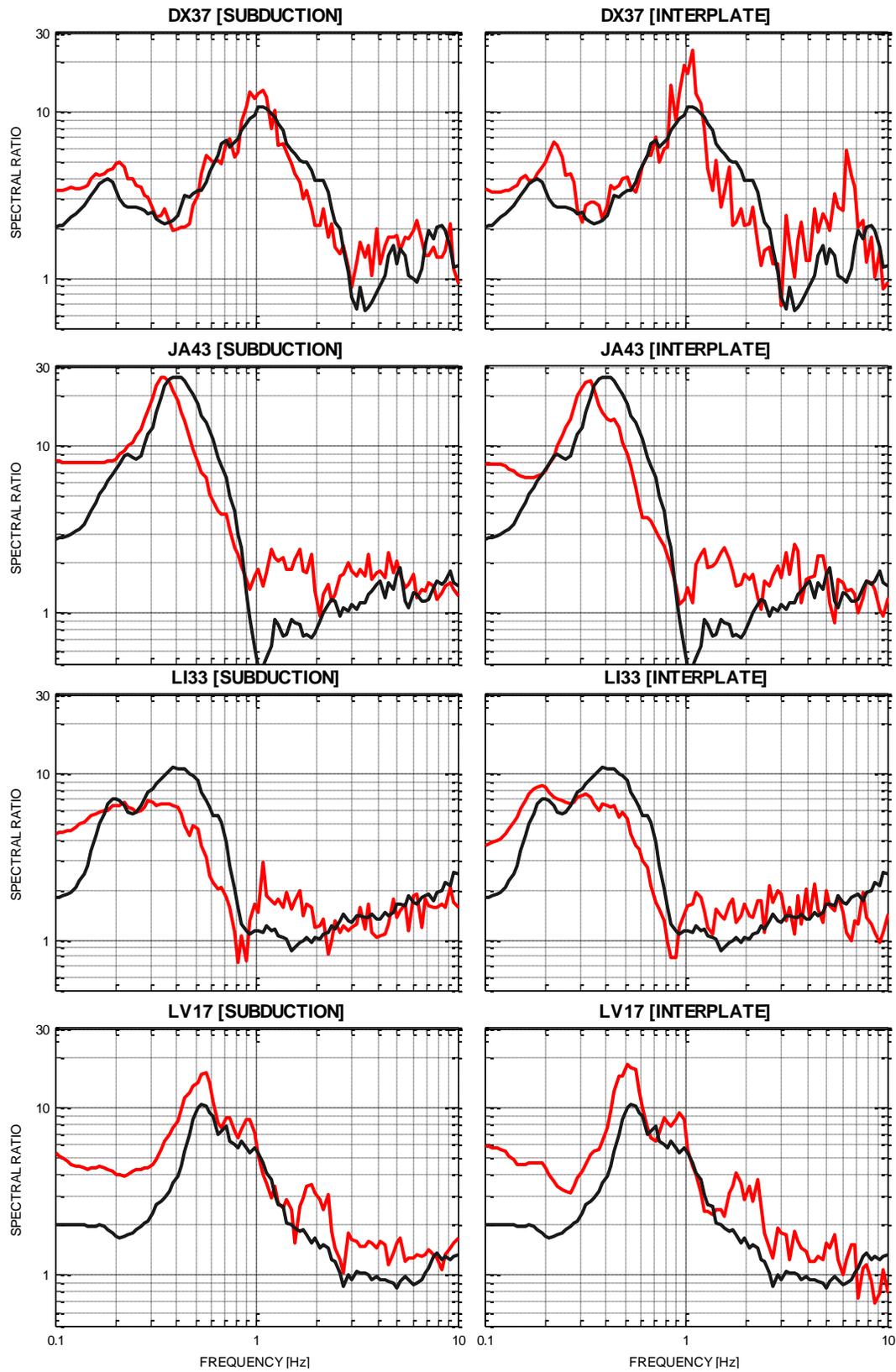


Figura 1.9 Continua

CAPÍTULO 2

EVALUACIÓN DE LA AMPLIFICACIÓN EN LAS ESTACIONES EN ZONA DE LOMA PARA LA CUENCA DE MÉXICO

En éste capítulo se hace una revisión del efecto de sitio presente en las estaciones acelerográficas localizadas en zona de loma, para determinar cuáles de estas pueden tomarse como sitio de referencia. Se comienza con un análisis sobre las causas de amplificación de las ondas sísmicas en esta parte de la ciudad. Se continúa con un análisis del efecto de sitio en la estación CUIP, concluyéndose que de seguir usándose los registros de esta estación tendrán que ser corregidos por efecto de sitio para un posterior empleo, por ejemplo, en la generación de mapas sísmicos de intensidad. Finalmente, se muestra que CENA ofrece una opción viable para ser considerada como un sitio de referencia para la generación de mapas sísmico.

2.1. INTRODUCCIÓN

Para cuantificar la amplificación sísmica del suelo es necesario establecer un sitio que funja como referencia, de tal modo que permita establecer alguna comparación del movimiento de salida con respecto al movimiento de entrada. Generalmente las estaciones de referencia deben estar localizadas sobre terreno firme libre de efecto de sitio. Singh *et al.*, (1988a, 1995) y Ordaz y Singh (1992) señalaron que la zona de loma en la Cuenca de México sufre una amplificación importante con respecto a las leyes de atenuación. Algunos investigadores (Reinoso y Ordaz, 1999, Montalvo-Arrieta *et al.*, 2002a) analizaron las respuestas entre los cocientes espectrales de las estaciones del norte y suroeste, encontrando diferencias significativas.

Montalvo-Arrieta *et al.*, (2002b) realizaron un estudio completo entre las diferencias de las estaciones que se encuentran al norte, hacia el sur y al oeste. Refieren que las estaciones del oeste y sur presentan una amplificación relativa constante de hasta 3 veces en la banda de frecuencia 0.7 a 10 Hz. Además refieren que las estaciones que se localizan al norte muestran amplitudes, tanto en tiempo como en frecuencia, que son mucho menores que las de las estaciones situadas al sur y oeste de la ciudad. Además proponen establecer una estación de referencia virtual con base en el promedio espectral de las estaciones localizadas al norte de la ciudad, ya que es aquí donde se encuentran los afloramientos de roca más antiguos de la Cuenca de México, de la época del Mioceno y que forman el basamento de la Cuenca de México (Figura 2.1).

Así mismo, estos mismos autores realizaron razones espectrales de las estaciones localizadas en la parte central y suroeste respecto a la estación Estanzuela (ESTS), localizada en la zona norte de la ciudad. La comparación de estos cocientes espectrales muestra que existen amplificaciones relativas hasta de cuatro veces entre algunas de las estaciones localizadas en la zona suroeste de la ciudad en el rango de frecuencias de 1 a 3 Hz. Estos efectos observados se deben a la presencia de material mucho más suave debajo de los flujos de lava donde se localizan las estaciones.

Por otro lado, para estimar el movimiento del suelo en varios sitios usando a CUIP como sitio de referencia, los efectos de la estación deben ser eliminados (Pacheco y Singh, 1995). Un aspecto a resaltar es que en los estudios anteriormente citados, ninguno de ellos se aboca a estudiar el comportamiento de la estación CENA, localizada a 1.8 km de distancia de CUIP. En la Figura 2.1 se muestra la localización espacial de las estaciones acelerográficas, diferenciadas con cuadros en rojo, localizadas en zona de loma y su distribución sobre el mapa geológico de la Cuenca de México.

2.2. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES ACELEROGRÁFICAS EN ZONA DE LOMA (SUELOS DUROS O ROCA) Y SU CORRELACIÓN CON LA GEOLOGÍA

En ésta sección se presenta una breve síntesis geológica de la cuenca de México. De acuerdo con la geología, las estaciones acelerográficas en zona de loma se encuentran sobre distintos elementos, los cuales son responsables de un comportamiento bajo el efecto de las ondas sísmicas. Así al ubicar las 16 estaciones en el mapa geológico (Mooser *et al.*, 1992) podemos relacionar el “efecto de sitio” de cada una de ellas de acuerdo con el rasgo geológico sobre el cual están asentadas. En la Figura 2.1 se presenta la ubicación de las 16 estaciones acelerográficas sobre la zona de loma.

Como observamos,

TE07, CHAS, TACY, UI21, CS78, IM40 y TP13 se encuentran sobre la unidad litológica de color azul, se trata de la Formación Tarango constituida por los abanicos volcánicos compuestos por cenizas, pómez, flujos piroclásticos, lavas intercaladas y lahares esencialmente, depositados por abanicos volcánicos del cerro San Miguel, que se identifica en color blanco en el extremo SW del mapa. Estos depósitos de material volcánico se encuentra en capas o estratos, como las conocidas arena azules, cuquita. Esta estratigrafía es muy errática, por lo que puede cambiar en pequeñas distancias. Para entender la distribución de los estratos, observemos las Figuras 2.3 y 2.5 donde se muestra que la Formación Tarango descansa sobre las vulcanitas depositadas del C. San Miguel. En TP13 se observa según el corte estratigráfico de la Figura 2.4, que esta estación se localiza en la transición de la F. Tarango y los depósitos aluviales del Cuaternario.

Las estaciones ETST y CT64 se ubican en el extremo SE de la Sierra de Guadalupe, sobre el cerro Santa Isabel representado por un cuerpo volcánico antiguo, probablemente Oligoceno-Mioceno que se localiza en las bases de esta sierra. Éste volcán acusa además los efectos de una tectónica intensa al presentar sólo una porción; se trata de su borde oriental coronado por los domos Gachupín y Santa Isabel de composición dacítico-andesítico. En la Figura 2.1 se observa en color castaño y en forma de un semicírculo o de un semivolcán que está fallado. Esta formación geológica es la más antigua dentro de la Cuenca de México. Esto se presenta en el corte geológico A-A' (Figura 2.2), donde se observa que esta formación del Cuaternario Inferior subyace por debajo de la Cuenca de México. Por debajo de esta formación se tiene un estrato de vulcanitas que descansan sobre depósitos de caliza del Cretácico. La estación CT64, esta se localiza en la parte baja del volcán, en lo que se define como la transición hacia los depósitos lacustres.

Las estaciones CUIP, CENA, FJ74 se encuentran sobre la unidad de color castaño claro que corresponde a lo que se conoce como pedregal de San Ángel formado por el derrame de lava basáltico-andesítico emitido por el volcán Xitle hace algo más de 2000 años. Éste derrame se posiciona sobre una parte de la F. Tarango y sobre depósitos aluviales del cuaternario (Qal, en color amarillo claro). En la Figura 2.7 se muestra el corte estratigráfico F-F' donde se aprecia la disposición de las estaciones FJ74, CENA y CUIP. En esta imagen se muestra a CUIP en la parte final del derrame basáltico, donde se ha visto la existencia de interdigitaciones basalto-arena por medio de sondeos geotécnicos.

En la zona de la estación FJ74 se tiene una capa de basalto que derramó sobre depósitos aluviales, probablemente producto de la actividad de los domos basálticos Zacayucan y de la erosión de la F. Tarango. Debajo del aluvión se presenta la F. Tarango y debajo de éste vulcanitas.

Las estaciones CP28 y CE18 que se encuentran en la región central de la ciudad. Se ubican sobre 2 elementos volcánicos formados sobre aluviones del cuaternario. El CP28 se ubica sobre los restos de un pequeño estratovolcán denominado Peñón de los Baños, afectado por dos fallas que determinan que solo aflore su porción NE.

El actual Cerro de la Estrella, malamente denominado así ya que éste es un antiguo volcán, sobreyace a un volcán aún más antiguo. El volcán primario al hacer erupción depositó una serie de diversos materiales como ceniza, tezontle, escoria volcánica y lahares, posteriormente viene otra erupción de lava que cubre toda esta secuencia eruptiva del Cerro de la Estrella.

Hacia la parte sur de la Cuenca de México, sobre la Sierra de Chichinautzin se ubica la estación PA34 en la parte baja de entre los volcanes Cuatzin y Teutli. En esta zona se presentan suelos residuales y transportados, producto de la erosión e intemperismo de la roca existente. El corte estratigráfico se presenta en la Figura 2.6.

Finalmente, la estación TXCR se posiciona sobre uno de los elementos más antiguos que afloran dentro de la cuenca de México, se trata de la caldera de Tlaixpan del Oligoceno (Texcoco, Edo. Mex.). La composición litológica de esta caldera es roca metamórfica.

Habiendo definido a grandes rasgos la posición de las 16 estaciones procedemos ahora a correlacionar de manera específica el comportamiento sísmico de cada una de ellas con respecto a la estratigrafía

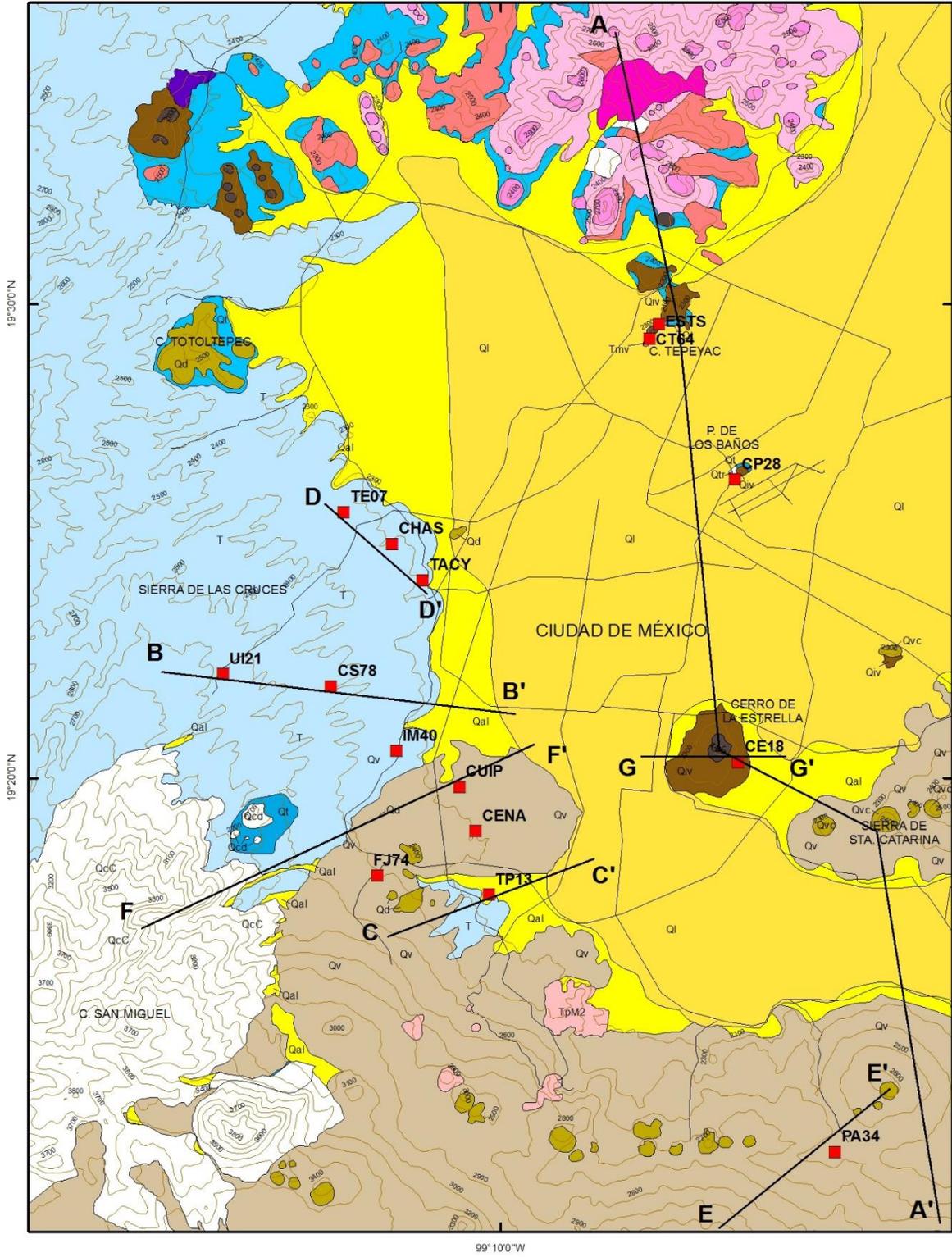


Figura 2.1 Ubicación de las estaciones permanentes ubicadas solamente en zona de loma sobre el mapa geológico para la porción centro de la Cuenca de México (Mooser et al., 1996). Perfiles geológicos de la distribución estratigráfica en las diferentes zonas de loma

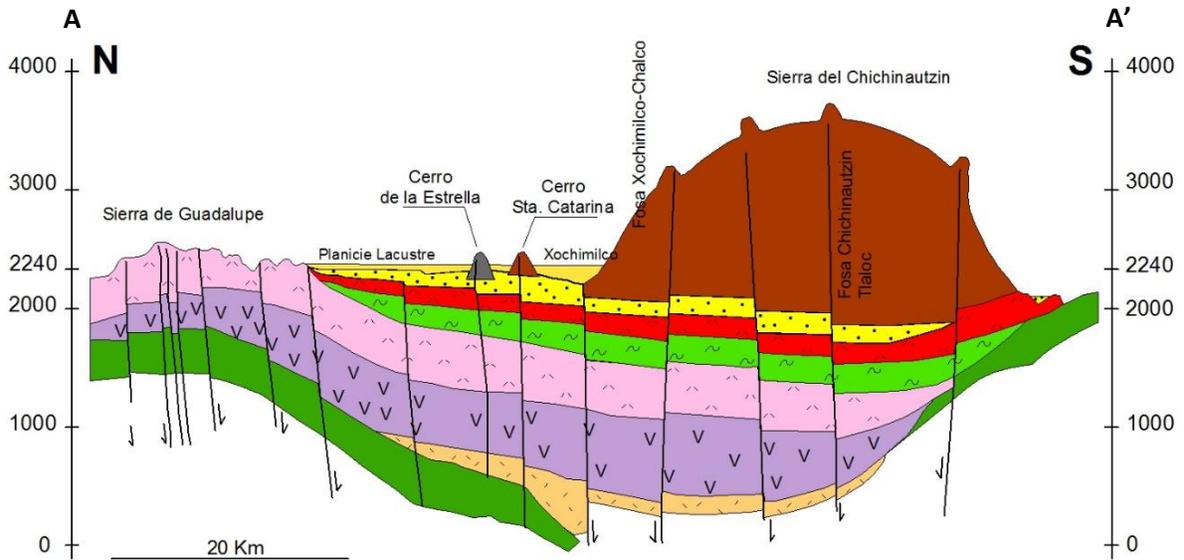


Figura 2.2 Perfil estratigráfico con dirección Norte-Sur (corte A-A') de la parte central de la cuenca (Mooser, 2013)

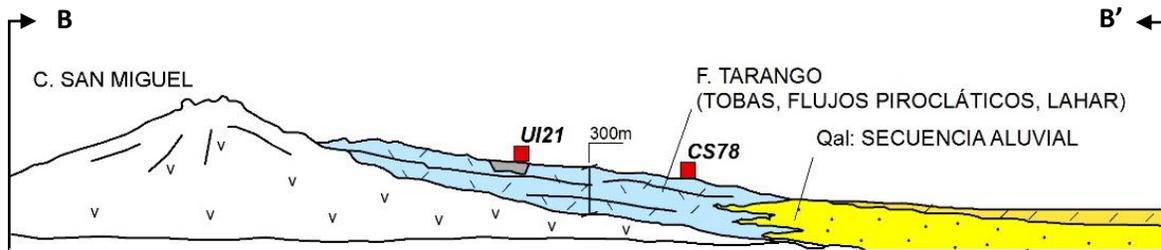


Figura 2.3 Corte estratigráfico con dirección Oeste-Este (corte B-B') de la parte poniente de la cuenca (Zúñiga, 2014)

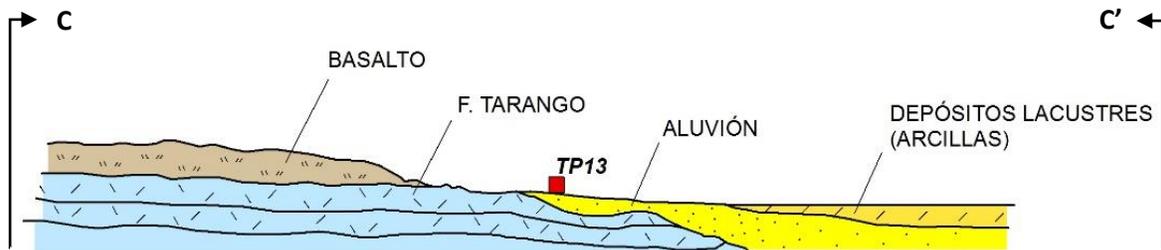


Figura 2.4 Corte estratigráfico con dirección SW-NE (corte C-C') de la parte sur-poniente de la cuenca (Zúñiga, 2014)

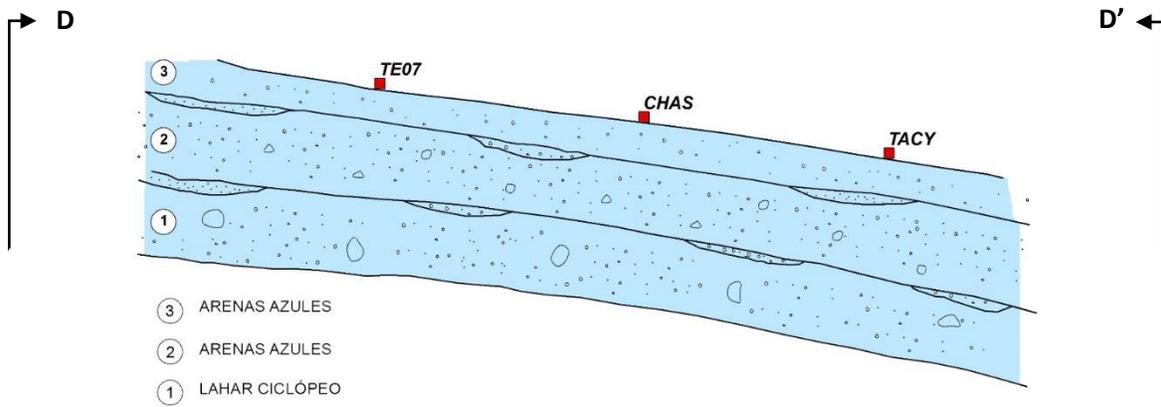


Figura 2.5 Corte estratigráfico con dirección NW-SE (corte D-D') de la parte poniente de la cuenca (Zúñiga, 2014)

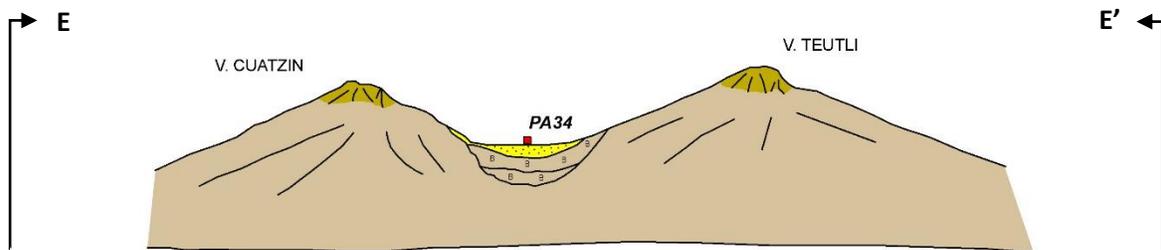


Figura 2.6 Corte estratigráfico con dirección SW-NE (corte E-E') de la parte sur de la cuenca (Zúñiga, 2014)

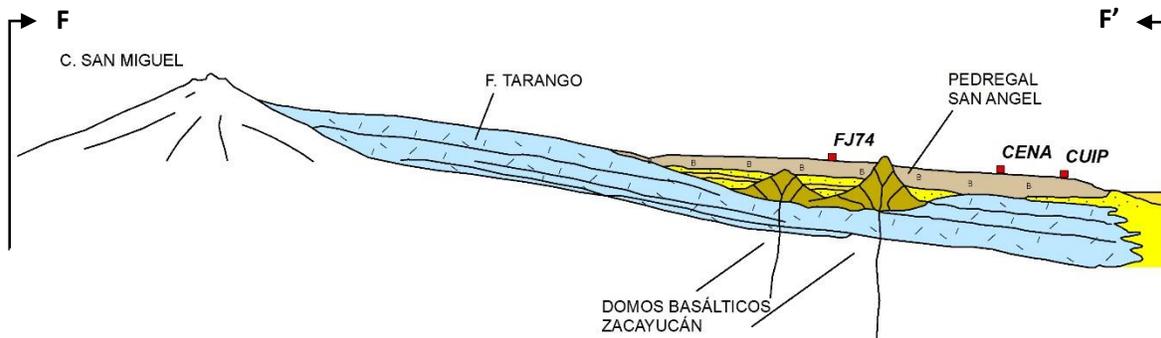


Figura 2.7 Corte estratigráfico con dirección SW-NE (corte F-F') de la parte sur-poniente de la cuenca (Zúñiga, 2014)

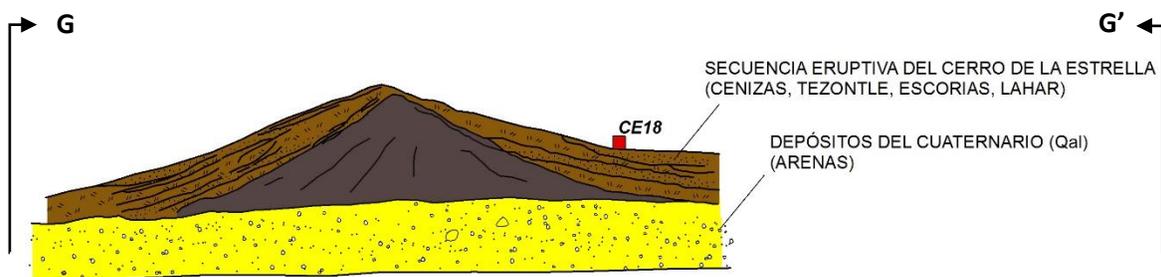


Figura 2.8 Corte geológico del Cerro de la Estrella (Zúñiga, 2014)

2.3. EVALUACIÓN DEL EFECTO DE SITIO DE LAS ESTACIONES LOCALIZADAS EN ZONA DE LOMA

Para determinar si un sitio puede ser considerado como sitio de referencia, se debe evaluar el efecto de sitio usando la Técnica de Nakamura a través de registros de terremotos débiles o fuertes (Lermo y Chávez-García, 1993, Molnar y Cassidy, 2006) y/o a través de registros de microtemores. Algunos autores (Bonilla *et al.*, 1997, Molnar y Cassidy, 2006) mencionan que el cociente espectral H/V con microtemores estima la frecuencia fundamental del sitio, pero falla en la determinación del verdadero factor de amplificación. Recientemente Cadet *et al.*, (2010) mencionaron que el sitio debe estar en roca y con un $V_{s30} \geq 750$ m/s y una frecuencia fundamental de resonancia mayor a 8 Hz para ser considerado un sitio libre de efecto local.

Dentro del manual de SESAME, la cual se reproduce la Figura 2.9, representa el espectro de sitio característico de un sitio ideal de referencia. Se observa en esta lámina que la forma típica de la curva H/V es prácticamente plana en el intervalo de 0.1 a 10 Hz (rango de interés en ingeniería sísmica) y con una amplitud cercana a la unidad, aunque puede tenerse pequeñas respuestas que sobrepasan ligeramente las dos unidades de amplitud, como en el caso del cociente mostrado con línea negra.

Por otro lado, estudios recientes concernientes a las propiedades dinámicas de los suelos en la cuenca de México, han demostrado que la zona de lago ha presentado variaciones en los valores de periodo dominante en las últimas décadas (Ovando-Shelley *et al.*, 2003, Ovando-Shelley *et al.*, 2007, Avilés y Pérez-Rocha, 2010, Martínez-González *et al.*, 2011, Arroyo *et al.*, 2013, Hernández-Estrada, 2013, Martínez-González *et al.*, 2014). Se ha visto que en algunas zonas las variaciones en los valores de periodo son de hasta 0.9s en los últimos 20 años (Martínez-González *et al.*, 2012). Por el contrario, las zonas de transición y loma han presentado variaciones máximas de periodo de 0.1s (Martínez-González *et al.*, 2012).

Dado que la zona de loma ha permanecido constante en sus propiedades dinámicas y estáticas, se usaron los registros de aceleración, contenidos en la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes vol.II de los años 1989 a 1999, para la evaluación del efecto de sitio de cada una de las estaciones acelerográficas ubicadas en esta zona de la ciudad. Además, se analizaron registros de sismos recientes (2010 a 2012), que fueron proporcionados por IdeI (UNAM), CENAPRED y CIRES.

Para el análisis se empleó la técnica de Nakamura (HVSR) (Lermo y Chávez-García, 1994), donde para cada estación se seleccionaron los sismos mediante el siguiente criterio: buena calidad de registro, determinación clara de arribos de ondas P y S, tiempo mínimo de registro de 60 segundos, magnitud sísmica mayor o igual a 5.0. Para el cálculo se utilizó la parte intensa del sismo. Esto es, a partir del arribo de las ondas S, se seleccionó una sola ventana de 81.92 segundos, con lo cual se han tomado ondas de cuerpo y ondas superficiales, donde estas arriban en promedio entre los 30 y 50 segundos. El cociente HVSR fue calculado siguiendo el método MC, descrito en el capítulo anterior. En la Figura 2.10 se presentan los cocientes espectrales calculados en las 16 estaciones analizadas. En línea negra gruesa se identifica al cociente promedio y en líneas delgadas la desviación estándar. En el Anexo C se presentan los espectros individuales de cada sismo.

En seguida se hará la evaluación del efecto de sitio en cada estación por cada zona. Al norte de la ciudad se localizan las estaciones ESTS y CT64 sobre una porción de sierra de Guadalupe. La distancia entre ambas estaciones es de 500 metros. Aunque la distancia es poca, se observan diferencias apreciables en su comportamiento dinámico. Analizando el cociente espectral CT64 se tiene un máximo espectral en 3 Hz con un factor de amplificación de 2.6 veces así como un segundo máximo en 0.8 Hz con apenas 2.1 veces de amplificación. En tanto que para ESTS, se observa un máximo espectral alrededor de 2.0 Hz que apenas alcanza las dos veces de amplitud. Este efecto entre 2.0-3.0Hz puede deberse a la presencia de riolita fracturada, mientras que el efecto en 0.8 Hz puede ser debido a la contribución de los depósitos lacustres.

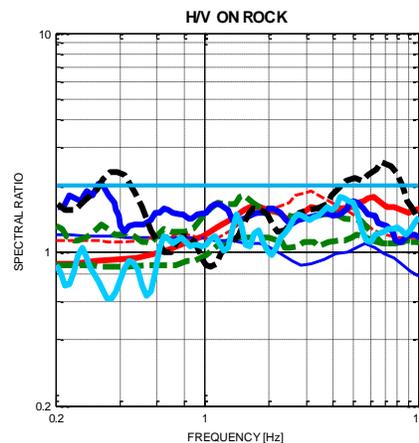


Figura 2.9 Curvas típicas de los cocientes H/V calculados sobre roca (SESAME, 2005)

Continuando con el análisis ahora para las estaciones localizadas hacia el poniente de la ciudad (TE07, UI21, IM40, CS78, TACY y CHAS), se verifica que existe un efecto de sitio regional entre 0.3-0.4Hz. Este efecto se identifica en la Figura 2.10 con una flecha en color rojo. Si se compara la respuesta en este rango de frecuencias entre las estaciones localizadas sobre la F. Tarango y las estaciones localizadas sobre la Sierra de Guadalupe, se tienen dos comportamientos diferentes. Para tratar de explicar estos comportamientos sería que el contraste de impedancia entre las vulcanitas y las calizas es muy bajo, por ello que no se presenta un máximo espectral comprendido entre 0.1 a 0.5 Hz (véase Figura 3.1). En tanto que la F. Tarango descansa directamente sobre las vulcanitas (véase Figura 2.7). Mediante un modelo teórico, si se estimada la respuesta de la F. Tarango para un espesor de 300 metros y una velocidad de onda de cortante promedio de 600 m/s, se tiene un máximo espectral en 0.5 Hz. Si se varía el espesor de éste depósito a 400 metros, el máximo espectral calculado es de 0.38 Hz. Ambas funciones teóricas con una amplificación relativa de 3 veces. Esto concuerda con la respuesta experimental observada en estas seis estaciones.

En el caso de CE18, ubicada sobre el Cerro de la Estrella, se tiene la máxima ordenada espectral en 1.8 Hz con tres veces de amplitud. Nótese que el ancho de banda de la respuesta de este sitio está comprendida entre 0.4-7.0 Hz. Esto nos está indicando la gran heterogeneidad de los materiales que componen los flancos de este antiguo volcán. Para la estación CP28 (Peñón de los Baños) se tiene que la razón espectral tiene una respuesta entre 0.9–2.0 Hz y una tremenda amplificación de hasta cuatro veces.

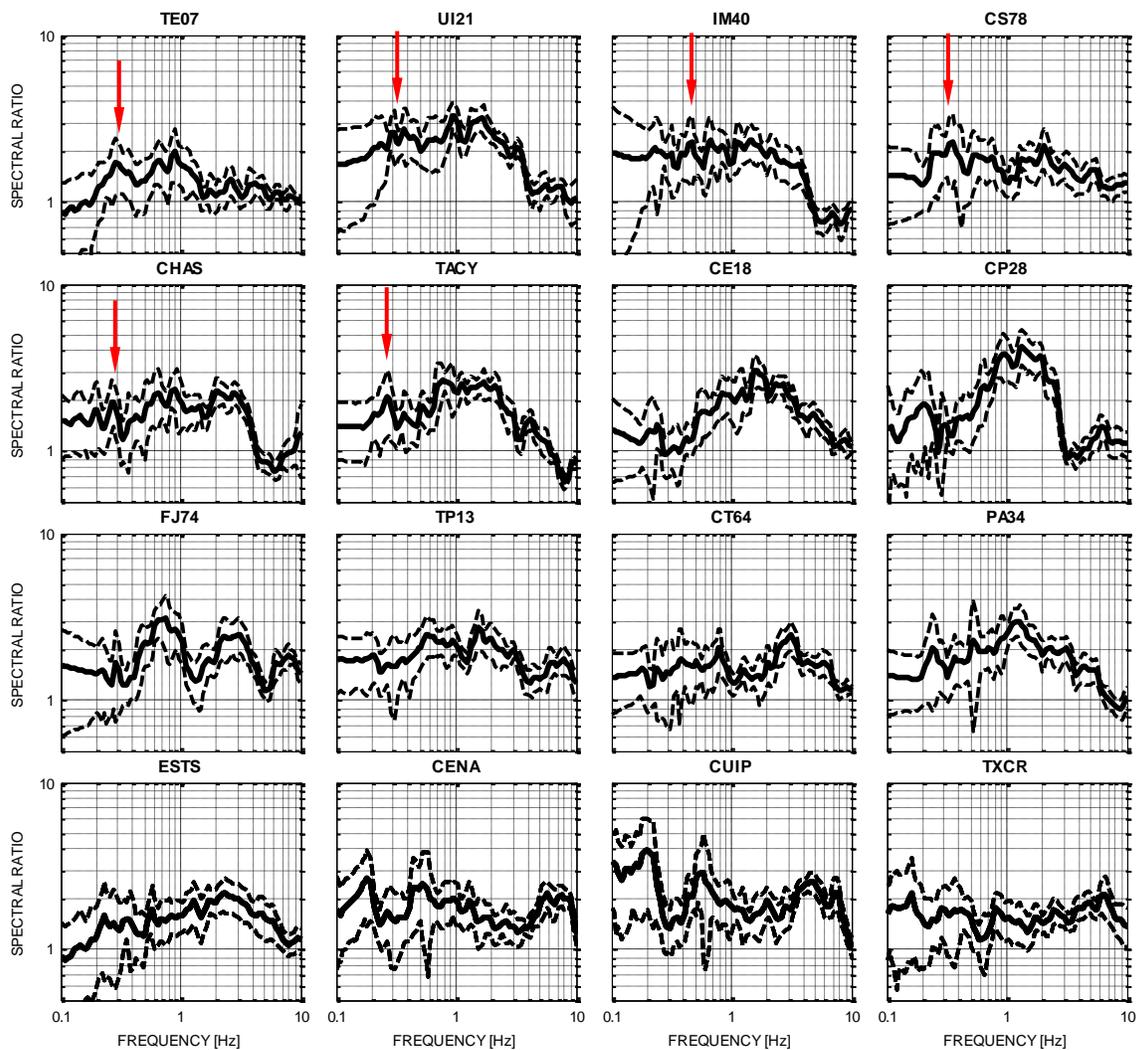


Figura 2.10 Evaluación del efecto de sitio en las estaciones acelerográficas ubicadas en zona de loma

Por otra parte, al sur-poniente de la ciudad se encuentran las estaciones CENA, CUIP, FJ74 y TP13. En FJ74 se aprecia claramente que existen tres máximos espectrales, siendo el de mayor amplitud en 0.6 Hz. En TP13 se presenta un efecto de sitio considerable de hasta tres veces entre las frecuencias 1.0–2.0 Hz.

En CUIP, estación que ha sido tomada en trabajos como estación de referencia (Singh *et al.*, 1988a) para el cálculo de la razón espectral por la Técnica Estándar (SSR), se observan claramente hasta 3 modos de vibrar del terreno. El primero se localiza en 0.2 Hz con un factor de amplificación de hasta 4 veces. Es necesario comentar que este comportamiento no se adjudica al efecto de oleaje, ya que este es constante para todos los sismos analizados. Se tiene otro máximo espectral en 0.5 Hz con una amplificación de 3 veces. Posteriormente le sigue otro efecto alrededor de 4.5 Hz con amplitud de 2.5 veces.

La estación CENA presenta dos máximos en bajas frecuencias, un efecto en 0.2 Hz con una amplificación promedio de 2.5 veces y uno más en 0.5 Hz con amplitud de 2.3 veces. Hacia altas frecuencias no se presenta ningún efecto considerable. Esto puede explicarse a que la capa superficial de basalto que cuenta con un espesor de 40 metros, atenúa las ondas sísmicas en este rango de frecuencias.

Hacia la zona sur, en PA34 se observa claramente un importante efecto de sitio cuyo máximo espectral está en 1.1 Hz con tres veces de amplificación. Este efecto confirma que la estación se localiza sobre un importante depósito de suelo residual y transportado, según lo estipulado en la Figura 2.6.

En la estación TXCR se observa que el comportamiento general en el rango de frecuencias de 0.1 a 10 Hz es muy uniforme, sin sobrepasar las 2 veces de amplitud. La respuesta de este sitio es muy similar a lo mostrado en la Figura 2.9. De todos los sitios analizados, éste es el que presenta el mejor comportamiento para una estación de referencia dentro de la Cuenca de México.

Analizando el comportamiento general de todas las estaciones, aquellas que más se apegan a los criterios de estación de referencia son TXCR, ESTS y CENA. Sin embargo, para el análisis siguiente se incluirá a CUIP ya que a esta estación hay una cantidad de trabajos referidos a la evaluación de efectos de sitio dentro de la Cuenca de México y los registros de ésta estación sirven para la generación de mapas de intensidades sísmicas o *ShakeMaps*.

Dado que para unas estaciones se han utilizado más registros para la evaluación del efecto de sitio, se realizó el siguiente ejercicio, que consistió en obtener la respuesta promedio para las estaciones TXCR, ESTS, CENA y CUIP, utilizando los mismos registros de sismos. En la Figura 2.11 se representan con una simbología la respuesta de cada sismo y con línea negra gruesa, el cociente promedio calculado. En la Tabla 2.1 se presentan las características de los sismos usados en este análisis. De la figura se puede comentar lo siguiente, se confirma que TXCR tiene el mejor comportamiento en todo el rango de frecuencias. ESTS, CENA y CUIP presentan los mismos máximos que los mostrados en la Figura 2.10. Sin embargo CENA presenta un efecto hacia bajas frecuencias y un comportamiento uniforme alrededor de dos unidades entre 1 – 10 Hz.

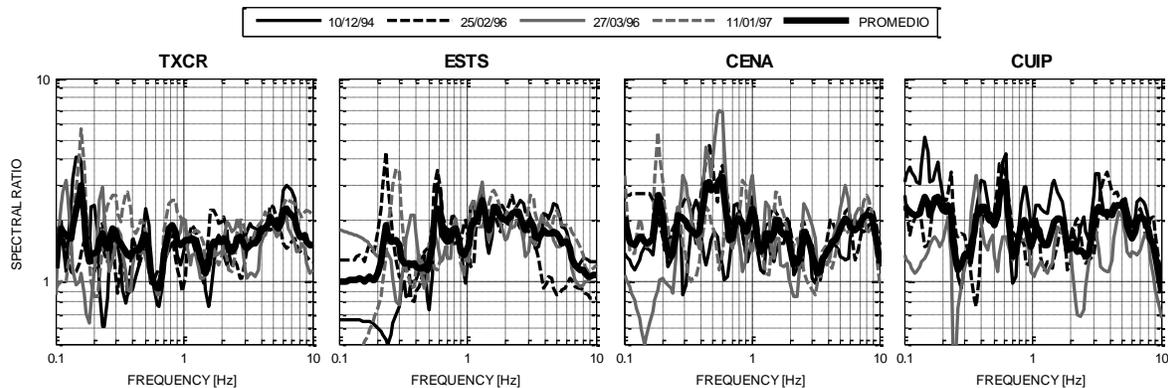


Figura 2.11 Comparación del efecto de sitio presente en 4 estaciones acelerográficas mediante el mismo número de eventos analizados en cada estación

Tabla 2.1 Parámetros de localización y características de los sismos analizados en la Figura 2.11

| Evento | Fecha | Latitud | Longitud | Prof (km) | Magnitud |
|--------|------------|---------|----------|-----------|----------|
| 1 | 10/12/1994 | 18.02 | -101.56 | 20 | 6.3 (Mc) |
| 2 | 25/02/1996 | 15.48 | -98.04 | 13 | 5.2 (Mc) |
| 3 | 27/03/1996 | 16.21 | -98.25 | 7 | 4.6 (Mc) |
| 4 | 11/01/1997 | 17.91 | -103.04 | 16 | 6.5 (Mb) |

2.4. CORRECCIÓN DE CUIP POR EFECTO DE SITIO

Los sismos más recientes que se han sentido con mayor intensidad en la ciudad de México fueron los ocurridos el 10 de diciembre de 2011 (M_w 6.5) y el 20 de marzo de 2012 (M_w 7.4), ambos de diferentes fuentes sismogénicas. El sismo de diciembre (interplaca) tuvo su epicentro dentro del continente a una profundidad de 58 Km y a una distancia de 195 Km de la ciudad de México. El sismo de marzo (subducción) tuvo su epicentro en las costas de Guerrero, en la zona llamada de subducción, a una distancia de 354 Km de la ciudad de México y a una profundidad de 16 Km. La principal diferencia entre estos radica en la energía contenida así como en las frecuencias dominantes, predominando bajas frecuencias para sismos de subducción y un mayor contenido de altas frecuencias para sismos generados dentro del continente.

Los acelerogramas registrados para el sismo de diciembre de 2011 y marzo de 2012 en las estaciones ESTS, CUIP y CENA se presentan en las Figuras 2.12 y 2.13, respectivamente. Para cada evento se presentan los valores de aceleración de cada componente así como su espectro de Fourier. Con una flecha se muestran las frecuencias espurias, relacionadas a efectos estratigráficos locales.

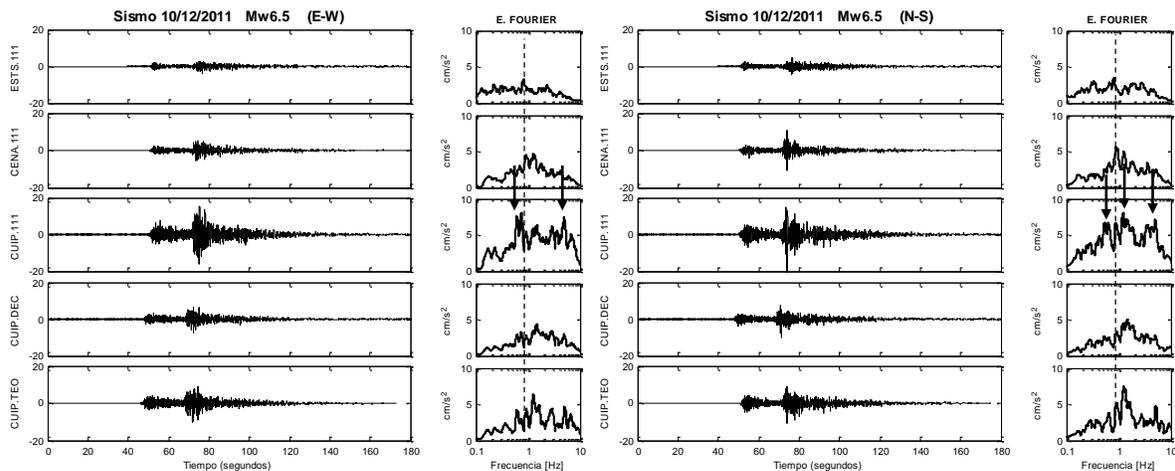


Figura 2.12 Acelerogramas del sismo del 10/12/2011 (M_w 6.5) registrado en CENA y CUIP para ambas componentes horizontales

Tabla 2.2 Comparación de parámetros entre los registros reales para las estaciones ESTS, CENA y CUIP y corregidos mediante el método teórico (TEO) y por deconvolución (DEC) para el sismo del 10/12/2011, para ambas componentes

| Registro | E-W | | | Registro | N-S | | |
|----------|------|-------|------|----------|------|-------|------|
| | Amax | Amin | P2P | | Amax | Amin | P2P |
| ESTS.111 | 2.8 | -3.9 | 6.7 | ESTS.111 | 4.5 | -4.7 | 9.2 |
| CENA.111 | 5.7 | -5.5 | 11.2 | CENA.111 | 10.9 | -10.6 | 21.4 |
| CUIP.111 | 15.7 | -15.9 | 31.6 | CUIP.111 | 14.8 | -22.0 | 36.8 |
| CUIP.DEC | 6.6 | -7.8 | 14.4 | CUIP.DEC | 7.6 | -9.2 | 16.8 |
| CUIP.TEO | 15.1 | -13.2 | 28.3 | CUIP.TEO | 12.4 | -14.5 | 26.9 |

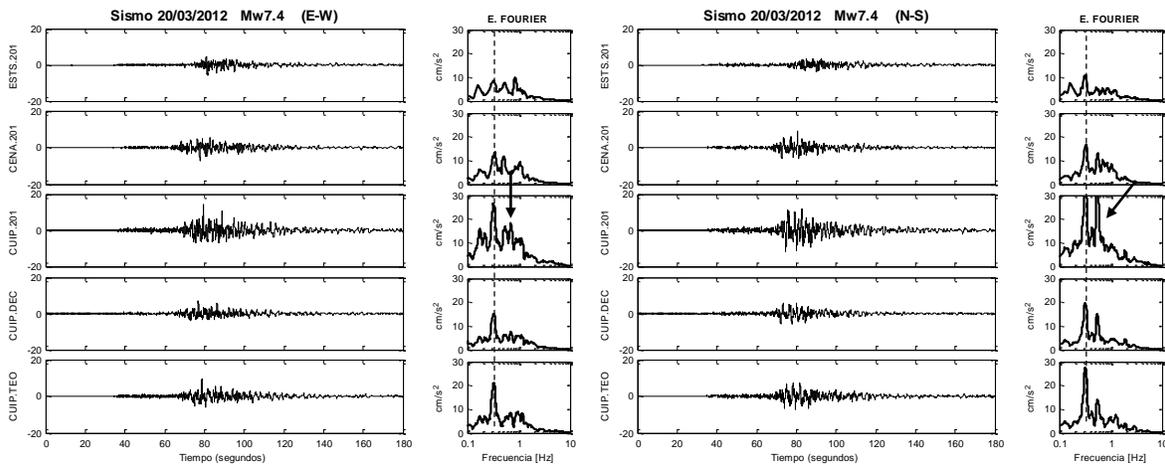


Figura 2.13 Acelerogramas del sismo del 20/03/2012 (M_w 7.4) registrado en CENA y CUIP para ambas componentes horizontales

Tabla 2.3 Comparación de parámetros entre los registros reales para las estaciones ESTS, CENA y CUIP y corregidos mediante el método teórico (TEO) y por deconvolución (DEC) para el sismo del 20/03/2012, para ambas componentes

| Registro | E-W | | | Registro | N-S | | |
|----------|------|------|------|----------|------|-------|------|
| | Amax | Amin | P2P | | Amax | Amin | P2P |
| ESTS.201 | 4.4 | -5.5 | 9.9 | ESTS.201 | 3.6 | -4.1 | 7.7 |
| CENA.201 | 5.2 | -7.0 | 12.2 | CENA.201 | 8.8 | -6.1 | 14.9 |
| CUIP.201 | 14.0 | -7.3 | 21.3 | CUIP.201 | 12.0 | -11.7 | 23.7 |
| CUIP.DEC | 7.2 | -3.9 | 11.1 | CUIP.DEC | 6.0 | -5.6 | 11.6 |
| CUIP.TEO | 8.6 | -5.8 | 14.4 | CUIP.TEO | 7.2 | -7.2 | 14.4 |

A simple vista se aprecia claramente que para el sismo de diciembre (M_w 6.5), la estación CUIP presenta mayores amplitudes en comparación con CENA en ambas componentes. El mismo comportamiento se observa con respecto al sismo de marzo. Por otro lado, comparando ambos registros y no obstante que el sismo de diciembre fue de una magnitud menor, la energía que presenta es mayor, debido a que el epicentro fue más cercano a la ciudad.

A pesar de que la distancia entre ambas estaciones es de 1.6 km, es interesante observar que la respuesta en los registros no es la misma. Esto se observa con mejor claridad en los espectros de Fourier, donde con línea discontinua se indica la frecuencia dominante del sismo, en tanto que con

flechas se remarca la presencia de frecuencias espurias contenidas en el registro; así como en los valores de aceleración reportados las Tablas 2.2 y 2.3. Esto está ligado a la estratigrafía superficial y profunda de la estación CUIP. Por lo tanto, es necesario corregir los registros para su posterior uso como en la generación de mapas de intensidad. La corrección de las señales se hará mediante dos metodologías y se analizarán sus resultados.

Una forma de corrección es mediante una Función de Transferencia Teórica (FTT). En base a información geotécnica de pozo y con el perfil de velocidades de propagación de ondas de corte reportado por Lermo *et al.*, (1990) en el sitio CUIP, se calculó la respuesta teórica para dicho sitio. Para calcular el modelo teórico unidimensional se utilizó el método de Thomson-Haskell (1962).

El primer espesor de 16 m para un estrato de basalto fracturado al que se le estimó una velocidad promedio de 270 m/s. El segundo estrato (basalto sano) de 10 metros, se le asignó una velocidad de 800 m/s. La tercera capa se consideró de un espesor de 120 m (arena con limo y arcilla) y una velocidad alrededor de 350 m/s. Dado que el pozo geotécnico solamente profundizó hasta 40 metros, con información del pozo Copilco se completó el modelo teórico para obtener la respuesta hacia bajas frecuencias. Los valores para el cálculo de la respuesta teórica propuesto para CUIP y CENA se muestran en la Tabla 2.4. En la Figura 2.15 se presenta en la parte superior el perfil de velocidades de ambas estaciones. En la parte inferior se muestra la comparación entre la Función de Transferencia Teórica y el cociente espectral promedio HVSR (línea en rojo) y HVNR (línea en azul).

Se observa que ambos modelos tienen una buena aproximación en el máximo espectral localizado alrededor de 0.18 Hz tanto en frecuencia como en amplitud, así como un buen ajuste en los máximos espectrales en altas frecuencias.

Tabla 2.4 Modelo estratigráfico unidimensional para la estación acelerográfica CUIP (superior) y CENA (inferior)

| <i>Modelo teórico CUIP</i> | | | | | |
|----------------------------|-------|---------------|------------------------------|-------|--------------------|
| N | H (m) | β (m/s) | γ (t/m ³) | ξ | Tipo suelo/roca |
| 1 | 16 | 270 | 2.6 | 0.03 | Basalto fracturado |
| 2 | 10 | 480 | 2.8 | 0.03 | Basalto |
| 3 | 6 | 350 | 1.7 | 0.03 | Arena |
| 4 | 9 | 600 | 2.8 | 0.02 | Basalto sano |
| 5 | 90 | 350 | 1.7 | 0.02 | Arena |
| 6 | 700 | 600 | 1.8 | 0.01 | F. Tarango |
| Base | -- | 1150 | 2 | 0.01 | Vulcanitas/Calizas |

| <i>Modelo teórico CENA</i> | | | | | |
|----------------------------|-------|---------------|------------------------------|-------|--------------------|
| N | H (m) | β (m/s) | γ (t/m ³) | ξ | Tipo suelo/roca |
| 1 | 40 | 500 | 2.7 | 0.03 | Basalto |
| 2 | 130 | 400 | 1.7 | 0.03 | Arena |
| 3 | 750 | 600 | 2 | 0.01 | F. Tarango |
| Base | -- | 1200 | 2 | 0.01 | Vulcanitas/Calizas |

Además, se empleó otro método para la corrección de las series de tiempo, por medio de una deconvolución de la señal con respecto al cociente espectral H/V estimado *in-situ*. Para ello se registraron sismogramas de ruido sísmico por tres días. Se colocó un sismógrafo de banda ancha

dentro de la caseta de la estación en Ciudad Universitaria y CENAPRED (Figura 2.14). Para el cálculo de los cocientes H/V se empleó el método de la media cuadrática. En la Figura 2.15 se presenta con línea azul el cociente HVNR, mientras que con línea roja se presentan el cociente HVSR promedio.

Comparando los cocientes HVNR y HVSR se observa que ambos espectros se ajustan para los máximos espectrales ubicados en 0.55 Hz y 4.5 Hz. Además se observa que sobrevalúa la respuesta entre 7.0–8.0 Hz, no así para el efecto en 0.2 Hz. En el caso de CENA se observa un resultado muy similar.

Se ha definido una métrica para conocer el ajuste de bondad de los resultados calculados con respecto a los observados. La medición de ajuste de bondad (GOF, por sus siglas en inglés) está calculada usando la función de error complementario (erfc, por sus siglas en inglés) de un de un residual normalizado (NR)

$$GOF = 100 * \text{erfc}[\text{NR}], \text{ donde } \text{NR} = \frac{2|x - y|}{x + y}$$

donde x y y son dos conjuntos de métricas escalares positivas. El resultado (distribuido entre 0 y 1) es entonces multiplicado por 100 para generar un valor GOF entre 0 y 100 (ajuste perfecto). Una clasificación de los valores GOF es útil en la cuantificación de los valores de ajuste generados en base a una inspección visual y el cociente entre las métricas x y y . La clasificación de los valores GOF calculados por este método es: 80-100 excelente ajuste, 65-80 muy buen ajuste, 45-65 ajuste justo, 35-45 ajuste pobre (Olsen y Mayhew, 2010). Los valores no incluidos en esta clasificación son malos para ser considerados.

Del análisis métrico entre ambas técnicas, se obtiene un valor GOF aproximado de 80, lo que indica una muy buena similitud de ambas. Ante esto, se concluye que con registros de microtemores obtenidos con varias horas y con el procesado adecuado, como ya se detalló en el capítulo anterior, sí es posible tener una buena estimación del factor de amplificación, de la forma espectral y de los diferentes máximos espectrales que con los obtenidos con sismos para la zona de loma.



Figura 2.14 Colocación de un sismógrafo de banda ancha en las casetas de las estaciones acelerográficas CUIP (izquierda) y CENA (derecha) para el registro de ruido ambiental

La corrección por deconvolución ($Corr_{dec}$) consiste en realizar el cociente del espectro de Fourier de una componente horizontal del sismo y el cociente espectral H/V (ecuación 2.1). Posteriormente se aplica la transformada inversa de Fourier a este producto para obtener el acelerograma corregido en el dominio del tiempo.

$$Corr_{dec} = \frac{Esp.Fourier_{xx}}{[H/V]} = \frac{Esp.Fourier_{xx}}{\sqrt{\frac{E_N + E_E}{E_z}}} \quad (2.1)$$

donde xx indica la componente NS o EW .

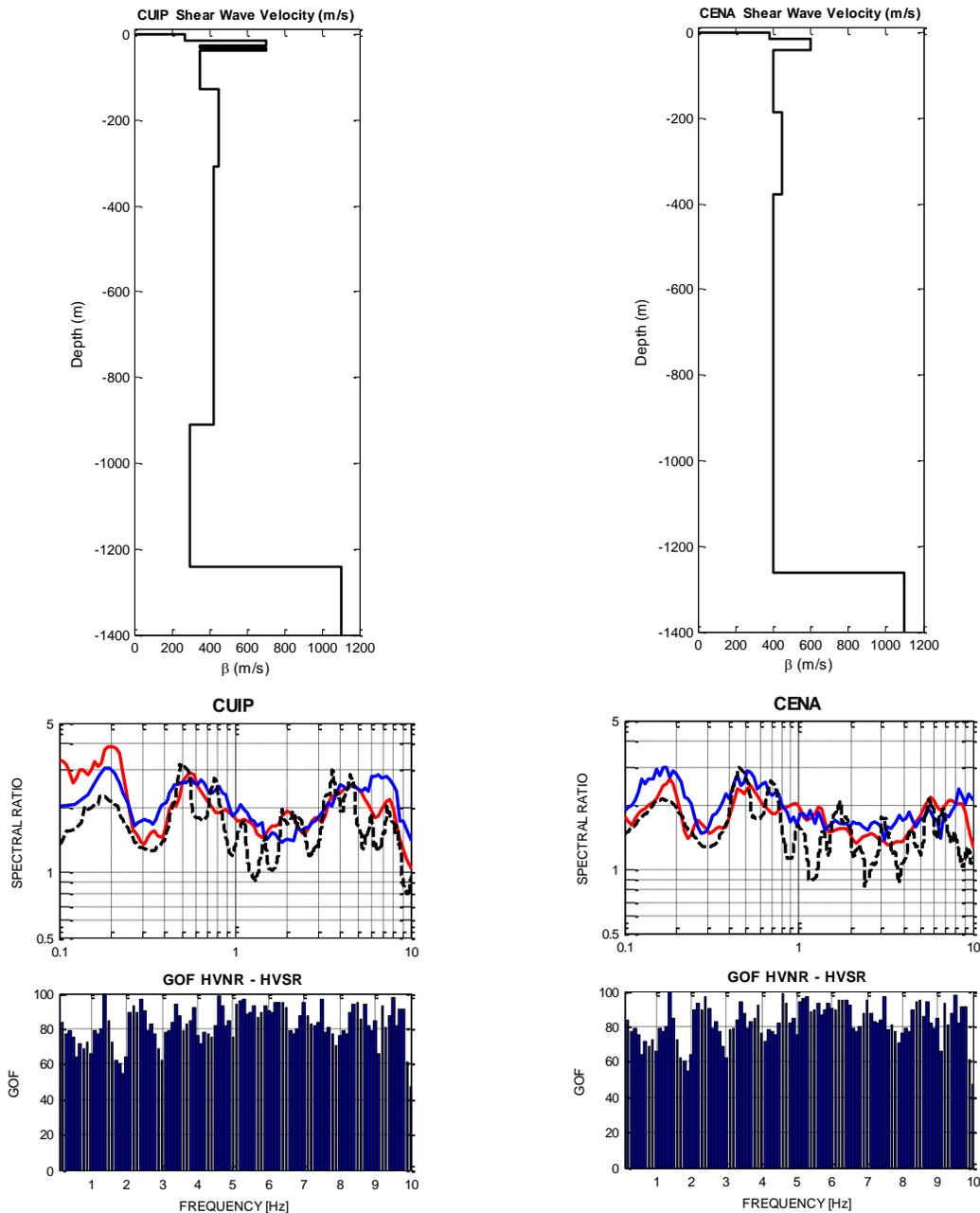


Figura 2.15 Modelo de velocidades para la estación CUIP (superior izq.) y la estación CENA (superior der.). Comparación entre FFT (línea discontinua negro), HVSR promedio (línea en rojo) y HVNR (línea en azul)

Por otro lado, si se compara la Función de Transferencia Teórica (FTT) y el cociente espectral obtenido con microtemores calculados para la estación CUIP, se observa una clara ventaja de la función empírica con respecto a la función teórica.

Para conocer la eficiencia de cada corrección, se aplicaron ambas metodologías a varios acelerogramas para la estación CUIP, ya que es la estación que se toma como referencia para la ciudad de México. Estas figuras se localizan en el Anexo D, donde se presentan los acelerogramas registrados en las estaciones ESTS, CENA y CUIP. Posteriormente se presenta el registro corregido mediante la deconvolución, indicado con la extensión “DEC” y al final con el modelo teórico, señalado con extensión ‘TEO’, ambos para CUIP.

Hay que recordar que las estaciones del norte (ESTS) presentan la menor amplificación en comparación con las del sur (CENA y CUIP). El objetivo de éste ejercicio es observar los registros originales de CENA y CUIP, así como los registros de CUIP corregidos mediante ambas metodologías y compararlos con respecto a ESTS. Hacia el lado derecho se presenta el espectro de Fourier, que indica la frecuencia predominante del sismo señalada con línea discontinua. Así mismo se ha marcado con una flecha negra las frecuencias espurias, que son provocadas por la estratigrafía de cada sitio.

En general, se observa que la corrección que ofrece mejores resultados es la técnica de deconvolución. Para el sismo del 10 de diciembre de 2011, se observa que mediante la deconvolución se obtiene una mejor corrección del registro dando valores más bajos (Tabla 2.2). Si éste resultado se compara con los valores del registro en CENA, se observa muy poca diferencia entre ambos. En el caso del sismo de 20 de marzo de 2012, con ambos métodos se obtiene una buena corrección, dando valores muy similares (Tabla 2.3). Sin embargo, por deconvolución se tienen valores más bajos, inclusive que para el registro en la estación CENA.

2.5. PROPUESTA Y VALIDACIÓN DE CENA COMO ESTACIÓN DE REFERENCIA

Para el cálculo de la respuesta sísmica en superficie en un punto dado o de interés, una manera de realizarlo es por medio de una función teórica, con la cual se afecta un registro en la base. Desgraciadamente, no en todas las ocasiones es posible tener información geotécnica ya sea un Sondeo de Penetración Estándar (SPT), un ensaye de cono, etc., para conocer los espesores de los estratos, y aún más difícil tener un perfil de velocidades de onda de cortante.

Ante estas deficiencias, surgió la necesidad de implementar un algoritmo que permita calcular el acelerograma en superficie, mediante un acelerograma registrado en un sitio de referencia y el cociente espectral medido *in situ*, sin la necesidad de obtener en primera instancia una FTT. Este procedimiento en esencia consiste en un escalamiento de amplitudes en el dominio de las frecuencias, al que posteriormente se recupera la serie en el dominio del tiempo. Esta metodología recibe el nombre de Teoría de Vibraciones Casuales. De esta manera se pueden obtener estimaciones de los valores máximos de aceleración de un sitio dado un evento sísmico hipotético determinado.

2.5.1. Cálculo de acelerogramas sintéticos utilizando a CENA como estación base y los cocientes espectrales empíricos

El cálculo se realizó generando un algoritmo que calcula la serie de tiempo en superficie (sintético) a través del escalamiento entre los cocientes espectrales H/V y la componente horizontal del sismo seleccionado que presenta la mayor aceleración o mayor energía. Para la generación de estas historias de aceleración se parte de los cocientes HVSR calculados en las estaciones de la RACM, las cuales se muestran en el Anexo E.

Como primer paso se obtiene el espectro de Fourier del sismo para realizar el producto de éste con la pseudo-función de transferencia empírica en el dominio de las frecuencias. A éste producto se aplica la transformada inversa de Fourier para obtener el acelerograma en superficie y en el dominio del tiempo. Éste desarrollo se aplica para el sismo del 10 de diciembre de 2011 de Zumpango del Rio, Gro (M_w 6.5), así como para el sismo del 20 de marzo de 2012 de Ometepec, Gro (M_w 7.4).

De cada acelerograma sintético se obtiene el espectro de respuesta en pseudoaceleración (SA) para un amortiguamiento del 5% de su valor crítico. Para el cálculo del espectro de pseudoaceleración se ha usado el método lineal de Newmark.

Ocupando las series de tiempo de CENA y CUIP como los sismos de entrada en la base del estrato, se procedió a efectuar la estimación de las series de tiempo sintéticas. En la Figura 2.16 se muestra un ejemplo de los espectros de respuesta en pseudoaceleración estimados para algunas estaciones acelerográficas de la ciudad de México. Se presenta el espectro de respuesta real con línea roja, los espectros calculados vía CUIP, CENA y CUIPmod se distinguen en línea negra, azul y línea discontinua gris, respectivamente. Cabe aclarar que el registro CUIPmod se refiere al registro corregido mediante deconvolución. Para ver el total de las simulaciones consúltese el Anexo F.

En el Anexo G se presentan los resultados obtenidos de aplicar la métrica entre los valores de los espectros de respuesta observados y los calculados empleando las series de tiempo en CENA y CUIPmod. Primeramente se presenta una comparación entre el espectro real y el calculado. En seguida se presenta el análisis de ajuste de bondad, en términos de valores GOF. Posteriormente se presenta una tabla resumen para 9 periodos entre 0.1 y 4 s (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1, 2, 3, 4 s) donde se describe el nivel de ajuste obtenido. Un ejemplo de ello se presenta en la Figura 2.17. Este ejercicio se presenta para los sismos del 10 de diciembre y 20 de marzo.

Finalmente en las Tablas 2.5 a 2.8 se presenta una estadística de la cantidad de casos obtenidos para cada categoría de ajuste y periodo, para el caso de CENA (lado izquierdo) y CUIPmod (lado derecho).

Mediante la sumatoria con valores GOF entre 45 a 100, se tiene una estimación de ajuste entre el 62 al 77% de los valores sintéticos con respecto a los reales. Es necesario mencionar que ésta métrica resulta ser rigurosa debido a la sensibilidad que presenta ante las pequeñas diferencias entre el conjunto de valores (real y estimado) para los espectros de respuesta. Además, se refuerza estadísticamente que los resultados tanto con CUIPmod y CENA son muy similares porcentualmente.

Por otro lado, en cuanto a los espectros vía CUIP (sin corregir) en general se observa una sobreevaluación aproximada de un factor de 2 veces con respecto al espectro real. Esto se explica a que la estación CUIP como hemos analizado anteriormente, tiene tres máximos espectrales en 0.18 Hz, 0.5 Hz y 7.0 -8.0 Hz, ambos con un factor de amplificación aproximado de 2 a 3 veces.

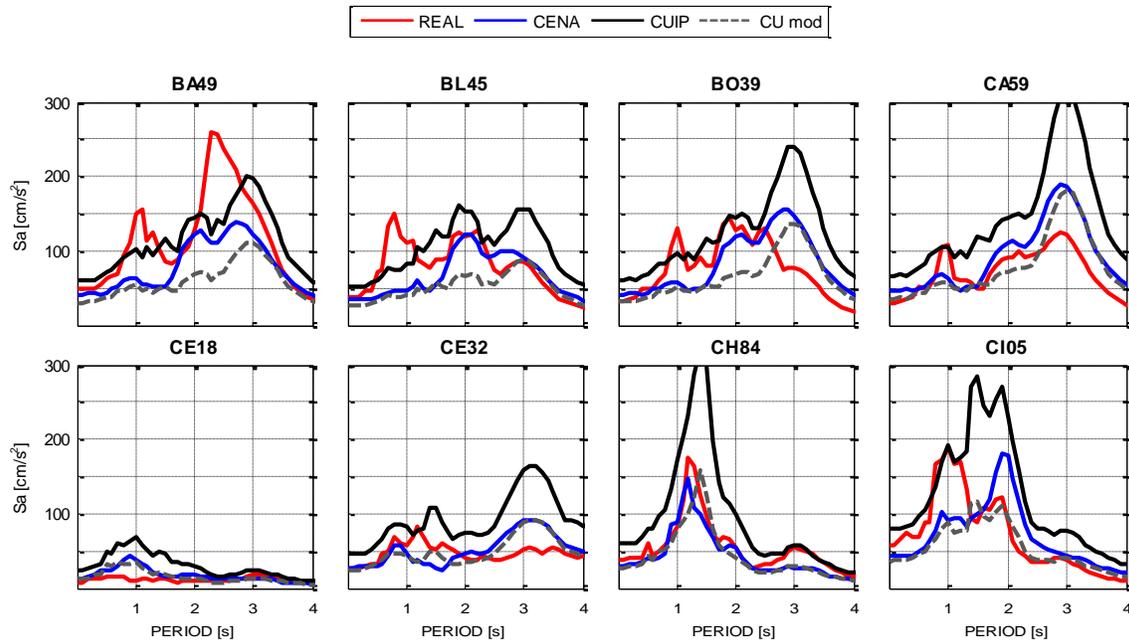


Figura 2.16 Comparación de los espectros de respuesta reales y calculados a partir de los cocientes obtenidas con la técnica HVSR convolucionados mediante los registros de las estaciones CENA y CUIP, para el sismo del 20 de marzo, 2012 (M_w 7.4). Componente Este-Oeste

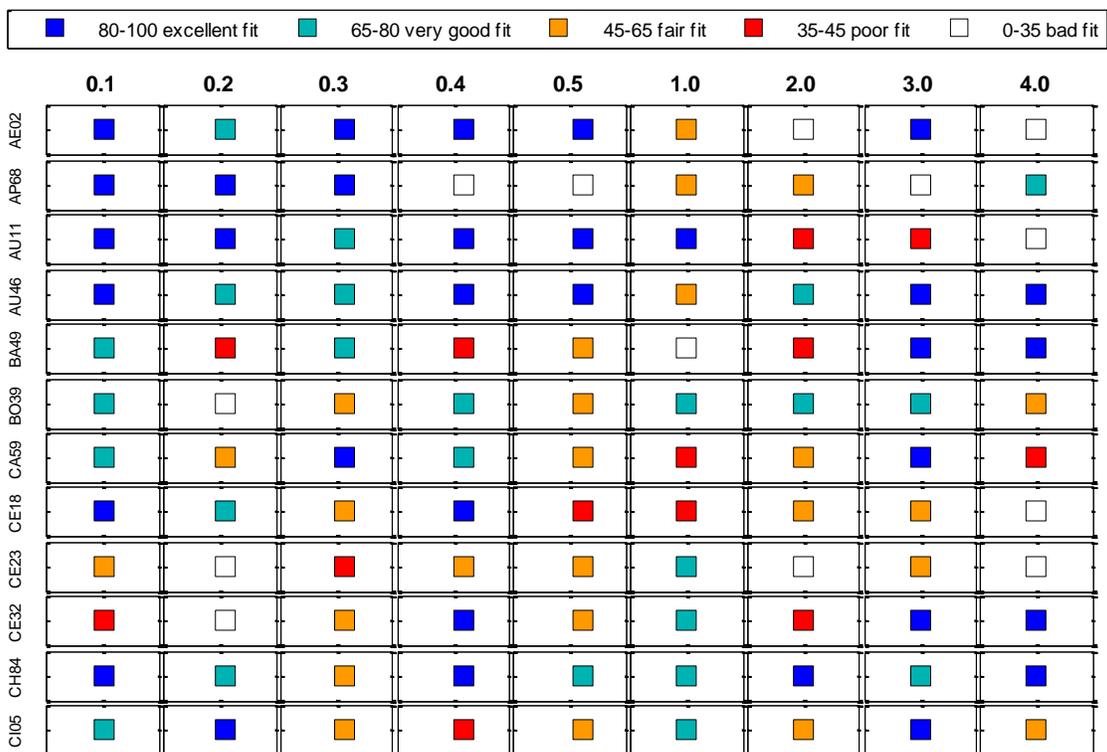


Figura 2.17 Ejemplo de la métrica usada en este estudio según Olsen y Mayhew (2010)

Tabla 2.5 Estadística de casos obtenidos para 10/Diciembre/2011 CENA / CUmod Componente EW

| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | TOTAL |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------------|
| Excellent fit | 11 / 19 | 8 / 20 | 12 / 13 | 6 / 5 | 7 / 8 | 12 / 6 | 12 / 14 | 15 / 13 | 21 / 20 | 104 / 118 |
| Very good fit | 11 / 8 | 9 / 7 | 7 / 7 | 3 / 6 | 10 / 4 | 9 / 5 | 15 / 10 | 15 / 15 | 7 / 16 | 86 / 78 |
| Fair fit | 10 / 15 | 11 / 18 | 9 / 16 | 10 / 12 | 10 / 11 | 10 / 9 | 15 / 15 | 16 / 17 | 18 / 10 | 109 / 123 |
| Poor fit | 5 / 5 | 11 / 3 | 5 / 5 | 9 / 5 | 7 / 6 | 6 / 6 | 5 / 5 | 7 / 4 | 4 / 2 | 59 / 41 |
| Bad fit | 16 / 6 | 14 / 5 | 20 / 12 | 25 / 25 | 19 / 24 | 16 / 27 | 6 / 9 | 0 / 4 | 3 / 5 | 119 / 117 |
| Porcentaje total: | | | | | | | | | | 62.7% / 66.9% |

Tabla 2.6 Estadística de casos obtenidos para 10/Diciembre/2011 CENA / CUmod Componente NS

| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | TOTAL |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------------|
| Excellent fit | 22 / 28 | 13 / 15 | 17 / 19 | 12 / 8 | 12 / 4 | 14 / 5 | 8 / 13 | 19 / 22 | 22 / 22 | 139 / 136 |
| Very good fit | 15 / 11 | 14 / 10 | 13 / 15 | 10 / 5 | 11 / 9 | 9 / 5 | 8 / 10 | 9 / 9 | 10 / 11 | 99 / 85 |
| Fair fit | 7 / 7 | 14 / 12 | 13 / 9 | 13 / 9 | 15 / 19 | 12 / 11 | 20 / 16 | 13 / 14 | 9 / 10 | 116 / 107 |
| Poor fit | 6 / 6 | 5 / 8 | 4 / 4 | 7 / 7 | 4 / 8 | 6 / 3 | 7 / 6 | 6 / 2 | 3 / 3 | 48 / 47 |
| Bad fit | 3 / 1 | 7 / 8 | 6 / 6 | 11 / 24 | 11 / 13 | 12 / 29 | 10 / 8 | 6 / 6 | 9 / 7 | 75 / 102 |
| Porcentaje total: | | | | | | | | | | 74.2% / 68.7% |

Tabla 2.7 Estadística de casos obtenidos para 20/Marzo/2012 CENA / Cumod Componente EW

| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | TOTAL |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------------|
| Excellent fit | 21 / 23 | 20 / 25 | 21 / 18 | 19 / 16 | 15 / 21 | 15 / 16 | 17 / 19 | 19 / 17 | 10 / 18 | 157 / 173 |
| Very good fit | 17 / 11 | 18 / 6 | 12 / 12 | 11 / 11 | 11 / 11 | 9 / 9 | 9 / 12 | 7 / 10 | 10 / 11 | 104 / 93 |
| Fair fit | 8 / 12 | 10 / 14 | 12 / 11 | 12 / 12 | 14 / 8 | 13 / 11 | 13 / 8 | 15 / 14 | 15 / 12 | 112 / 102 |
| Poor fit | 3 / 1 | 1 / 2 | 3 / 2 | 6 / 5 | 6 / 6 | 3 / 4 | 8 / 6 | 7 / 6 | 9 / 8 | 46 / 40 |
| Bad fit | 5 / 7 | 5 / 7 | 6 / 11 | 6 / 10 | 8 / 8 | 14 / 14 | 7 / 9 | 6 / 7 | 10 / 5 | 67 / 78 |
| Porcentaje total: | | | | | | | | | | 76.8% / 75.7% |

Tabla 2.8 Estadística de casos obtenidos para 20/Marzo/2012 CENA / CUMod Componente NS

| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | TOTAL |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------------|
| Excellent fit | 15 / 22 | 19 / 21 | 12 / 17 | 17 / 20 | 12 / 18 | 15 / 12 | 17 / 15 | 16 / 8 | 12 / 15 | 135 / 148 |
| Very good fit | 17 / 12 | 13 / 12 | 18 / 13 | 12 / 11 | 11 / 12 | 11 / 8 | 11 / 11 | 12 / 10 | 9 / 2 | 114 / 91 |
| Fair fit | 11 / 13 | 13 / 14 | 11 / 12 | 15 / 17 | 21 / 16 | 13 / 15 | 15 / 15 | 10 / 15 | 13 / 9 | 122 / 126 |
| Poor fit | 5 / 1 | 4 / 1 | 9 / 5 | 4 / 0 | 1 / 3 | 5 / 7 | 5 / 5 | 2 / 5 | 6 / 5 | 41 / 32 |
| Bad fit | 6 / 6 | 5 / 6 | 4 / 7 | 6 / 6 | 9 / 5 | 10 / 12 | 6 / 8 | 14 / 16 | 14 / 23 | 74 / 89 |
| Porcentaje total: | | | | | | | | | | 76.3% / 75.1% |

CAPÍTULO 3

CASOS DE APLICACIÓN: ESCENARIOS SÍSMICOS PARA LA CIUDAD DE MÉXICO

Un escenario sísmico es un mapa de parámetros de movimiento del terreno (SA). Consiste en la distribución espacial de aceleraciones espectrales esperadas para un determinado periodo estructural desde un punto de vista determinista.

En el capítulo anterior, se mencionó que a partir de los cocientes espectrales y teniendo el sismo de entrada en roca o en el sitio de referencia y por medio de la Teoría de Vibraciones Casuales, se puede caracterizar el movimiento del suelo para un sitio específico. A partir de las series de tiempo sintéticas, se calcula el espectro de respuesta en pseudoaceleración con un amortiguamiento del 5% de su valor crítico. Finalmente, a partir de los datos obtenidos de los espectros, para un periodo estructural determinado, se genera la distribución de aceleraciones espectrales en base a métodos geostatísticos como es el Kriging ordinario.

Los mapas que se presentan indican con diferentes colores los distintos niveles de intensidad sísmica estimada, en este estudio para la ciudad de México. Las intensidades que se reportan son aceleraciones, por lo que sus unidades son *gal* (abreviatura de galileo; $1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/s}^2$).

Como se ha señalado, estos mapas presentan intensidades sísmicas, es decir, medidas locales de la severidad del movimiento que se experimentaría en el suelo o en la azotea de edificios de diferentes alturas. Cuanto mayores sean las intensidades, mayores las fuerzas que el sismo impondrá a los edificios. Sin embargo, el daño que sufra un edificio depende tanto de la severidad del movimiento como de la resistencia del propio edificio. Dos edificios de la misma altura sometidos al mismo movimiento del suelo podrán tener daños diferentes dependiendo de su diseño y la calidad de su construcción. Además, existen otras características del sismo que hacen que ciertos edificios puedan ser afectados en mayor o menor medida. Por estas razones, los mapas presentados no son mapas de daño esperado.

En la Figura 3.1 se presenta en cuadros rojos la ubicación de las 72 estaciones que conforman la Red Acelerográfica de la ciudad de México (RACM). Si se observa su distribución, se podrá dar cuenta que las estaciones se concentran en la zona centro y norte de la ciudad. Para resolver la deficiencia de información en zonas faltantes, se tomaron mediciones hacia la zona norponiente de la ciudad, el paleovalle Culhuacán, hacia la zona sur-poniente, en los alrededores del Peñón de los Baños y del Marqués, respectivamente. Inclusive se tomaron algunas mediciones en la zona de Ecatepec, estado de México. Con esta información se tiene un mejor conocimiento de las propiedades del suelo, además de una mayor certeza en los límites entre las zonas de loma, transición y lago.

Se recaudaron un número total de 140 cocientes que cubren una buena parte de la ciudad, de éstos 68 corresponden a mediciones realizadas con vibración ambiental, siguiendo la metodología

propuesta tanto en la adquisición y procesado de los datos citados en este trabajo. La localización de todos los cocientes se presenta en la Figura 3.1. En la imagen se indica en círculos en color azul los sitios en los cuales se han tomado registros de ruido ambiental. El límite político del Distrito Federal se muestra con línea en rojo.

Se han formado familias espectrales clasificando a los cocientes H/V de acuerdo a su forma espectral. Este método sólo considera los rasgos predominantes de las formas espectrales, con el fin de clasificar e identificar las microzonas existentes. En consecuencia, se puede decir que la forma espectral de las familias obtenidas, describen el comportamiento dinámico según el tipo de terreno al que corresponde en términos de los periodos de vibración, por lo que es posible realizar una clasificación de acuerdo a las propiedades dinámicas del terreno, presentando ciertas ventajas, puesto que uno de los parámetros del diseño sísmico de las construcciones es precisamente el periodo fundamental de la construcción.

De acuerdo con lo anterior, se clasificaron los cocientes en 3 familias:

Familia 1 (Zona de loma). Se observa un comportamiento constante casi horizontal en el intervalo de 1 a 10 Hz en las funciones de transferencia empírica (Figura 3.2). Se considera que esta zona está libre de efecto de sitio.

Familia 2 (Zona de transición). La respuesta de esta zona está comprendida en el intervalo de 1.0 a 2.0 Hz (o entre 0.5 a 1.0 segundos) en las funciones de transferencia empíricas (Figura 3.2). Se observa que las amplificaciones relativas de esta zona abundan alrededor de las 10 veces, pero sin rebasar las 20 veces.

Familia 3 (Zona de lago). En esta zona se observa una gran dispersión de los cocientes espectrales en el intervalo de 0.2 a 1.0 Hz (o bien de 1.0 a 5 segundos). Es de llamar la atención que las amplificaciones relativas abundan alrededor de las 20 veces, llegando a darse sitios en los cuales la onda sísmica se amplifica hasta casi 40 veces, como en la estación AU11 (estación Autódromo).

Por otro lado, los estudios de amenaza sísmica incluyen una descripción de las fuentes sísmogenéticas que pueden afectar de manera considerable a una determinada región. En el caso de la ciudad de México, Rosenblueth *et al.*, (1987) identificó éstas clasificándolas en cuatro zonas sísmicas diferentes, de cuya descripción en dicho trabajo se presenta una síntesis a continuación.

- La zona de *subducción* de la placa de Cocos. Los terremotos generados en ella son los que han tenido las más severas consecuencias para la Cuenca de México (CM). La magnitud máxima registrada desde 1800 ha sido $M_w 8.4$, correspondiente al temblor de Jalisco de 1932. Los sismos que se originan frente a las costas de Guerrero y Michoacán han tenido sistemáticamente magnitudes menores a la citada. Un análisis de las zonas que son susceptibles de romperse en un solo gran evento indica que el temblor más violento que es razonable esperar que se presente en la brecha de Guerrero, al W de Acapulco, tendrá una magnitud de momento $M_w 8.2$ y una distancia epicentral en promedio de 250 km a la Cuenca de México.

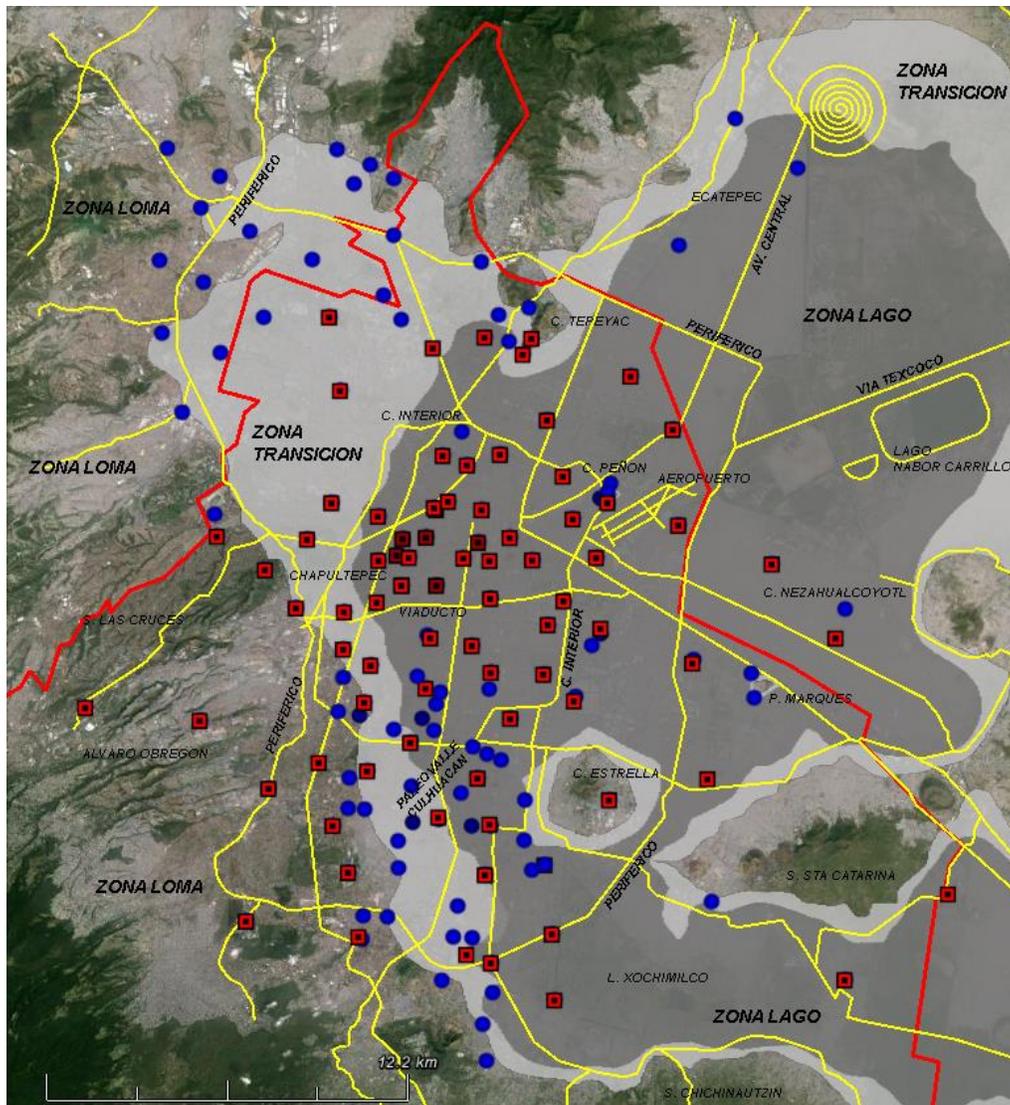


Figura 3.1 Localización de los cocientes espectrales, los cuales servirán para el cálculo de historias sísmicas según el sismo a estudiar

- La parte de la placa Norteamericana nombrada *Acambay*, llamada así en referencia al sismo ocurrido en 1912, de $M_w 7.0$ (Urbina y Camacho, 1913). Las fallas que producen estos sismos obedecen principalmente a dos fenómenos: el desplazamiento de esta placa con respecto a las oceánicas y la flexión inducida por la fricción de las placas oceánicas cuando llegan a gran profundidad. Los eventos que mayormente pueden afectar a la CM se producen en las intersecciones de las fallas principales o cerca del extremo de fallas cuya longitud ha estado creciendo. El candidato más peligroso (pues es, de hecho, el lugar donde se originó el sismo de 1912 sin producir sismos significativos desde entonces) es la terminación oriental de las dos fallas que definen el graben de Acambay, estructura geológica que se encuentra a 80 km de la CM.

- La zona llamada *Normal*, la cual abarca la parte interior de la placa de Cocos. Las magnitudes observadas decrecen con la distancia a la zona de subducción. Esto es porque la

tensión inducida en la placa por el arrastre crece junto con la cercanía a la zona de subducción. El temblor más desfavorable tendría M_w 6.5 y una distancia epicentral de 80 km.

- La zona denominada *Local* comprende la propia ciudad de México (CM) y en ella se producen temblores debido a la existencia de sistemas de fallas en la provincia geológica conocida como Cinturón Volcánico Mexicano. Los principales sistemas de fallas que cruzan la CM son esencialmente en tres direcciones: NE, SE y E. Aun cuando el mayor sismo reportado sea de M_c 3.7 (Rodríguez *et al.*, 1984). Sin embargo, Chavacán-Ávila (2007) propone definir como el de mayor amenaza un sismo de magnitud M_L 4.7 y distancia epicentral de 11 km a la CM.

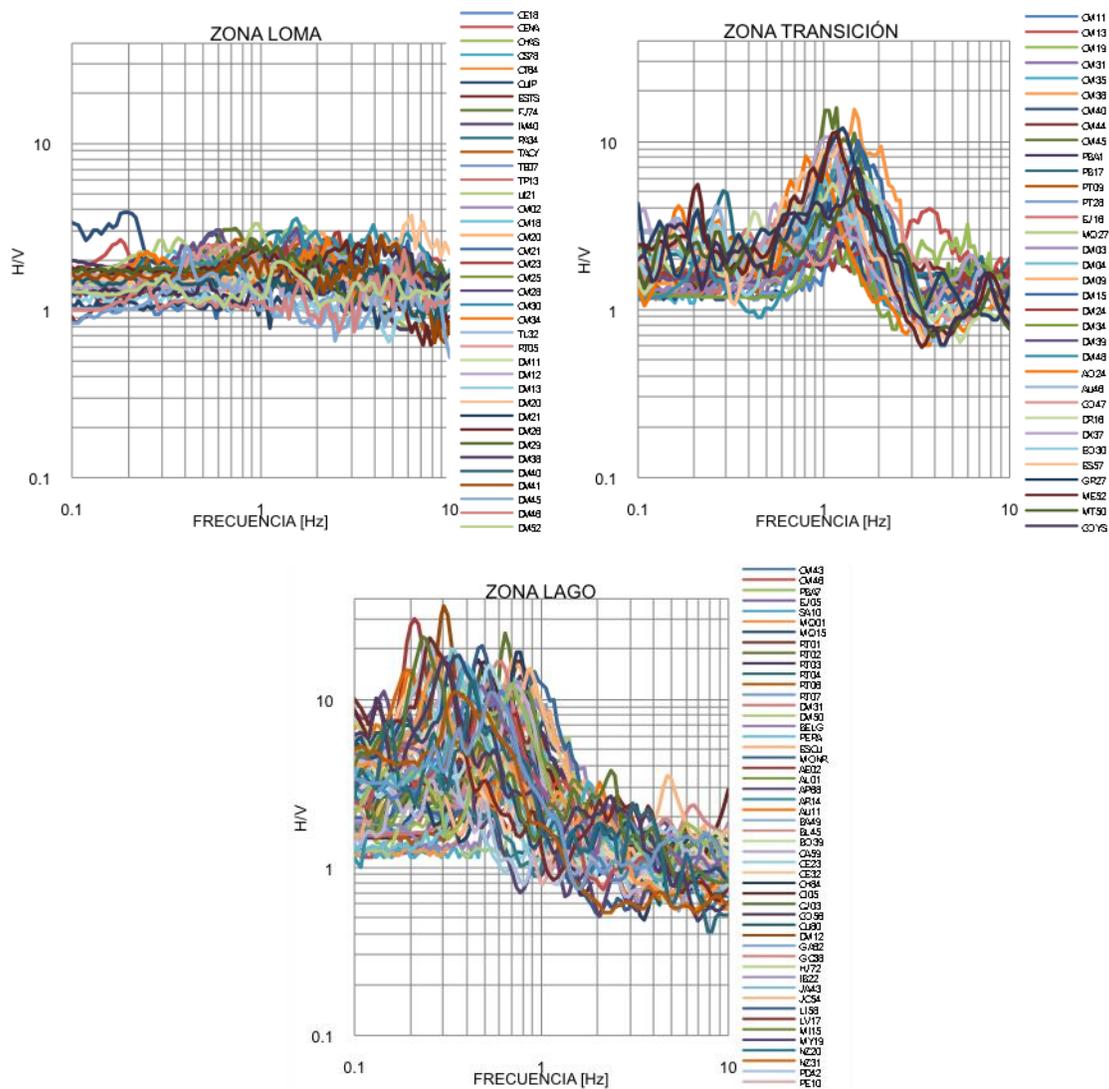


Figura 3.2 Familias espectrales para la zona urbana de la ciudad de México. Criterio que define las microzonas sísmicas a partir de su forma espectral y del rango de frecuencias del efecto de sitio

Si bien ya es sabido que la zona sismogénica *Local* no genera sismos de tamaño significativo, debemos recordar que así como el peligro está asociado a la magnitud (o al momento, o a otra medida del tamaño) del sismo, el riesgo está más bien asociado a la intensidad, esto es, a los efectos que un sismo produce en un lugar determinado, en general distinto al de su origen. Es por ello que aunque los sismos de mayor magnitud no ocurran en la zona sísmica Local, los eventos locales podrían llegar a generar intensidades dañinas, sobre todo en lugares cercanos al epicentro.

También se debe notar que el efecto de sitio observado al producirse un sismo regional es diferente al observado por un evento local, puesto que son diferentes sus contenidos de frecuencias. Esto significa que las construcciones serán afectadas de manera muy diversa por causa de uno u otro sismo.

Un estudio de amenaza sísmica en la actualidad debe contener en esencia un carácter cuantitativo, dejando de lado lo cualitativo. Para la recreación de los escenarios sísmicos para la ciudad de México, se han postulado tres fuentes sismogénicas las cuales son: subducción, interplaca y falla local. Para cada fuente se ha seleccionado el registro sísmico de mayor magnitud que se haya registrado en la estación CUIP, por lo que estos sismos podrían proponerse como sismos de diseño para la construcción de los espectros de sitio. La localización del epicentro de los eventos sísmicos utilizados para la generación de los escenarios se presenta en la Figura 3.3 y la localización del Distrito Federal dentro del polígono marcado con color azul claro.

En los siguientes apartados se presenta los mapas de distribución de aceleraciones espectrales estimados para los sismos seleccionados. Dado que carecemos de información en gran parte del lago de Texcoco, hemos puesto una frontera a nuestros resultados, siendo éste el polígono del Distrito Federal. Dicho polígono se marca con línea discontinua en color negro en los mapas generados por el IdeI, UNAM, esto con objeto de centrar nuestra atención en las mismas zonas y así realizar las respectivas comparaciones.

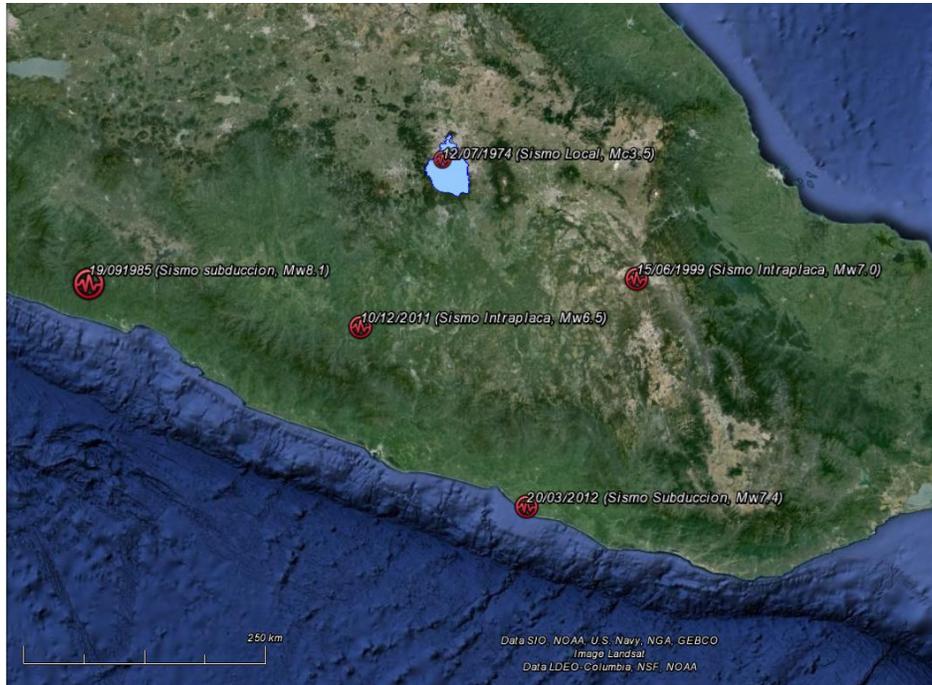


Figura 3.3 Ubicación de los eventos sísmicos usados para la generación de los escenarios de riesgo sísmico

3.1. SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985 (M_w8.1) (TIPO: SUBDUCCIÓN)

En esta sección se presenta un escenario sísmico hipotético para la ciudad de México. Se ha propuesto el sismo del 19 de septiembre de 1985 (M_w8.1) por ser el que más daños estructurales ha dejado tras su ocurrencia. Para la generación de estos mapas, se han usado los cocientes espectrales promedio con sismo de las 72 estaciones acelerográficas de la ciudad de México (Anexo A) para las condiciones dinámicas del suelo propias de 1990, y para las condiciones actuales del suelo. Se conoce que hay partes de la ciudad que se hunden 40 cm/año, lo cual debe tener repercusiones en la respuesta sísmica en los últimos 22 años. Por otro lado, la única estación en roca que registró este evento fue CUIP. Por lo anteriormente analizado, este registro se ha corregido mediante deconvolución, para eliminar los efectos de sitio, que han sido comentados anteriormente.

Se consideró como hipótesis que las condiciones dinámicas del suelo hacia el año 1985 eran similares a las que se tenía entre los años 1989 a 1993. Dado que para 1985 solo se tenían 7 estaciones en operación dentro de la ciudad, no es posible hacer una comparación completa de todos los sitios entre los espectros de respuesta en aceleración reales y calculados. Sin embargo, una de las estaciones en registrar este evento fue SCT. En la Figura 3.4 se presenta una comparación entre el acelerograma registrado en SCT para la componente este-oeste y el registro calculado por medio del método citado.

Además se presenta del lado derecho el espectro de respuesta en pseudoaceleración real y calculada. Se observa que empleando la Teoría de Vibraciones Casuales se puede estimar de manera satisfactoria historias sísmicas para un sismo de interés, del cual se deriva el cálculo de espectros de respuesta.

En las Figuras 3.5 y 3.6 se presentan los espectros de respuesta en pseudoaceleración calculados a partir de los cocientes HVSR promedio para 1990 y las condiciones actuales. Se observa que las aceleraciones esperadas para fechas recientes serán ligeramente mayores en las zonas de transición y lago.

En la Figura 3.7 se muestra la distribución de aceleraciones esperadas para un periodo estructural de $T=2.0$ (seg). En el lado izquierdo se presenta el escenario para el año de 1990, en el lado derecho el escenario para una ocurrencia próxima.

En estas imágenes para un periodo de $T=2.0$ (seg), se observan dos aspectos interesantes. El primero de ellos es un aumento considerable de las aceleraciones para las condiciones actuales del terreno, sobre todo hacia el poniente de la ciudad, como en la colonia Juárez y la zona Rosa. Por otro lado, la zona potencial de daños se ha movido hacia el nororiente de la ciudad, por lo que la zona de Tlatelolco ya no presentaría el mayor daño. En tanto que la porción nororiente del Circuito Interior se vería seriamente afectada. En la imagen del lado izquierdo se presentan dos regiones delimitadas dentro de polígonos en rojo. En línea punteada se presentan las zonas donde ocurrieron daños en estructuras. El polígono en línea continua delimita las zonas con los daños más graves ocurridos tras la ocurrencia del sismo de M8.1. Debe destacarse que la zona con mayor aceleración propuesta en el escenario sísmico concuerda con las zonas de mayor daño. De lo anterior, bajo la hipótesis de vincular las zonas de mayor aceleración con la ocurrencia de daños, éstas nuevas zonas estarían comprendidas al nororiente de la ciudad y en colonias como Roma, Juárez y Zona Rosa. Sin embargo, como se mencionó al inicio de este capítulo, depende de varios factores para que las edificaciones puedan presentar daños estructurales.

En la Figura 3.8 se presenta el escenario de riesgo sísmico para cuatro periodos estructurales obtenido empleando todos los cocientes espectrales para las condiciones actuales del suelo. La Figura 3.9 es una imagen tomada del escenario sísmico en cuestión generado por el Instituto de Ingeniería, UNAM. Éste se puede consultar en la dirección electrónica: <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/websaps/eventoshistoricos.aspx>

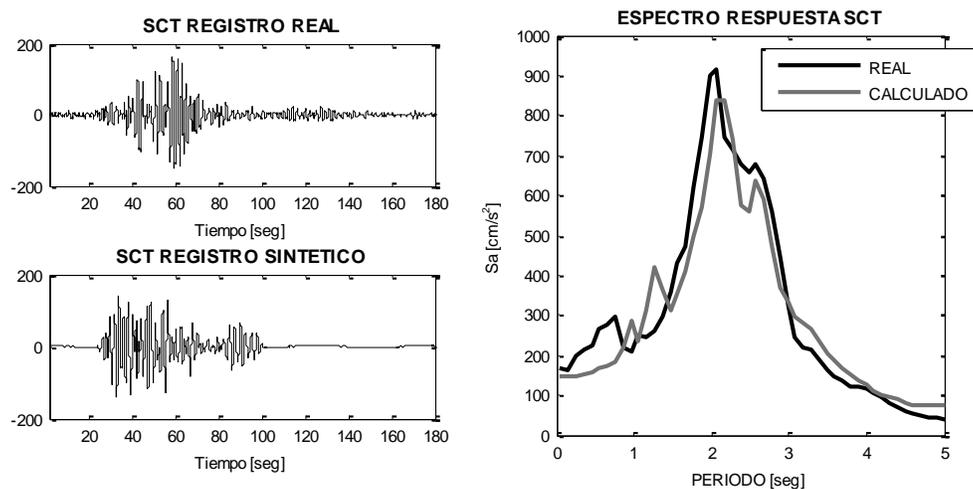


Figura 3.4 Comparación de espectros de respuesta real y calculado para el sismo del 19 de septiembre de 1985 en SCT

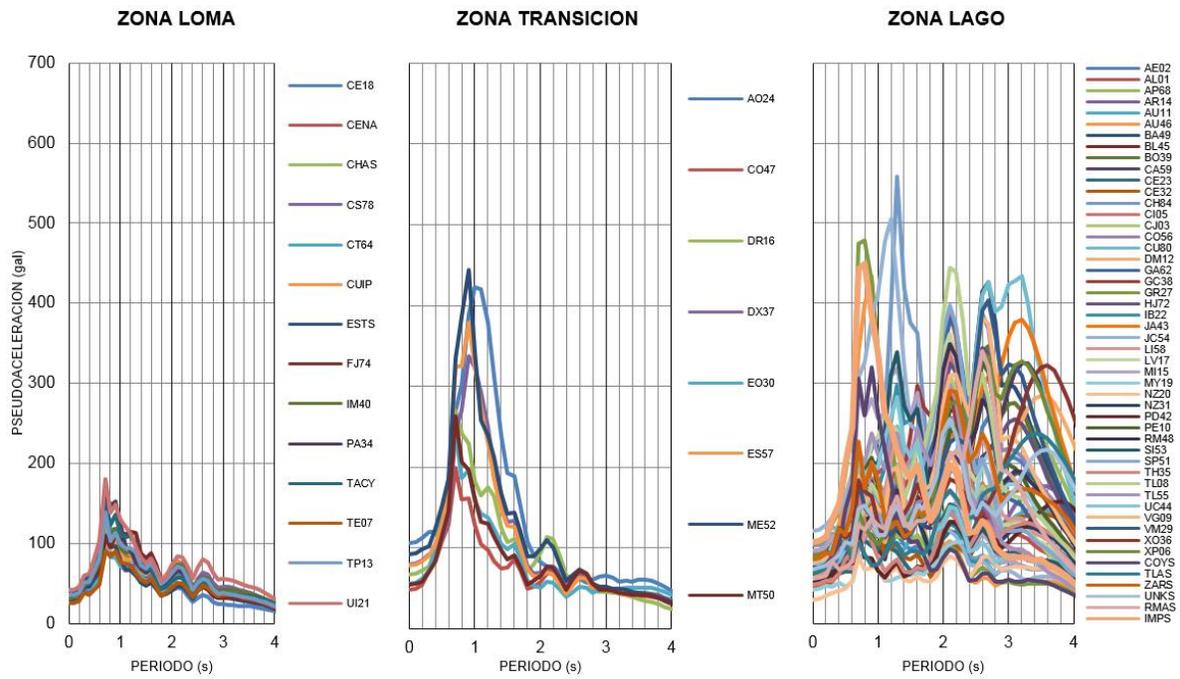


Figura 3.5 Espectros de respuesta en pseudoaceleración calculados con las pseudo-Funciones de Transferencia Empíricas (1990) para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 19 de septiembre de 1985 ($M_w 8.1$)

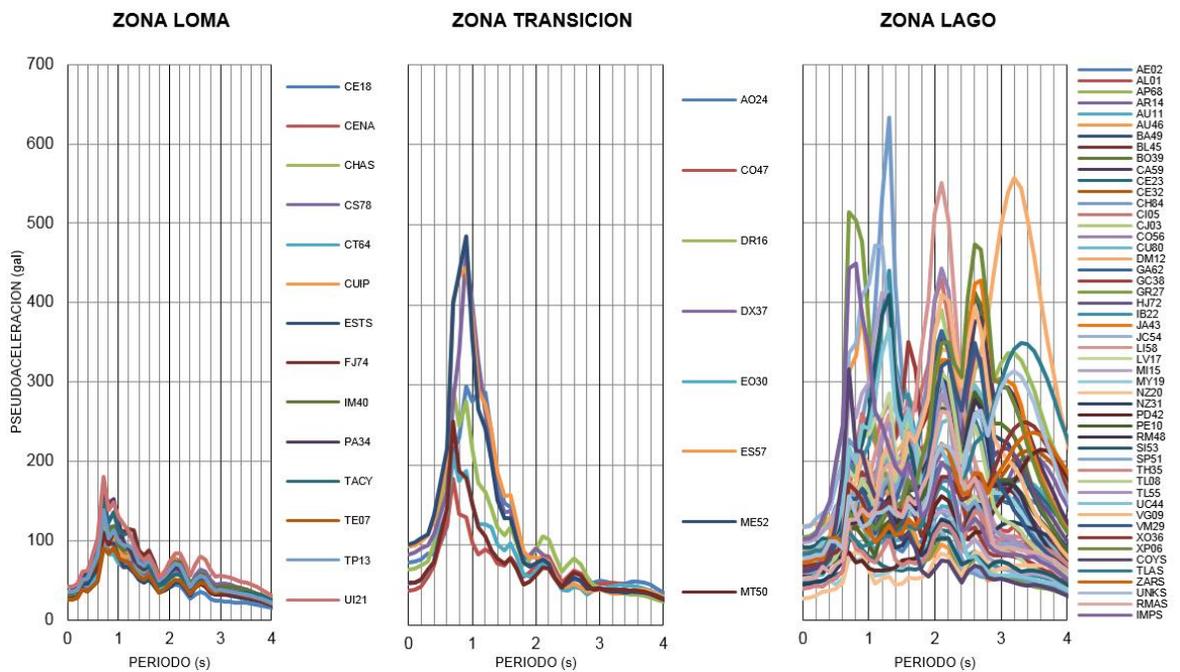


Figura 3.6 Espectros de respuesta en pseudoaceleración calculados con las pseudo-Funciones de Transferencia Empíricas (2012) para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 19 de septiembre de 1985 ($M_w 8.1$)

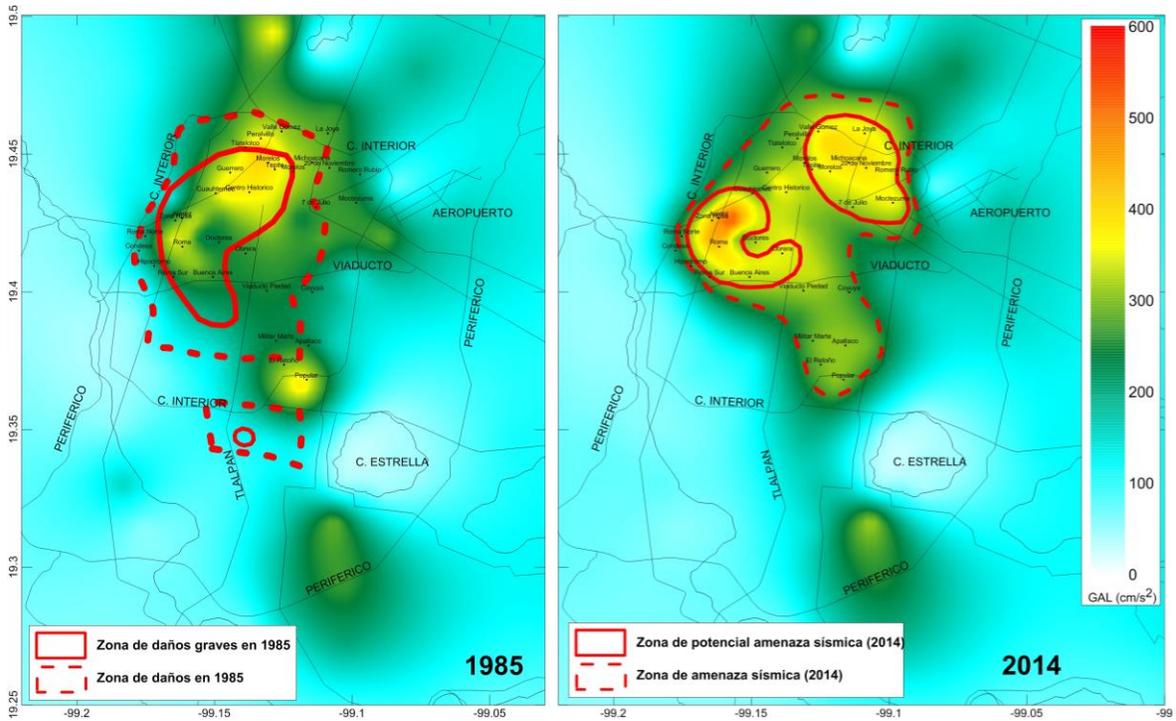


Figura 3.7 Escenario sísmico para un periodo estructural de 2.0s. (edificios de 16-20 pisos), estimado excitando el terreno con el sismo del 19 de septiembre de 1985 en dos fechas diferentes: 1990 (izquierda) y 2013 (derecha), ambos obedeciendo la misma escala (cm/s²)

Sobre cada uno de los mapas se han señalado con línea discontinua las zonas de la ciudad que presentan las mayores aceleraciones. Lo anterior se ha hecho para todos los escenarios propuestos en este capítulo. Si se compara uno a uno los correspondientes mapas de distribución de aceleración propuestos en este trabajo y por parte del IdeI UNAM, se observa una similitud de las formas en ambos trabajos. Sin embargo, las aceleraciones calculadas en este trabajo resultan ser menores a las obtenidas por el centro de investigación.

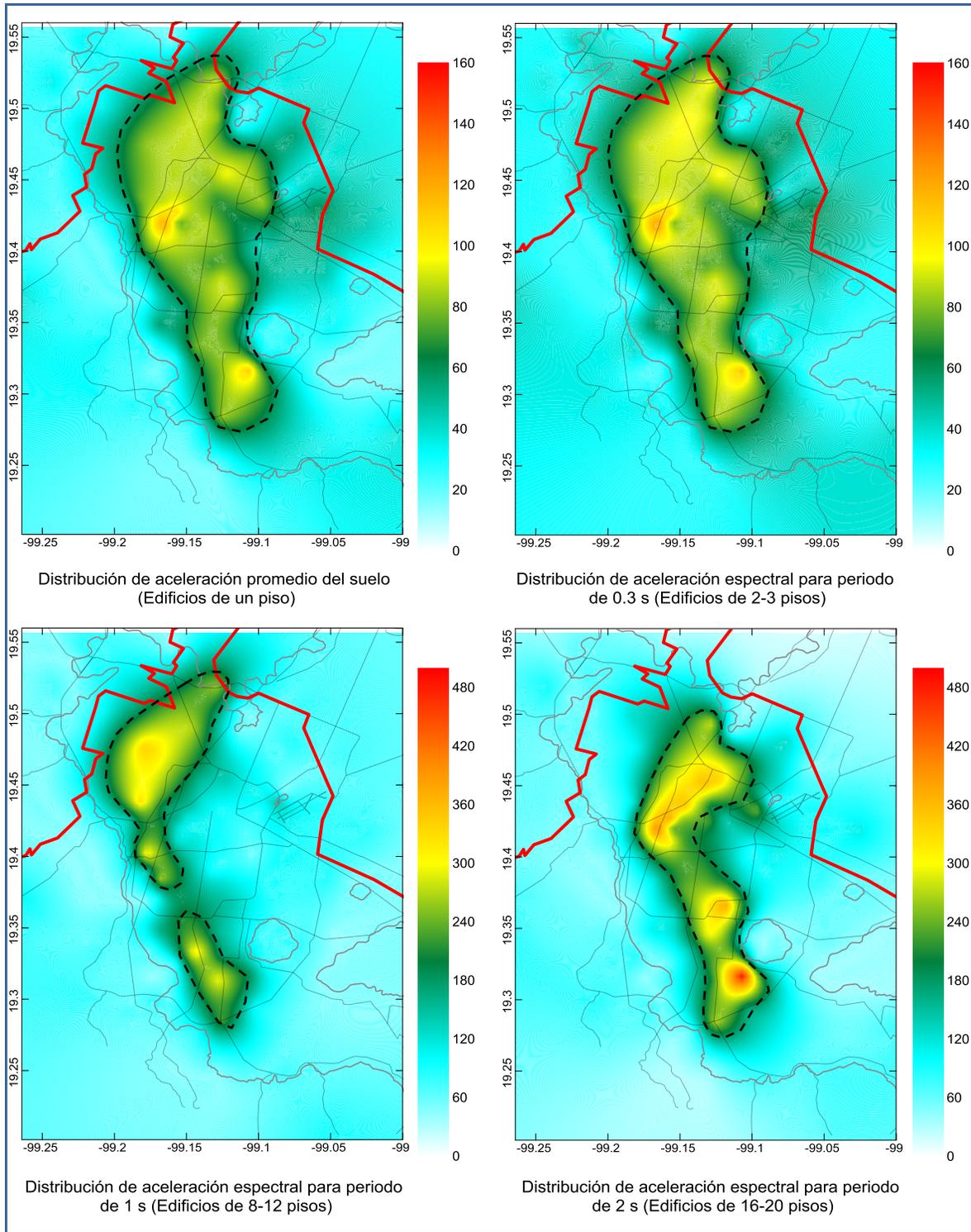


Figura 3.8 Mapa de intensidades sísmicas propuesto para diferentes periodos estructurales para el sismo del 19 de septiembre de 1985, $M_w 8.1$ tipo subducción. Escala en cm/s^2

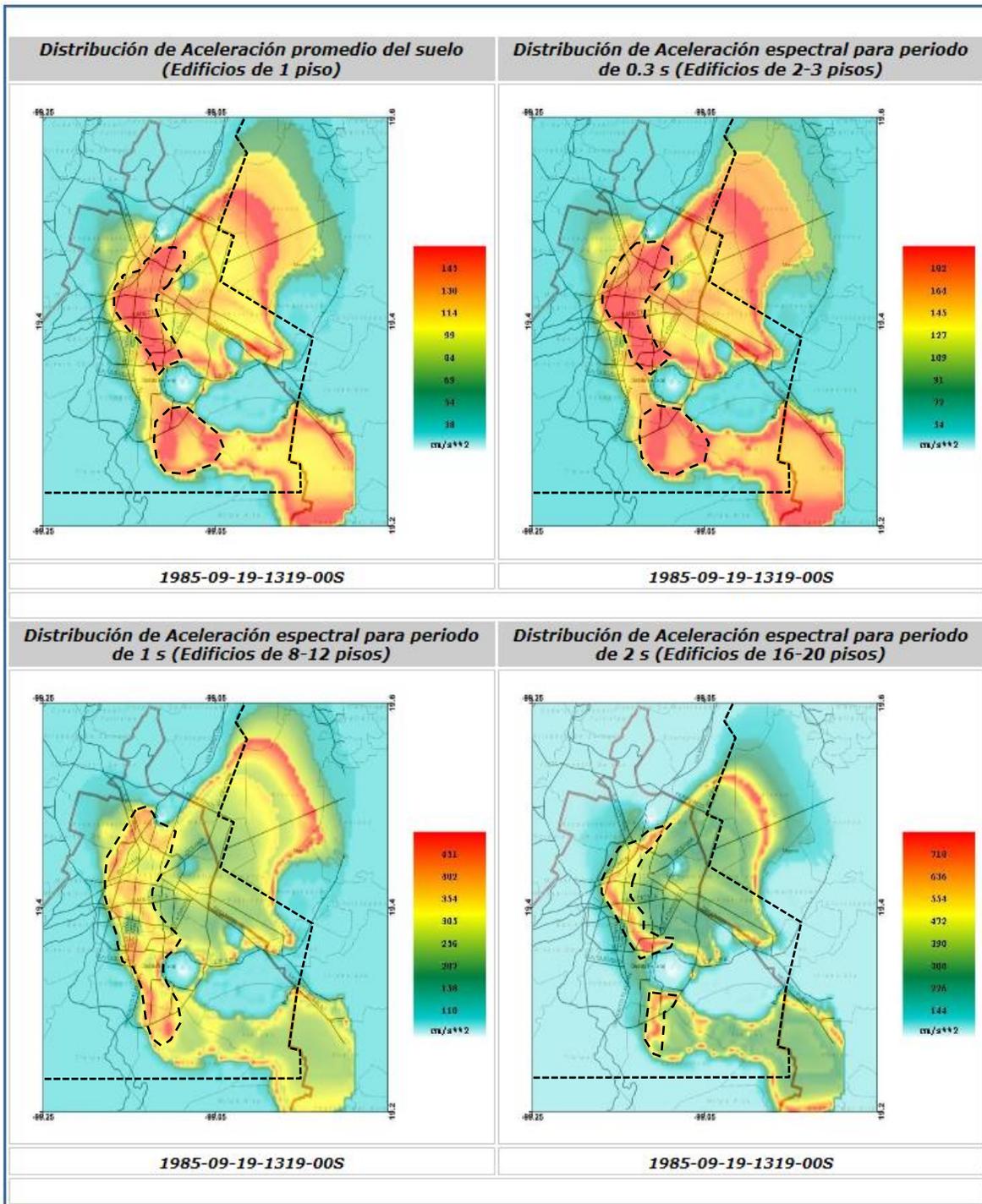


Figura 3.9 Mapa de intensidades sísmicas para diferentes periodos estructurales para el sismo del 19 de septiembre de 1985, $M_w 8.1$ tipo subducción (Fuente: Idel, UNAM)

3.2. SISMO DEL 12 DE JULIO DE 1974 ($M_c 3.5$) (TIPO: LOCAL)

En esta sección se presenta un escenario sísmico hipotético para la ciudad de México. Se ha propuesto el sismo del 12 de julio de 1974 ($M_c 3.5$), de tipo local, generado por el sistema de fallas dirección este-oeste que atraviesan la zona sur de la ciudad.

En la Figura 3.10 se presenta los espectros de respuesta en pseudoaceleración promedio calculados a partir de los cocientes espectrales promedio para las condiciones actuales del suelo. Se observa que este tipo de sismo genera las mayores aceleraciones (~ 130 gales) en la zona de loma en un periodo $T=0.1$ seg. La zona de loma resultaría ser la que sufra más afectaciones tras la ocurrencia de un sismo local.

Recordemos que en esta parte de la ciudad se tiene un importante número de viviendas edificadas con métodos autoconstructivos, lo que conllevaría a que no se cumplieran los criterios mínimos de diseño. En la Figura 3.11 se presenta el mapa de intensidades sísmicas propuesto para diferentes periodos estructurales para éste tipo de sismo.

En la Figura 3.12 se presenta la distribución de aceleraciones sísmicas para el periodo $T=0.1$ (seg). En esta figura se observa que las mayores aceleraciones estimadas se presentan en la zona de loma están entre 60-90 gales. En zona de lago y transición para valores de $T>1.0$ (seg) se esperan aceleraciones menores a 30 gales.

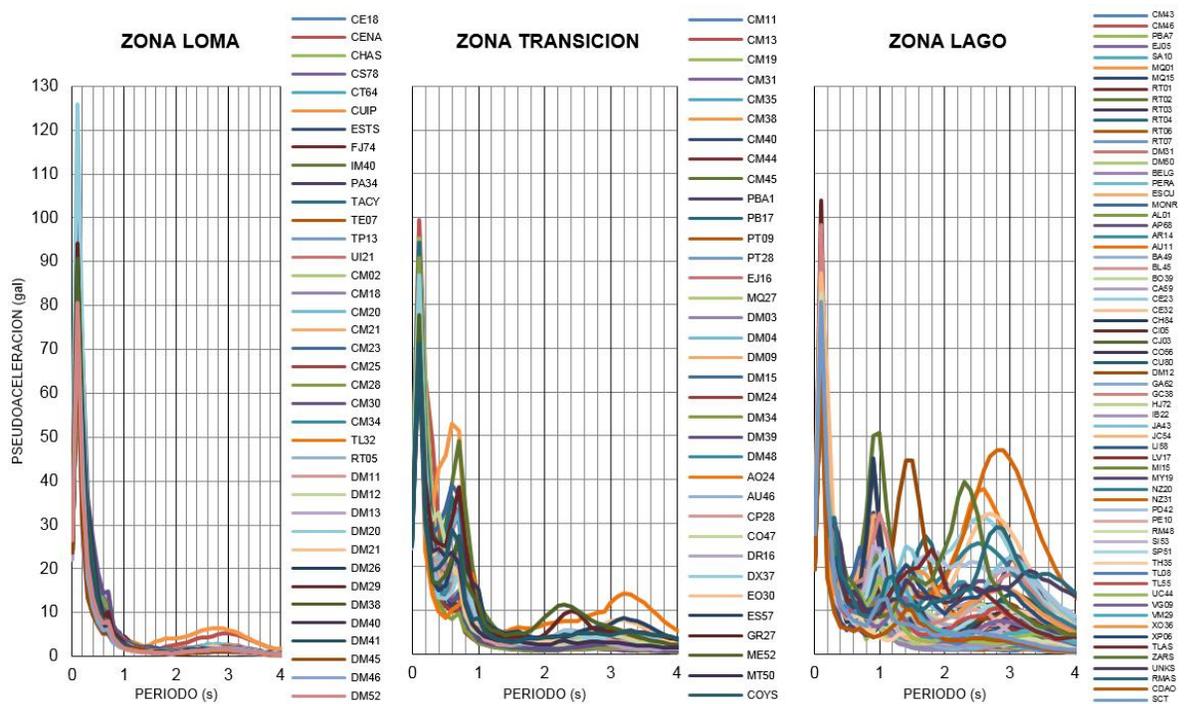


Figura 3.10 Espectros de respuesta en pseudoaceleración calculados con las pseudo-Funciones de Transferencia Empíricas (2012) para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 12 de julio de 1974 ($M_c 3.5$)

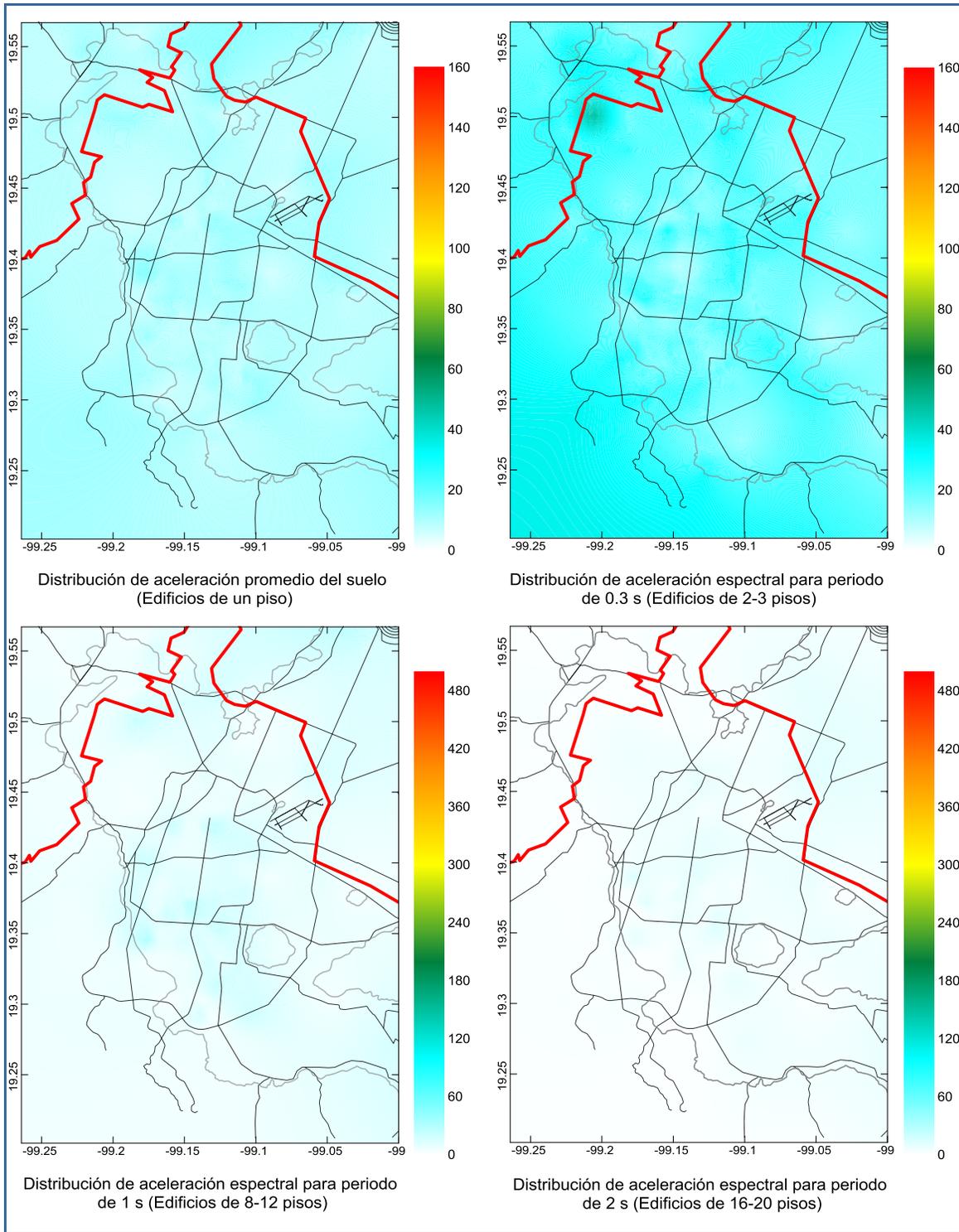


Figura 3.11 Mapa de intensidades sísmicas propuesto para diferentes periodos estructurales para el sismo del 12 de julio de 1974, $M_c 3.5$ tipo local. Escala en cm/s^2

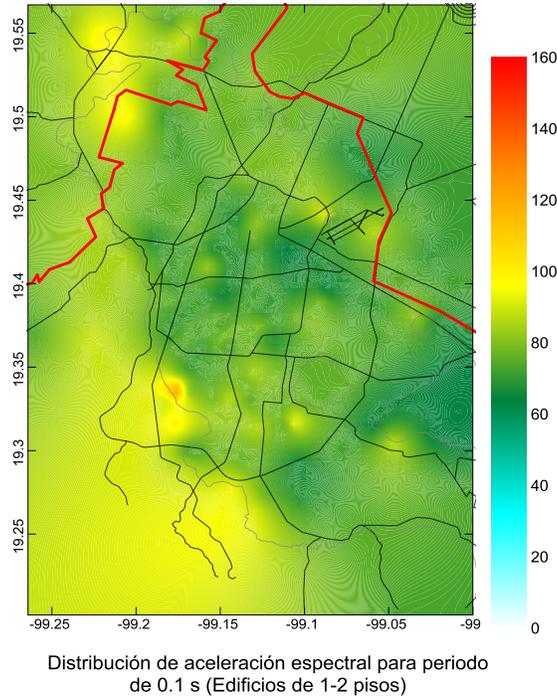


Figura 3.12 *Distribución de aceleraciones sísmicas para un periodo estructural de 0.1s (casa habitación de uno a dos pisos), estimado excitando el terreno con el sismo del 12 de julio de 1974, $M_c 3.5$ tipo local. Escala en cm/s^2*

3.3. SISMO DEL 15 DE JUNIO DE 1999 (M6.7) (TIPO: INTERPLACA)

En esta sección se presenta un escenario sísmico hipotético para la ciudad de México. Se ha propuesto el sismo del 15 de julio de 1999 (M6.7), de tipo interplaca, ocurrido a 30 kilómetros de Tehuacán, Puebla.

En la Figura 3.13 se presenta los espectros de respuesta en pseudoaceleración promedio calculados a partir de los cocientes empíricos para las condiciones actuales del suelo. Se observa que este tipo de sismo genera las mayores aceleraciones (~250 gales) en la zona de transición en un periodo $T=0.6$ seg. La zona de transición resultaría ser la que experimentaría mayores aceleraciones tras la ocurrencia de un sismo interplaca con epicentro entre los límites de Puebla y Oaxaca, en cambio la zona de loma tendría las menores aceleraciones (~130 gales). En cuanto a la zona de lago, las aceleraciones esperadas estarían entre 100 a 200 gales.

En la Figura 3.14 se presenta el mapa de intensidades sísmicas propuesto para diferentes periodos estructurales para éste sismo. En la figura siguiente se presenta el mismo mapa pero generado por el Instituto de Ingeniería, UNAM.

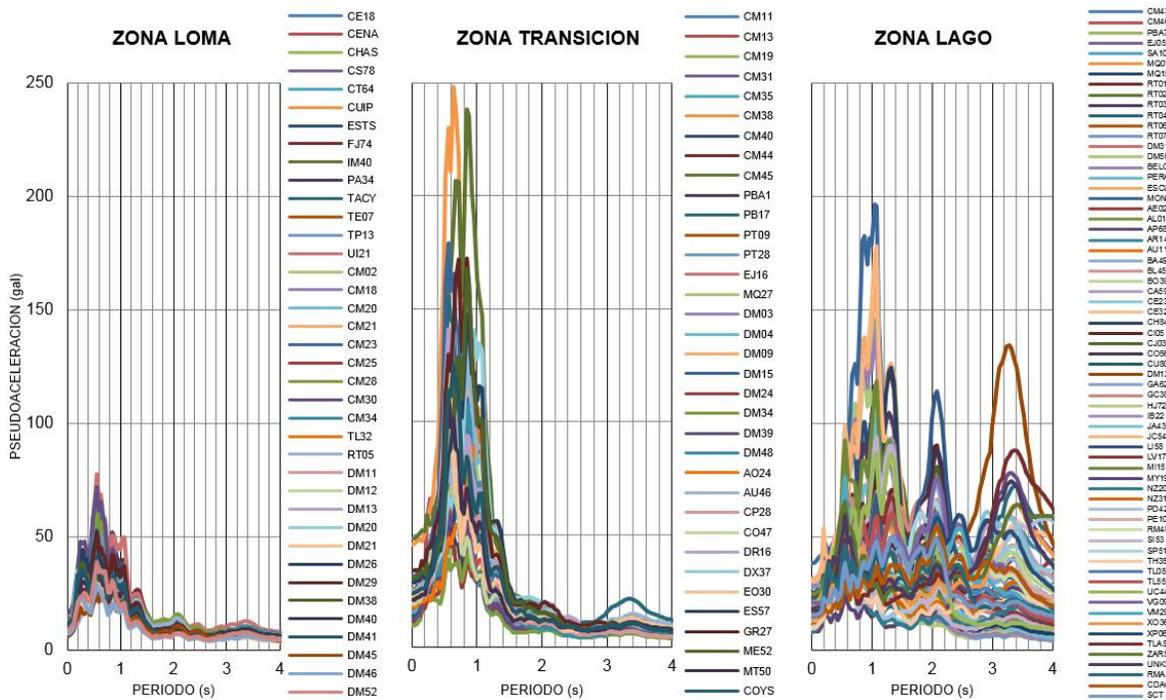


Figura 3.13 Espectros de respuesta en pseudoaceleración calculados con las pseudo-Funciones de Transferencia Empíricas (2012) para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 15 de junio de 1999 (M6.7)

Sobre cada uno de los mapas se han señalado con línea discontinua las zonas de la ciudad que presentan las mayores aceleraciones. Si se compara uno a uno los correspondientes mapas de distribución de aceleración propuestos en este trabajo y por parte del IdeI UNAM, se observa que este sismo tendría una aceleración para la zona de transición entre 20 a 50 gales para $T=0$ (seg). Para un periodo $T=0.3$ (seg) el área de máxima aceleración ocuparía gran parte de la zona de lago y otra tanta de la zona de transición. En tanto que para un $T=1.0$ (seg) la zona de transición experimentaría aceleraciones entre 100-200 gales. Para un periodo $T=2.0$ (seg) la aceleración máxima esperada se localizaría en la zona norte de la ciudad. Las zonas donde existe una discrepancia es en el periodo correspondiente a 0.3 (seg), ocupando mayor extensión en el mapa propuesto en este trabajo, así como en el mapa $T=2.0$ (seg). Por otro lado, los valores de aceleración son menores en comparación con los obtenidos por el instituto.

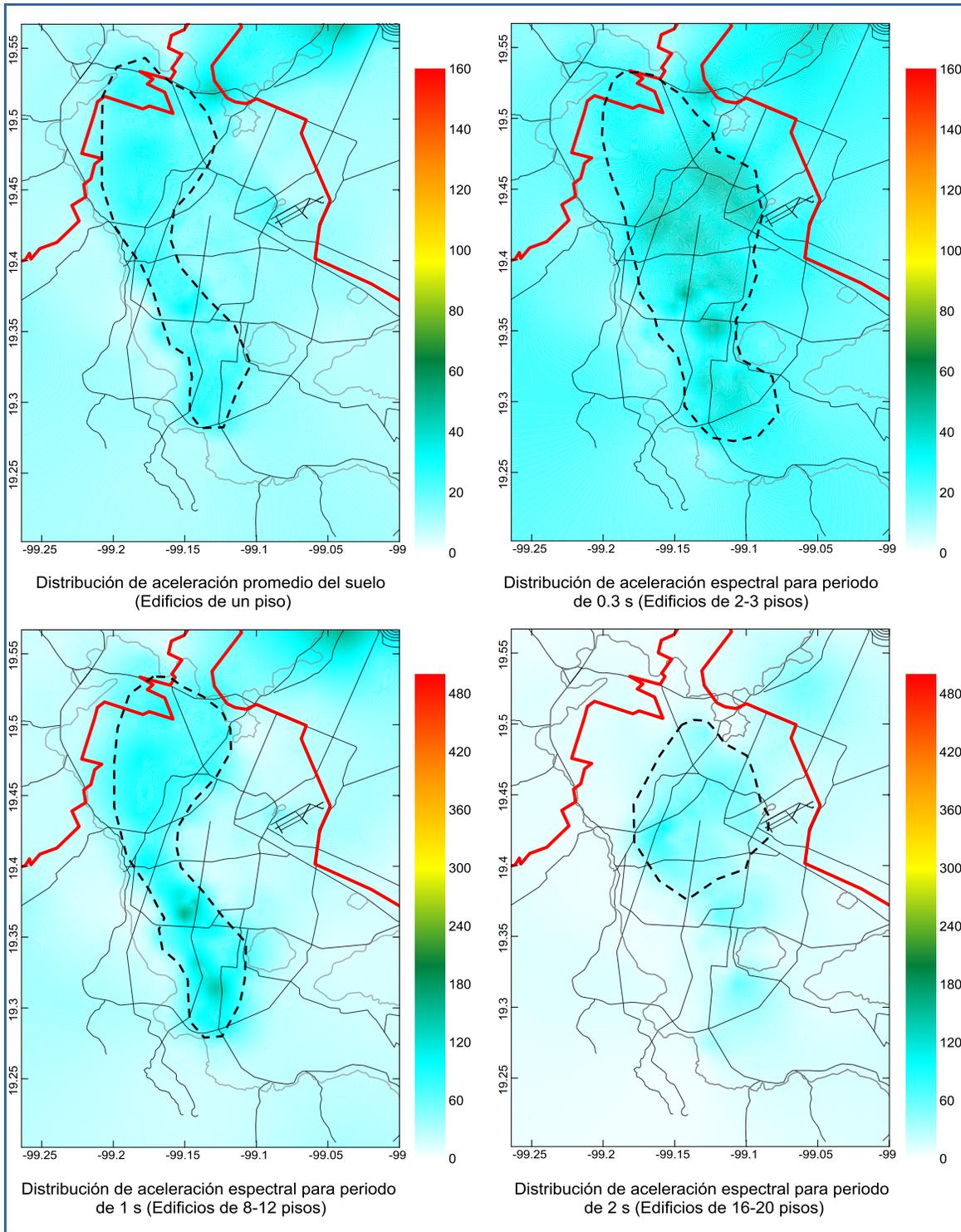


Figura 3.14 Mapa de intensidades sísmicas propuesto para diferentes periodos estructurales para el sismo del 15 de junio de 1999, M6.7 tipo interplaca. Escala en cm/s^2

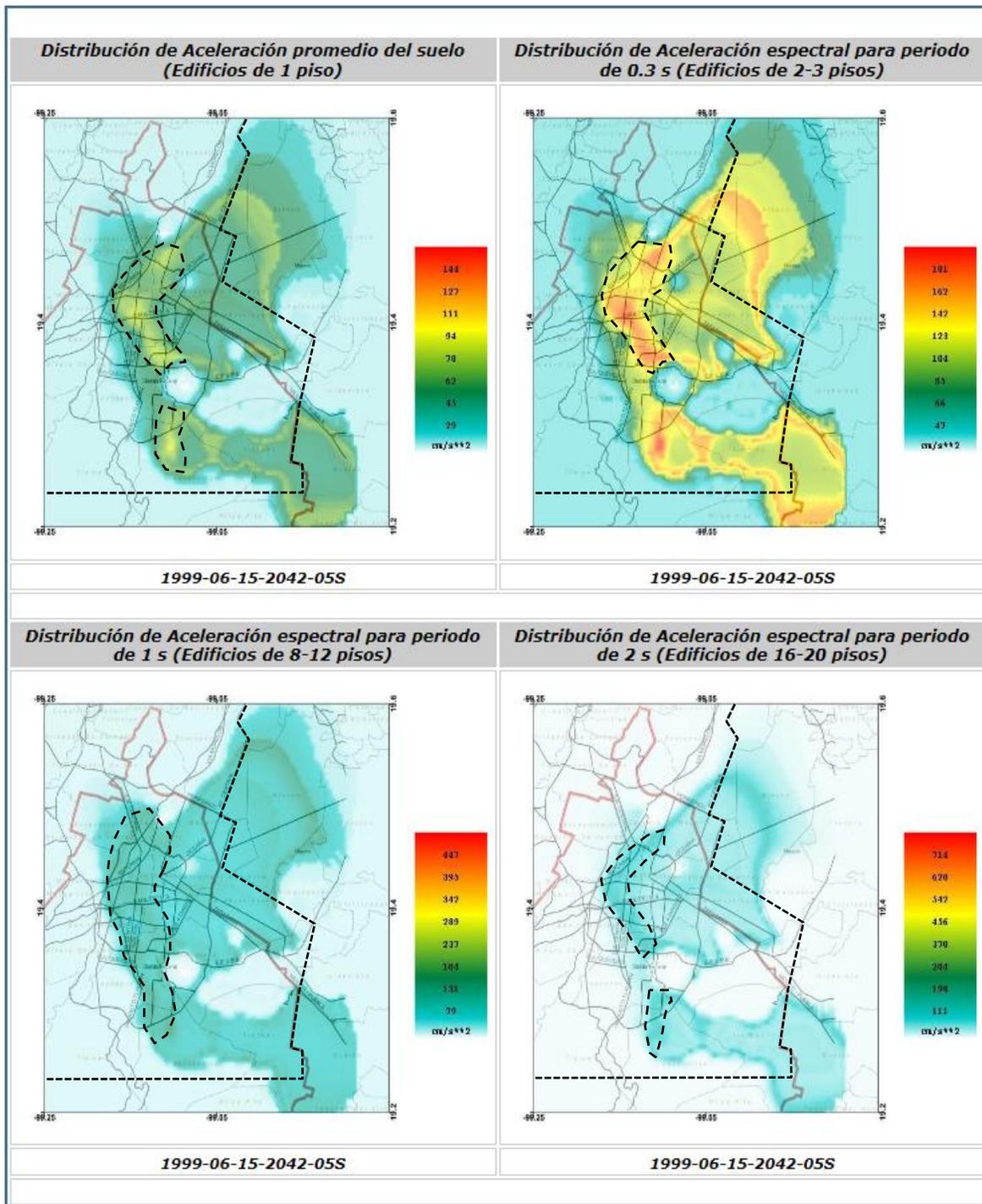


Figura 3.15 Mapa de intensidades sísmicas para diferentes periodos estructurales para el sismo del 15 de junio de 1999, M6.7 tipo interplaca (Fuente: Idel, UNAM)

3.4. SISMO DEL 10 DE DICIEMBRE DE 2011 ($M_w6.5$) (TIPO: INTERPLACA)

En esta sección se presenta un escenario sísmico hipotético para la ciudad de México. Se ha propuesto el sismo del 10 de diciembre de 2011 ($M_w6.7$), de tipo interplaca. Se seleccionó este sismo para comparar ambos mapas de intensidad, el generado en este estudio y el del Instituto de Ingeniería, UNAM.

En la Figura 3.16 se presenta los espectros de respuesta en pseudoaceleración promedio calculados a partir de los cocientes HVSr y HVNR para las condiciones actuales del suelo, en tanto que en la Figura 3.17 se muestran los espectros de respuesta promedio reales. Se observa que este tipo de sismo genera las mayores aceleraciones (~160 gales) en la zona de transición en un periodo $T=0.7$ (seg). La zona de transición resultaría ser la que experimentaría mayores aceleraciones tras la ocurrencia de un sismo interplaca con epicentro en el estado de Guerrero, en cambio la zona de loma tendría las máximas aceleraciones (~40 gales) en este mismo periodo.

En cuanto a la zona de lago, las aceleraciones esperadas estarían entre 30 a 80 gales en $T=0.7$ (seg). Sin embargo este sismo presenta dos comportamientos interesantes en dos diferentes periodos. Esto se aprecia claramente en la zona de loma y transición, donde las aceleraciones en loma estarían en 0.2 (seg), no así en la zona de transición, donde las máximas aceleraciones estarían aproximadamente en 0.7 (seg). En zona de lago por el contrario, la distribución de aceleraciones calculadas se tiene en un rango más amplio de periodo, del que no exceden los 80 gales. En la misma zona pero en los espectros reales, tan solo 5 sitios presentan aceleraciones mayores a 80 gales entre 0.4 a 0.8 (seg), el resto de los sitios presentaron las máximas aceleraciones que oscilan entre los 80 gales.

En la Figura 3.18 se presenta el mapa de intensidades sísmicas propuesto para diferentes periodos estructurales para éste sismo. En la Figura 3.19 se presenta el mismo mapa pero generado por el Instituto de Ingeniería, UNAM.

En los mapas concernientes a $T=0.3$ (seg) se tiene una gran diferencia en cuanto a la distribución de aceleración así como en los valores calculados. Veamos la Figura 2.16 y 2.17, se observa que si se toma tal cual el registro de CUIP como sismo en base, se tiene una respuesta sobrevaluada y en ocasiones inexistente en un periodo ~0.2 (seg). Esto se refleja en la comparación de los espectros de respuesta calculados y reales de las figuras 3.16 y 3.17 para la zona de transición, donde para dicho periodo las aceleraciones reales y calculadas son del orden de 60 gales, mientras que para la zona de lago fueron de 80 gales. Esto confirma que de tomarse a CUIP como estación de referencia para la generación de estos mapas de intensidad sísmica, el registro deberá ser corregido por el efecto de sitio que presenta.

También hay que notar, remontándonos a la Figura 3.12, la existencia de un máximo espectral ~5-6 Hz, presente en ambas componentes horizontales. Compárese esta respuesta con la que se tiene en la estación CENA, donde no se presenta dicho máximo. Este tipo de sismo con epicentro dentro del continente, contiene mayor cantidad de energía hacia altas frecuencias debido a la poca atenuación de la energía. Este contenido de frecuencias excita los estratos más superficiales de basalto, cuya respuesta se refleja claramente en el espectro de Fourier.

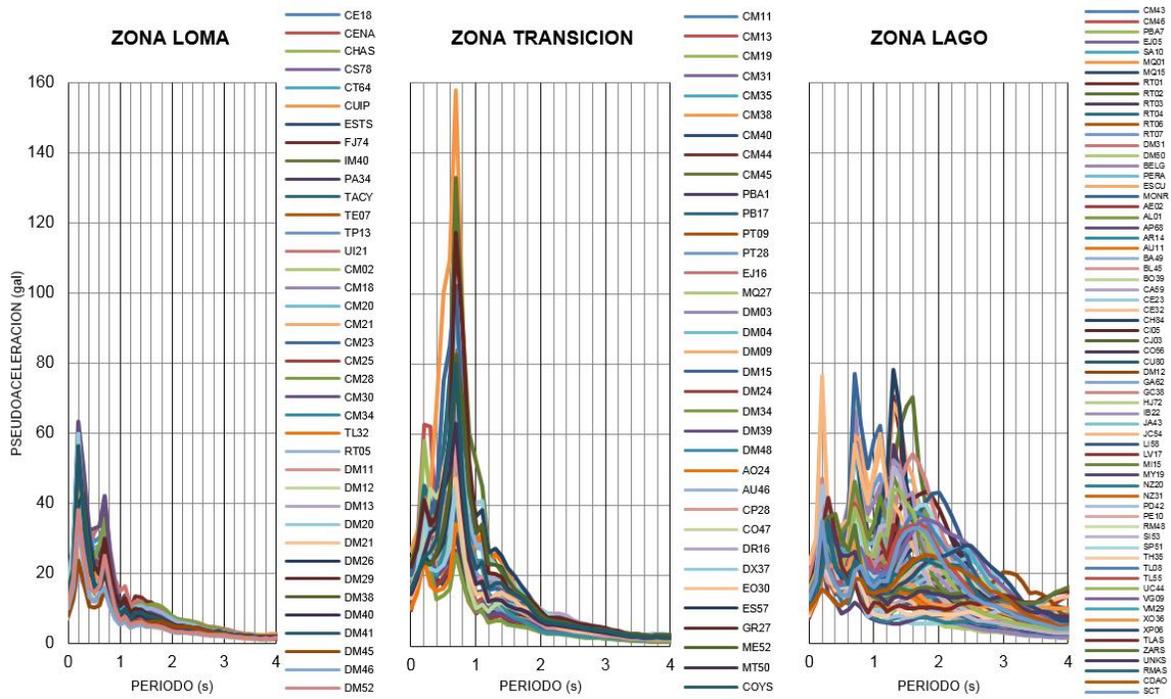


Figura 3.16 Espectros de respuesta en pseudoaceleración calculados con las pseudo-Funciones de Transferencia Empíricas para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 10 de diciembre de 2011 ($M_w6.5$)

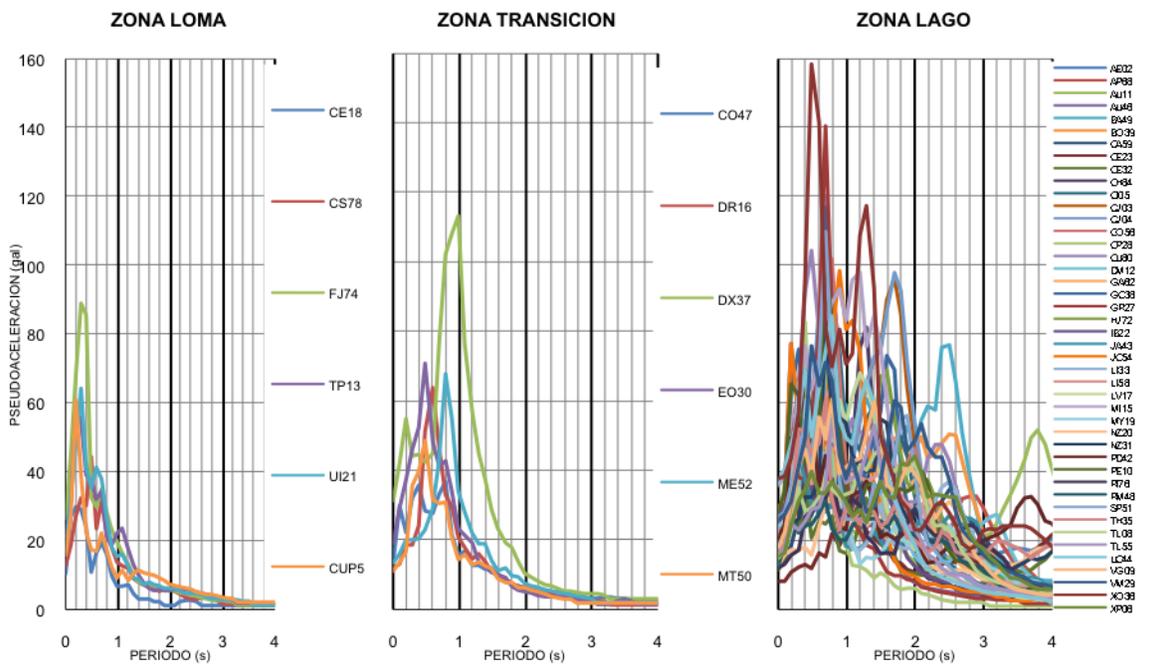


Figura 3.17 Espectros de respuesta en pseudoaceleración de las estaciones acelerográficas de la red RACM para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 10 de diciembre de 2011 ($M_w6.5$)

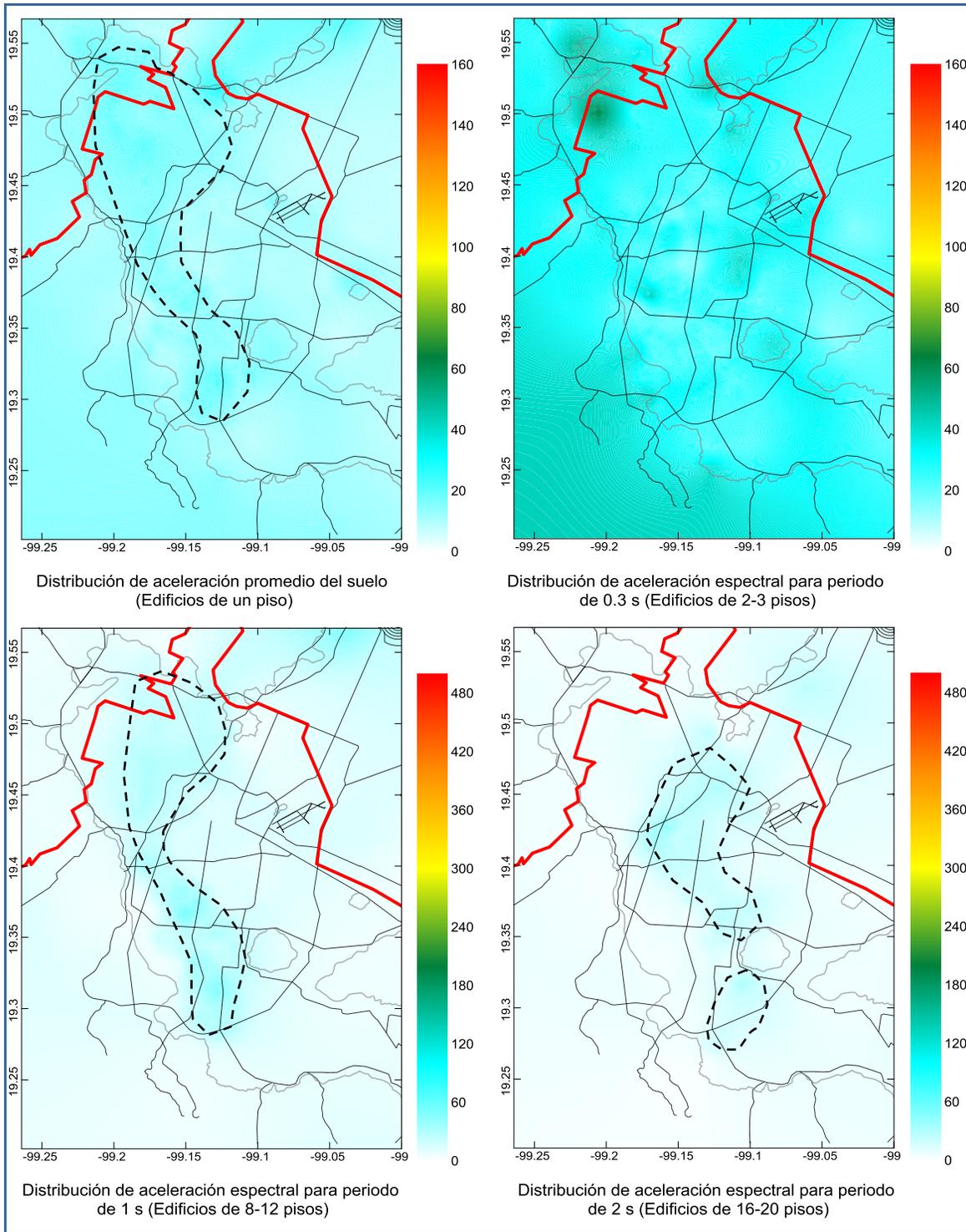


Figura 3.18 Mapa de intensidades sísmicas propuesto para diferentes periodos estructurales para el sismo del 10 de diciembre de 2011, M_w 6.5 tipo interplaca. Escala en cm/s^2

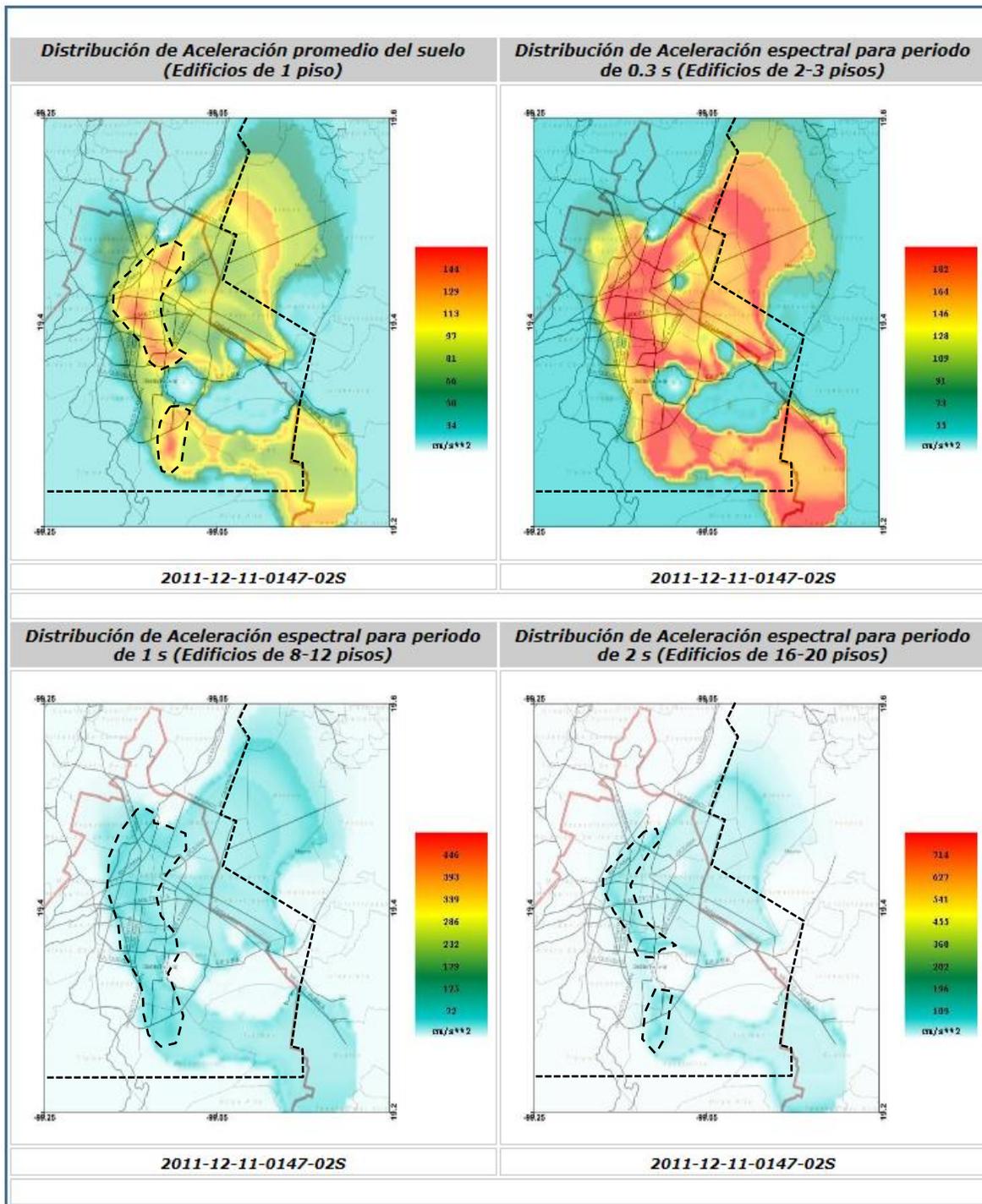


Figura 3.19 Mapa de intensidades sísmicas para diferentes periodos estructurales para el sismo del 10 de diciembre de 2011, $M_w 6.5$ tipo interplaca (Fuente: Idel, UNAM)

3.5. SISMO DEL 20 DE MARZO DE 2012 (M_w 7.4) (TIPO: SUBDUCCIÓN)

En esta sección se presenta un escenario sísmico hipotético para la ciudad de México. Se ha propuesto el sismo del 20 de marzo de 2012 (M_w 7.4), de tipo subducción. Se seleccionó este sismo para comparar ambos mapas de intensidad, el generado en este estudio y el del Instituto de Ingeniería, UNAM.

En la Figura 3.20 se presenta los espectros de respuesta en pseudoaceleración promedio calculados a partir de los cocientes HVSR y HVNR para las condiciones actuales del suelo, en tanto que en la Figura 3.21 se muestran los espectros de respuesta promedio reales. Se observa que este tipo de sismo genera las mayores aceleraciones (~250 gales) en la zona de lago en un periodo ~ 2.0 (seg). La zona de lago resultaría ser la que experimentaría mayores aceleraciones tras la ocurrencia de un sismo de subducción con epicentro en las costas de Guerrero, en cambio la zona de loma tendría las menores aceleraciones (~50 gales). En cuanto a la zona de transición, las aceleraciones esperadas estarían entre 70 a 150 gales.

En la Figura 3.22 se presenta el mapa de intensidades sísmicas propuesto para diferentes periodos estructurales para éste sismo. En la Figura 3.23 se presenta el mismo mapa pero generado por el Instituto de Ingeniería, UNAM.

Las aceleraciones calculadas y reales para la zona de loma y transición son prácticamente del mismo orden. En zona de lago se presenta las máximas aceleraciones ~1.8 (seg). Sin embargo en $T=3.0$ (seg) se sobrevaloraron en seis puntos aceleraciones de hasta 250 gales. El resto ronda alrededor de 150 gales. Lo mismo se aprecia en la gráfica real para este periodo. En general se observa que este tipo de sismo genera la máxima distribución de aceleraciones en zona de lago.

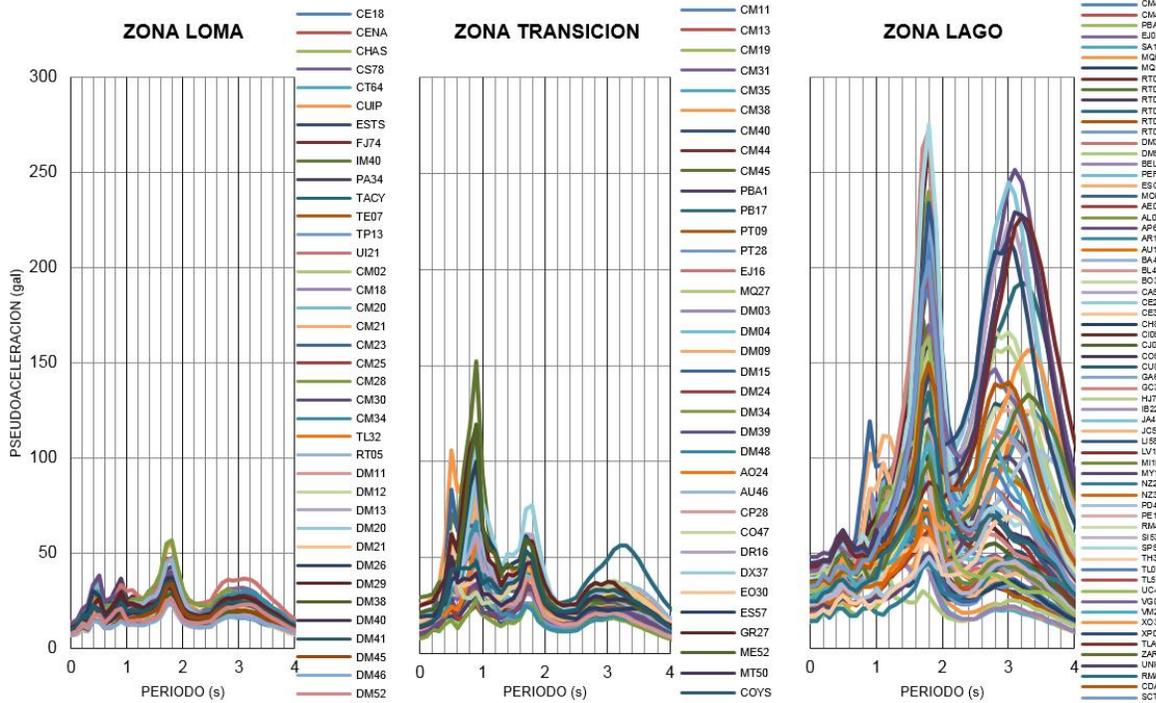


Figura 3.20 Espectros de respuesta en pseudoaceleración calculados con las pseudo-Funciones de Transferencia Empíricas para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 20 de marzo de 2012 ($M_w7.4$)

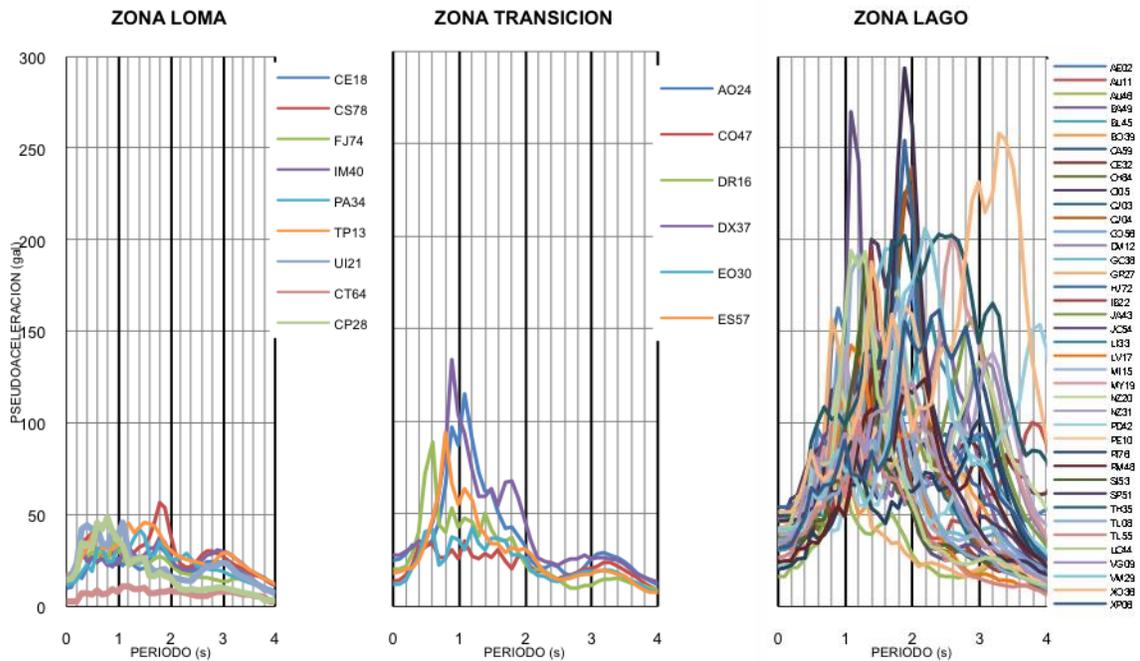


Figura 3.21 Espectros de respuesta en pseudoaceleración de las estaciones acelerográficas de la red RACM para las distintas zonas geotécnicas de la ciudad de México, para el sismo del 20 de marzo de 2012 ($M_w7.4$)

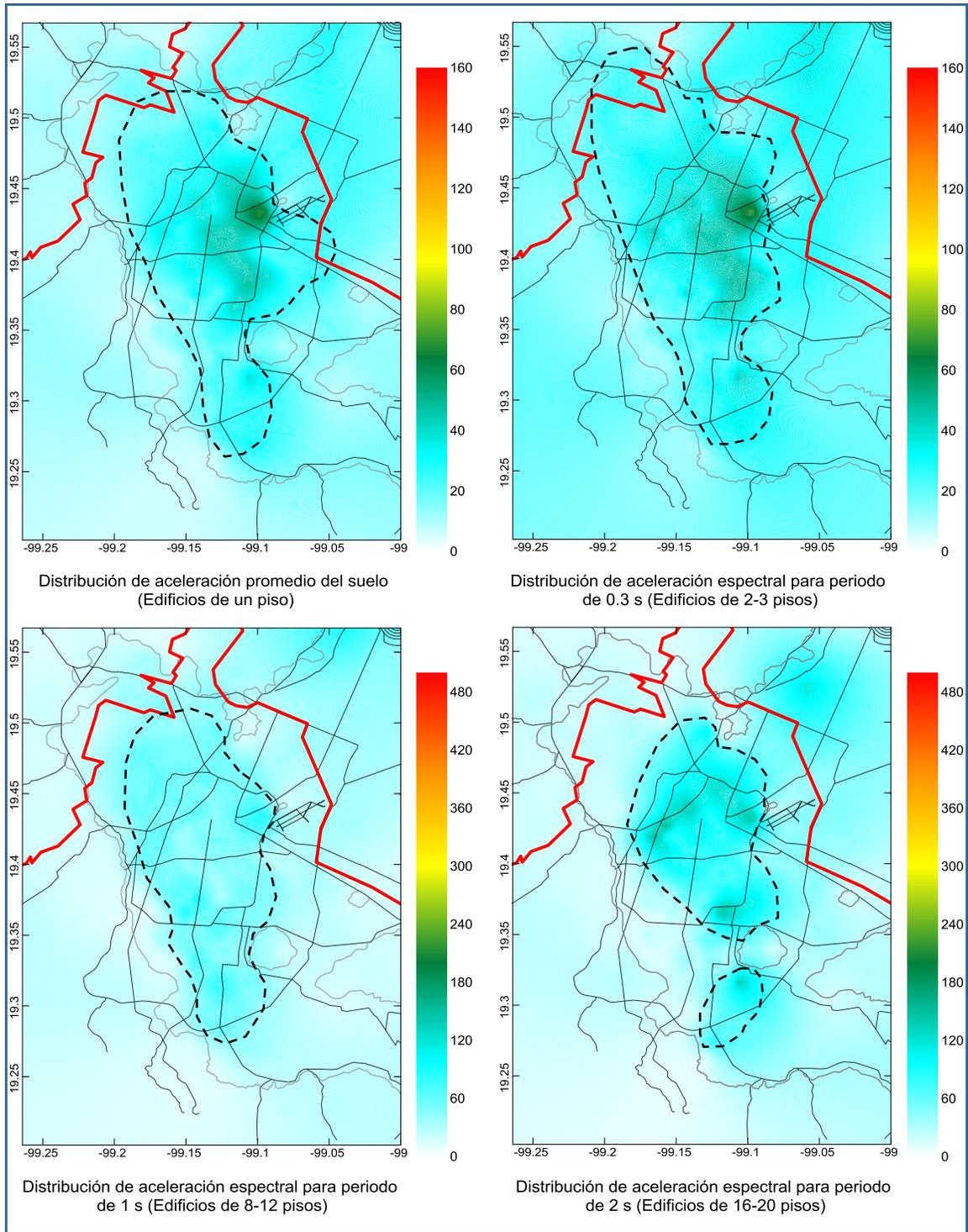


Figura 3.22 Mapa de intensidades sísmicas propuesto para diferentes periodos estructurales para el sismo del 20 de marzo de 2012, $M_w 7.4$ tipo subducción

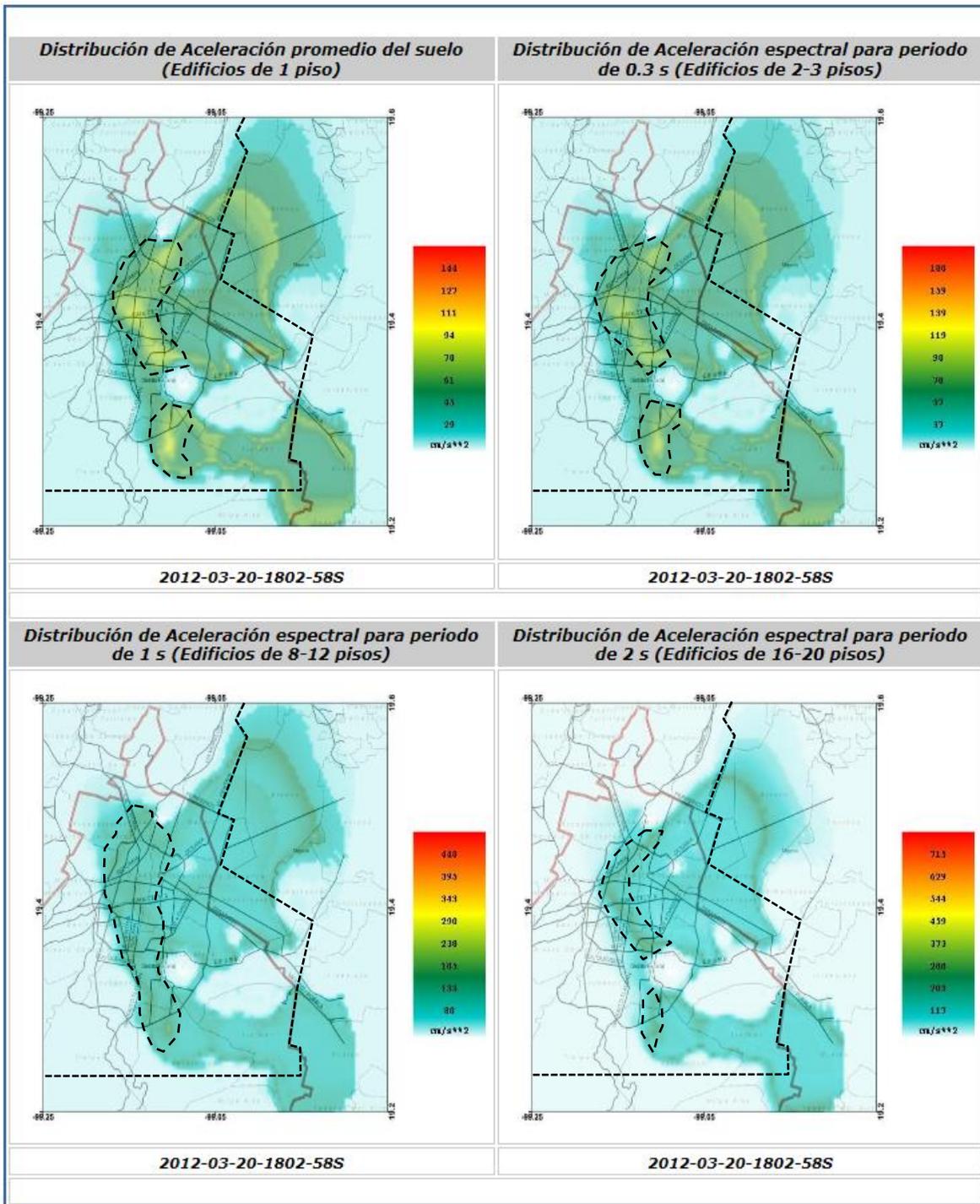


Figura 3.23 Mapa de intensidades sísmicas para diferentes periodos estructurales para el sismo del 20 de marzo de 2012, $M_w 7.4$ tipo subducción (Fuente: Idel, UNAM)

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Antes de empezar con la discusión de lo derivado en este trabajo, hay que dejar en claro que se decidió dar un enfoque a los resultados hacia temas relacionados con la práctica de la ingeniería sísmica. Los nuevos resultados que se han presentado son empíricos, pero respaldados por las teorías que ya han sido comprobadas y validadas desde hace tiempo.

El segundo objetivo de este trabajo es dar validez a los cocientes espectrales obtenidos con microtemores, sobretodo en el valor de amplificación. En la literatura mundial se ha desestimado a esta herramienta para la obtención de valores confiables en la amplitud. Sin embargo, hasta el día de hoy no se ha propuesto alguna metodología que se aboque en solventar este problema. Es por lo anterior que motivó a la investigación y desarrollo de este proyecto de tesis.

En el primer capítulo de este trabajo se abordó el tema del tiempo de duración de los registros de microtemores para poder estimar de manera confiable el factor de amplitud que puede presentar un sitio. Primeramente, debe tenerse en consideración que cada sitio presenta diferentes niveles de ruido cultural, tipos de suelo, ambientes geológicos, principalmente. Lo anterior indica que cada cuenca a estudiar presentará características diferentes a las que pudiera presentarse en otro sitio. Es por ello que establecer un tiempo exacto de medición es algo que debe tomarse con cuidado. No obstante, el aprendizaje que nos ha dejado el realizar un número importante de mediciones de ruido sísmico en diferentes sitios, se resume a continuación.

El uso de sensores de velocidad de banda ancha para la adquisición de microtemores se presenta como la opción más viable para estimar la respuesta sísmica del terreno (frecuencia, amplitud y forma espectral). Por los resultados presentados en la Figura 1.3, el uso de acelerógrafos debe ser descontinuado para el desarrollo de ésta práctica, por lo que su uso deberá destinarse solamente al registro de movimientos fuertes.

Hemos visto que empleando sismógrafos de banda ancha, el tiempo de estabilización de los componentes electromecánicos es de una hora aproximadamente. Esto se visualiza al momento de efectuar el cálculo de la razón espectral, donde se aprecia un comportamiento exponencial hacia bajas frecuencias. A medida que el tiempo de registro aumenta y es mayor de una hora, este comportamiento se normaliza.

Como resultado de haber analizado un número importante de sitios bajo diferentes condiciones geológicas y geotécnicas, para el caso de estimar la frecuencia fundamental en el rango de 1.0 a 10Hz, empíricamente se ha visto que con el registro de dos horas se puede obtener una correcta estimación de la frecuencia y del factor de amplitud, equiparable con la obtenida con registros de sismo. Para obtener la respuesta del suelo hacia bajas frecuencias (0.1 a 1.0 Hz) es necesario como mínimo entre 3 y 6 horas de registro, los cuales se tienen que registrar entre la media noche y el

medio día, ya que hemos observado que las horas de la tarde y de la noche presentan mayor dispersión en los cocientes H/V. Estos tiempos difieren notablemente de los tiempos establecidos por SESAME en su manual de procedimientos.

Se ha definido una metodología que permite estimar la amplificación que presentan los suelos ante la ocurrencia de los sismos pero usando registros de vibración ambiental o microtremores. Esta consiste en:

1. El registro de ruido sísmico deberá realizarse con sensores de velocidad con un rango amplio de respuesta.
2. El registro de ruido ambiental tendrá que ser realizado en las primeras horas del día y hasta medio día.
3. El tiempo de duración de cada registro será de entre 2 – 3 horas para altas frecuencias, en tanto que para bajas frecuencias será entre 3 – 6 horas.
4. Para el procesado de las señales sísmicas se propone el siguiente tratamiento:
 - a. Empleo de un filtro pasabandas, como el Butterworth de 4 polos, no causal y en el intervalo de 0.1 a 30 Hz.
 - b. No se deberá usar taper ni suavizado.
 - c. La longitud de la ventana de tiempo será de 81.92 s, ya que se ha comprobado experimentalmente que ésta tiene una buena definición de la respuesta del suelo tanto hacia altas como bajas frecuencias.
 - d. En caso de que sea requerida la aplicación de traslape, este no deberá ser mayor del 25% de la ventana.
5. Se ha considerado al momento del cálculo del cociente H/V los efectos transitorios, dado que se tiene mayor porcentaje de ruido de fondo en los registros.
6. Para trabajos de ingeniería sísmica, el rango de interés en la respuesta de los cocientes espectrales es de 0.1 a 10 Hz.

Empleando esta metodología, se puede obtener una estimación aceptable de la amplitud muy próxima al obtenido con sismo, tal y como ha quedado demostrado experimentalmente. El registro de movimientos fuertes ya no es ahora un impedimento para la correcta caracterización de zonas urbanas, lo cual se traduce en una correcta clasificación de los terrenos sísmicos.

Nakamura (1988) y Lermo *et al.*, (1988) muestran en sus trabajos una variación de la energía al calcular los espectros de Fourier. Sin embargo, no mencionaron si esta variación se veía reflejada en los niveles de amplitud del cociente H/V. Esta variabilidad en el factor de amplificación pudo haber sido constatada desde aquel entonces.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de variación del factor de amplitud, estos refuerzan lo observado por Volant *et al.*, (1998), Cara *et al.*, (2003), Mucciarelli y Monachesi (1998), Bour *et al.*, (1998), Mucciarelli *et al.*, (2003) y Di Giacomo *et al.*, (2005), no existe una variación notable del cociente H/V en una escala de tiempo ya sea en semana, mes y año.

También se observó que la frecuencia fundamental es invariable conforme el tiempo (Guillier *et al.*, 2007), y que ésta es confiable independientemente de la hora de medición, lo que no concuerda con

Cara *et al.*, (2010). Los resultados arrojados en este estudio demuestran que existen variaciones en el factor de amplitud independientemente del método utilizado, media cuadrática y densidades espectrales, sin embargo no se observaron tremendas variaciones como las que presenta Guillier *et al.*, (2007). Este comportamiento pudo deberse al uso indiscriminado de una serie de parámetros (anti-trigger, 1-s STA a 30-s LTA, STA/LTA, cosine taper), pudiendo ocasionar una inestabilidad en sus resultados.

Para las estaciones del Distrito Federal, se observa que no cualquier hora del día es buena para estimar el cociente H/V eficazmente en amplitud. El tiempo mínimo de registro estaría comprendido entre 6 horas. Este tiempo toma en consideración la estabilización del sensor.

Hemos visto que empleando el tratamiento espectral como lo es el blanqueado espectral (*spectral whitening*), se puede corregir el gran problema que presentan los cocientes H/V como es la deamplificación del espectro hacia altas frecuencias. Además ha quedado comprobado que siguiendo la metodología propuesta en este trabajo, se tiene una confiabilidad del factor de amplitud, equiparable con registros de sismo. Lo anterior valida los cocientes espectrales tomados a partir de 2010 con varias horas de registro y utilizando sensores de velocidad triaxiales de banda ancha, que fueron utilizados en la generación de los escenarios de riesgo sísmico.

Haghshenas, Bard y Theodulidis (2008) en su trabajo concluyen que mediante el registro de microtemores no es factible la obtención de valores confiables de amplitud. No obstante, este estudio ha demostrado que con microtemores sí es posible estimar de manera confiable el factor de amplificación. Esto ha quedado constatado en la Figura 1.8.

A partir de sondeos de penetración estándar (SPT) en diferentes condiciones geológicas y geotécnicas, se ha calculado la respuesta teórica de los suelos, donde de manera matemática se han estimado valores muy próximos a los reportados de manera empírica. Lo anterior ha reforzado la amplitud obtenida con microtemores y siguiendo la metodología propuesta. Además se ha comparado la amplitud obtenida con sismo con las técnicas HVSR y SSR, obteniéndose amplitudes congruentes entre todas las metodologías. Un aspecto a destacar es que Haghshenas *et al.*, (2008) en su estudio no presentan comparación de la amplitud de forma matemática (FFT), por lo que sus resultados no presentan un sustento matemático fuerte. En cuanto a la obtención de los cocientes espectrales con sismo, los resultados dependen fuertemente de la forma de procesado de las señales sísmicas.

Un aspecto a considerar es que se tiene un mal concepto de los cocientes H/V. Se ha dicho que la frecuencia fundamental del suelo se define como el máximo absoluto de la razón espectral. Sin embargo un suelo no puede clasificarse en torno a un único valor. Lo importante de los cocientes espectrales es su interpretación y correlación con la geología y morfología de una zona. Resumiendo, un suelo no se define por el máximo espectral de la curva H/V, sino por la banda de frecuencias de éste y su forma espectral.

En cuanto a los métodos matemáticos empleados para la obtención de los cocientes espectrales a partir de sismogramas de ruido sísmico, se observó que el método de las Densidades Espectrales

Direccionales (DED) sobre-evalúa las amplitudes obtenidas empleando el método de la Media Cuadrática (MC) con un factor de dos unidades. Además se observó una mejor definición de los diferentes modos de vibrar del suelo y que estos se asemejan con los observados en los cocientes HVSR.

Por último, sería de esperarse que un sismo de mayor magnitud provocaría mayores amplitudes en una localidad en comparación con un sismo de menor magnitud, pero esto no siempre sucede así. Esto depende de la distancia epicentral, azimut, profundidad del sismo. Si con este tipo de energía se tienen variaciones considerables en la amplitud, el obtener variaciones empleando a los microtemores como fuente sería un resultado más que entendible.

En el segundo capítulo se abordó el tema del efecto de sitio que presentan las estaciones acelerográficas localizadas en zona de loma, de las cuales las que ofrecen la menor amplificación de las ondas son ESTS, CENA y TXCR. Se comprobó que la estación CUIP presenta tres efectos en diferentes frecuencias. De seguir usándose ésta como estación de referencia para la generación de sismogramas sintéticos, deberán corregirse los acelerogramas por efecto de sitio. En este trabajo se ha propuesto un modelo estratigráfico con el cual se ha obtenido la respuesta teórica que se ajusta bien al cociente espectral empírico.

Se ha empleado otra metodología para la corrección de estos sismogramas por medio de la deconvolución de los acelerogramas con la respuesta de sitio en el dominio del tiempo. Comparando la corrección por ambos métodos, se presentan los valores más bajos de aceleración mediante la deconvolución.

Se observó que los valores de aceleración de los acelerogramas registrados en CUIP pero corregidos con el método de la deconvolución son de un orden muy similar a los que se han registrado en la estación CENA, localizada a dos kilómetros de distancia de ésta.

Se presentó la comparación de los espectros de respuesta en pseudoaceleración utilizando a CUIP como sismo en base y los reales para los sismos del 10 de diciembre de 2011 y del 20 de marzo de 2012, registrados en la Red Acelerográfica de la ciudad de México. En general se observa una sobreevaluación del doble y en ocasiones del triple con respecto a los valores reales. Sin embargo, utilizando el registro de CENA y CUIP corregido como señales de entrada, la métrica empleada en base a Olsen y Mayhew muestran un ajuste de bondad del 62 al 77 con respecto a los valores reales. Lo que significa un muy buen ajuste de los valores calculados a través de la metodología propuesta en este trabajo. Para los sitios donde el ajuste de bondad fue deficiente, será necesaria una reevaluación de los cocientes espectrales más cuidadosa, a fin de obtener valores más apegados a los valores observados.

Pasando a los escenarios de amenaza sísmica propuestos para la ciudad de México, se observa que existe un aumento de las aceleraciones para un sismo de las características del ocurrido el 19 de septiembre de 1985 para las condiciones actuales del subsuelo de la ciudad. Las áreas de mayor daño han migrado hacia el noreste de la ciudad, siendo propensas de sufrir nuevos daños.

En esas imágenes para un periodo de $T=2.0$ s, se observan dos aspectos interesantes. El primero de ellos es un aumento considerable de las aceleraciones para las condiciones del terreno en 2014, sobre todo hacia el poniente de la ciudad, como en la colonia Juárez y la zona Rosa. Por otro lado, la zona potencial de daños se ha movido hacia el nororiente de la ciudad, por lo que la zona de Tlatelolco ya no presentaría el mayor daño. En tanto que la porción nororiente del Circuito Interior se vería seriamente afectada. En la imagen superior se presentan dos regiones delimitadas dentro de polígonos en rojo. En línea punteada se presentan las zonas donde ocurrieron daños en estructuras. El polígono en línea continua delimita las zonas con los daños más graves ocurridos tras la ocurrencia del sismo de M8.1. Debe destacarse que la zona con mayor aceleración propuesta en el escenario sísmico concuerda con las zonas de mayor daño.

Una forma clara de ver la importancia en el cambio de las propiedades dinámicas del suelo se ejemplifica a continuación. Se construyó un edificio habitacional de 15 pisos, con un periodo estructural aproximado de 1.5s, en una zona de lago que en 1990 tenía un periodo de 2.5s. Con el paso del tiempo y mientras continúe el hundimiento regional de la ciudad, el periodo de suelo disminuirá paulatinamente, hasta llegar el momento en que ambos periodos coincidirán. De presentarse un sismo en las costas de Guerrero, se presentaría el efecto de resonancia, ocasionando daños importantes al edificio.

Es necesario que al momento de planificar la construcción de nuevas edificaciones, se tome en cuenta este fenómeno y se piense a futuro. Una solución a lo anterior sería que las edificaciones tuviesen un valor de periodo mayor al del suelo en el momento de su construcción, o bien el uso de nuevas tecnologías, como el de disipadores de energía dentro de la estructura.

Por otro lado, se observa que para sismos de fuente interplaca y cortical, la zona de transición presenta las mayores aceleraciones, representando las zonas más vulnerables ante la ocurrencia de este tipo de eventos. Para sismos de subducción, las mayores aceleraciones se presentan en la zona de lago. Algo en común para estos eventos, subducción, interplaca y tipo Acambay, la zona de loma presenta las menores amplificaciones. Para un evento local, se tiene que las mayores aceleraciones se presentan en la zona de loma, pudiendo darse los mayores daños en esta zona de la ciudad, sobre todo en las construcciones casa-habitación de uno y dos pisos.

Este tipo de simulaciones, dejando un tanto de lado si el valor de las aceleraciones es el real o no, permiten tener una idea de la localización de “zonas críticas” que pudieran presentar afectaciones hacia las construcciones y a la infraestructura. Este tipo de información ayudaría a la toma de decisiones por parte de las autoridades competentes, como Protección Civil por mencionar alguna. Sería atractivo escuchar por parte de las autoridades, la respuesta ante la formulación de la pregunta ¿Qué zonas de la ciudad resultarían afectadas ante la ocurrencia de un evento sísmico de tal o cual característica?

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Se ha comprobado que el equipo que mejor se adecua para la toma de registros de microtemores son los sismógrafos de banda ancha, ya que estos definen, por un lado la respuesta del suelo hacia bajas frecuencias y por otro, una mejor resolución de la frecuencia fundamental así como del factor de amplificación en el rango comprendido entre 0.1 a 10 Hz (para fines de ingeniería sísmica), por lo que el uso de acelerógrafos deberá destinarse solamente al registro de movimientos fuertes.

Se han mostrado una serie de resultados que demuestran que, mediante registros de microtemores sí es posible estimar la respuesta en amplificación del suelo que se esperaría si se calcula con registros de sismos. Para ello deben cumplirse los siguientes criterios:

1. El registro de ruido sísmico deberá realizarse con sensores de velocidad con un rango amplio de respuesta.
2. El registro de ruido ambiental tendrá que ser realizado en las primeras horas del día y hasta medio día.
3. El tiempo de duración de cada registro será de entre 2 – 3 horas para altas frecuencias, en tanto que para bajas frecuencias será entre 3 – 6 horas, tomando en consideración el tiempo de estabilización de los sensores.
4. Para el procesado de las señales sísmicas se propone el siguiente tratamiento:
 - a. Empleo de un filtro pasabandas, como el Butterworth de 4 polos, no causal y en el intervalo de 0.1 a 30 Hz.
 - b. No se deberá usar taper ni suavizado.
 - c. La longitud de la ventana de tiempo será de 81.92 s, ya que se ha comprobado experimentalmente que ésta tiene una buena definición de la respuesta del suelo tanto hacia altas como bajas frecuencias.
 - d. En caso de que sea requerida la aplicación de traslape, este no deberá ser mayor del 25% de la ventana.
5. Se ha considerado al momento del cálculo del cociente H/V los efectos transitorios, dado que se tiene mayor porcentaje de ruido de fondo en los registros.

El método de las densidades espectrales direccionales (DED) merece una mayor observación, así como un mayor número de experimentos para observar los alcances de ésta nueva herramienta basada en campos difusos.

Se observó una variación de la forma espectral del cociente H/V que está en función de la cantidad de vibración generada a diferentes horas del día. Se ha visto que en horas de la madrugada y hasta las 8 de la mañana, la energía es más estable y en consecuencia, el cociente H/V. Este resultado rompe con varias suposiciones que se tenían con respecto a la fuente de los microtemores, por

ejemplo que las mejores horas para medir este tipo de energía, era cuando se tenía dentro de una zona urbana, la mayor cantidad de tráfico vehicular.

Se ha comprobado que:

- 1) Con mediciones de microtremores y aplicando la metodología descrita y propuesta en este trabajo sí es posible determinar confiablemente si un sitio es propicio para funcionar como estación de referencia.
- 2) Con mediciones de microtremores y aplicando la metodología propuesta en el procesado de los datos de ruido sísmico, sí es posible determinar confiablemente el valor de amplificación del suelo, siendo equiparable con el obtenido con registros de sismo. Además hemos visto que los cocientes presentan una gran robustez, esto quiere decir, delimita el ancho de respuesta de cada máximo espectral.
- 3) Con mediciones de vibración ambiental y aplicando la metodología descrita en este trabajo la frecuencia dominante del suelo es estable e invariable con el tiempo.

Por otro lado, se ha hecho una revisión del efecto de sitio que presentan las estaciones acelerográficas localizadas en zona de loma. Las estaciones que mejor cumplen los criterios de estación de referencia actualmente son CENA y ESTS. Debe reconsiderarse el funcionamiento de TXCR como estación acelerográfica, pues presenta el menor efecto de sitio dentro de la Cuenca de México.

Empleando la metodología propuesta para el cálculo de historias de tiempo sintéticas, y comparando los resultados reales y calculados de los espectros de respuesta para los eventos del 10/12/2011 y 20/03/2012, el análisis métrico indicó un muy buen ajuste de bondad de los datos. Esto le da validez a la propuesta de la metodología presentada para la generación de acelerogramas sintéticos, a partir de los cuales se deriva la generación de mapas de amenaza sísmica.

Se ha propuesto un escenario sísmico con magnitud $M_w 8.1$, como el ocurrido el 19 de septiembre de 1985 para la ciudad de México. Se ha visto que el efecto del hundimiento regional ha propiciado cambios espaciales en las zonas de mayor daño, resultando afectadas para las condiciones actuales del suelo, zonas como la parte nororiental de la ciudad, a la altura del Circuito Interior. Se estima que colonias como la Roma, Juárez, Zona Rosa entre otras, se verán de nuevo afectadas ante la ocurrencia de un sismo de estas características.

REFERENCIAS

- Anderson, J. (2004). Quantitative measure of the goodness-of-fit of synthetic seismograms. *Proc. of 13th World Conference on Earthquake Engineering, paper 243*.
- Arroyo, D., Ordaz, M., Ovando-Shelley, E., Guasch, J., Lermo, J., Pérez, C., Alcántara, L. (2013). Evaluation on the change in dominant periods in the lake-bed zone of Mexico City produced by ground subsidence. *Soil Dyn Earthquake Eng.* **44**, 54-66
- Avilés J. y Pérez-Rocha, L. (2010). Regional subsidence of Mexico City and its effects on seismic response. *Soil Dyn Earthquake Eng.* **30**, 981-989.
- Bensen, G. D., M. H. Ritzwoller, M. P. Barmin, A. L. Levshin, F. Lin, M. P. Moschetti, N. M. Shapiro, and Y. Yang (2007), Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, *Geophys. J. Int.* **169**, 1239 – 1260, doi:10.1111/j.1365-1246X.2007.03374.x.
- Bernal Esquia, Y. (2006). Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, México. *Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Bonilla L.F., Steidl J.H., Lindley G.T., Tumarkin A.G., Archuleta R.J. (1997). Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **87**, 710–730.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P.-Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J. and Fäh, D. (2006). H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations. *Geophys. J. Int.*, **167**, 827–837.
- Borcherdt, R D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **60**, 29-61.
- Cadet H., Bard P-Y., Rodriguez-Marek A. (2010). Defining a standard rock site: propositions base on the KiK-netdatabase. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **100**, 172–195.
- Cara F., Di Giulio, G., Milana, G., Bordoni, P., Haines, J. and Rovelli, A. (2010). On the stability and reproducibility oh the horizontal-to-vertical spectral ratios on ambien noise: case study. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **100**, 1263-1275.
- Chavacán-Avila, M. (2007). Catálogo de sismicidad local para la Cuenca de México. *Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Chávez-García, F.J., Tejeda-Jacome, J. (2010). Site response in Tecoman, Colima, Mexico—I: Comparison of results from different instruments and analysis techniques. *Soil Dyn Earthquake Eng* **30:8**, 711-716.
- CIS. (1989). Cálculo de espectros de respuesta a través de funciones de transferencia empíricas. *Proyecto de investigación Centro de Investigación Sísmica Fundación Javier Barros Sierra AC*. Informe final al DDF.
- De la Fuente, Héctor. Comunicación personal.
- Díaz-Rodríguez, J., Moreno-Carrizales, P., and López-Flores, L. (2001). A study of soil microstructure using bender element tests. *4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. Paper 1.39.
- Guillier, B., Atakan, K., Chatelain, J., Havskov, J., Ohrnberger, M., Cara, F., Duval, A.M., Zacharopoulos, S., Teves-Costa, P., The SESAME Team. (2007). Influence of instruments on the H/V spectral ratios of ambient vibrations. *Bull Earthquake Eng*, DOI 10.1007/s10518-007-9039-0

- Haghshenas, E., Bard, P. and Theodulidis, N. (2008). Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio. *Bull. Earthquake Eng.* **6**, 75-108.
- Haskell, N. A. (1960). Crustal reflection of plane SH waves. *Journal of Geophysical Research*, **65:12**, 4147-4150.
- Haskell, N. A. (1962). Crustal reflection of plane P and SV waves. *Journal of Geophysical Research*, **67**, 4151-4167.
- Hernández-Estrada, A.F. (2013). Variación en el tiempo del periodo dominante del suelo y las amplificaciones dinámicas del terreno en la ciudad de México. *Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.*
- Lermo, J., Rodríguez, M. and Singh, S.K. (1988). The Mexico earthquake of September 19, 1985; Natural period of sites in the valley of Mexico from microtremor measurements and from strong motion data, *Earthquake Spectra*, v. 4, 805-814
- Lermo, J, Cabrera R., Cesati G., Ortega R. (1990). Estimación del periodo dominante del subsuelo en 18 sitios del Distrito Federal. *XV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Innovaciones en Geotecnia, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, San Luis Potosí, México.*
- Lermo, J., y Chávez-García, F.J. (1993). Site Effect Evaluation Using Spectral Ratios With Only One Station, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **83:5**, 1574-1594.
- Lermo, J. y Chávez-García, F.J. (1994). Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation?, *Bull. of the Seismological Society of America*, **84:5**, 1350-1364.
- Lermo, J., Martínez, J., Angulo, J., Zúñiga, A., Espinoza, L. (2011). Identificación de riesgos, peligros y vulnerabilidad ante fenómenos perturbadores de origen natural. Capítulo V del Atlas de Riesgos del municipio de Tecamachalco, Puebla, 2011. SEDESOL.
- Lermo, J., Mendoza, M., Ismael, E., Martínez, J., Angulo, J., Zúñiga, A., Espitia, G., Valle, R., Espinoza, L. (2012). Estudios sismológicos y de peligro sísmico para el desarrollo de las Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo del estado de Tlaxcala. Informe técnico.
- Lermo, J., Martínez-González J. y Sánchez-Sesma, F. (2013). Validación del factor de amplificación de los cocientes espectrales a partir de microtremores. *Memorias, XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Boca del Rio, Veracruz, México.*
- Lin, F.C., Moschetti, M., Ritzwoller, M. (2008). Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh and Love wave phase velocity maps. *Geophys. J. Int.*, **173**, 281 – 298, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03720.x.
- Martínez-González, J., Lermo, J., Ismael, E., Angulo-Carrillo, J. (2011). Efectos del hundimiento regional en los cambios de periodo dominante del suelo de la Cuenca de México: Propuesta de nuevos mapas para las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS). *Memorias, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes.*
- Martínez-González, J., Lermo, J., Sánchez-Sesma, F.J., Angulo-Carrillo, J., Valle-Orozco, R., Ordoñez-Alfaro, J. and Pérez-Rocha, L. (2012). Effects of the subsidence on the changes of dominant periods of soils within Mexico City valley. *Proc. of 15th World Conference on Earthquake Engineering.*
- Martínez-González, J., Lermo, J., Sánchez-Sesma, F.J., Ovando, E. (2014). Repercusión del hundimiento regional en la respuesta sísmica de la ciudad de México. El sismo de 1985, hoy. *Memorias, XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, Puerto Vallarta, Jalisco, México.*

- Méndez, E., Juárez, M., Pérez, D., and Auvinet, G. (2008). Evolución del hundimiento regional en el valle de México. *Memorias de la XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*. B, 377-384.
- Meneses, F. (1996). Proyecto de la instalación de la red de acelerógrafos de la ciudad de Tlaxcala (RACT). *Tesis profesional*. Universidad Autónoma de Puebla.
- Molnar, S., Cassidy, J.F. (2006). A Comparison of Site Response Techniques Using Weak-Motion Earthquakes and Microtremors. *Earthquake Spectra*, **22**, 169–188.
- Montalvo-Arrieta, J.C., Reinoso-Angulo, E., Sánchez-Sesma, F.J. (2002a). Observations of strong ground motion at hill zone sites in Mexico City from recent earthquakes. *Geofis. Int.* **41:1**, 1-13.
- Montalvo-Arrieta, J.C., Sánchez-Sesma, F.J., Reinoso-Angulo, E. (2002b). A virtual reference site for the Valley of Mexico. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **92:5**, 1847-1854.
- Mooser, F., Montiel, A., Zúñiga, A. (1992). Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla-estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos. Comisión Federal de Electricidad, México.
- Mooser, F. (2013). Comunicación personal.
- Mucciarelli, M. (1998). Reliability and applicability range of the Nakamura's technique. *Journ. Earthq. Eng.* **2:4**, 625-638.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute*, **30:1**, 25-30.
- Navarro, J. (2000). Estudio de mecánica de suelos de superficie en el zoológico de Tlaxcala, Tlax. para el diseño de la cimentación del auditorio de usos múltiples. Empresa privada.
- Nogoshi, M. & Igarashi T., 1971. On the amplitude characteristics of microtremor (part 2) (in Japanese with english abstract). *J. of seism. Soc. of Japan*, **24**, 26-40.
- Olsen, K.B. and Mayhew, E. (2010). Goodness-of-fit criteria for broadband synthetic seismograms, with application to the 2008 Mw5.4 Chino Hills, California, earthquake. *Seismological Research Letters* **81:5**, 715-723.
- Ordaz, M., and Singh, S.K. (1992). Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City. *Bull. Seism. Soc. Am.* **82**, 24–43.
- Ordoñez-Alfaro, J. (2013). Zonificación sísmica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería*, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ovando-Shelley, E., Romo, M. P., Contreras, N. y Giralto, A. (2003). Some implications of the Future evolution of Central Mexico City's subsoil properties due to water pumping, *Geofísica Internacional* **42:2**, 185-204.
- Ovando-Shelley, E., Ossa A., and Romo M. (2007). The sinking of Mexico City: its effect on soil properties and seismic response. *Soil Dyn Earthquake Eng* **27**, 333-343.
- Pacheco, J.F., and Singh, S.K. (1995). Estimation of ground motions in the valley of Mexico from normal-faulting, intermediate-depth earthquakes in the subducted Cocos plate. *Earthquake Spectra* **2**, 233–247.
- Ramos-Zuñiga, L., Montalvo-Arrieta, J., Pérez-Campos, X., Valdés-González, C. (2012). Seismic characterization of station LNIG as a reference site in North-east Mexico. *Geofis. Int.* **51:2**, 187-197.
- Reinoso, E., and Ordaz, M. (1999). Spectral ratios for Mexico City from free-field recordings. *Earthquake Spectra* **15**, 273–295.

Riquer-Trujillo, G., Leyva-Soberanis, R., Williams-Linera, F., Franyutti-Limón, D.J., Rivera-Baizabal, R., Lermo-Samaniego, J., Vargas-Colorado, A., Pérez-Torres, S., Zamora-Hernández, A. (2013). Efecto de sitio en la ciudad de Jáltipan, Veracruz. *Memorias, XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Boca del Rio, Veracruz, México.

Rosenblueth, E., Singh, K., Ordaz, M. y Sánchez-Sesma, F, 1987, Espectros de diseño para el Distrito Federal, en Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A.C., p. A1-A17.

Sánchez-Sesma, F., Singh, S. K. (1986). Un programa de computadora para el cálculo de espectros de respuesta en formaciones estratificadas. *Proyecto de investigación Centro de Investigación sísmica Fundación Javier Barros Sierra AC*.

Sánchez-Sesma, F., Rodríguez, M., Iturrarán-Viveros, U., Luzón, F., Campillo, M., Margerin, L., García-Jerez, A., Suarez, M., Santoyo, M. and Rodríguez-Castellanos, A. (2011). A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium. *Geophys. J. Int.* **186**, 221–225.

Sandoval, H., Alcántara, L., Arroyo, D., Delgado, M.R., Ordaz, M., Perez, C, Quiroz, A. y Ruiz, A. Generación de mapas de intensidades sísmicas en tiempo real para el territorio nacional. *Gaceta del Instituto de Ingeniería, UNAM* 78, marzo 2012, 14-16

SECODUVI (2000). Problemáticas y prácticas de la descentralización. Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda.

Seed, HB., Wong, RT., Idriss IM. and Tokimatsu, K. (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils, *J. Geotech. Eng.* **112:11**:1016–1032.

SESAME. (2005). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation.

Singh, S. K., Lermo, J., Domínguez, T., Ordaz, M., Espinosa, J. M., Mena E. and Quaas, R. (1988). The Mexico Earthquake of September 19, 1985—A Study of Amplification of Seismic Waves in the Valley of Mexico with Respect to a Hill Zone Site. *Earthquake Spectra* **4:4**, 653-673.

Semblat, J.F., Kham, A., Parara, E., Bard, P., Pitilakis, K., Makra, K., Raptakis, D. (2005). Seismic wave amplification: Basin geometry vs soil layering. *Soil Dyn Earthquake Eng* **25 (7-10)**, 529-538

Singh, S.K., Mena, E., Castro, R. (1988). Some aspects of the source characteristics and ground motion amplification in and near Mexico City from acceleration data of the September 1985, Michoacan, Mexico Earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.* **78**, 451–477.

Singh, S.K., Quaas, R., Ordaz, M., Mooser, F., Almora, D., Torres, M., Vásquez, R. (1995). Is there truly a hard rock site in the valley of Mexico?. *Geophys. Res. Lett.* **22**, 481–484.

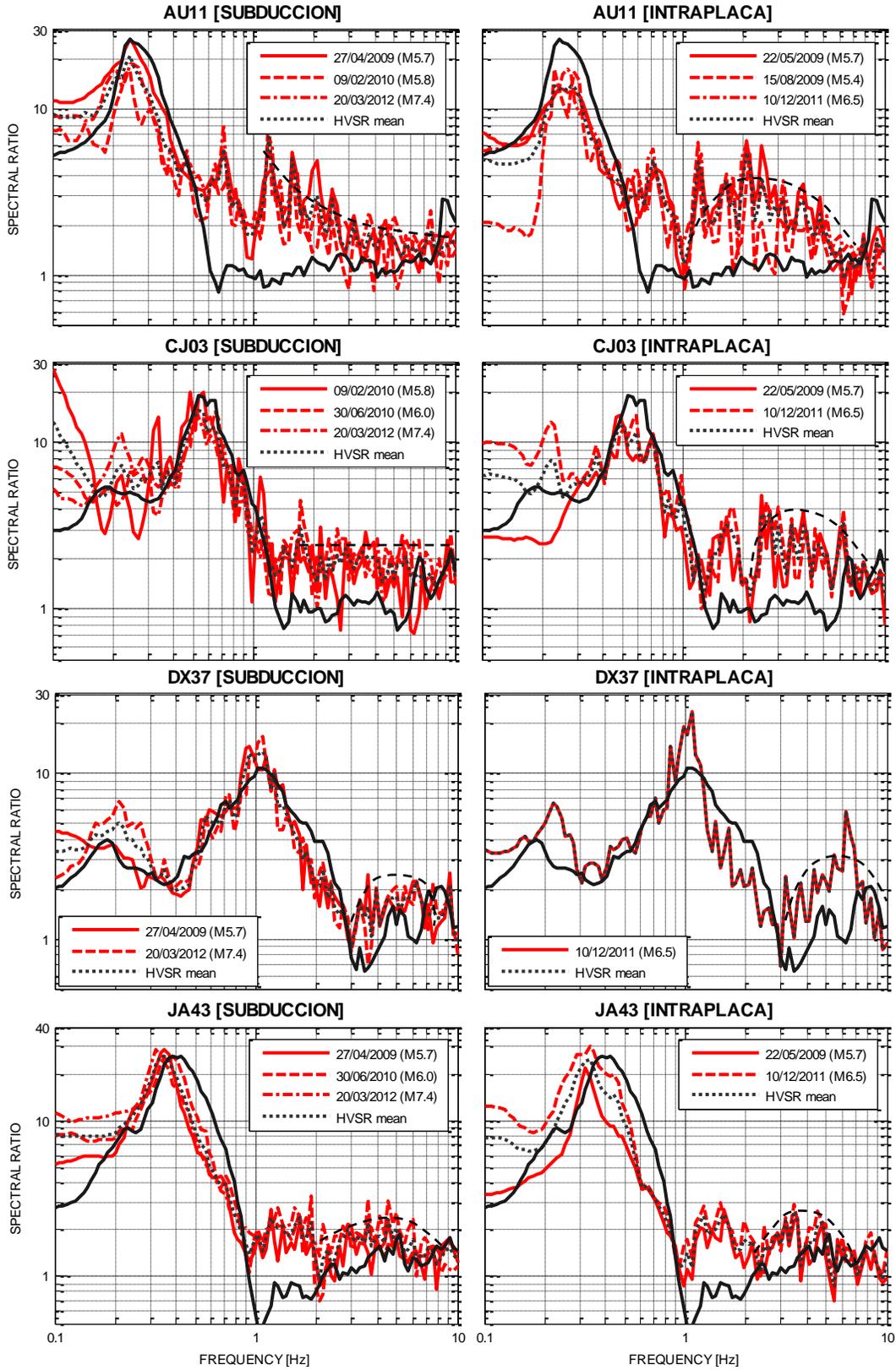
Thomson, W. T. (1950). Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *J. Appl. Phys.* **21**, 89-93.

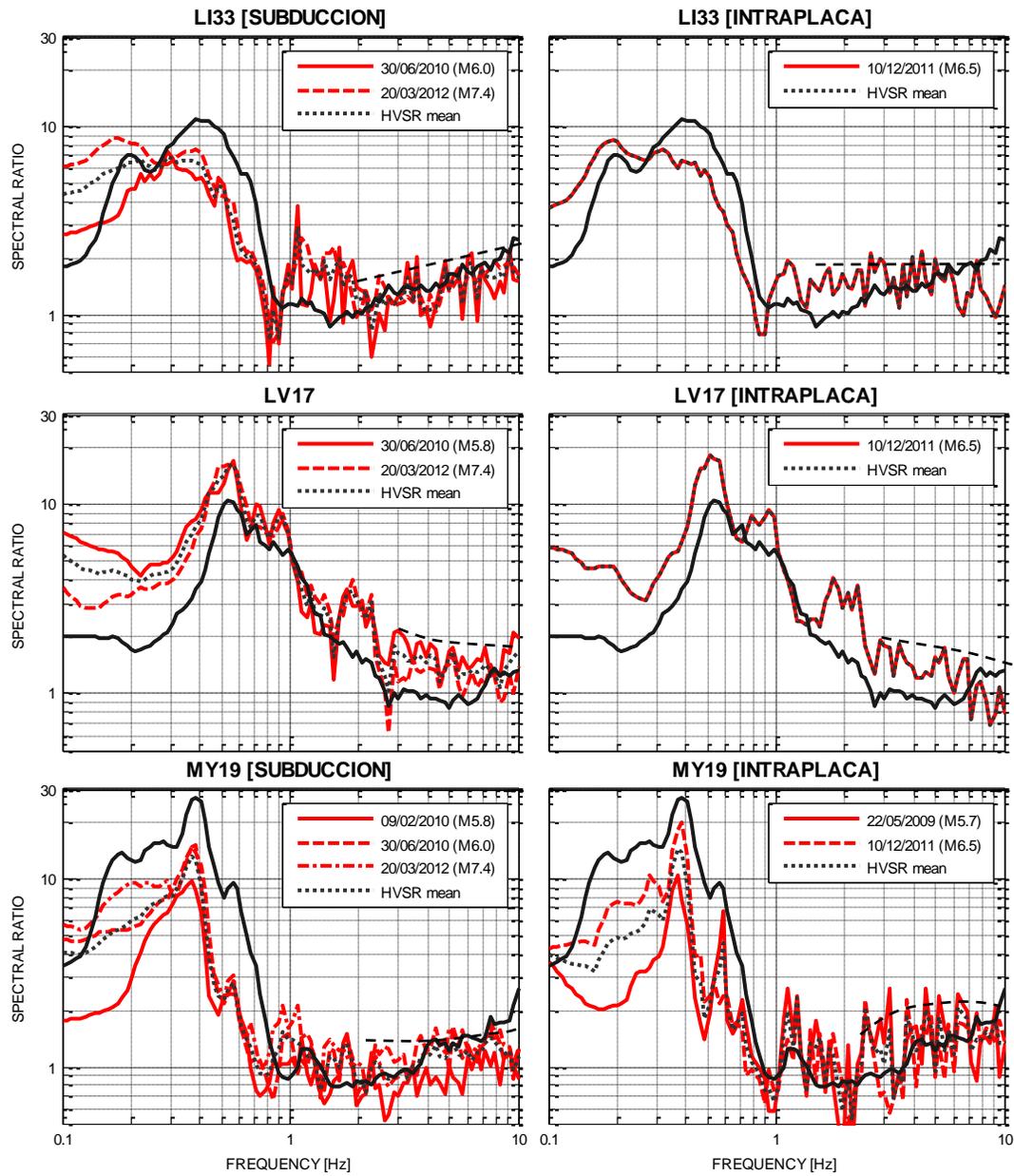
Urbina, F., Camacho, H. (1913). La zona megasísmica Acambay-Tixmadejé, Estado de México, conmovida el 19 de noviembre de 1912. *Boletín del Instituto Geológico de México* **32**, 125 p.

Zúñiga-Arista, Ángel R. (2014). Comunicación personal.

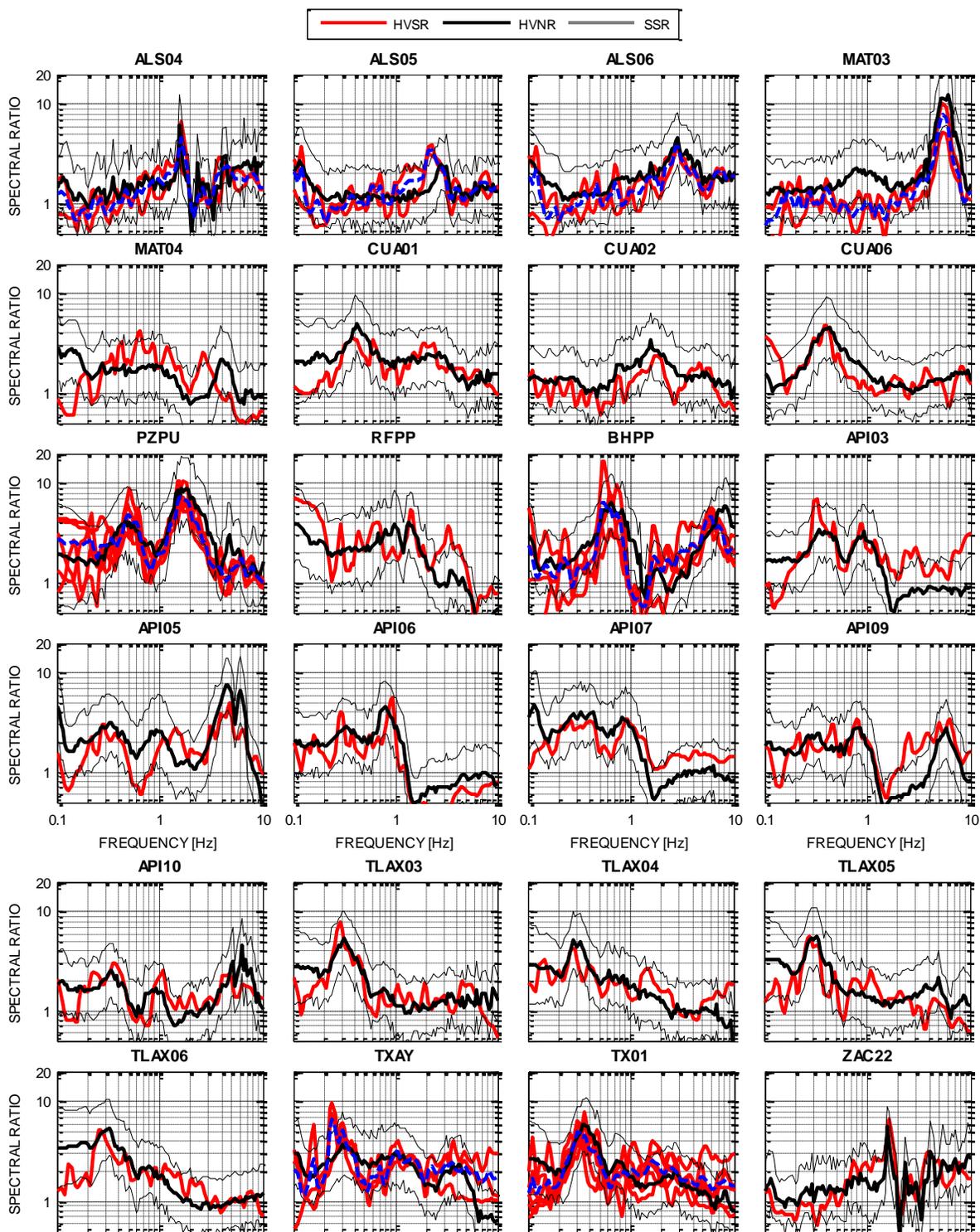
ANEXOS

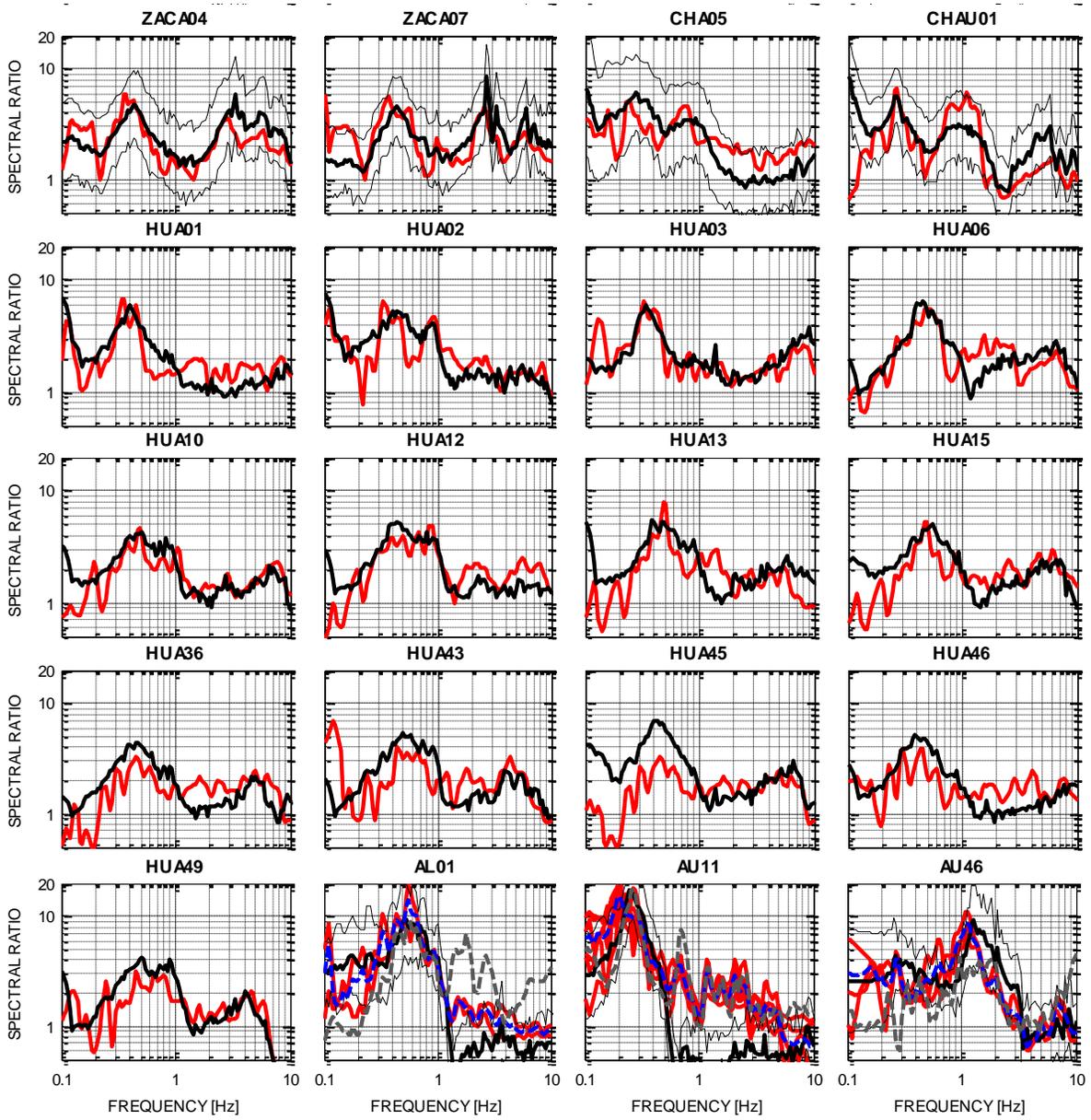
ANEXO A

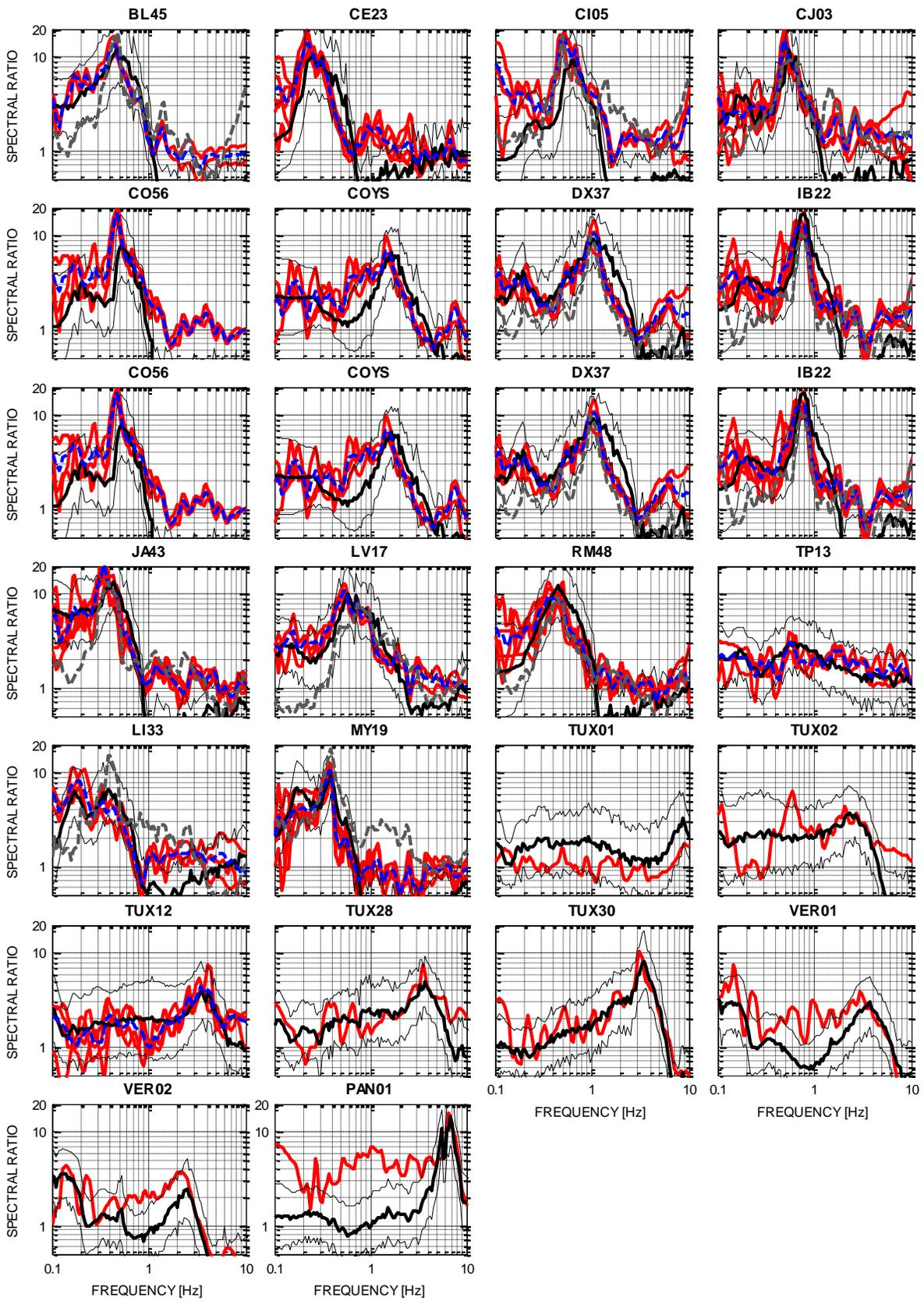




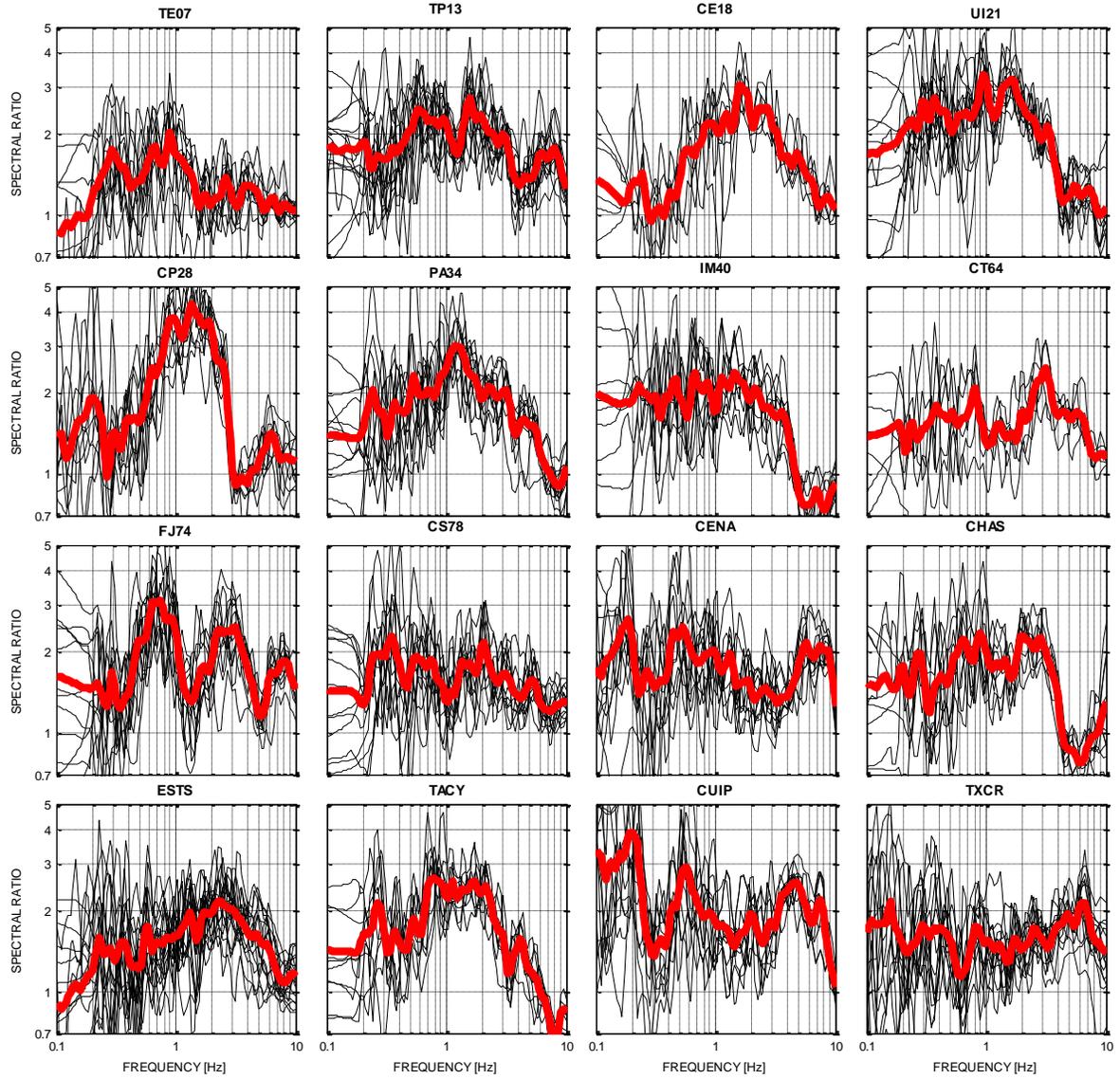
ANEXO B





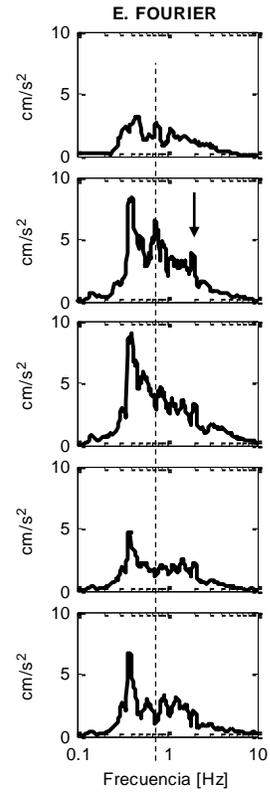
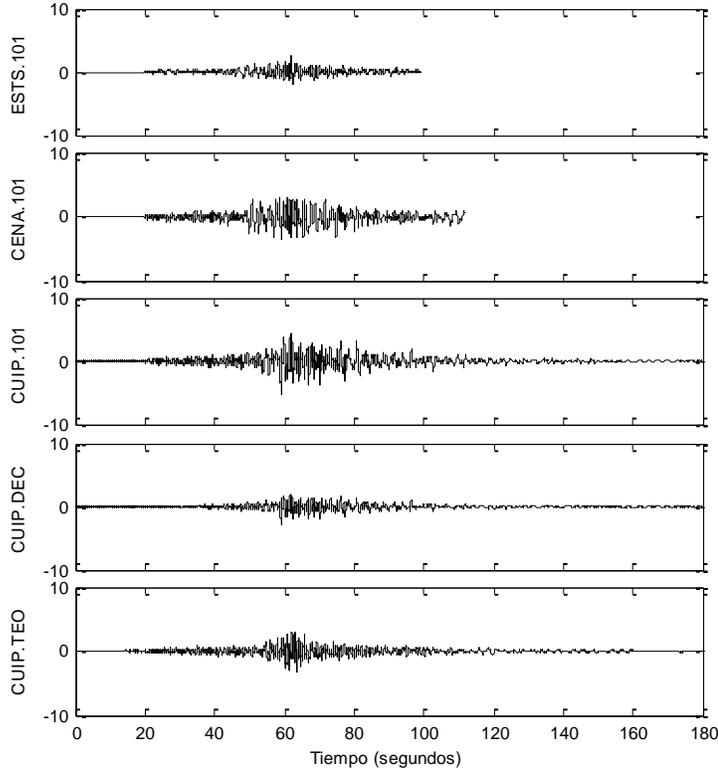


ANEXO C

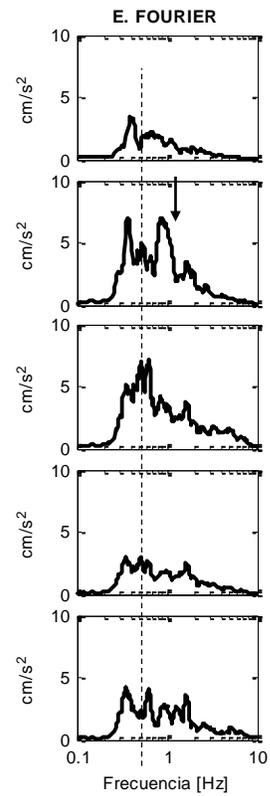
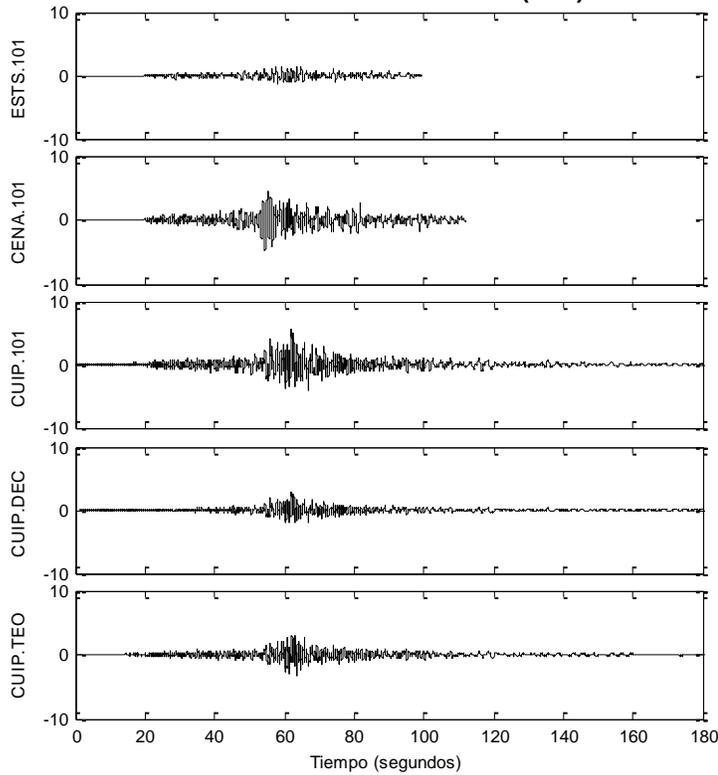


ANEXO D

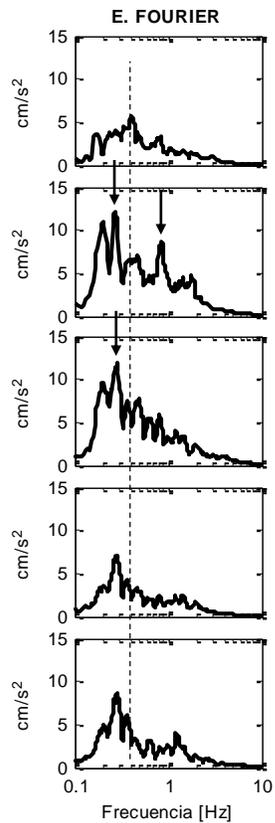
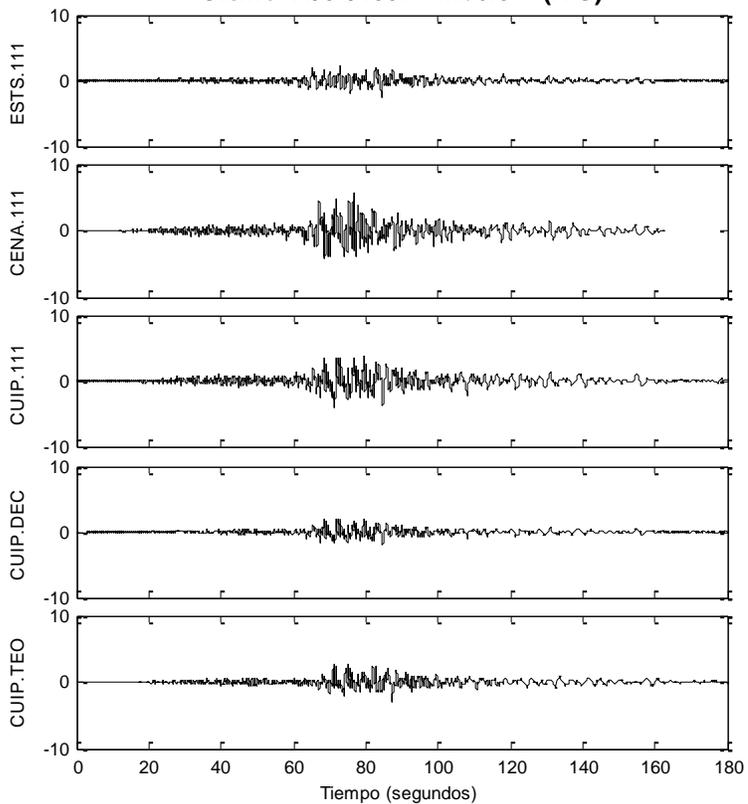
Sismo 10/12/1994 Mc6.3 (N-S)



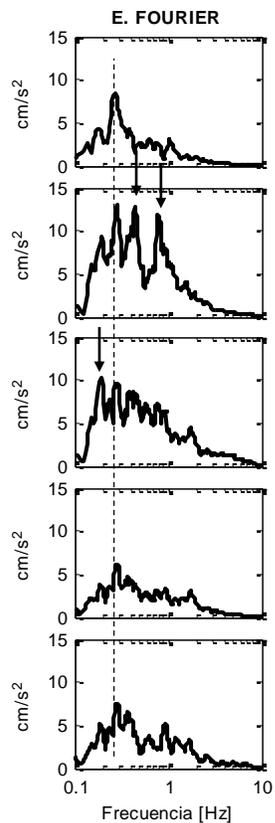
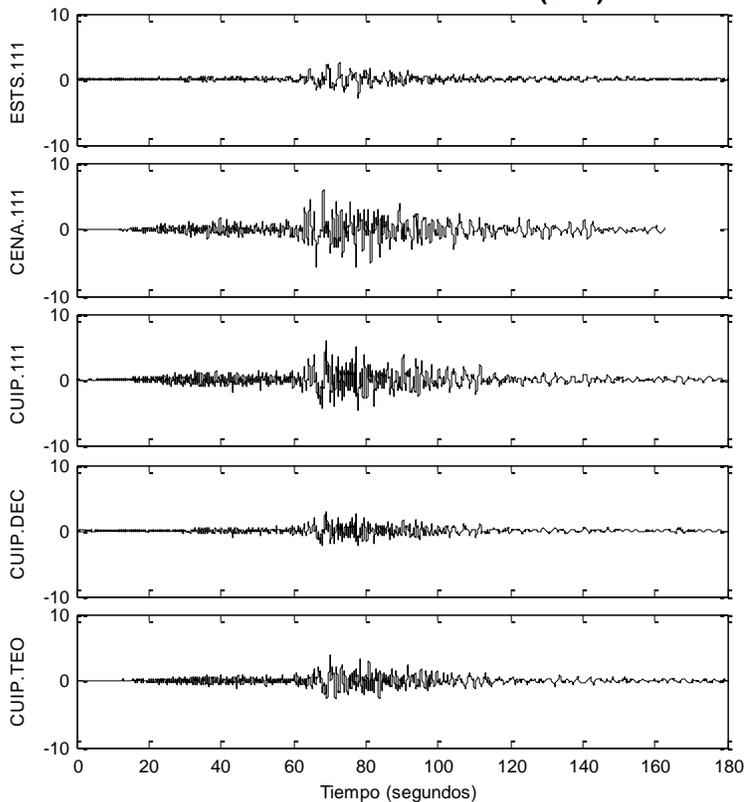
Sismo 10/12/1994 Mc6.3 (E-W)



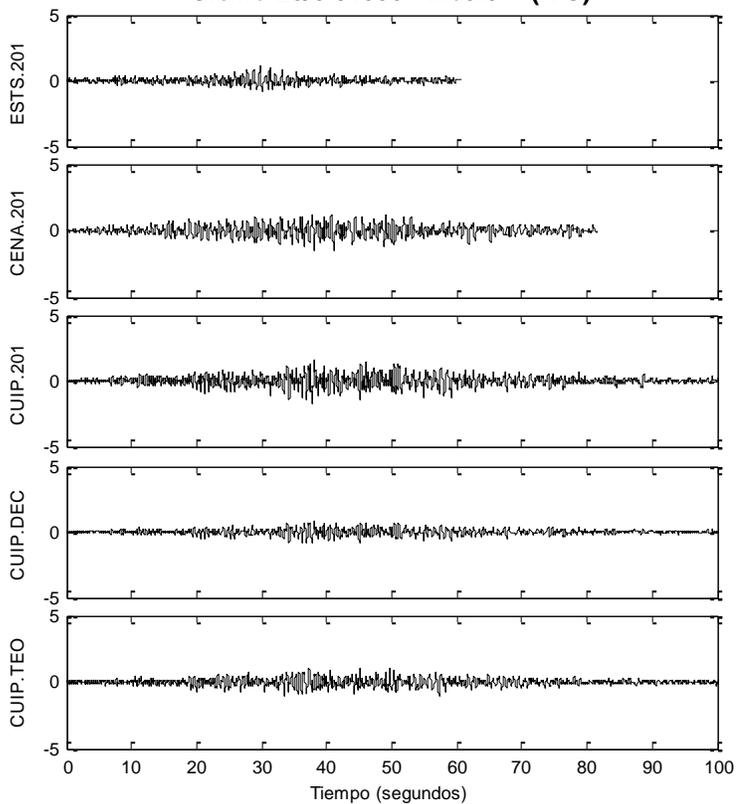
Sismo 11/01/1997 Mb6.5 (N-S)



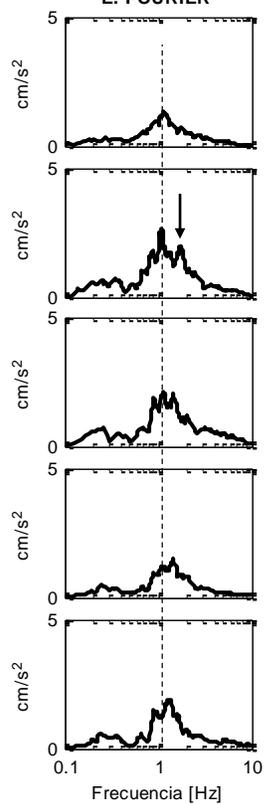
Sismo 11/01/1997 Mb6.5 (E-W)



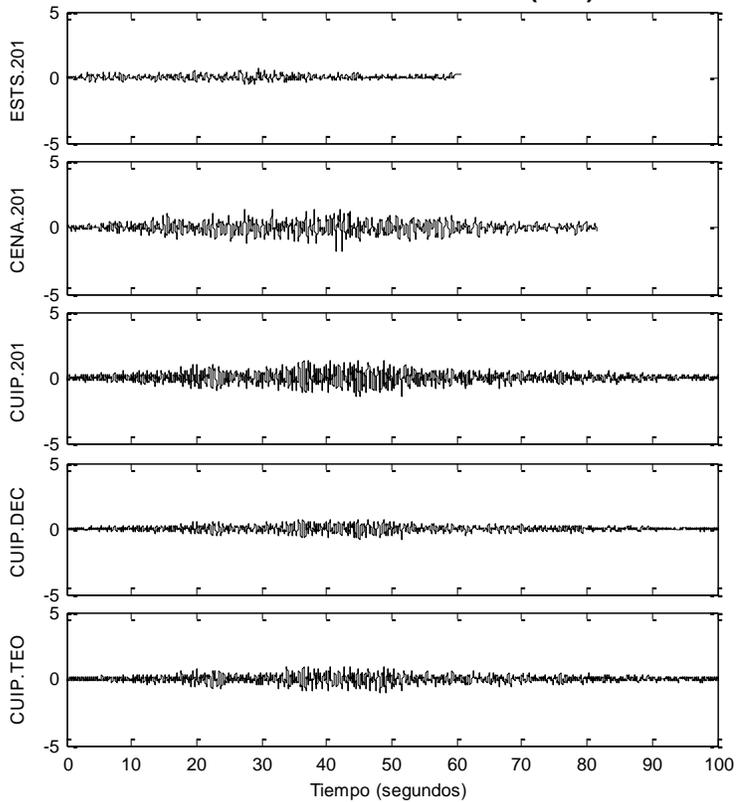
Sismo 20/04/1998 Mc5.0 (N-S)



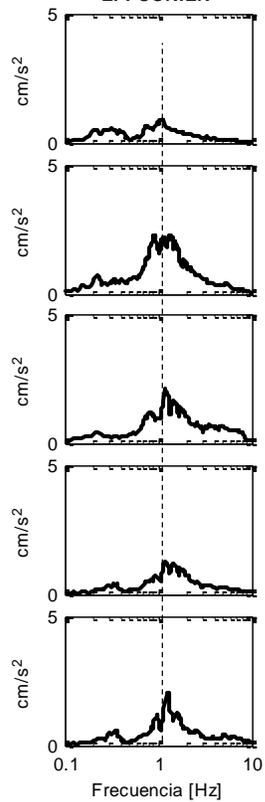
E. FOURIER

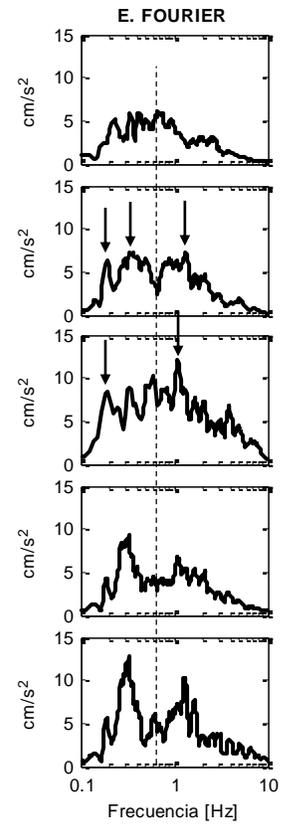
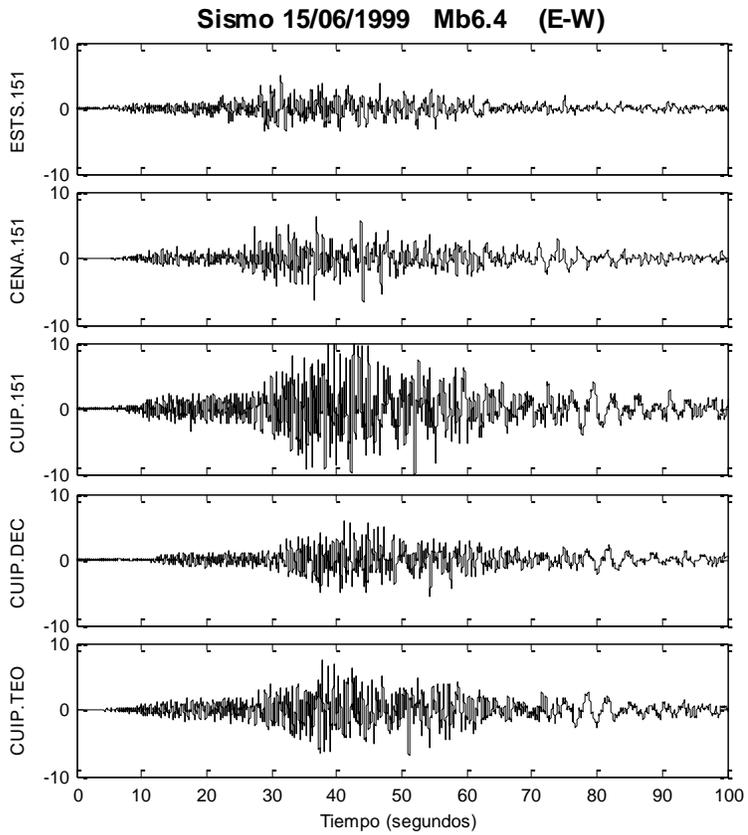
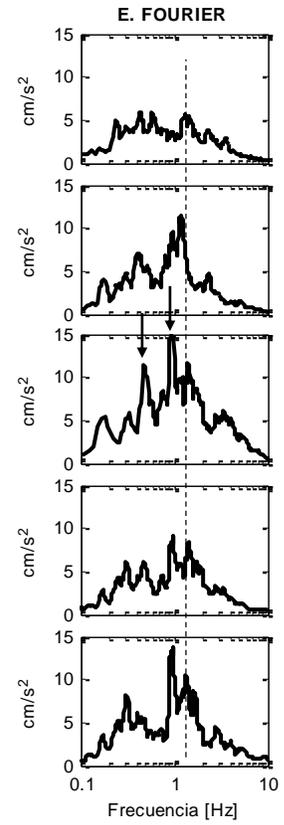
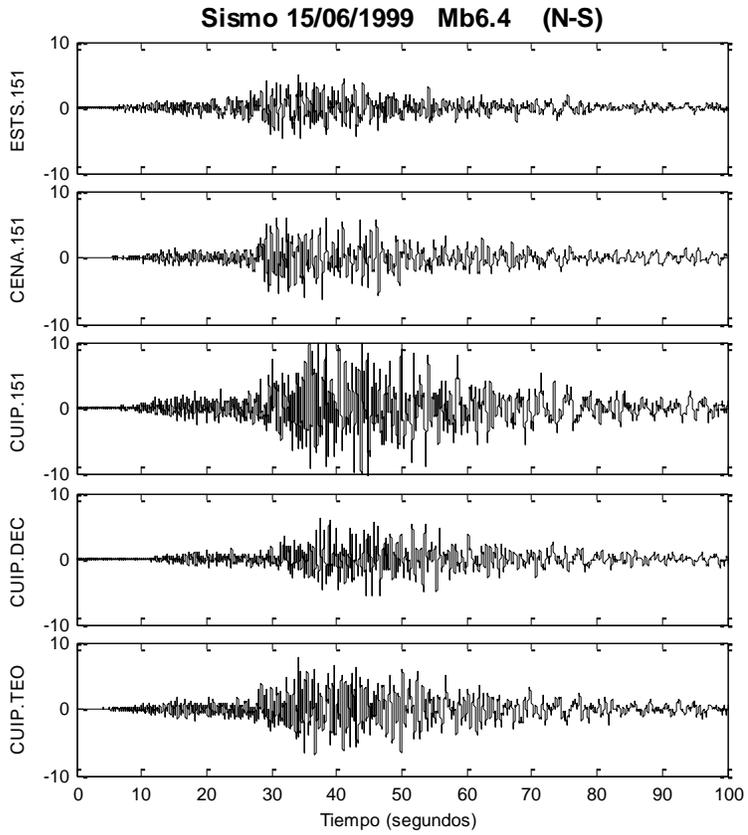


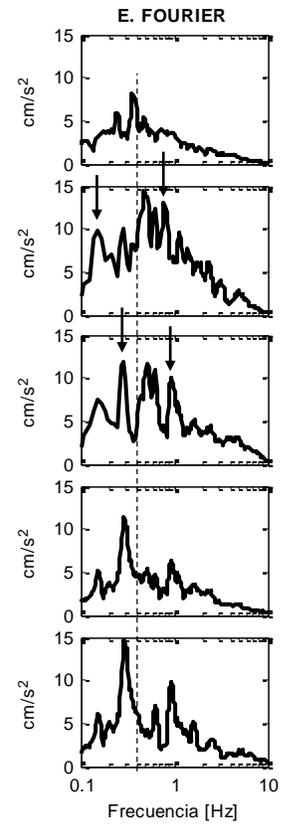
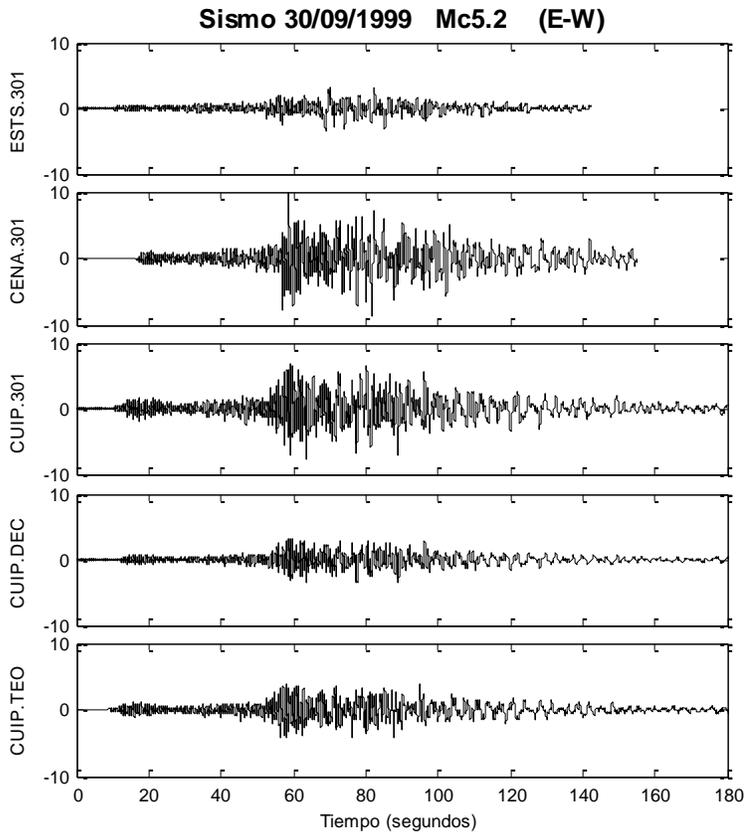
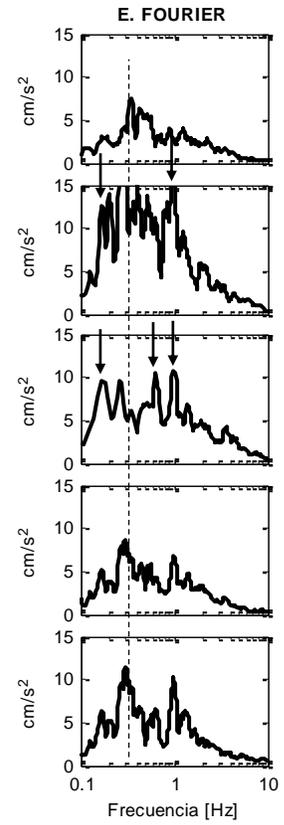
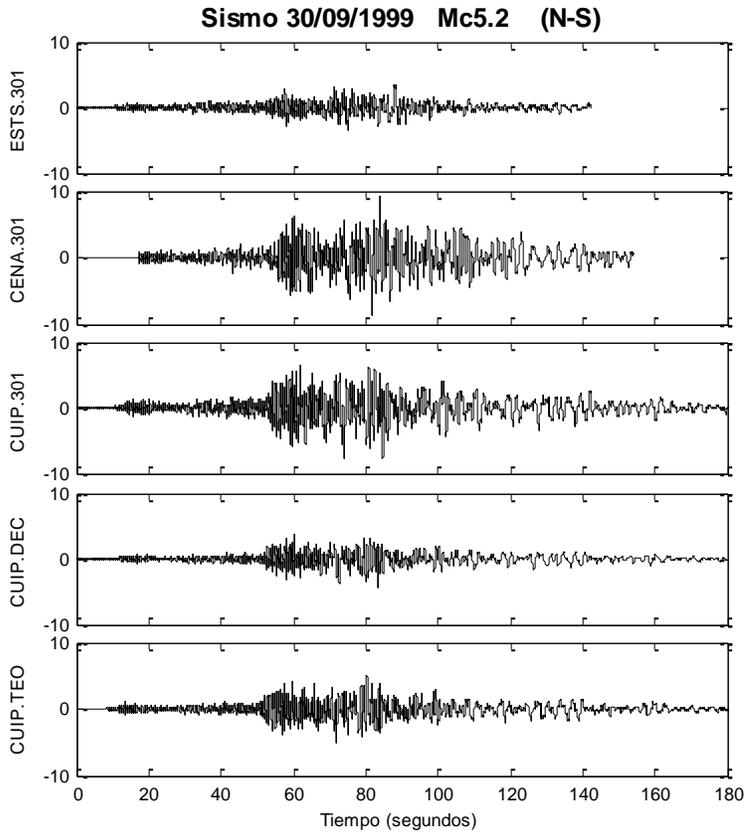
Sismo 20/04/1998 Mc5.0 (E-W)



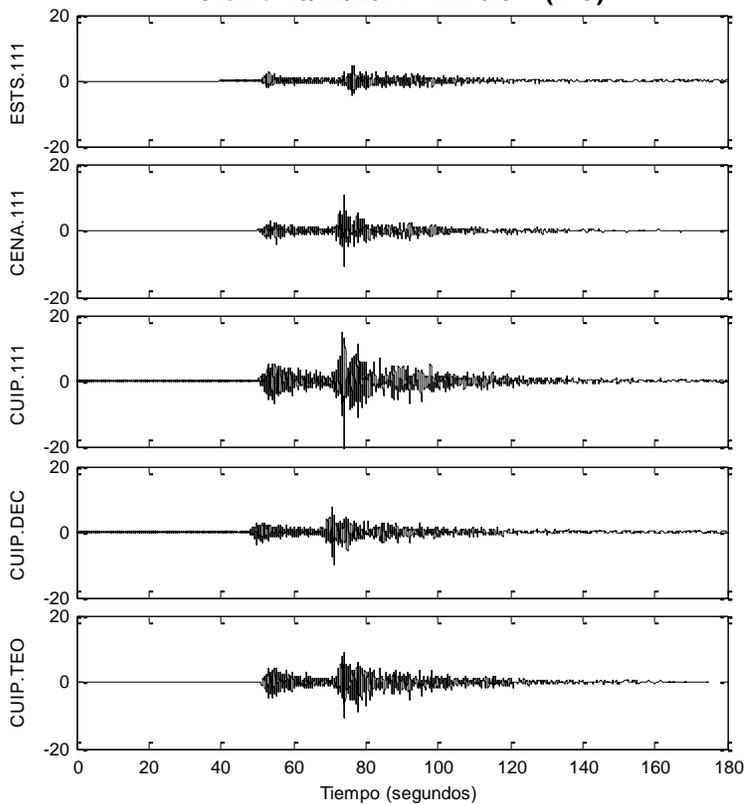
E. FOURIER



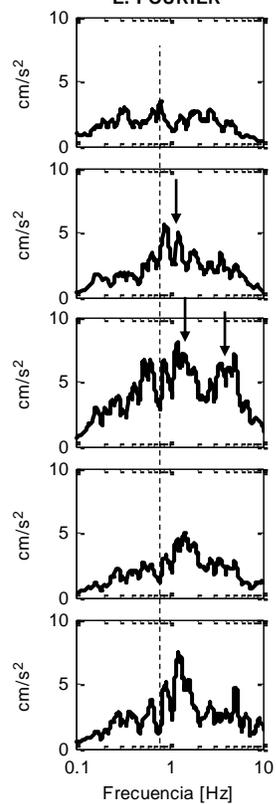




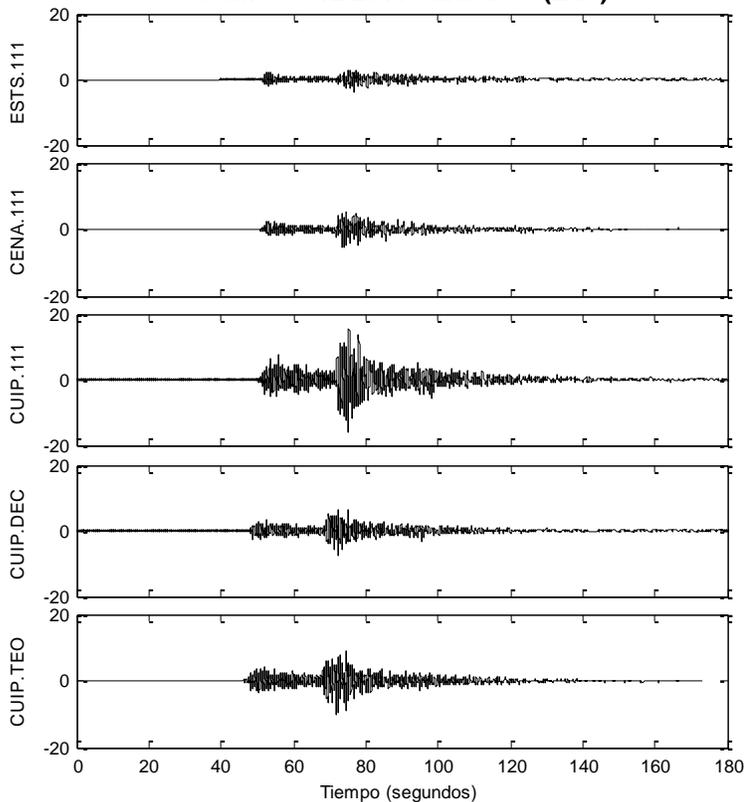
Sismo 10/12/2011 Mw6.5 (N-S)



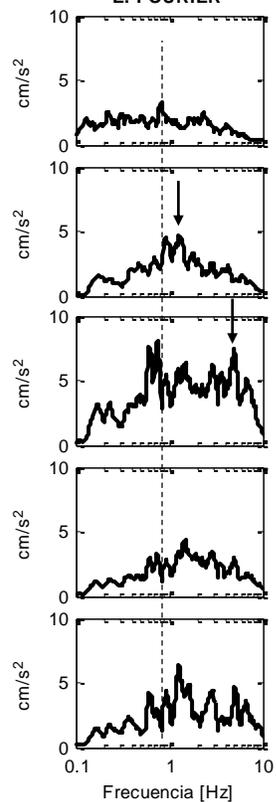
E. FOURIER



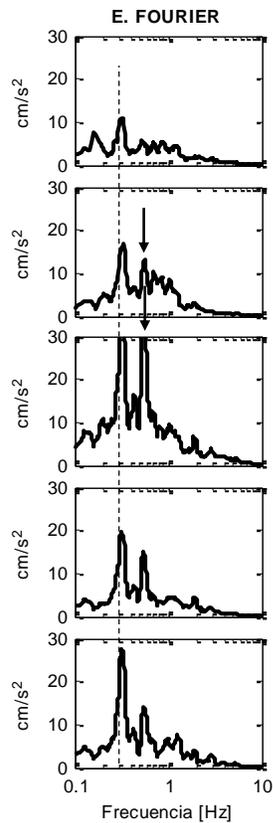
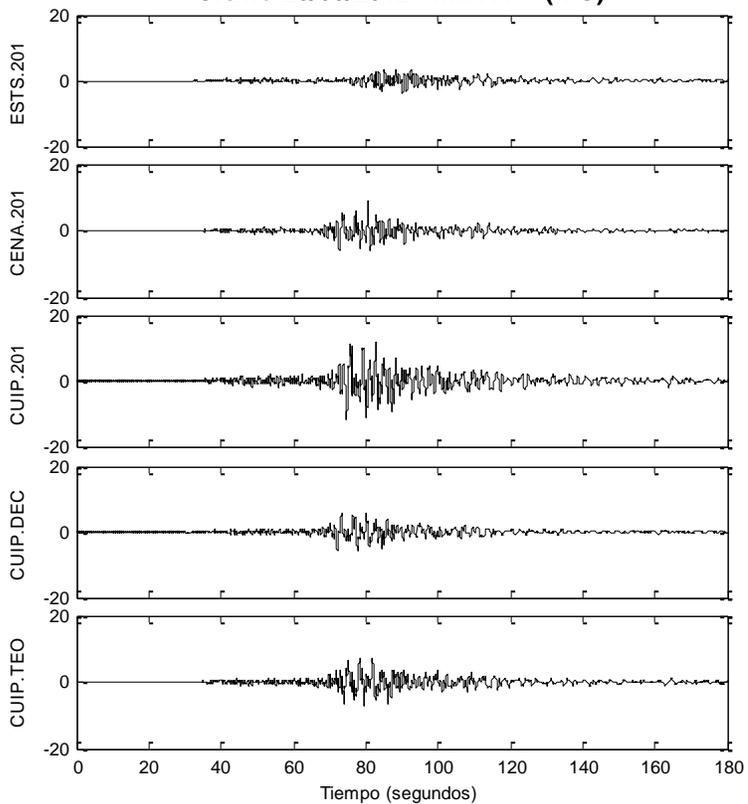
Sismo 10/12/2011 Mw6.5 (E-W)



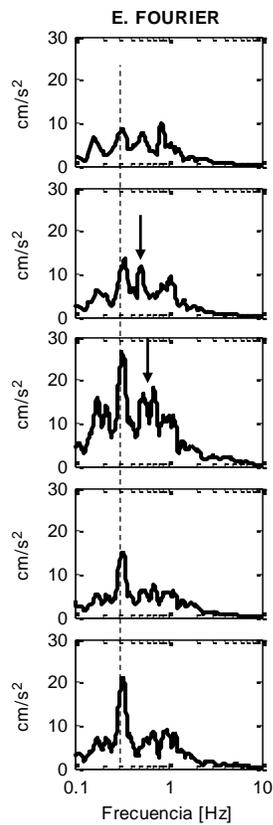
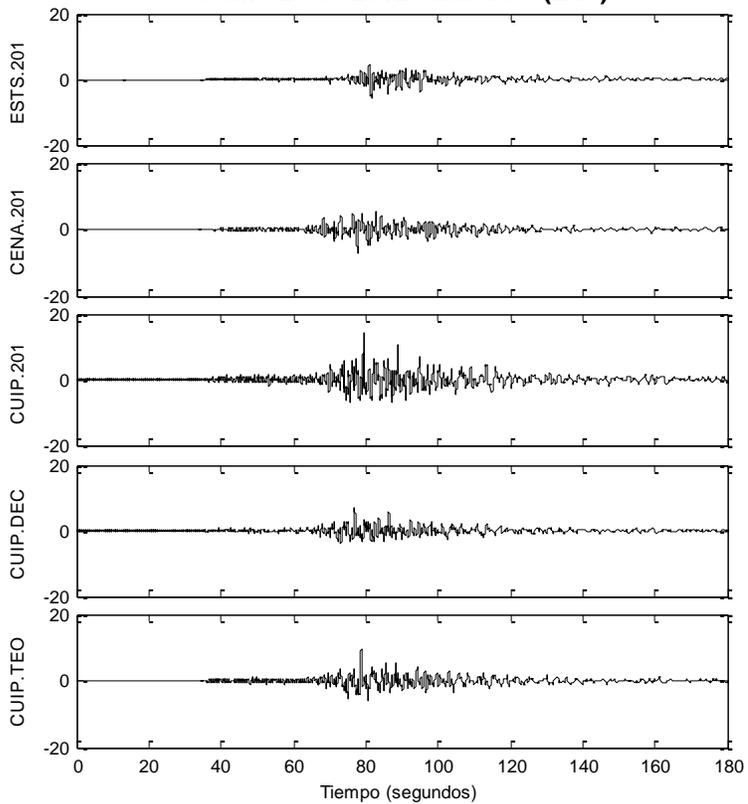
E. FOURIER



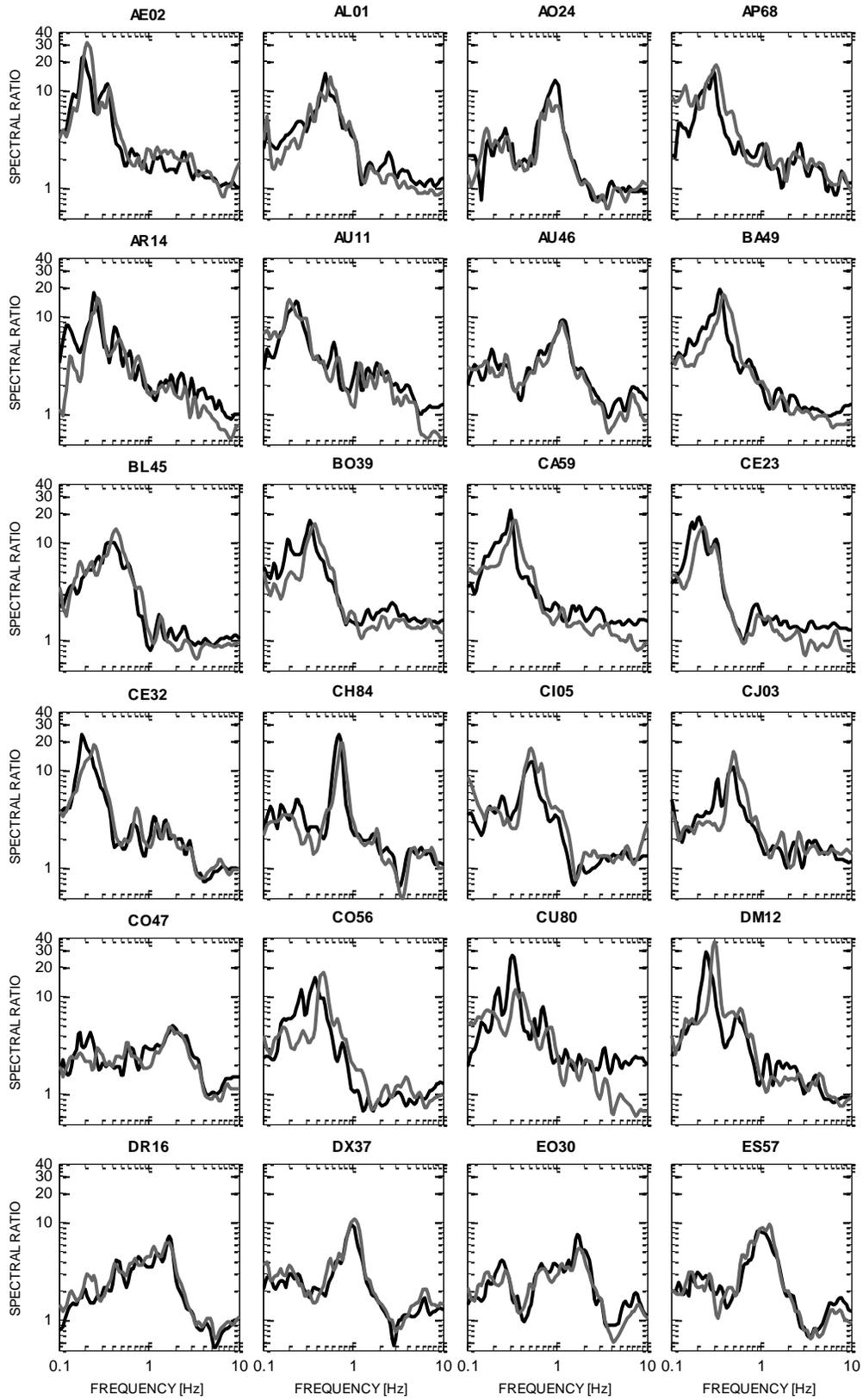
Sismo 20/03/2012 Mw7.4 (N-S)

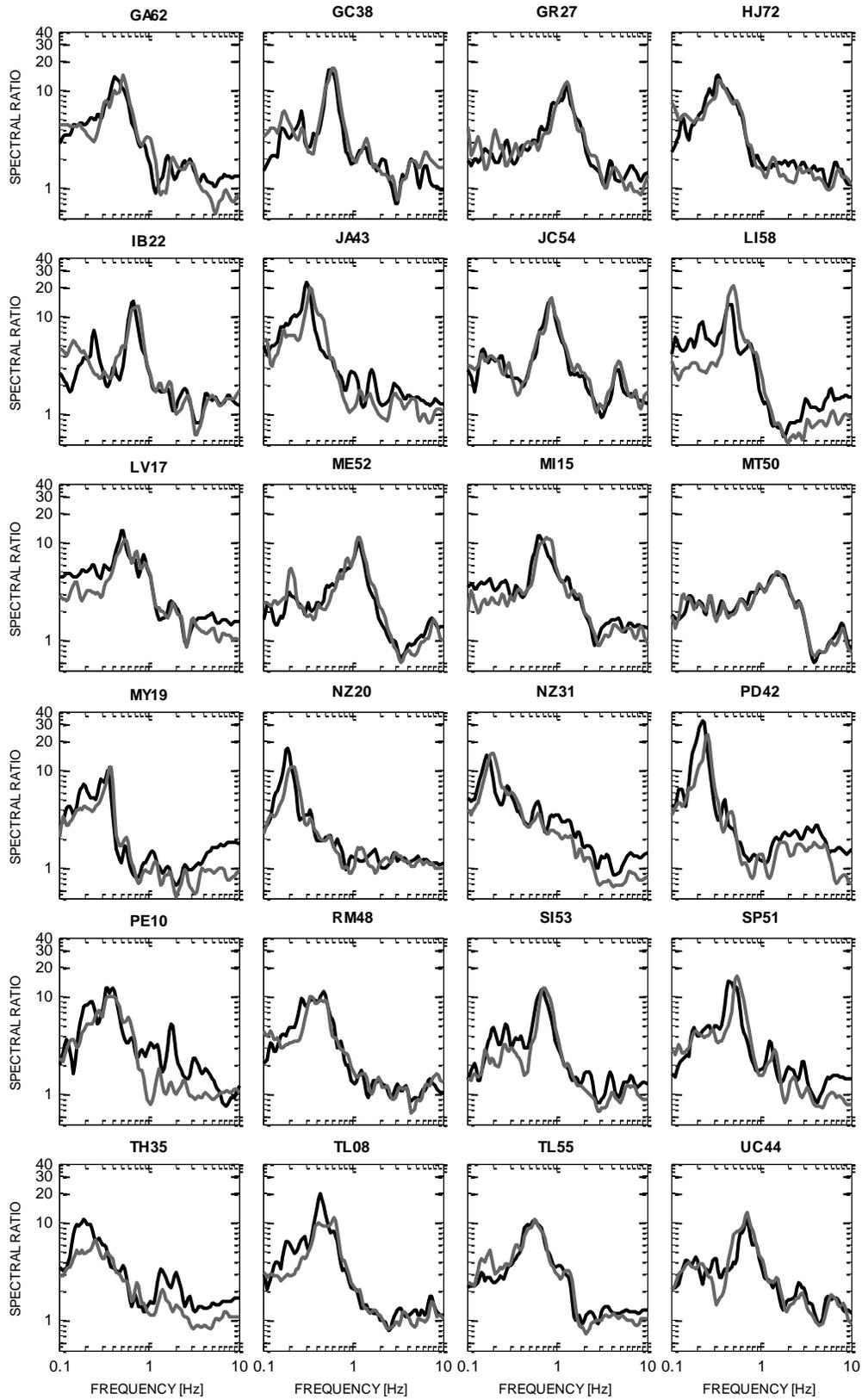


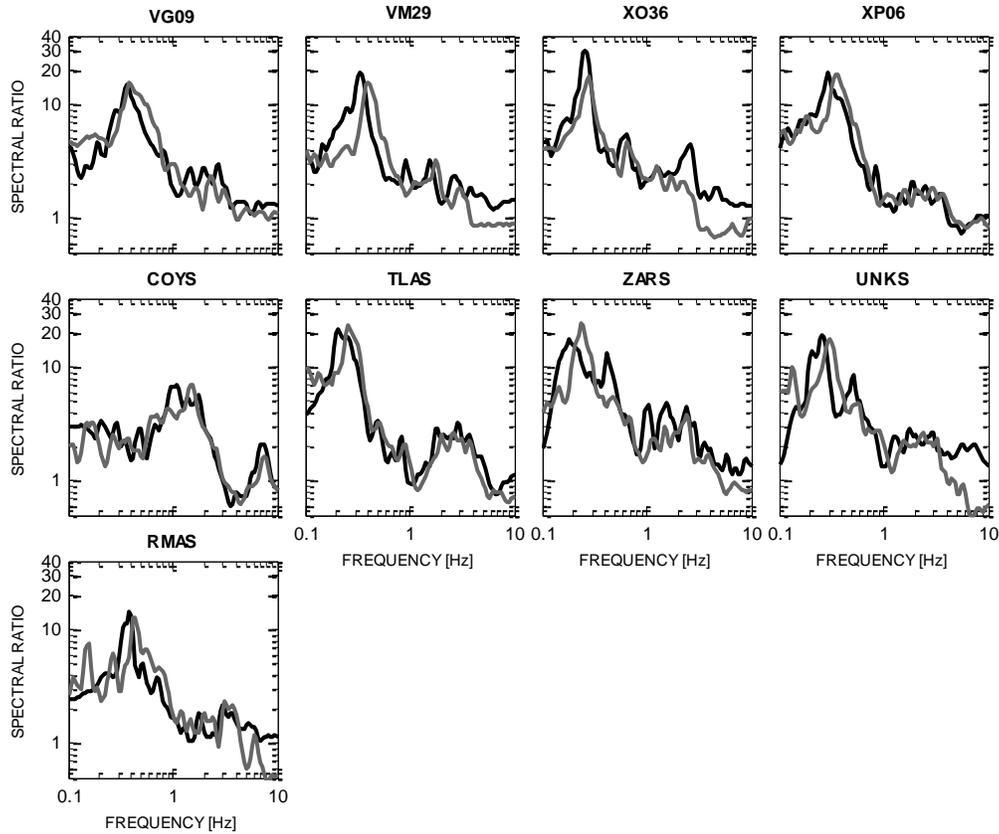
Sismo 20/03/2012 Mw7.4 (E-W)



ANEXO E

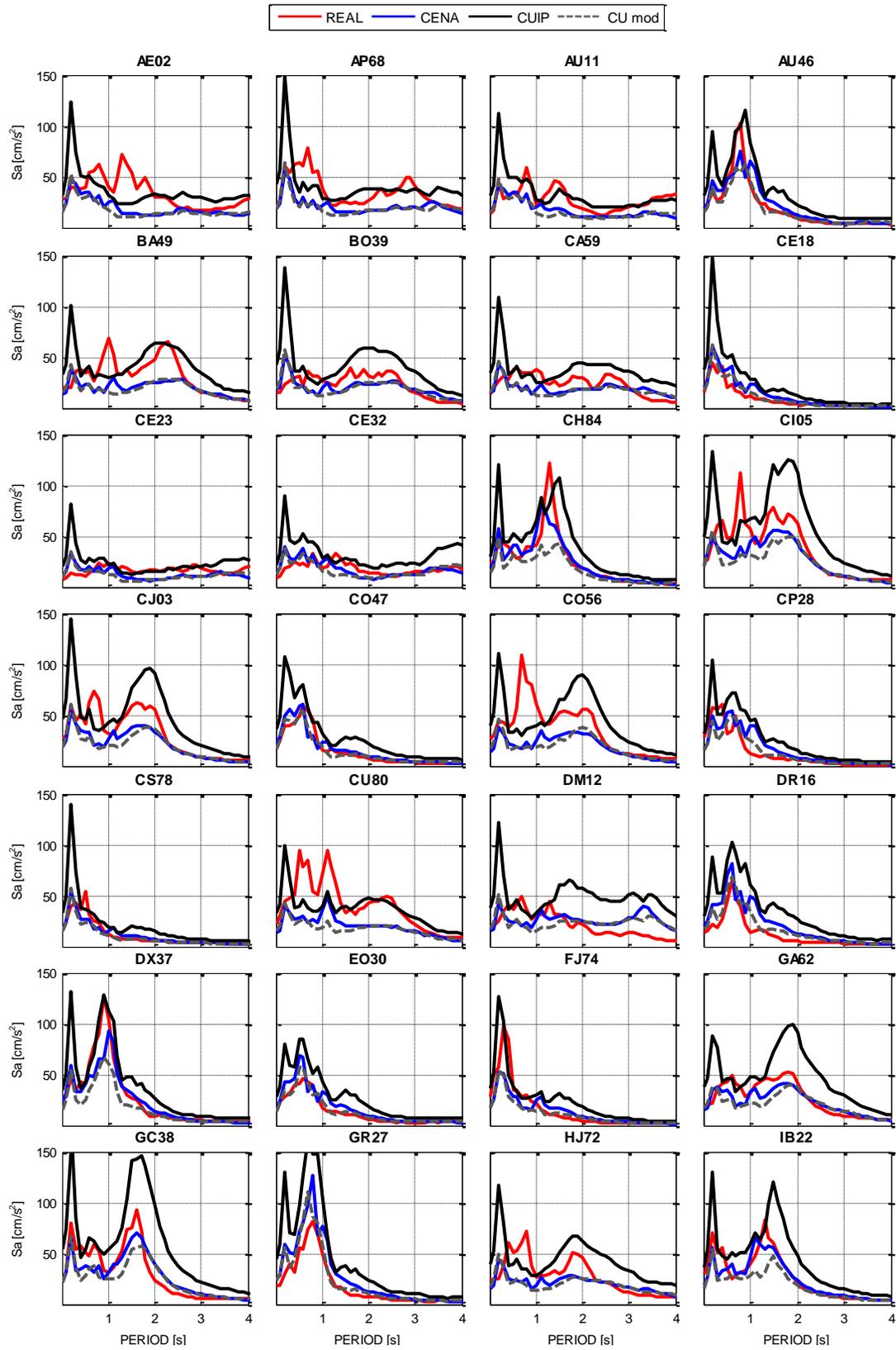


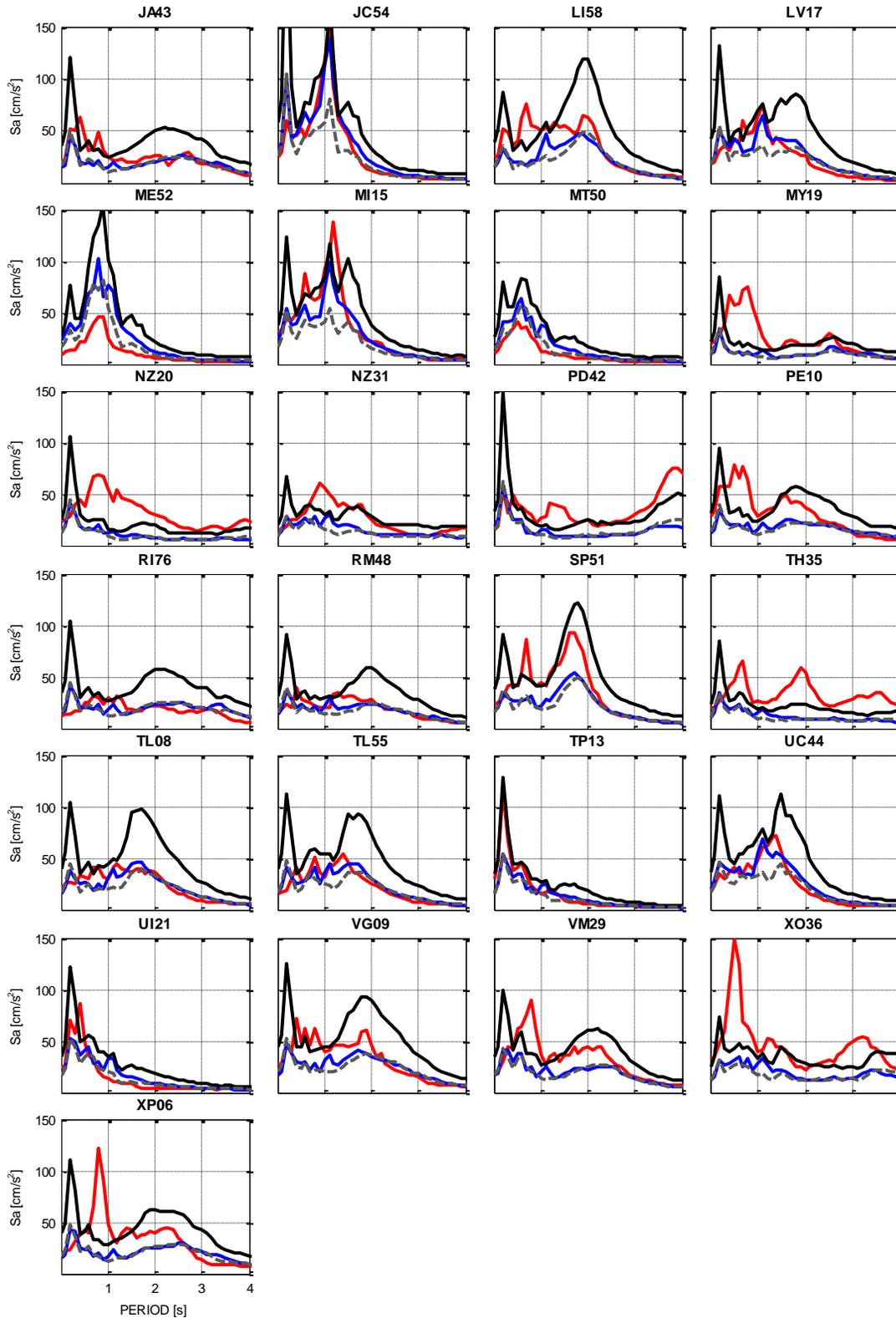




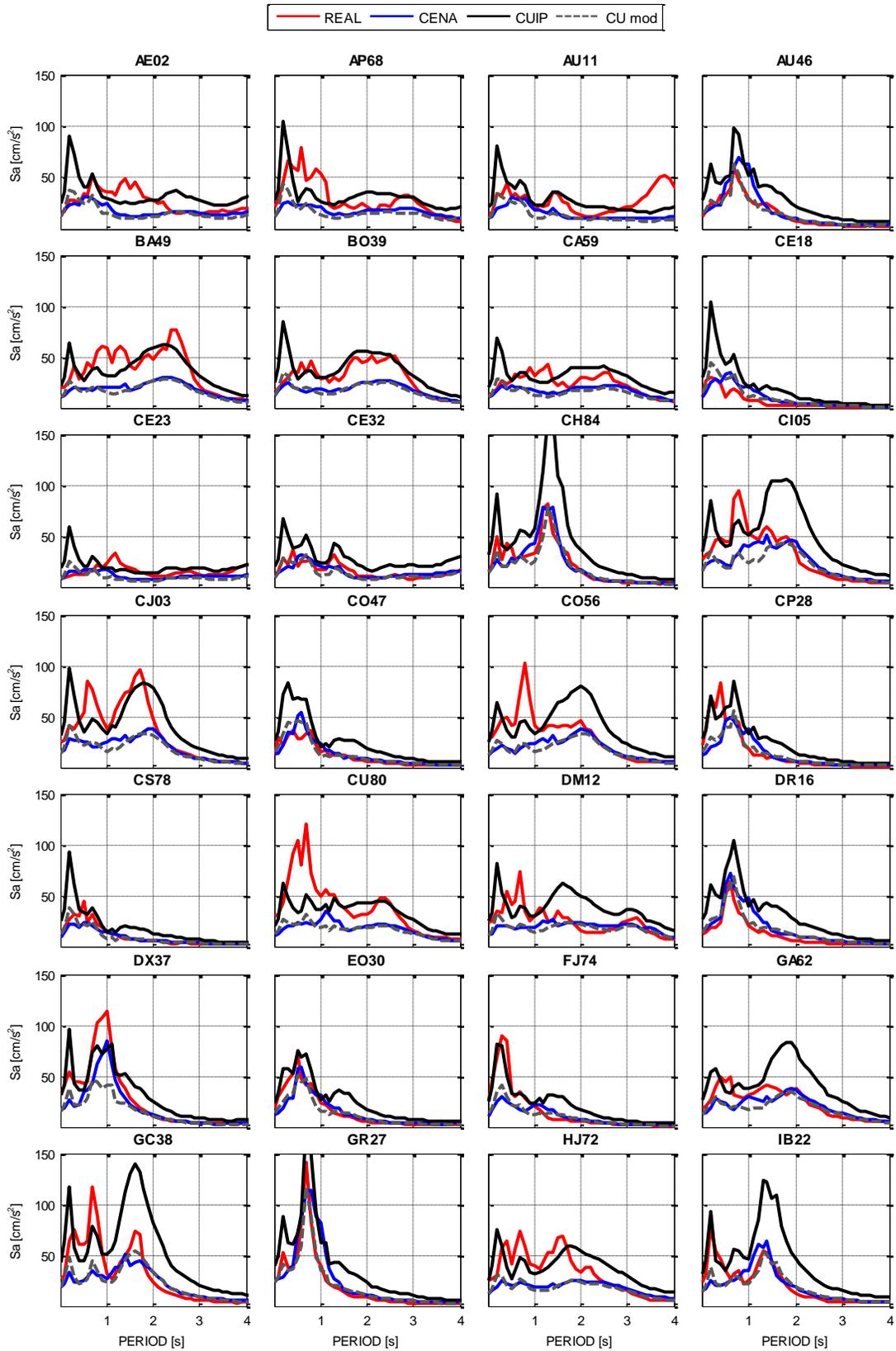
En esta imagen se presentan algunos cocientes espectrales promedio calculados para la Red Acelerográfica de la ciudad de México (RACM) mediante la técnica de Nakamura (HVSr); que sirvieron para cálculo de los espectros de respuesta en aceleración. En línea negra se presenta el cociente promedio para las propiedades dinámicas del suelo de entre 1990 – 1993, calculadas con registros de eventos entre 1990 – 1993. En línea gris se presentan el cociente espectral promedio para las condiciones actuales, calculadas con registros de eventos ocurridos entre 2010 – 2012. En estas graficas se observa un corrimiento hacia la derecha de los cocientes, provocado por el efecto del hundimiento regional de los últimos 20 años.

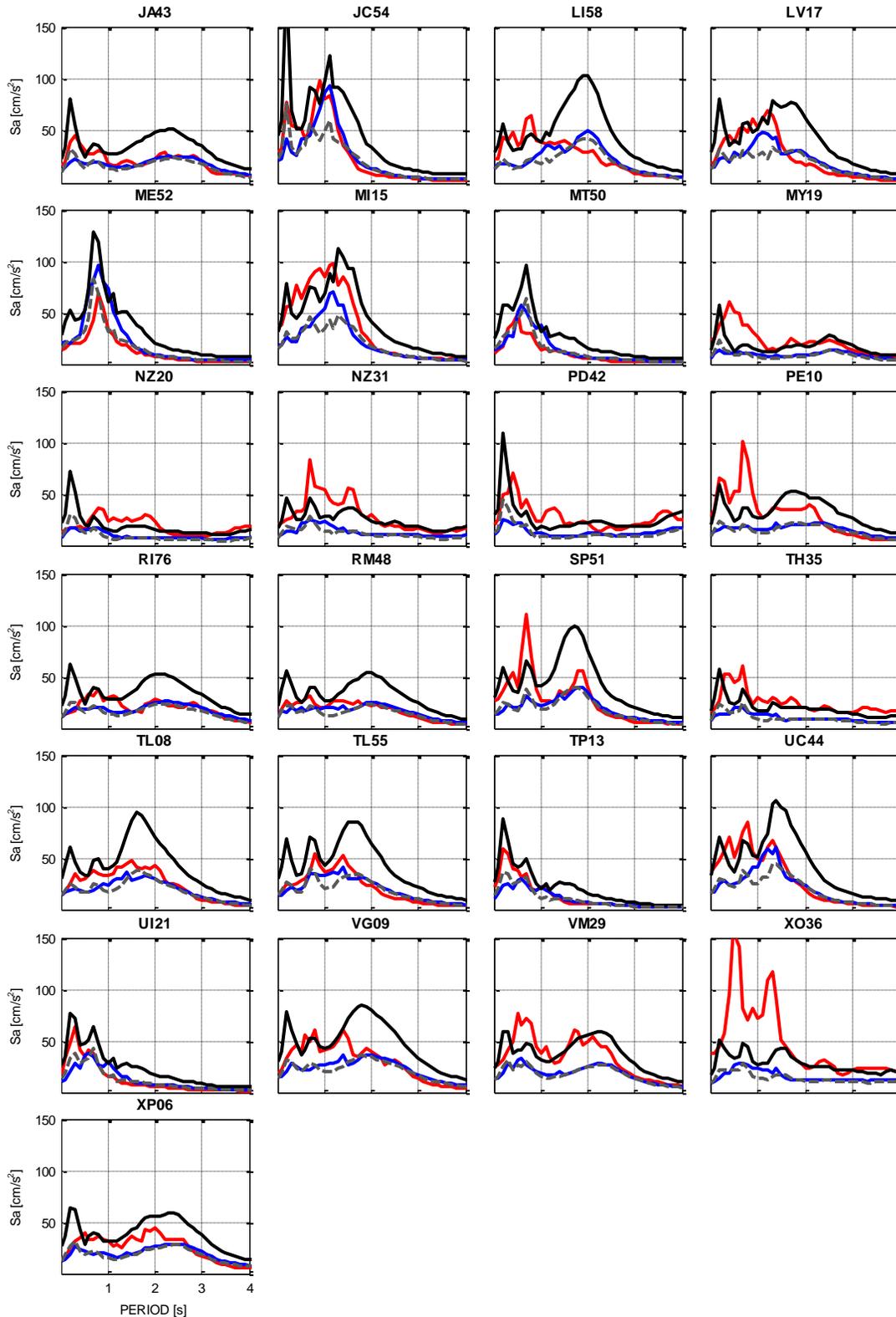
ANEXO F



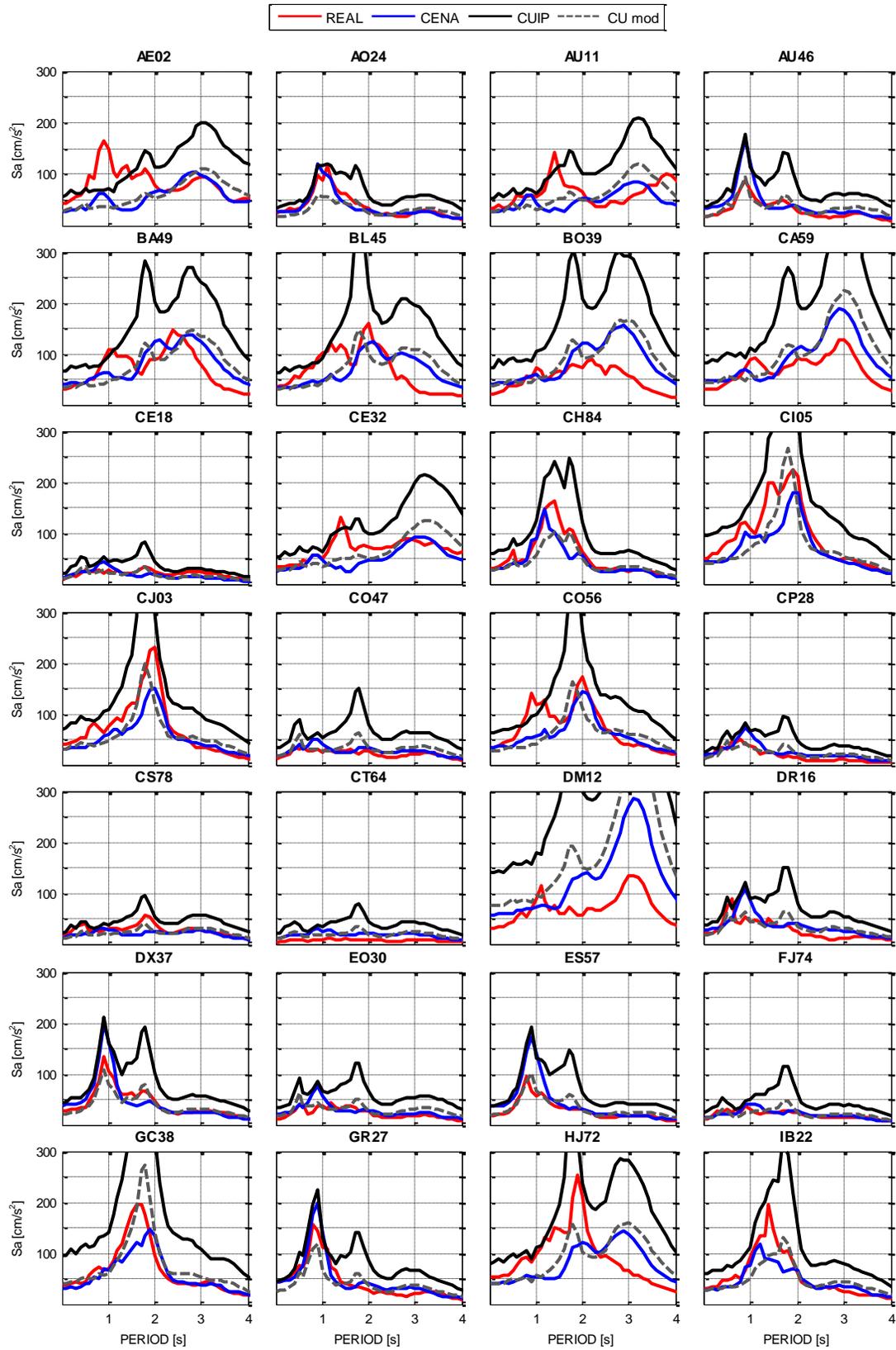


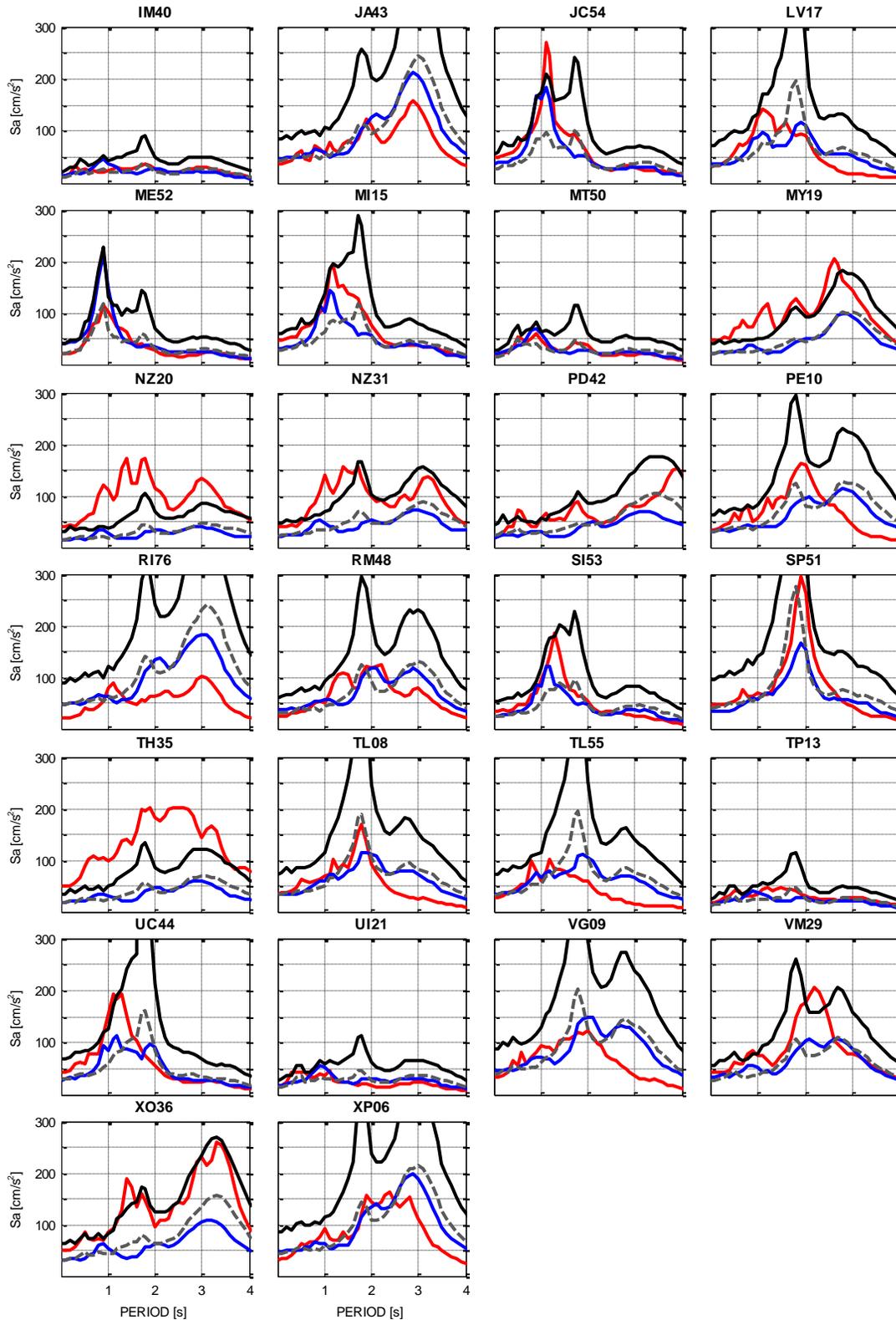
Comparación de los espectros de respuesta reales y calculados a partir de los cocientes obtenidas con la técnica HVSR convolucionados mediante los registros de las estaciones CENA y CUIP, para el sismo del 10 de diciembre, 2011 (M_w 6.5). Componente Norte-Sur



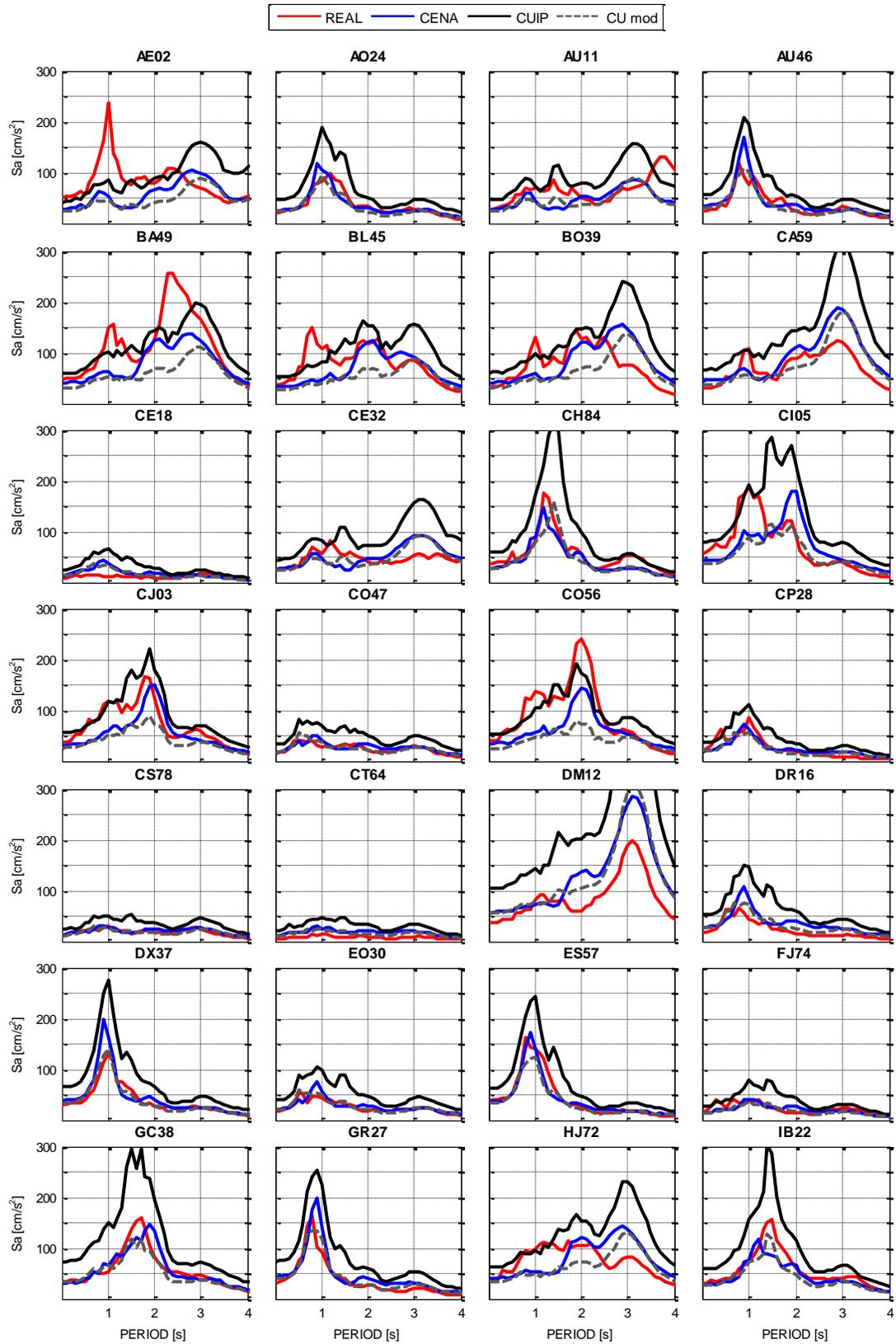


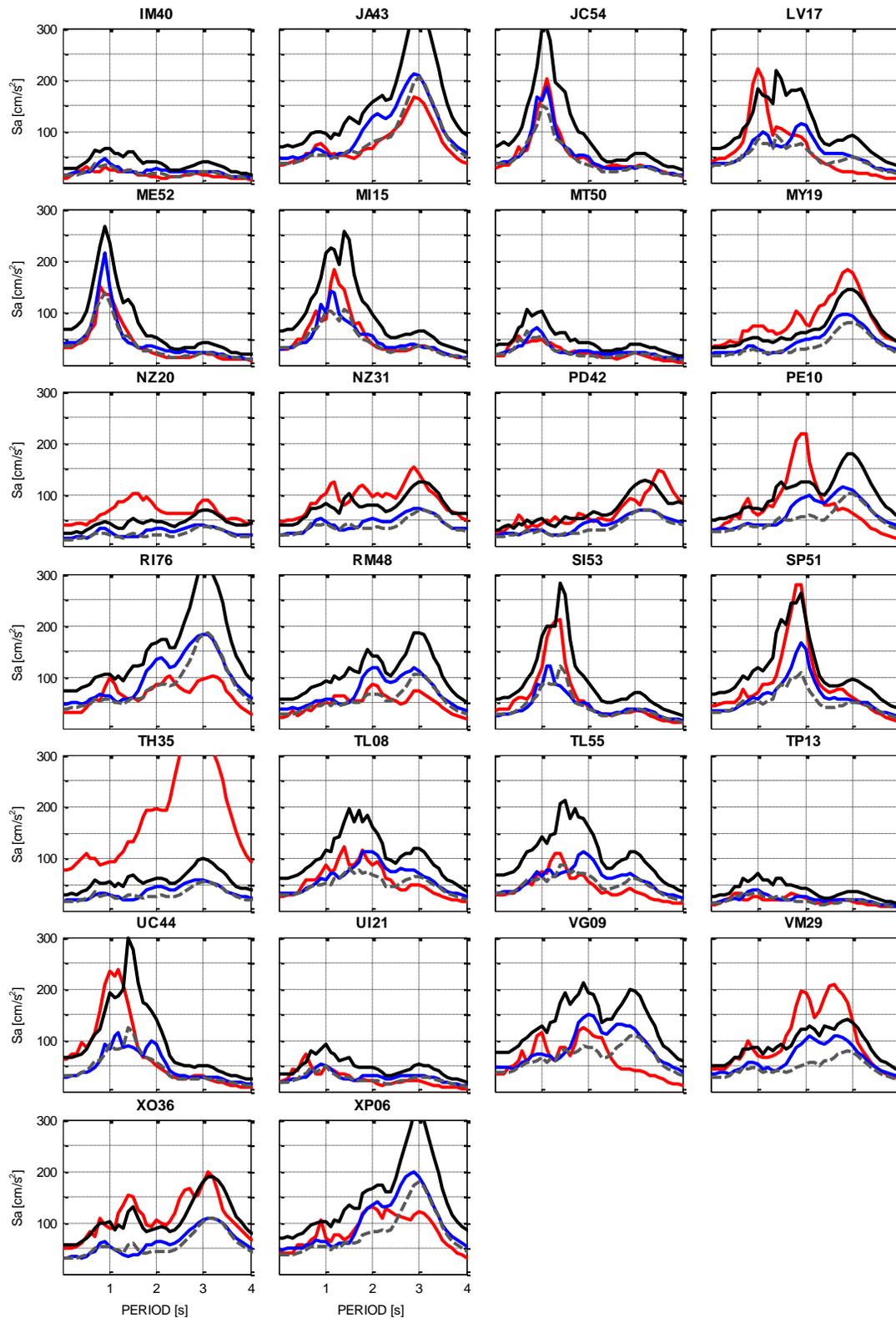
Comparación de los espectros de respuesta reales y calculados a partir de los cocientes obtenidos con la técnica HVSR convolucionados mediante los registros de las estaciones CENA y CUIP, para el sismo del 10 de diciembre, 2011 (M_w 6.5). Componente Este-Oeste





Comparación de los espectros de respuesta reales y calculados a partir de los cocientes obtenidas con la técnica HVSR convolucionados mediante los registros de las estaciones CENA y CUIP, para el sismo del 20 de marzo, 2012 (M_w 7.4). Componente Norte-Sur

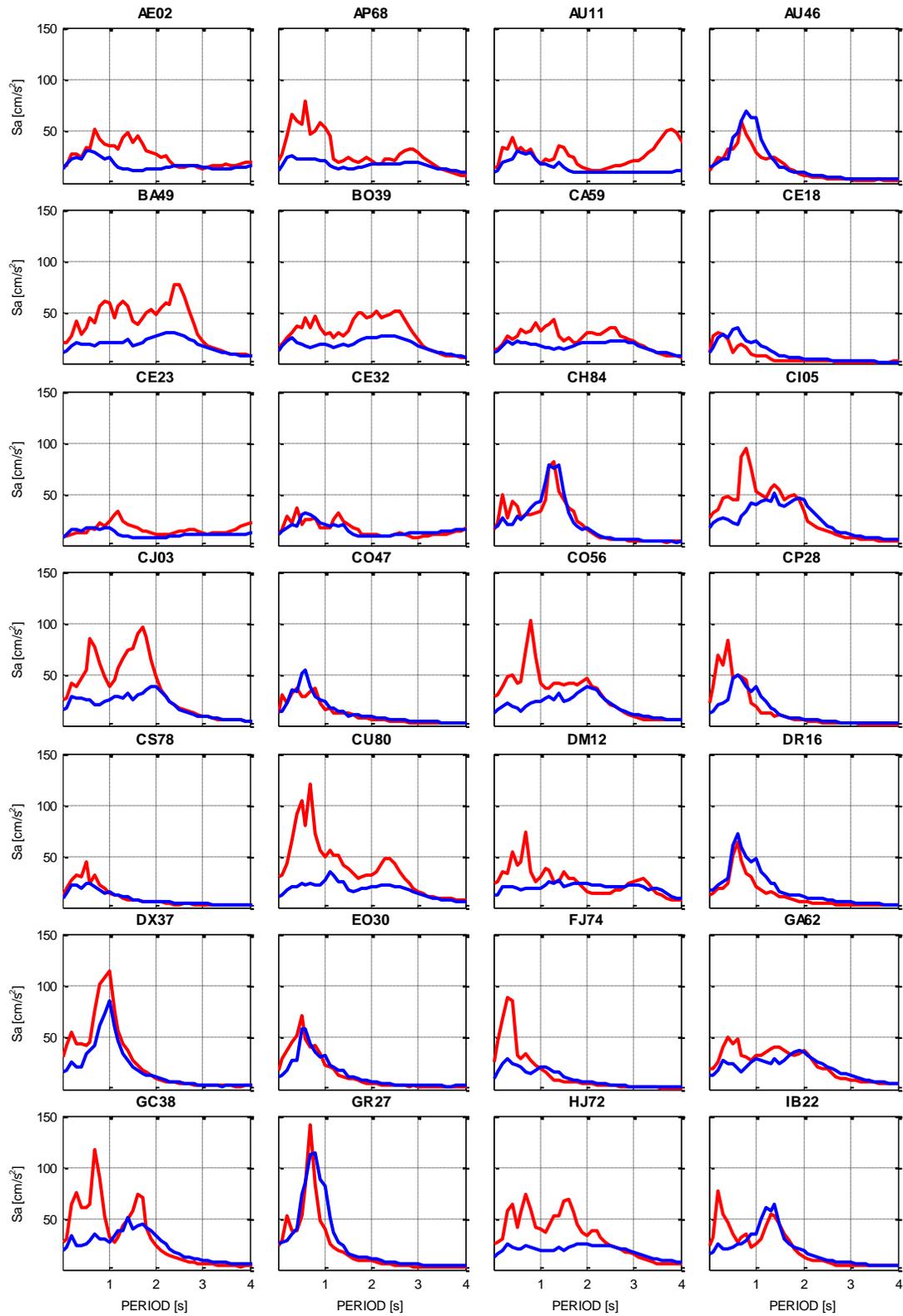


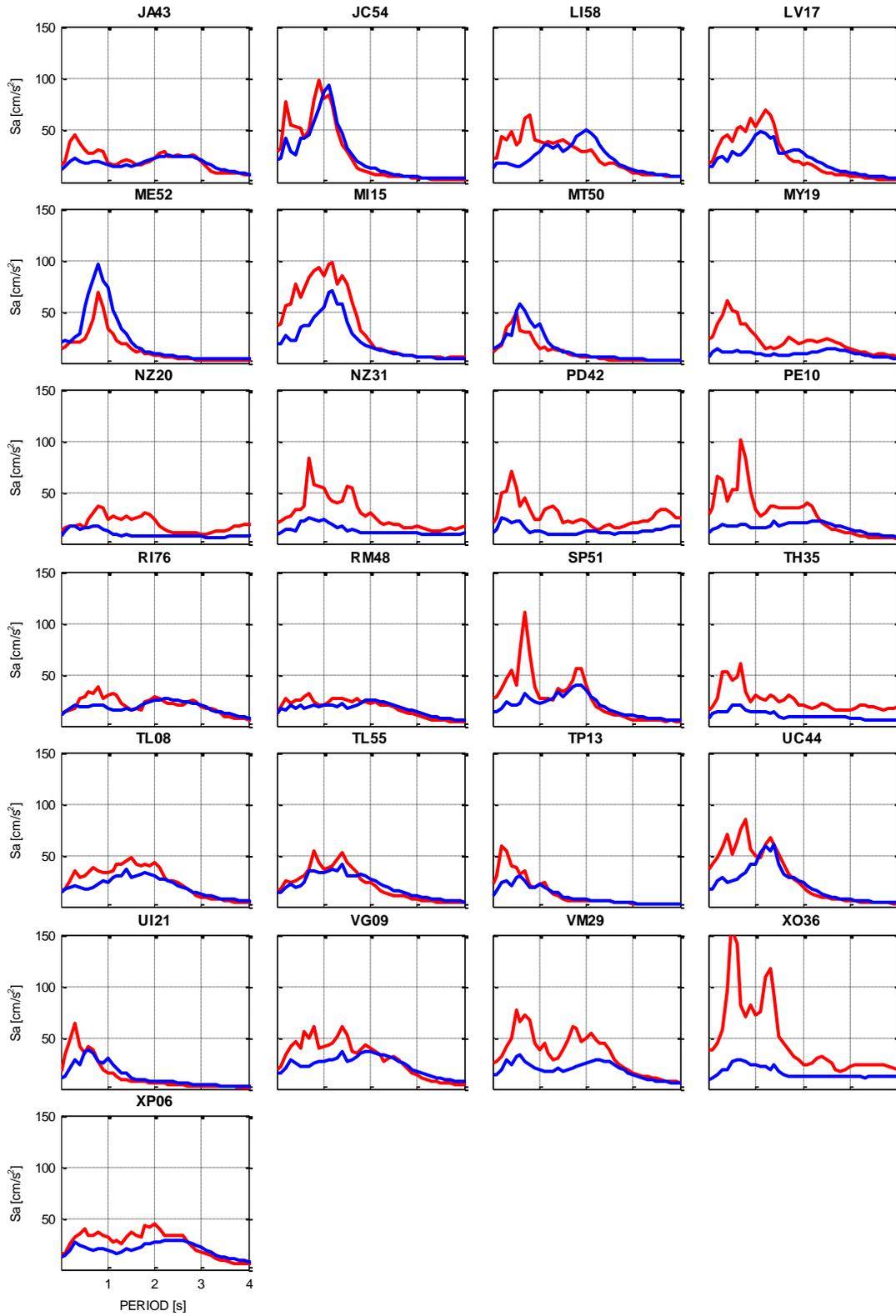


Comparación de los espectros de respuesta reales y calculados a partir de los cocientes obtenidos con la técnica HVSR convolucionados mediante los registros de las estaciones CENA y CUIP, para el sismo del 20 de marzo, 2012 ($M_w7.4$). Componente Este-Oeste

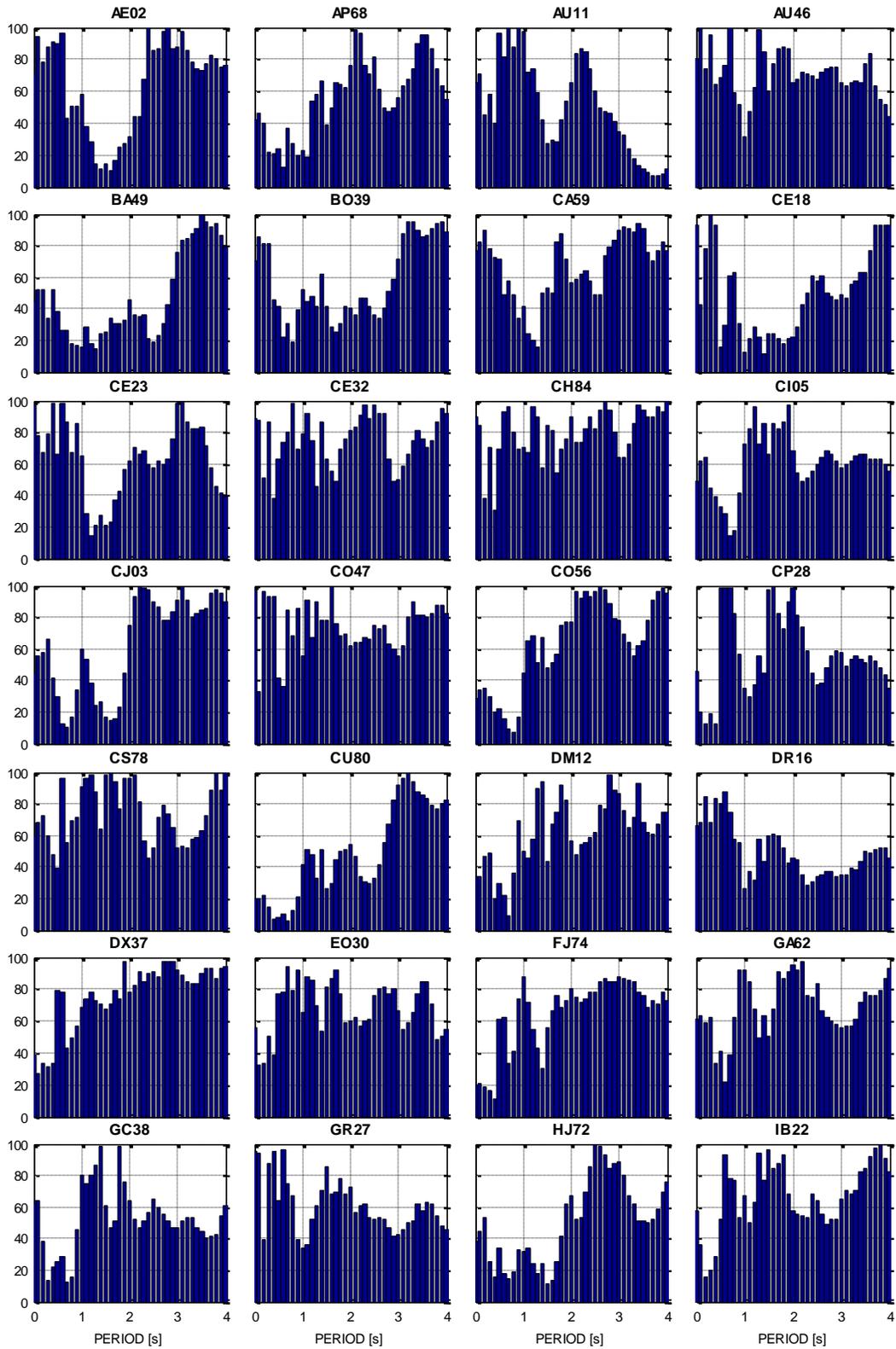
ANEXO G

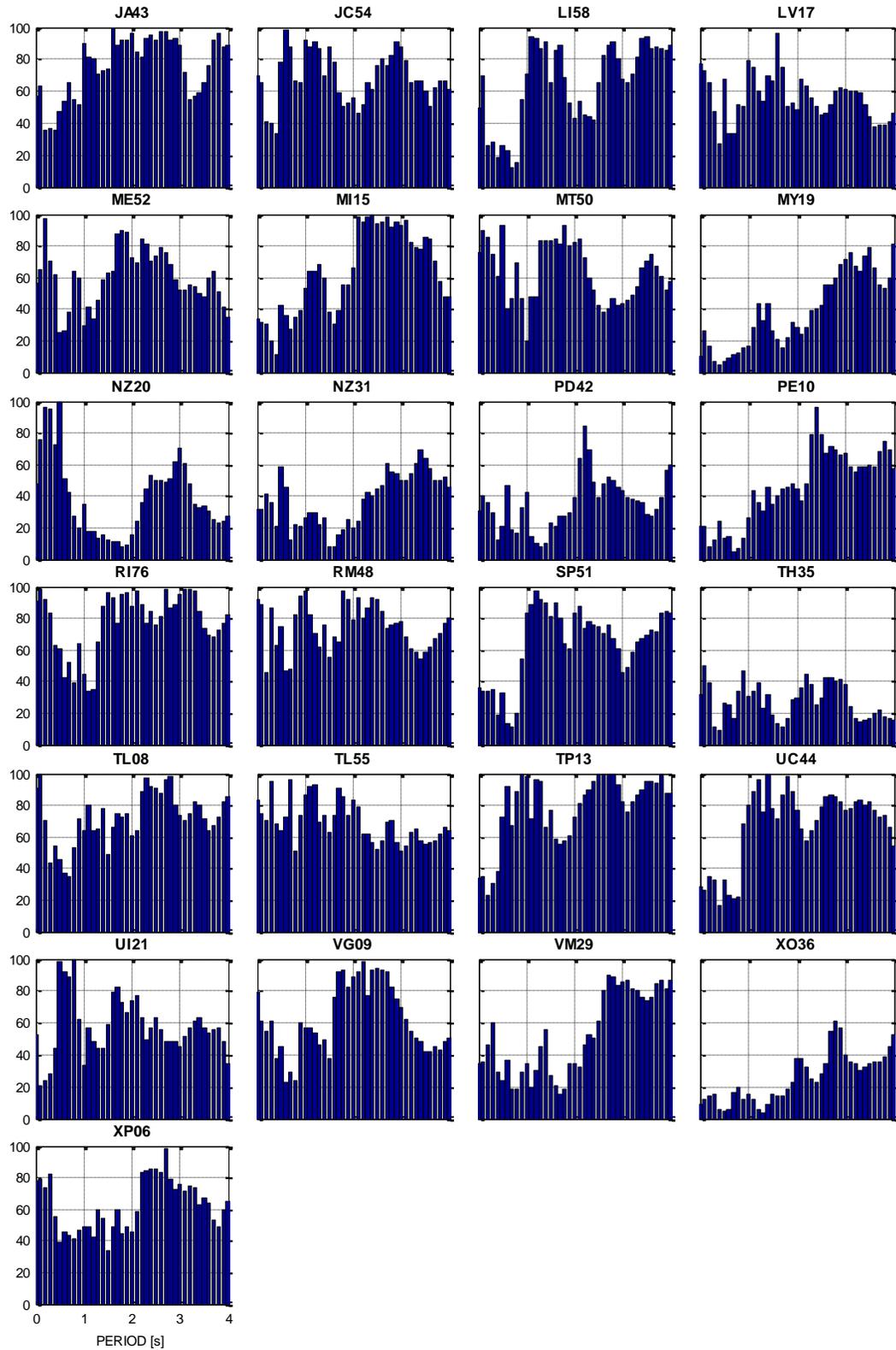
Comparación de espectros de respuesta real (rojo) y calculado CENA (azul) 10/12/2011EW





Métrica obtenida entre los valores reales y sintéticos CENA 10/12/2011 EW



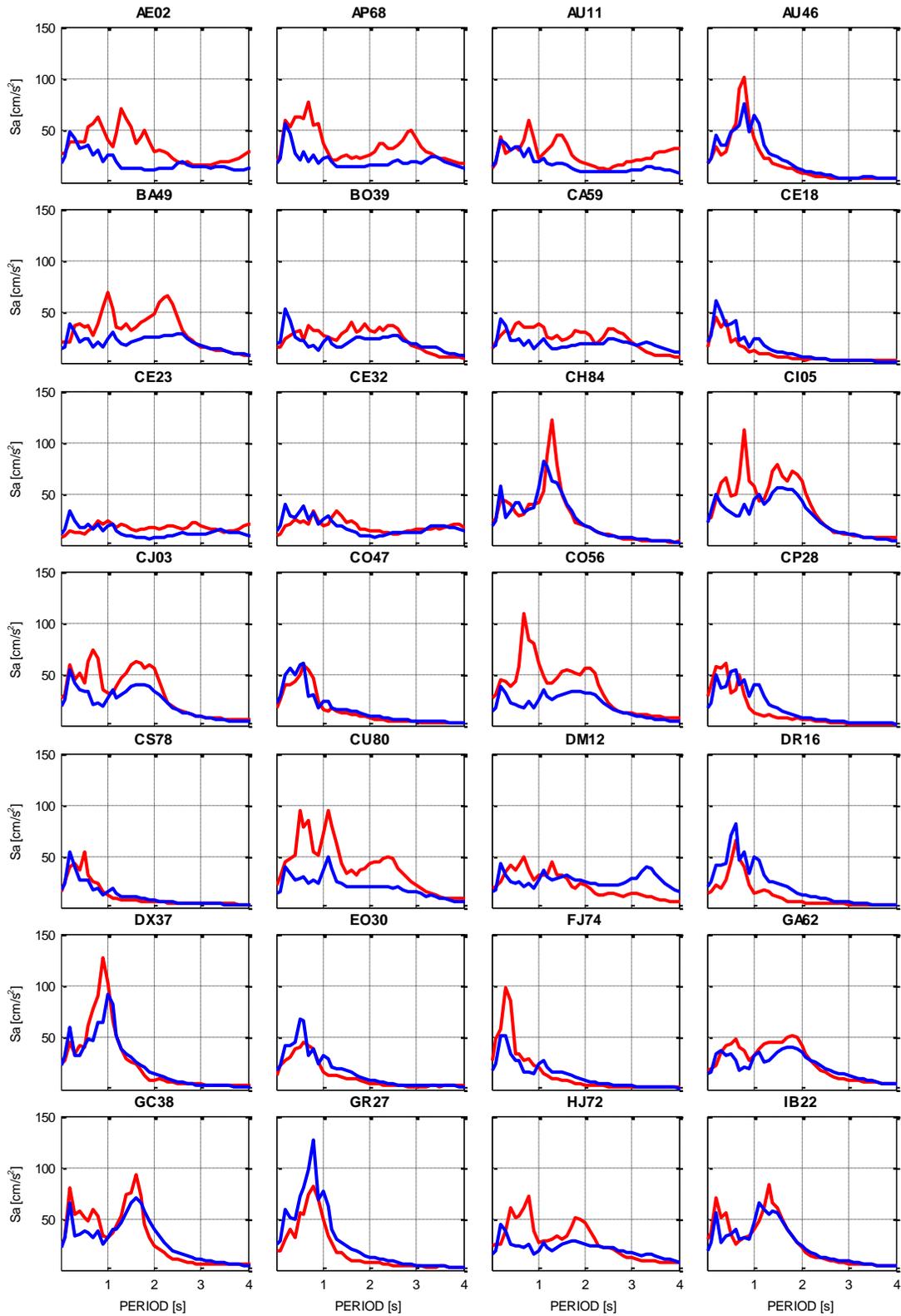


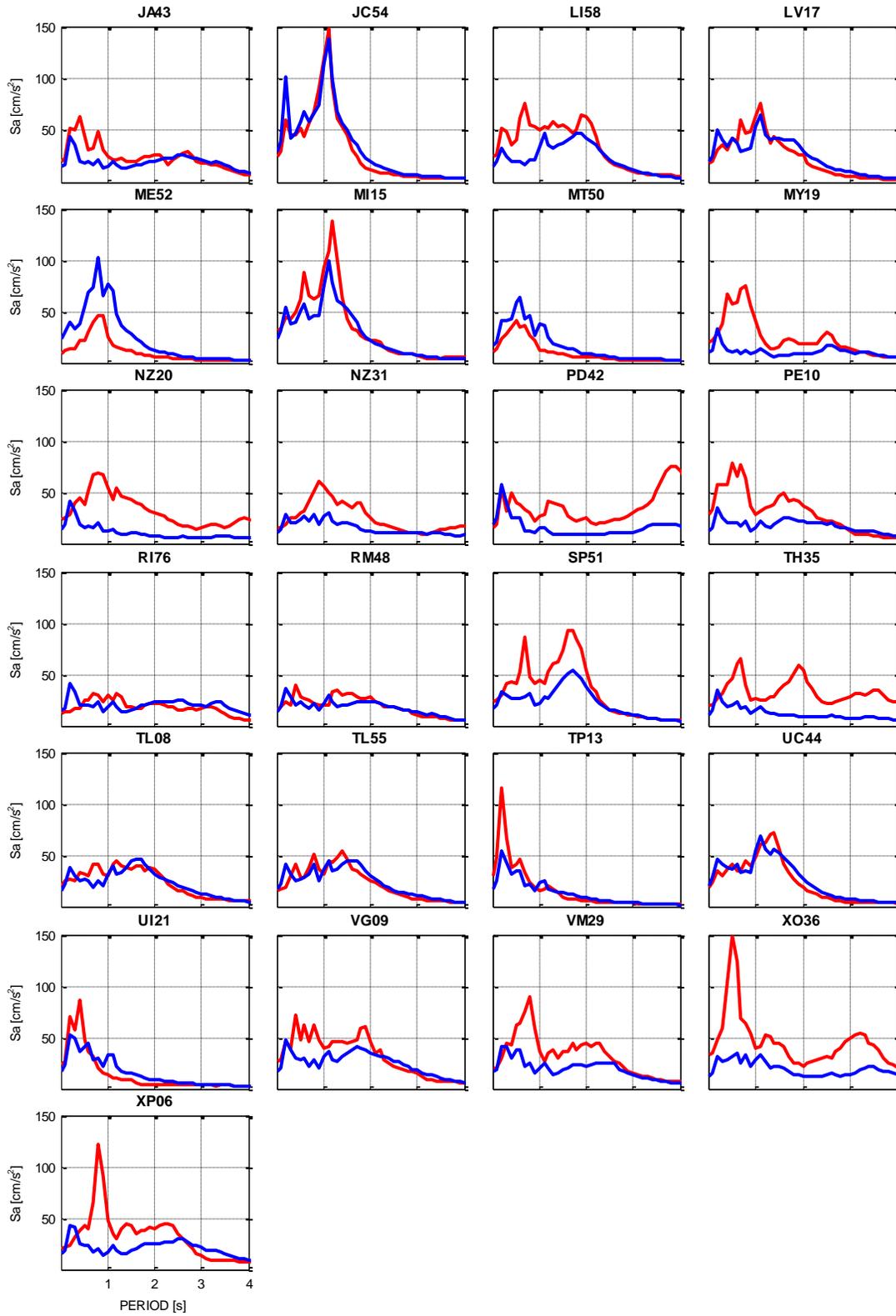
Resumen métrico de SA entre los valores reales y sintéticos CENA 10/12/2011 EW

| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| AEO2 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| AP88 | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit |
| AU11 | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit |
| AU46 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit |
| BA49 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit |
| BO39 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| CA59 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| CE18 | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| CE23 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit |
| CE32 | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| CH84 | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| C105 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit |
| CJ03 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| CO47 | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| CO56 | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| CP28 | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit |
| CST8 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| CU80 | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| DM12 | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| DR16 | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit |
| DX37 | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| EO30 | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit |
| FJ74 | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| GA62 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| GC38 | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit |
| GR27 | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit |
| HJ72 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| IB22 | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |

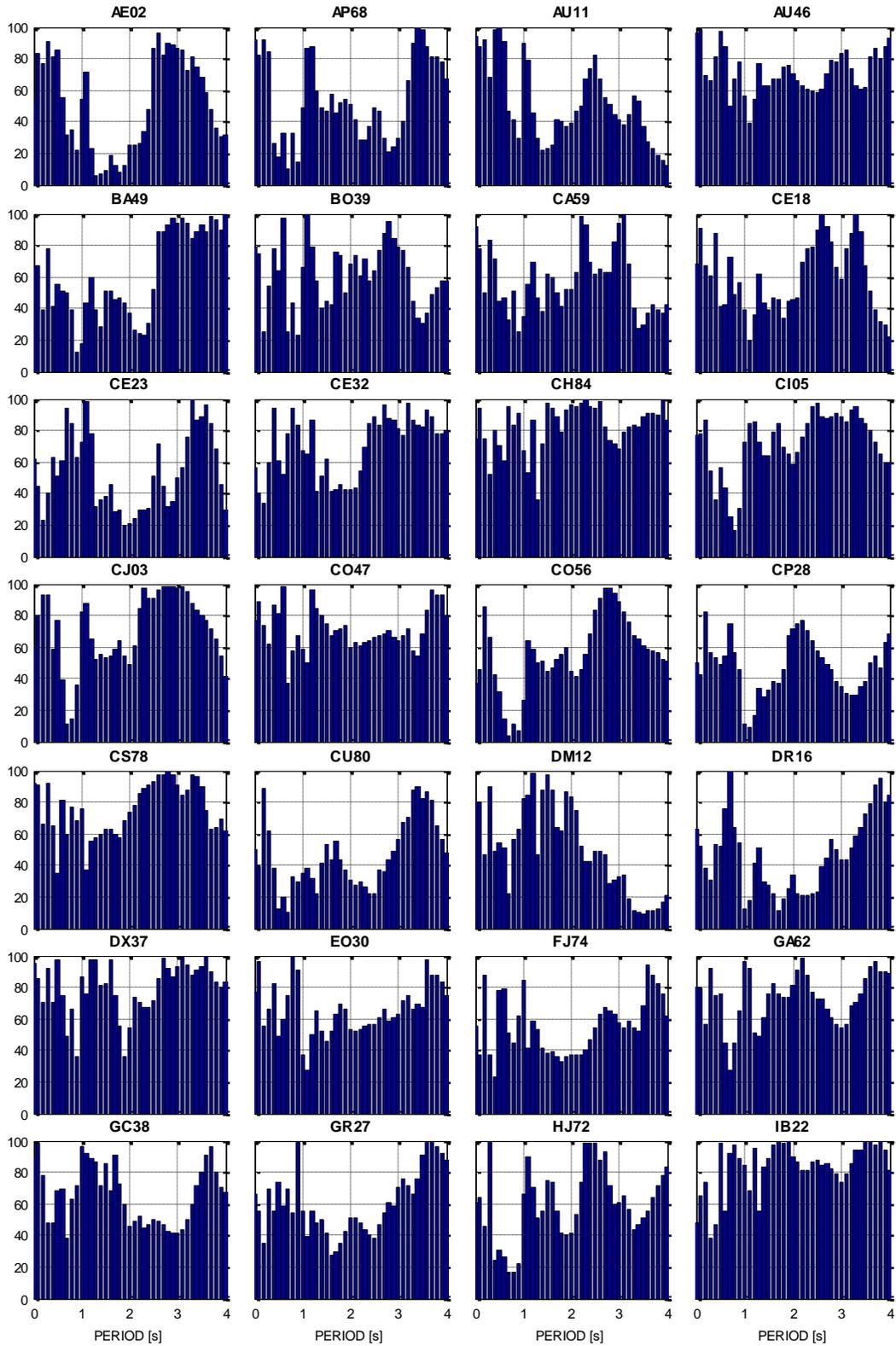
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| J43 | Orange | Red | Red | Red | Orange | Blue | Blue | Blue | Blue |
| JC54 | Teal | Red | Red | White | Teal | Blue | Orange | Blue | Orange |
| L58 | Teal | White | White | White | White | Teal | Red | Teal | Blue |
| LV17 | Teal | Teal | Orange | White | Teal | Teal | Orange | Orange | Orange |
| ME52 | Teal | Blue | Teal | Orange | White | White | Teal | Orange | Red |
| M115 | White | White | White | White | Red | Orange | Teal | Blue | Orange |
| MT50 | Blue | Blue | Teal | Orange | Blue | White | Blue | Red | Orange |
| MY19 | White | Teal | Blue |
| NZ20 | Teal | Blue | Blue | Teal | Blue | Red | White | Teal | White |
| NZ31 | White | Red | Red | White | Orange | White | White | Orange | Orange |
| PD42 | Red | Red | White | White | White | Red | Red | Red | Orange |
| PE10 | White | White | White | White | White | White | Orange | Teal | Orange |
| R176 | Blue | Blue | Blue | Orange | Orange | Orange | Blue | Blue | Blue |
| RM48 | Blue | Orange | Blue | Orange | Teal | Blue | Teal | Teal | Blue |
| SP51 | White | White | Red | White | White | Blue | Blue | Orange | Blue |
| TH35 | Orange | Red | White | White | White | White | White | Red | White |
| TL08 | Blue | Teal | Red | Orange | Orange | Orange | Orange | Teal | Blue |
| TL55 | Teal | Teal | Blue | Teal | Orange | Blue | Blue | Orange | Orange |
| TP13 | Red | White | White | Red | Teal | Blue | Teal | Blue | Blue |
| UC44 | White | Red | White | White | White | Blue | Teal | Teal | Orange |
| UI21 | White | White | White | Red | Blue | White | Teal | Orange | Red |
| VG09 | Orange | Orange | Orange | Red | Orange | Orange | Blue | Teal | Orange |
| VM29 | Red | Orange | Orange | White | White | White | Red | Blue | Blue |
| XO36 | White | White | White | White | White | White | Red | Red | Orange |
| XP06 | Teal | Teal | Blue | Orange | Red | Orange | Orange | Teal | Teal |

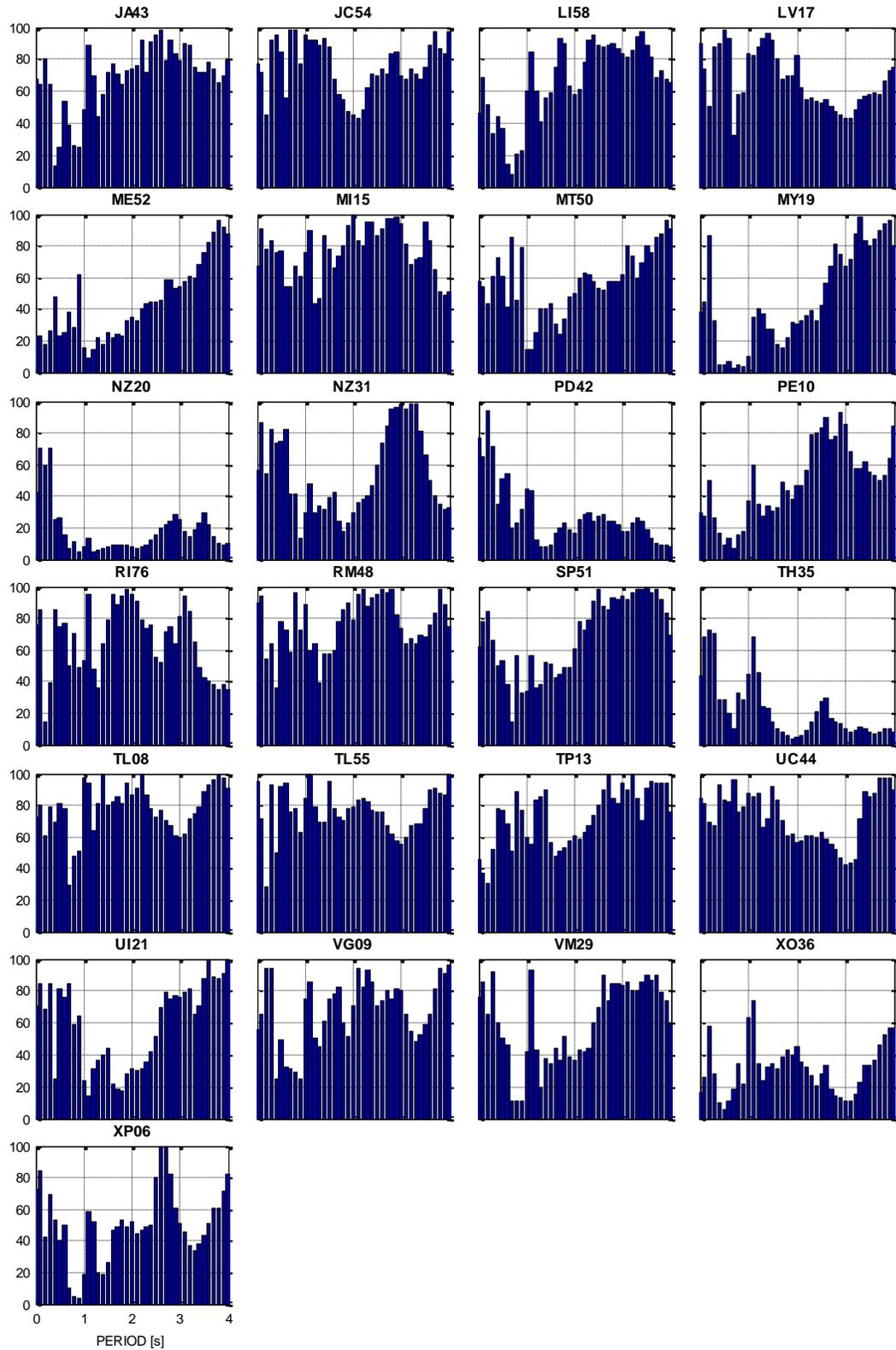
Comparación de espectros de respuesta real (rojo) y calculado CENA (azul) 10/12/2011NS





Métrica obtenida entre los valores reales y sintéticos CENA 10/12/2011 NS



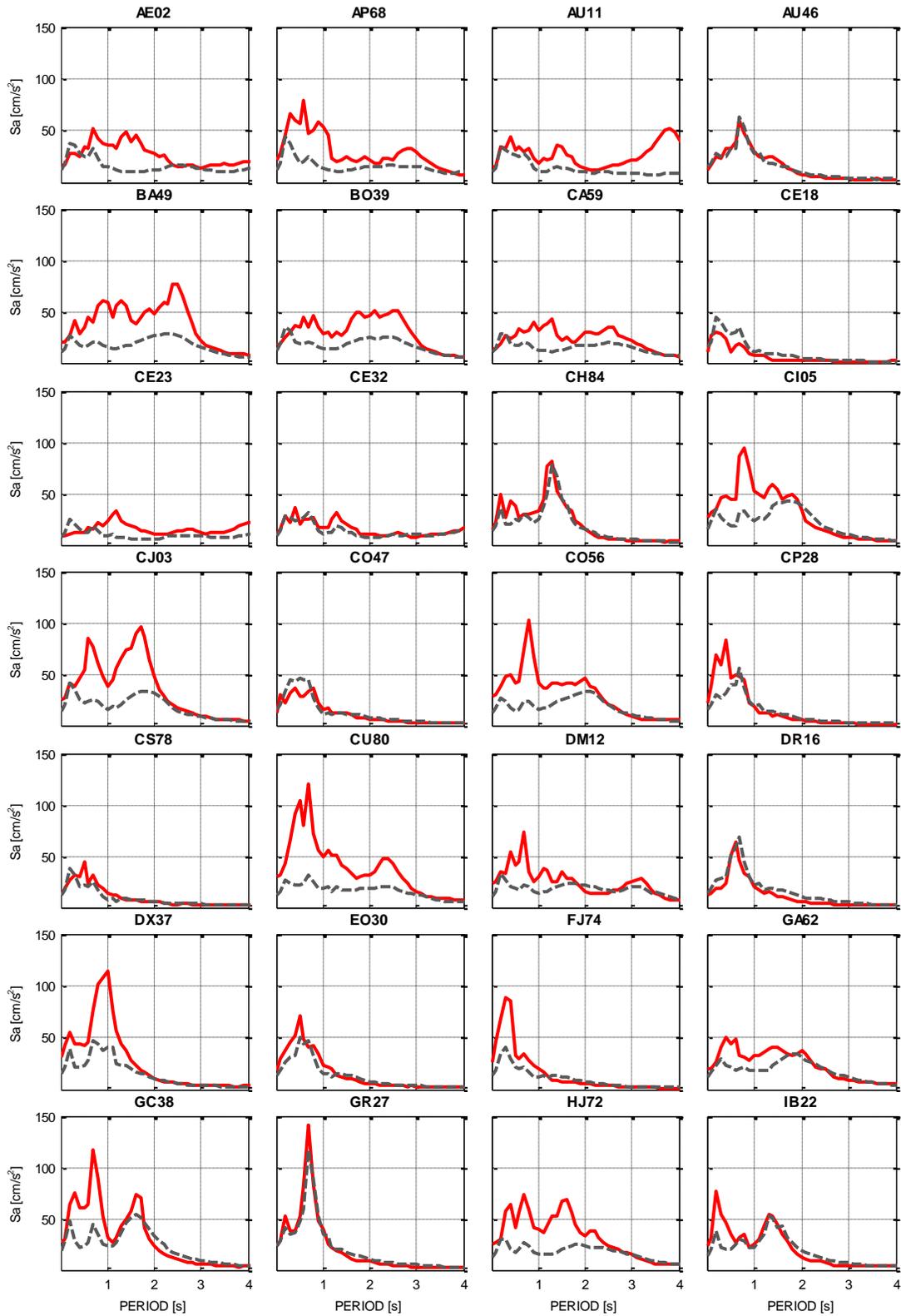


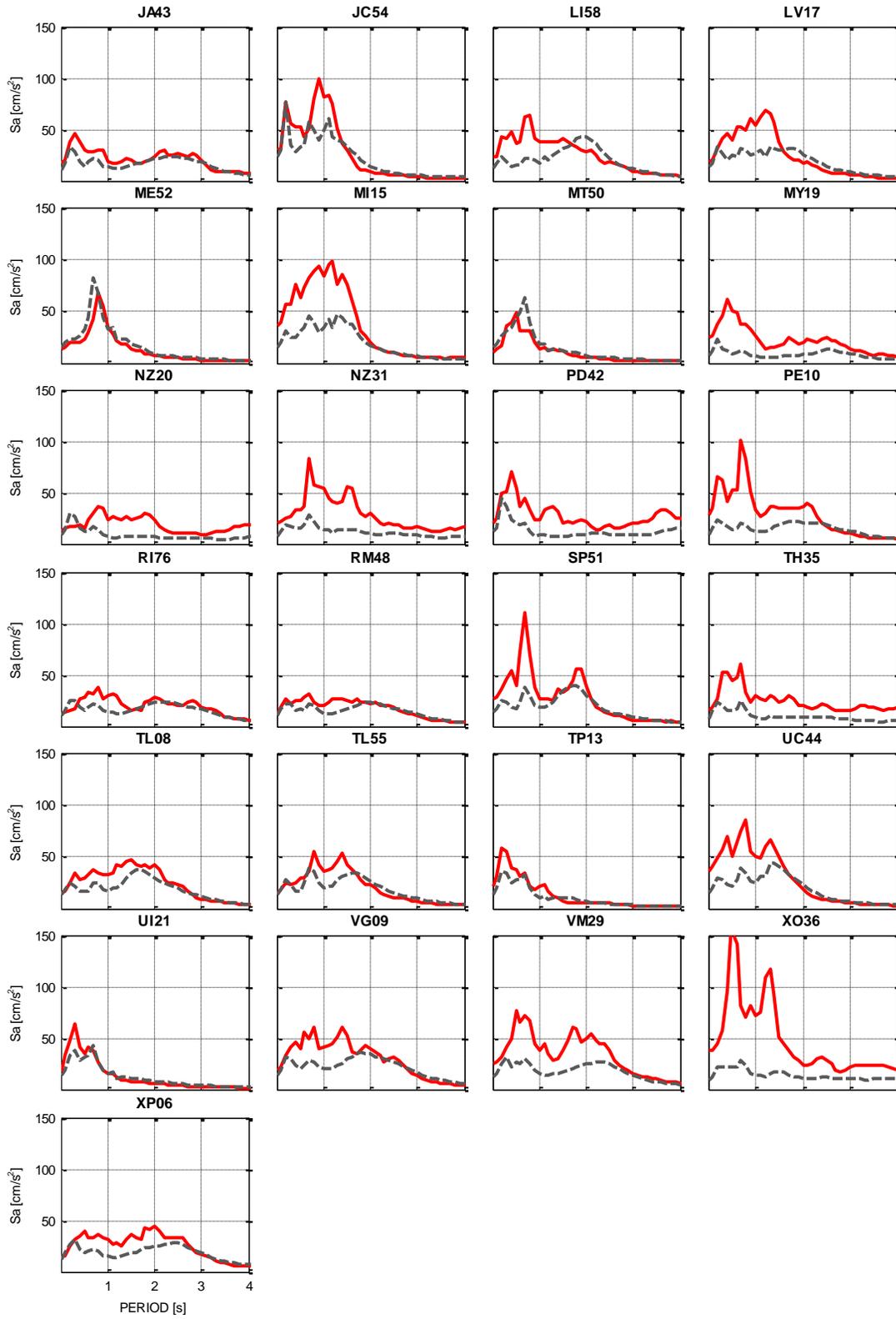
Resumen métrico de SA entre los valores reales y sintéticos CENA 10/12/2011 NS

| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| AE02 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit |
| AP68 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit |
| AU11 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit |
| AU46 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| BA49 | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| BO39 | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit |
| CA59 | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit |
| CE18 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit |
| CE23 | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit |
| CE32 | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| CH84 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| CI05 | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit |
| CJ03 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit |
| CO47 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| CO56 | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit |
| CP28 | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit |
| CS78 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit |
| CU80 | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit |
| DM12 | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit |
| DR16 | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit |
| DX37 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| EO30 | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit |
| FJ74 | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit |
| GAB2 | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| GC38 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit |
| GR27 | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| HJ72 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| IB22 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |

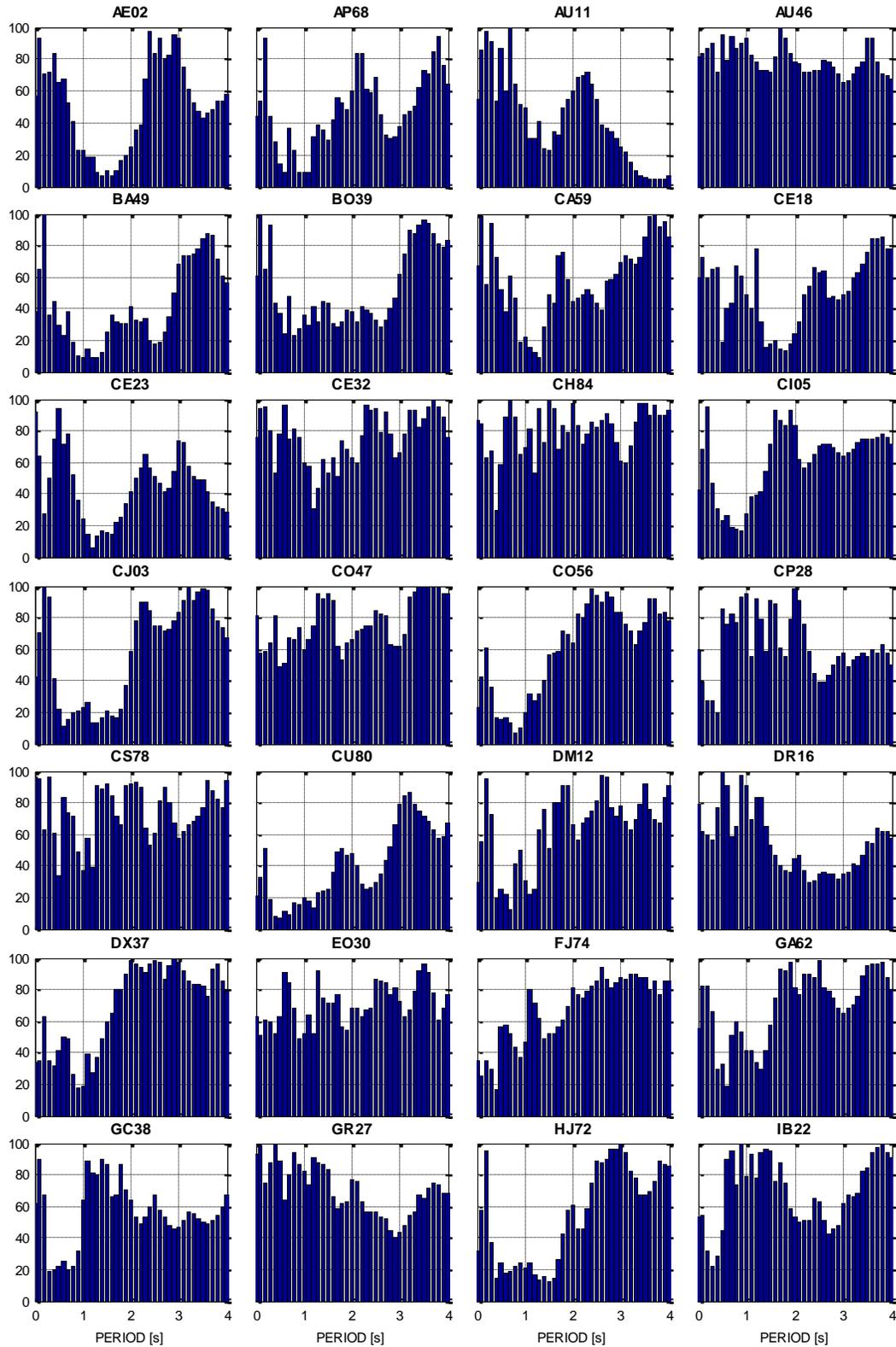
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| J43 | Orange | Blue | Orange | White | White | Orange | Teal | Teal | Teal |
| JC54 | Teal | Orange | Blue | Blue | Blue | Blue | Orange | Teal | Blue |
| L58 | Teal | Orange | White | Red | Red | Orange | Orange | Blue | Teal |
| LV17 | Teal | Orange | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Red | Teal |
| MES2 | White | White | White | Orange | White | White | Red | Orange | Blue |
| M15 | Blue | Teal | Blue | Teal | Teal | Teal | Blue | Blue | Orange |
| MT50 | Orange | Red | Orange | Teal | Orange | White | Orange | Orange | Blue |
| MY19 | Red | Blue | White | White | White | White | White | Teal | Blue |
| NZ20 | Teal | Orange | Teal | White | White | White | White | White | White |
| NZ31 | Blue | Orange | Blue | Teal | Teal | White | White | Blue | White |
| PD42 | Teal | Blue | Teal | Red | Orange | Orange | White | White | White |
| PE10 | White | Orange | White | White | White | Red | Orange | Blue | Blue |
| R176 | Blue | White | Red | Blue | Teal | Orange | Blue | Blue | Red |
| RM48 | Blue | Orange | Orange | Red | Teal | Blue | Teal | Teal | Teal |
| SP51 | Teal | Blue | Teal | Orange | Orange | White | Orange | Blue | Teal |
| TH35 | Teal | Teal | Teal | White | White | Orange | White | White | White |
| TL08 | Blue | Orange | Teal | Teal | Blue | Blue | Blue | Orange | Blue |
| TL55 | Teal | White | Blue | Orange | Blue | Blue | Teal | Orange | Blue |
| TP13 | Red | White | Orange | Teal | Teal | Orange | Orange | Blue | Teal |
| UC44 | Blue | Teal | Teal | Blue | Blue | Blue | Orange | Red | Blue |
| UJ21 | Blue | Teal | Blue | White | Blue | White | White | Teal | Blue |
| VG09 | Teal | Blue | Blue | White | Orange | Teal | Teal | Blue | Blue |
| VM29 | Blue | Teal | Blue | Orange | Orange | Red | Red | Blue | Orange |
| XO36 | White | Orange | White | White | White | Orange | Orange | White | Orange |
| XP06 | Blue | Red | Teal | Orange | Red | White | Orange | Orange | Blue |

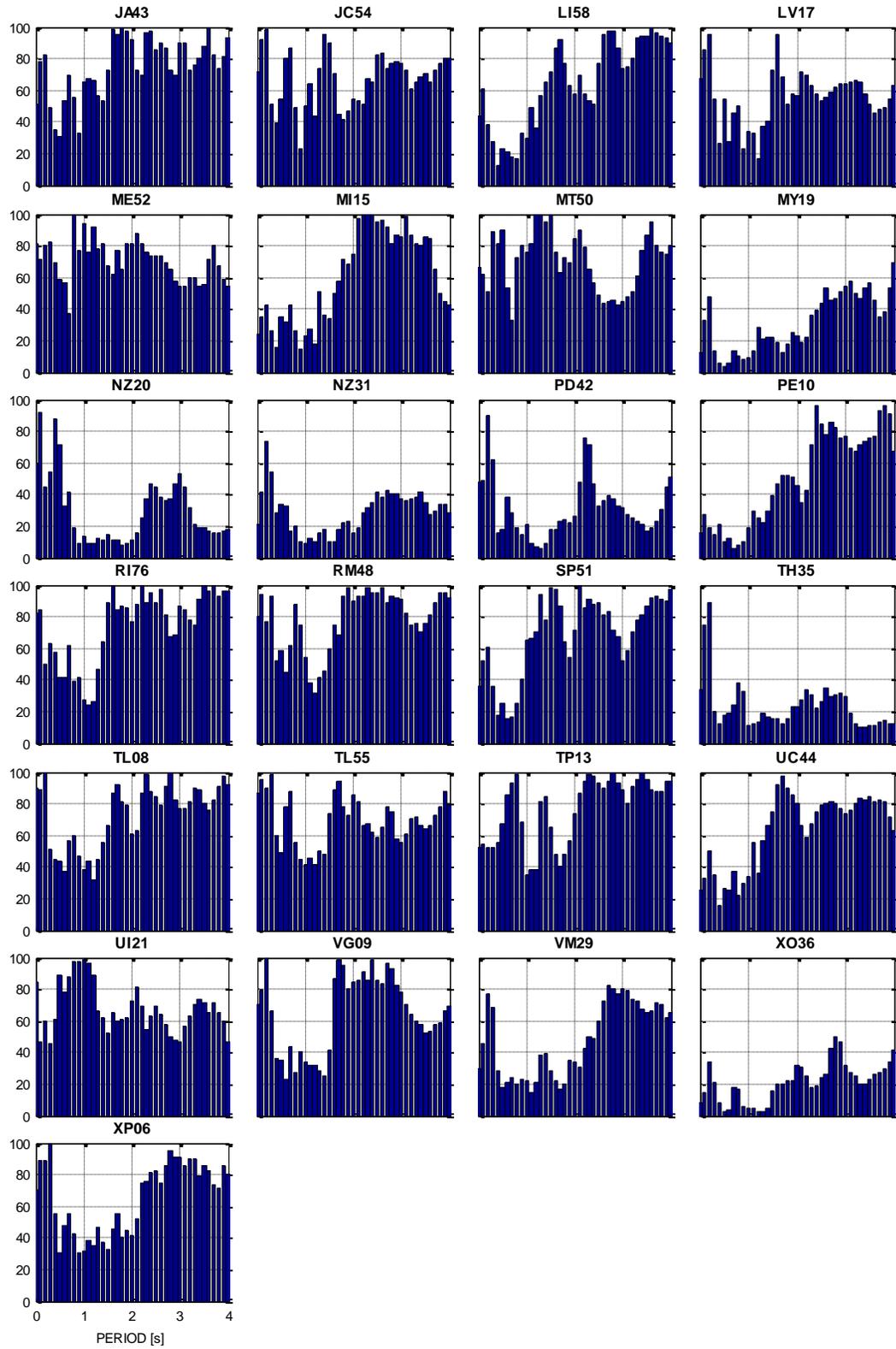
Comparación de espectros de respuesta real (rojo) y calculado CUmud (gris) 10/12/2011 EW





Métrica obtenida entre los valores reales y sintéticos CUmod 10/12/2011 EW



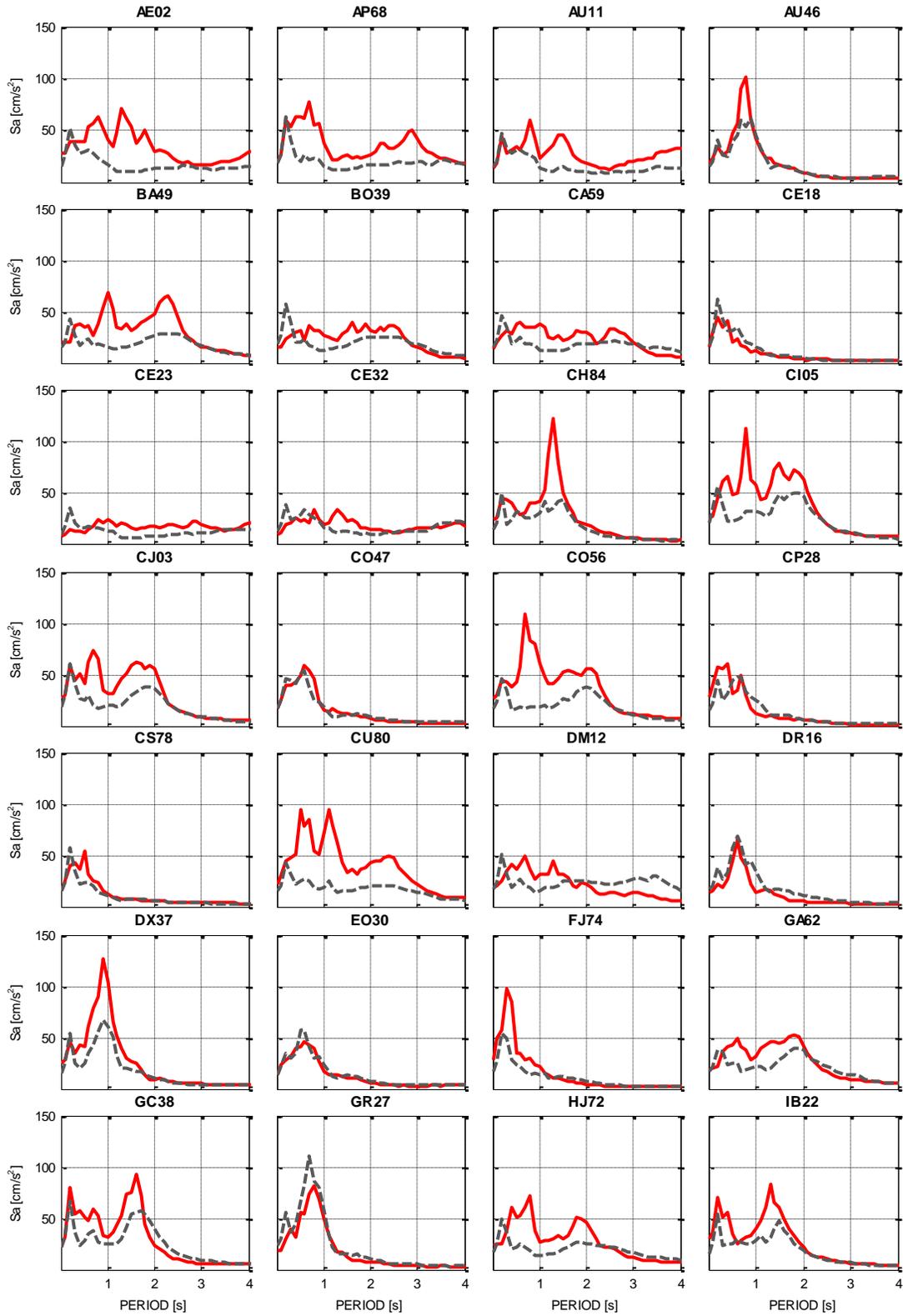


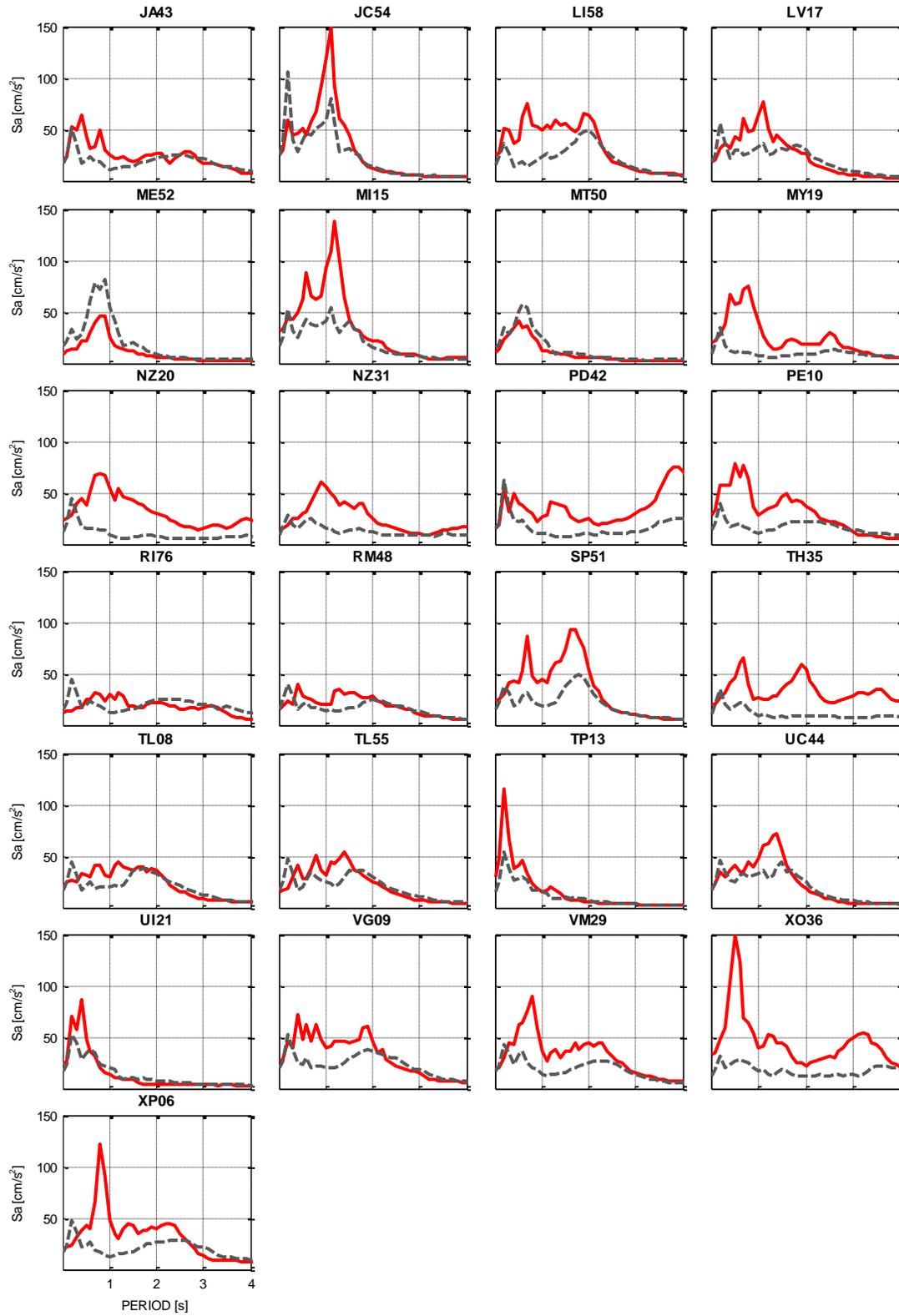
Resumen métrico de SA entre los valores reales y sintéticos CUMod 10/12/2011 EW

| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| AE02 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit |
| AP88 | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit |
| AU11 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit |
| AU46 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit |
| BA49 | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit |
| BO39 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 35-45 poor fit | 35-45 poor fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| CA59 | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| CE18 | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit |
| CE23 | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit |
| CE32 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit |
| CH84 | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| CI05 | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit |
| CJ03 | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| CO47 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| CO56 | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| CP28 | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit |
| CS78 | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| CU80 | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit |
| DM12 | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| DR16 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit |
| DX37 | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| EO30 | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit |
| FJ74 | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| GA62 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| GC38 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit |
| GR27 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit |
| HJ72 | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| IB22 | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |

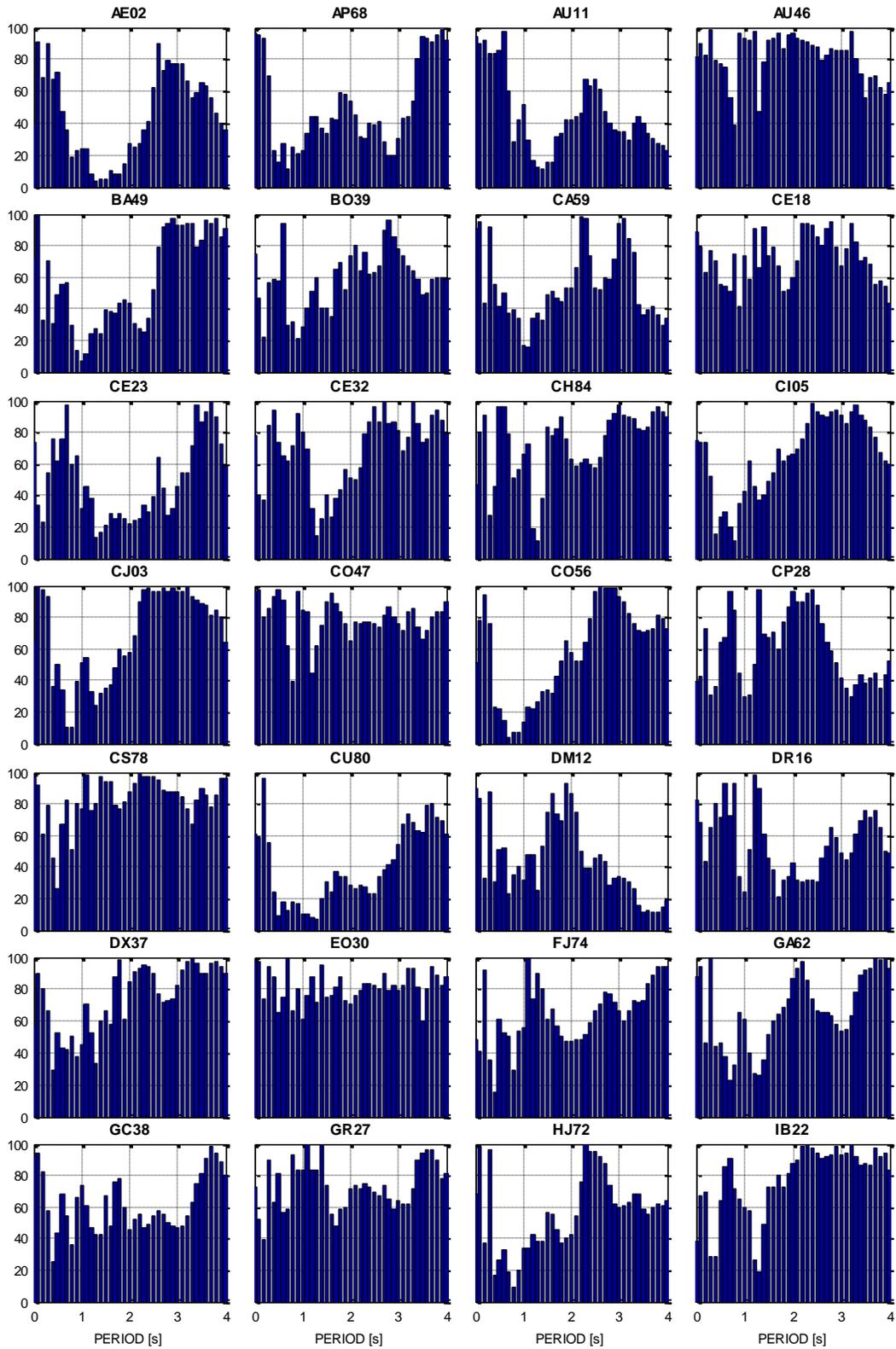
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| JA43 | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| JC54 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| L58 | ■ | ■ | □ | □ | □ | □ | ■ | ■ | ■ |
| LV17 | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |
| MES2 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| M15 | ■ | ■ | □ | □ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |
| MT50 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| MY19 | □ | ■ | □ | □ | □ | □ | □ | ■ | ■ |
| NZ20 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | □ | ■ | □ |
| NZ31 | ■ | ■ | ■ | □ | □ | □ | □ | ■ | □ |
| PD42 | ■ | ■ | ■ | □ | □ | □ | □ | □ | ■ |
| PE10 | □ | □ | □ | □ | □ | □ | ■ | ■ | ■ |
| R176 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |
| RM48 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| SP51 | ■ | ■ | ■ | □ | □ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| TH35 | ■ | ■ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ |
| TL08 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| TL55 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| TP13 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| UC44 | □ | ■ | ■ | □ | □ | □ | ■ | ■ | ■ |
| UI21 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| VG09 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |
| VM29 | ■ | ■ | ■ | □ | □ | □ | □ | ■ | ■ |
| XO36 | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | ■ |
| XP06 | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | □ | ■ | ■ | ■ |

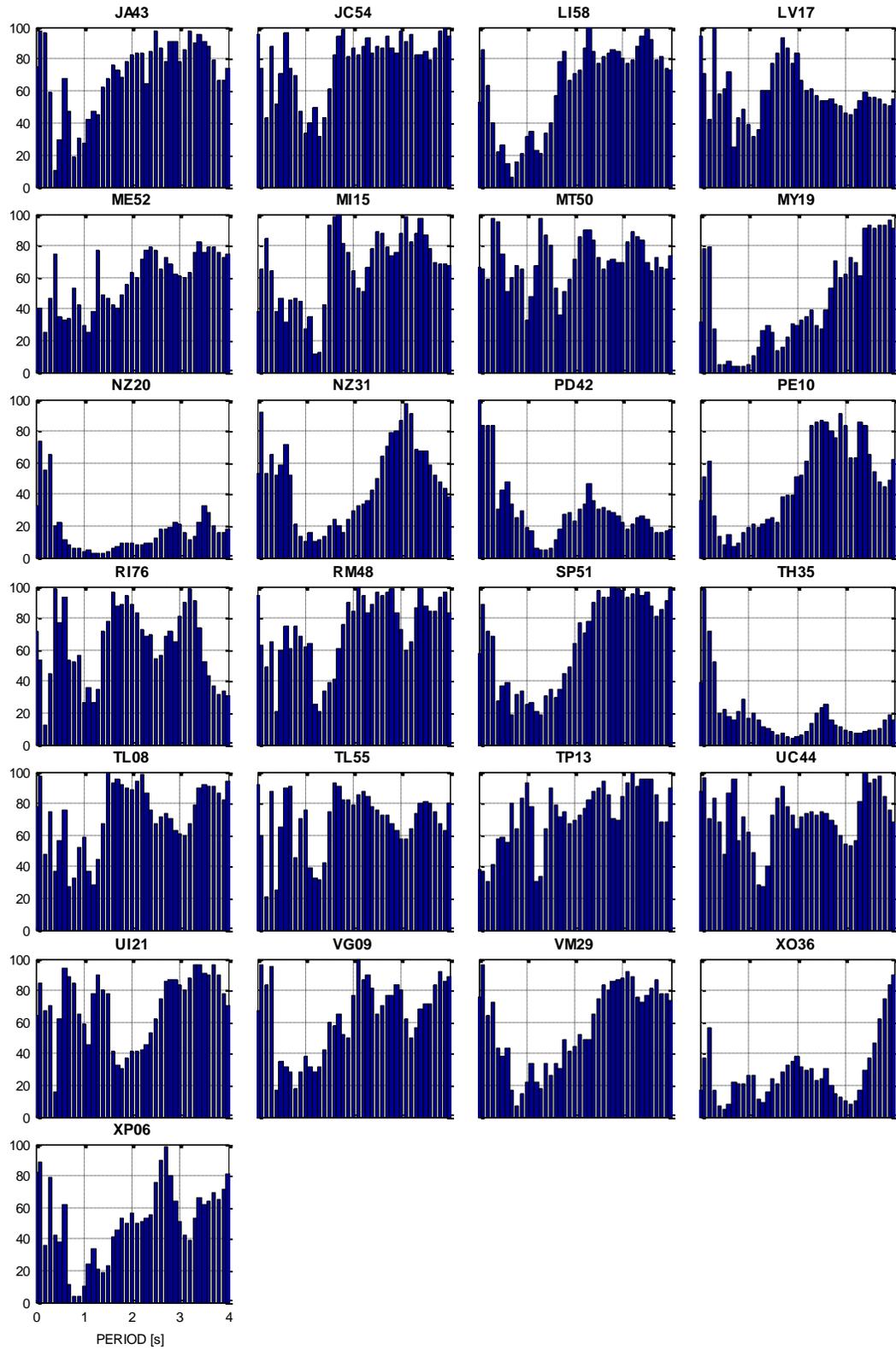
Comparación de espectros de respuesta real (rojo) y calculado CUmud (gris) 10/12/2011 NS





Métrica obtenida entre los valores reales y sintéticos CUmod 10/12/2011 NS



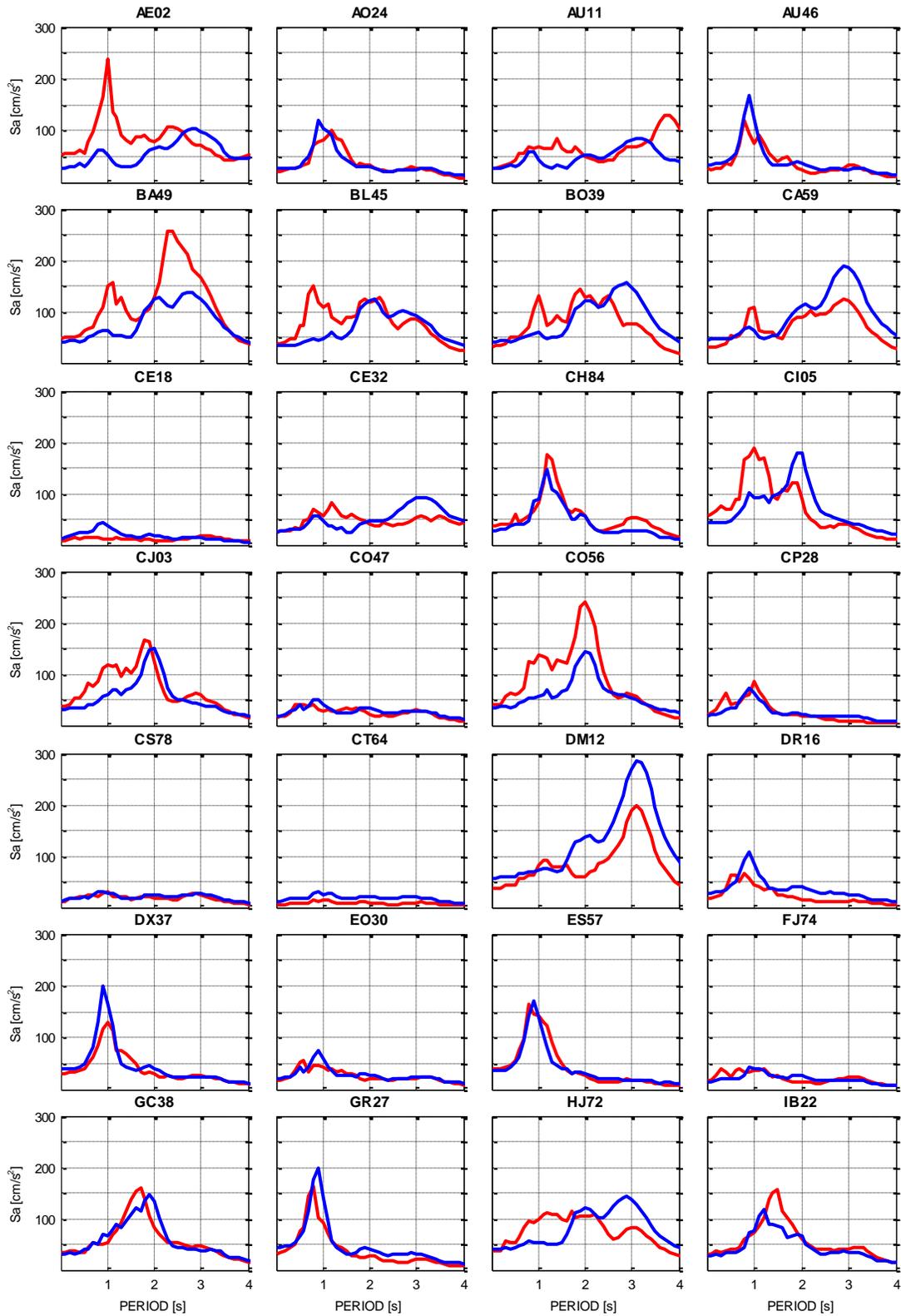


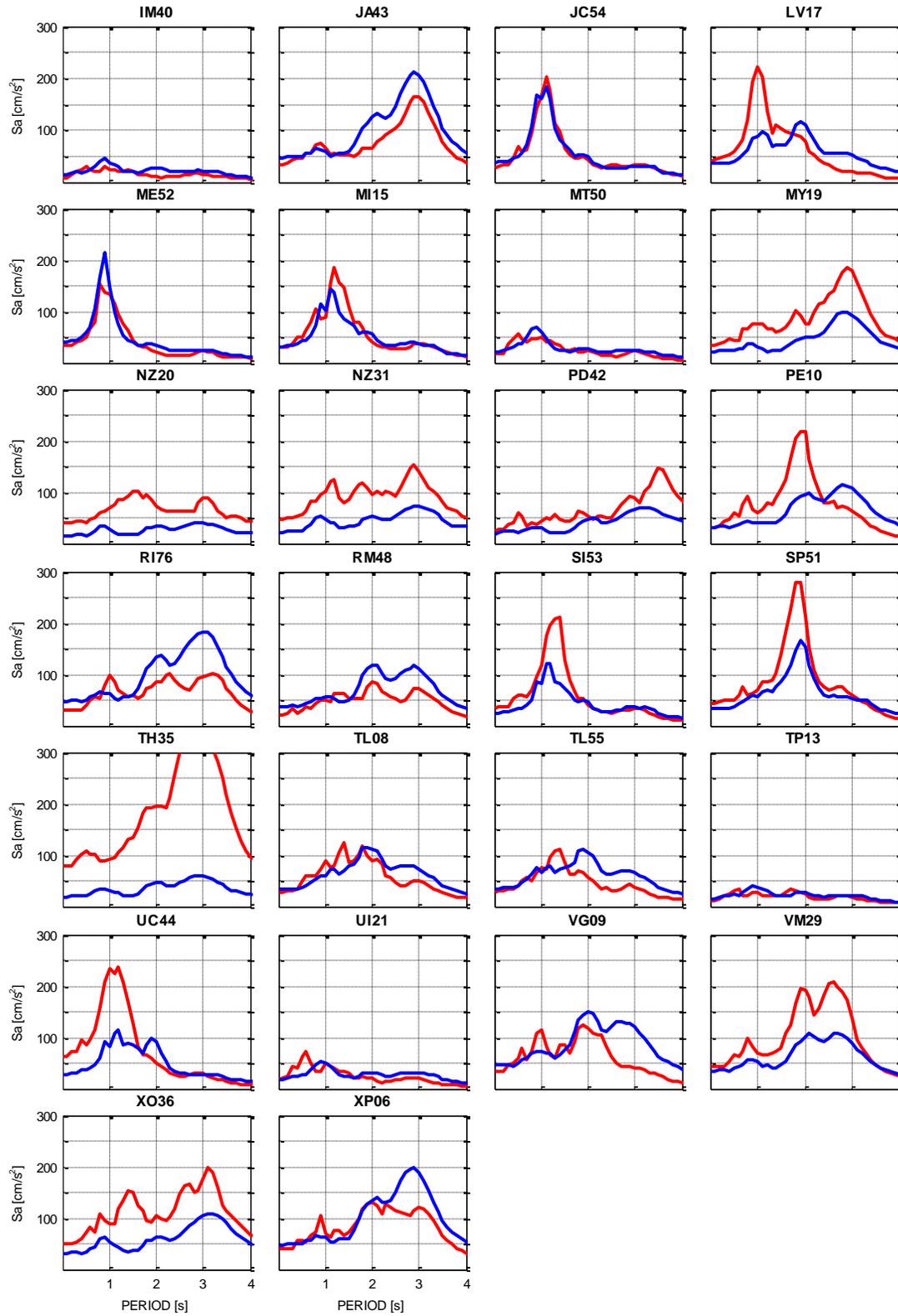
Resumen métrico de SA entre los valores reales y sintéticos CUmod 10/12/2011 NS

| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| AE02 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit |
| AP88 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit |
| AU11 | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit |
| AU46 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| BA49 | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| BO39 | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit |
| CA59 | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit |
| CE18 | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit |
| CE23 | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit |
| CE32 | 35-45 poor fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| CH84 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| CI05 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit |
| CJ03 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit |
| CO47 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| CO56 | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| CP28 | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit |
| CS78 | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| CU80 | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit |
| DM12 | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit |
| DR16 | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit |
| DX37 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| EO30 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| FJ74 | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| GA62 | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| GC38 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| GR27 | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| HJ72 | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit |
| IB22 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |

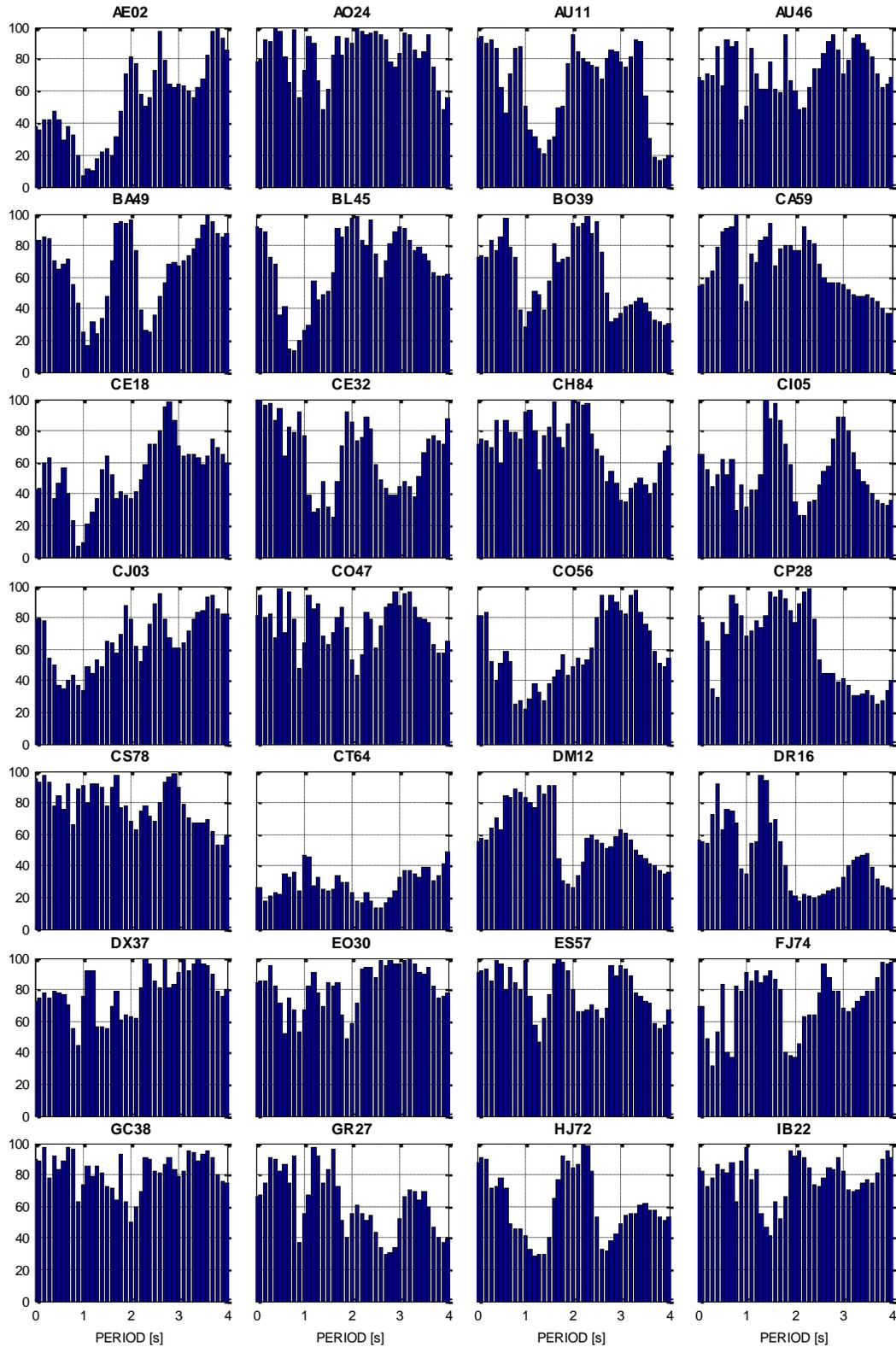
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| JA43 | ■ | ■ | ■ | □ | □ | □ | ■ | ■ | ■ |
| JC54 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |
| L58 | ■ | ■ | ■ | □ | □ | □ | ■ | ■ | ■ |
| LV17 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| MES2 | ■ | □ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |
| M15 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |
| MT50 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |
| MY19 | ■ | ■ | □ | □ | □ | □ | □ | ■ | ■ |
| NZ20 | ■ | ■ | ■ | □ | □ | □ | □ | □ | □ |
| NZ31 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | □ | ■ | ■ |
| PD42 | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | □ | □ | □ | □ |
| PE10 | ■ | ■ | □ | □ | □ | □ | ■ | ■ | ■ |
| R176 | ■ | □ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | □ |
| RM48 | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| SP51 | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |
| TH35 | ■ | ■ | ■ | □ | □ | □ | □ | □ | □ |
| TL08 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| TL55 | ■ | □ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| TP13 | ■ | □ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| UC44 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| UJ21 | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| VG09 | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| VM29 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |
| XO36 | ■ | ■ | □ | □ | □ | □ | ■ | □ | ■ |
| XP06 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |

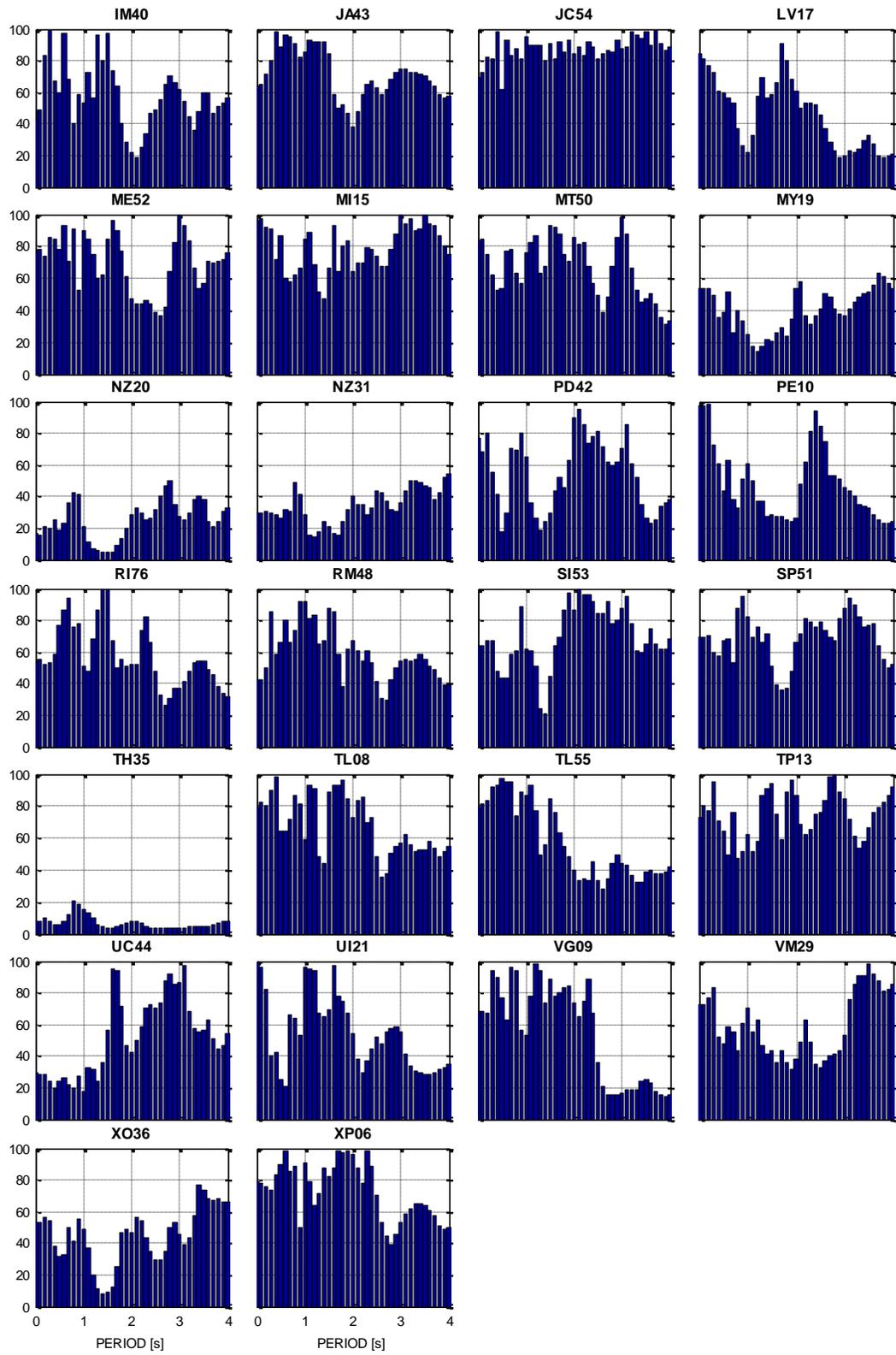
Comparación de espectros de respuesta real (rojo) y calculado CENA (azul) 20/03/2012 EW





Métrica obtenida entre los valores reales y sintéticos CENA 20/03/2012 EW



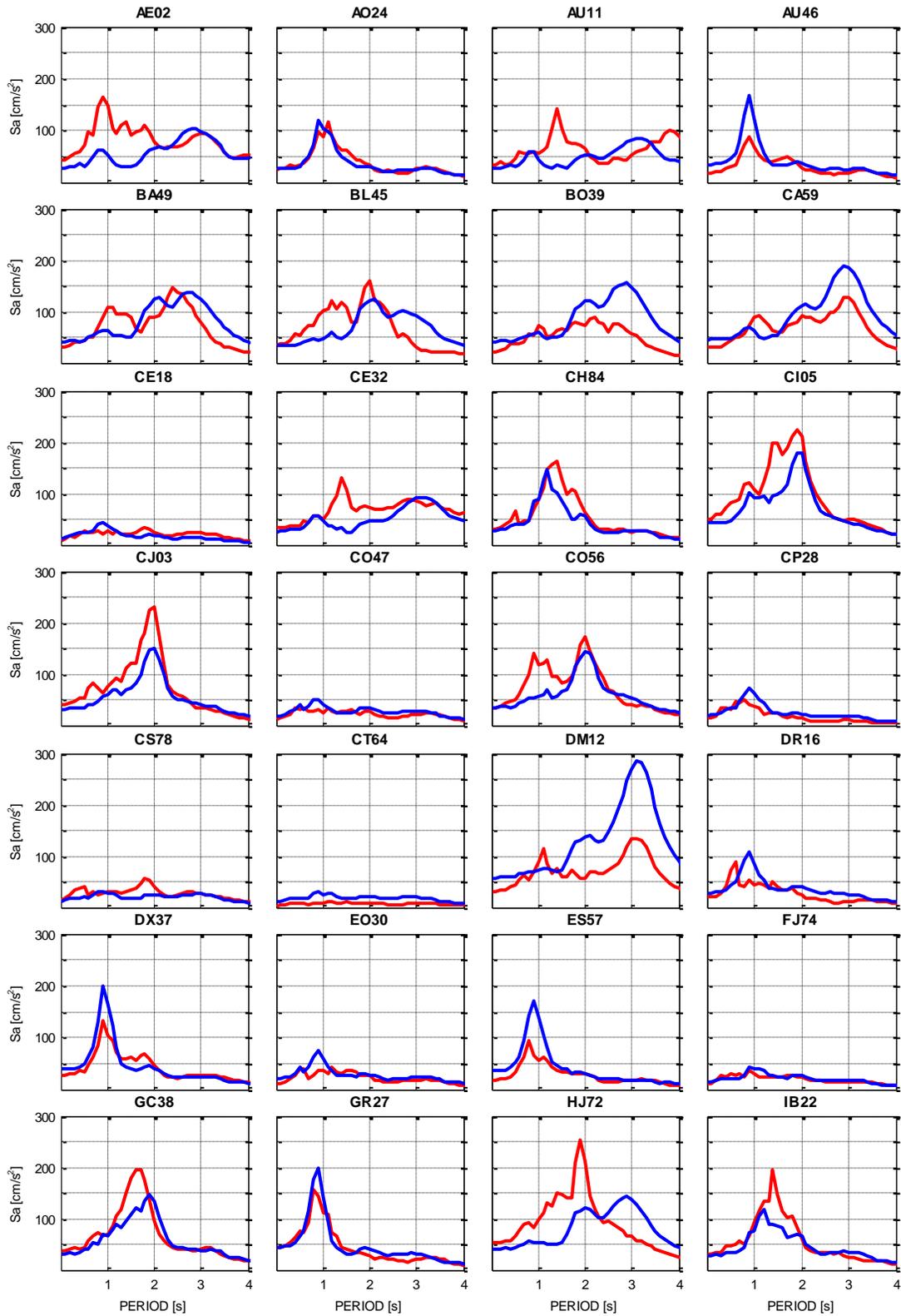


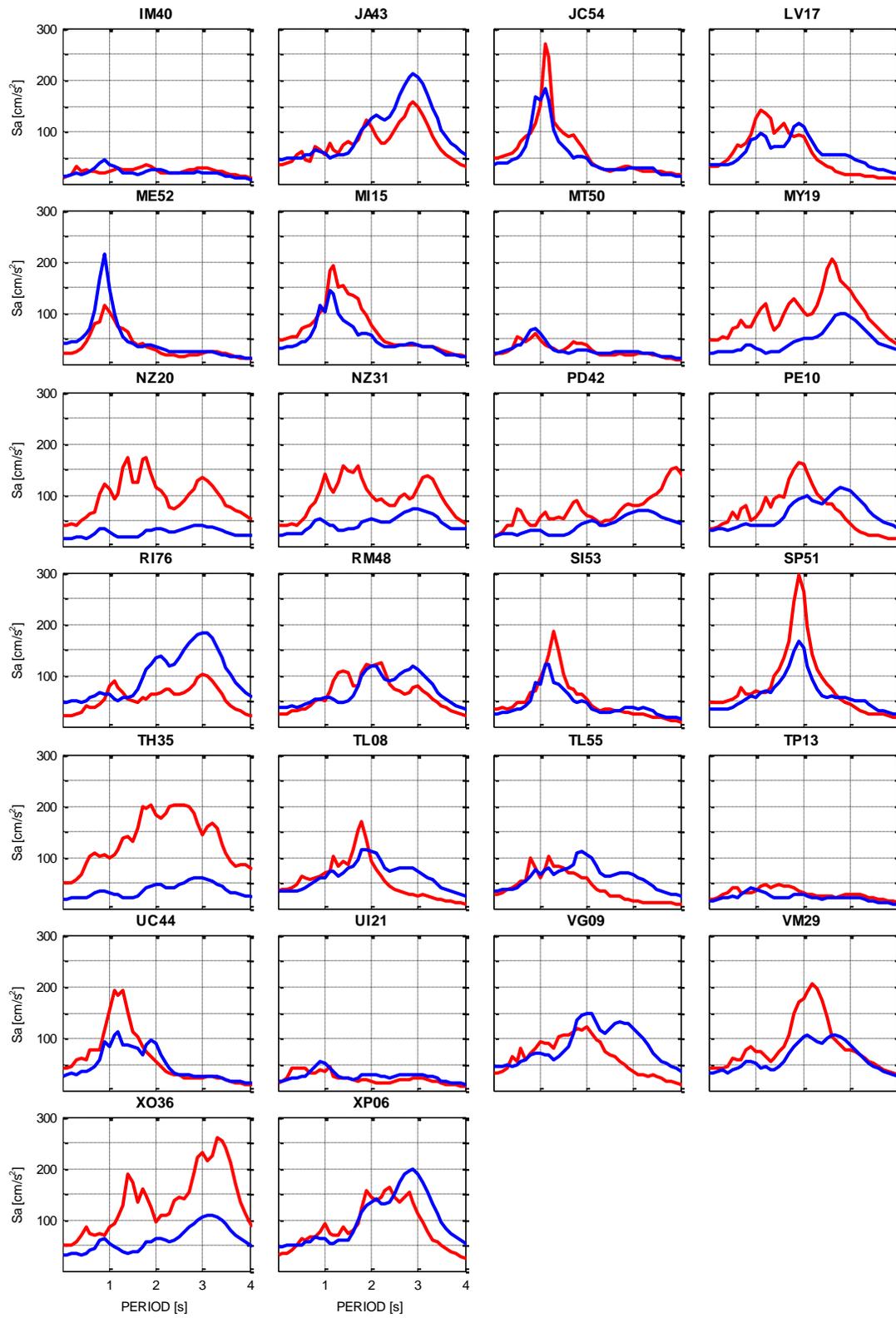
Resumen métrico de SA entre los valores reales y sintéticos CENA 20/03/2012 EW

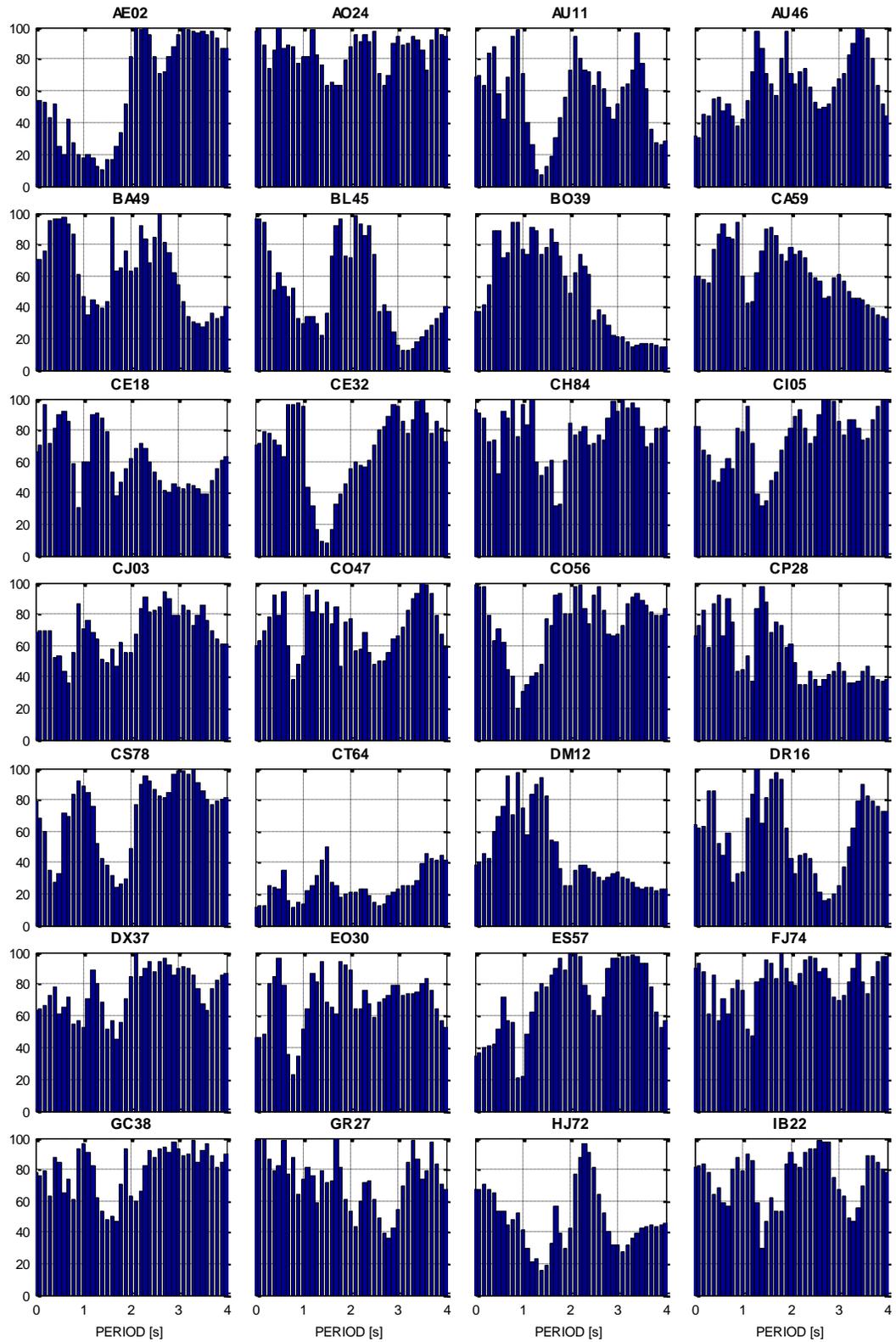
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| AE02 | 35-45 poor fit | 35-45 poor fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| AO24 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit |
| AU11 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit |
| AU46 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit |
| BA49 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| BL45 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit |
| BO39 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit |
| CA59 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit |
| CE18 | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit |
| CE32 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| CH84 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit |
| CI05 | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit |
| CJ03 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| CO47 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| CO66 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit |
| CP28 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 35-45 poor fit |
| CS78 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit |
| CT64 | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit |
| DM12 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit |
| DR16 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit |
| DX37 | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| EO30 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| ES57 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| FJ74 | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| GC38 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| GR27 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit |
| HJ72 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit |
| IB22 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |

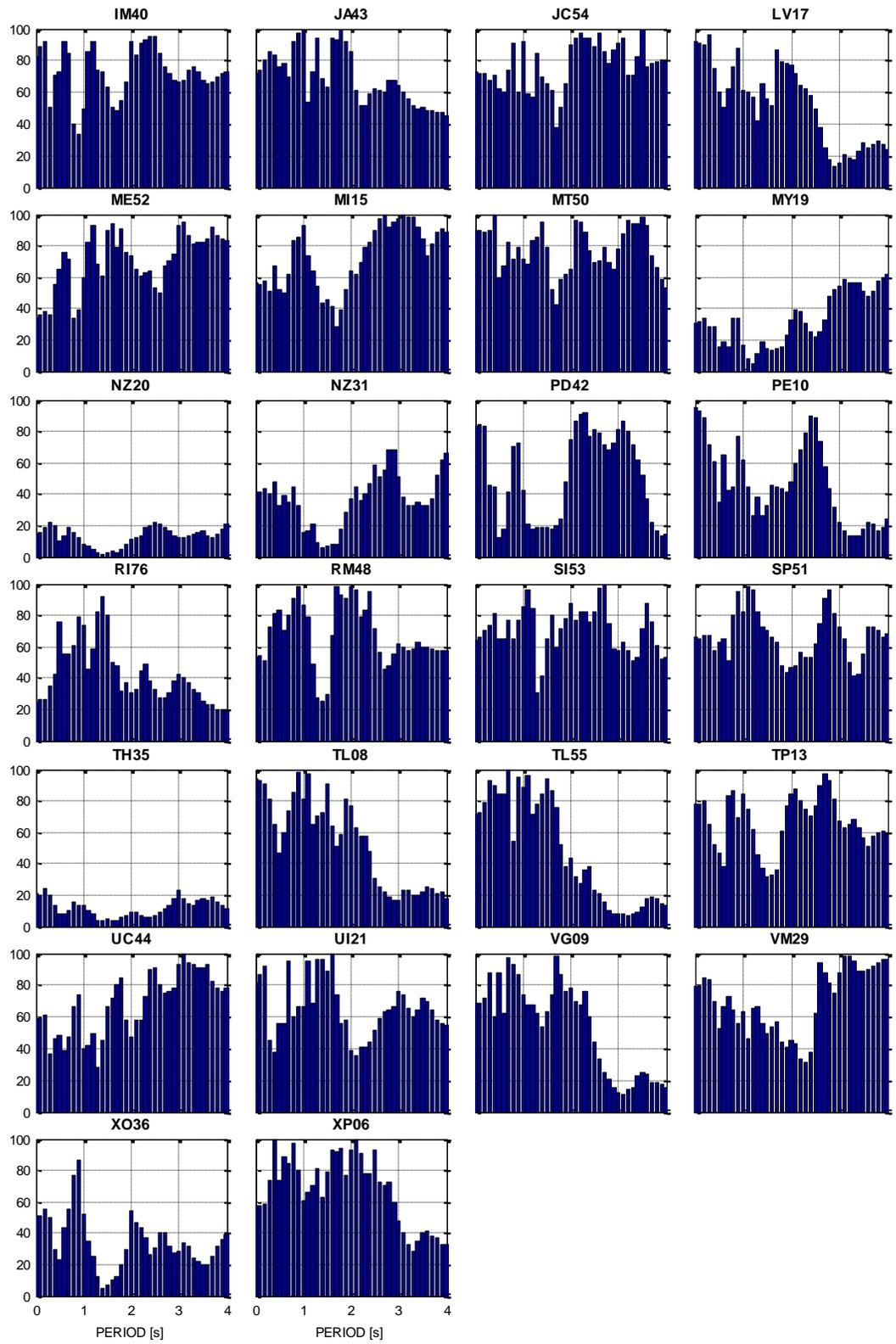
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| IM40 | Orange | Blue | Blue | Teal | Orange | Orange | White | Orange | Orange |
| JA43 | Teal | Teal | Blue | Blue | Blue | Blue | Red | Teal | Orange |
| JC54 | Teal | Blue | Blue | Blue | Orange | Blue | Blue | Blue | Blue |
| LV17 | Blue | Teal | Teal | Orange | Orange | White | Orange | White | White |
| ME52 | Teal | Teal | Blue | Blue | Teal | Blue | Orange | Blue | Teal |
| M15 | Blue | Blue | Blue | Teal | Blue | Blue | Teal | Blue | Teal |
| MT50 | Blue | Teal | Orange | Orange | Orange | Teal | Blue | Blue | White |
| MY19 | Orange | Orange | Orange | Red | Red | White | Orange | Red | Orange |
| NZ20 | White |
| NZ31 | White | White | White | White | White | White | Red | Red | Orange |
| PD42 | Teal | Blue | Orange | Red | White | Teal | Blue | Teal | Red |
| PE10 | Blue | Blue | Teal | Orange | Red | Orange | White | Orange | White |
| R176 | Orange | Orange | Orange | Orange | Teal | Orange | Orange | Red | White |
| RM48 | Red | Orange | Blue | Orange | Teal | Blue | Teal | Orange | Red |
| SI53 | Orange | Teal | Teal | Orange | Red | Orange | Blue | Blue | Teal |
| SP51 | Teal | Teal | Orange | Orange | Teal | Blue | Teal | Blue | Orange |
| TH35 | White |
| TL08 | Blue | Blue | Blue | Blue | Orange | Orange | Teal | Orange | Orange |
| TL55 | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Red | Red | Red |
| TP13 | Blue | Teal | Blue | Teal | Teal | Orange | Blue | Blue | Blue |
| UC44 | White | White | White | White | White | White | Red | Blue | Orange |
| UI21 | Blue | Blue | Red | Red | White | Blue | Orange | Orange | Red |
| VG09 | Teal | Teal | Blue | Blue | Teal | Orange | Teal | White | White |
| VM29 | Teal | Teal | Blue | Orange | Orange | Teal | Red | Orange | Blue |
| XO36 | Orange | Orange | Orange | Red | White | Orange | Orange | Orange | Teal |
| XP06 | Teal | Teal | Teal | Blue | Blue | Blue | Blue | Orange | Orange |

Comparación de espectros de respuesta real (rojo) y calculado CENA (azul) 20/03/2012 NS







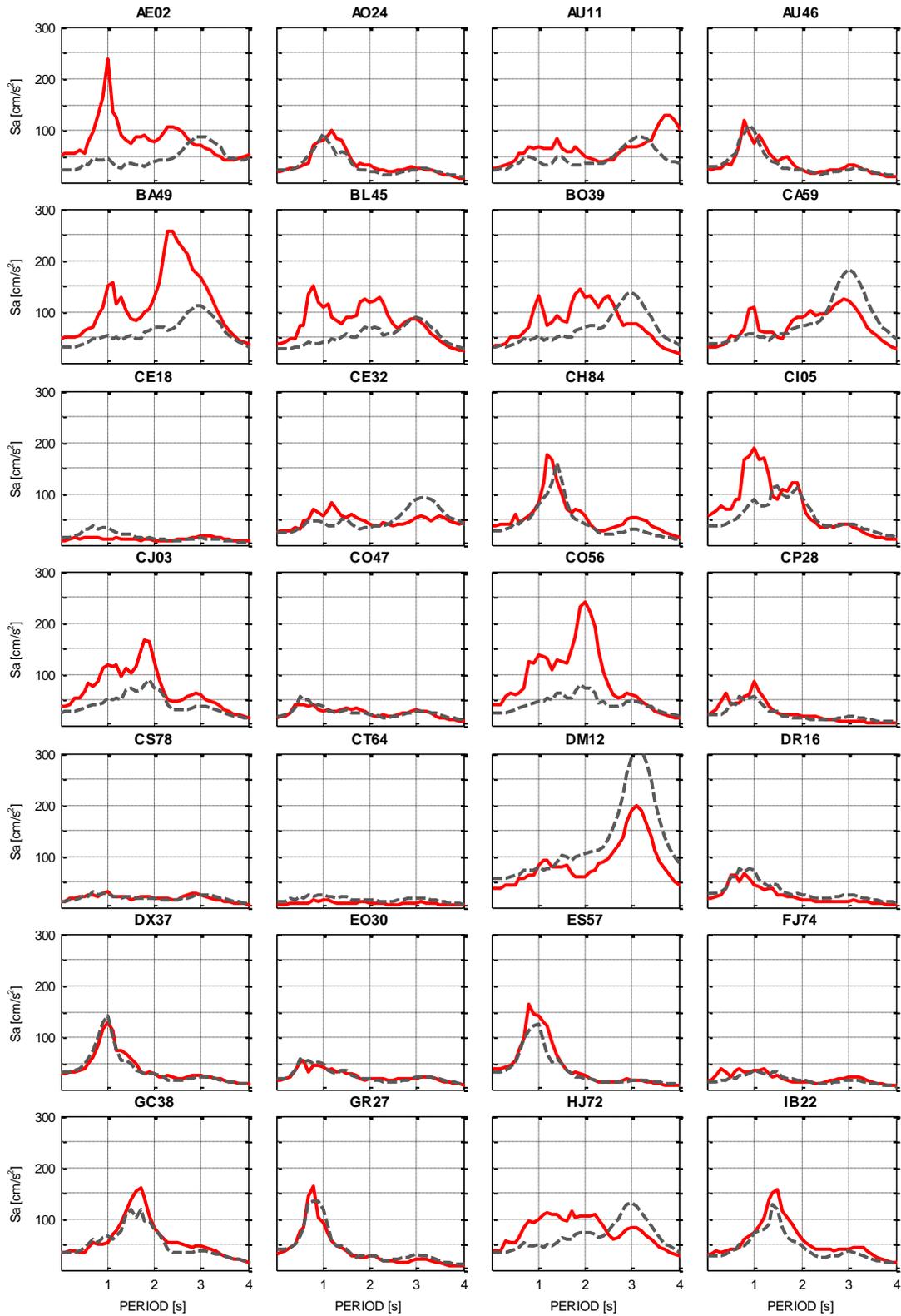


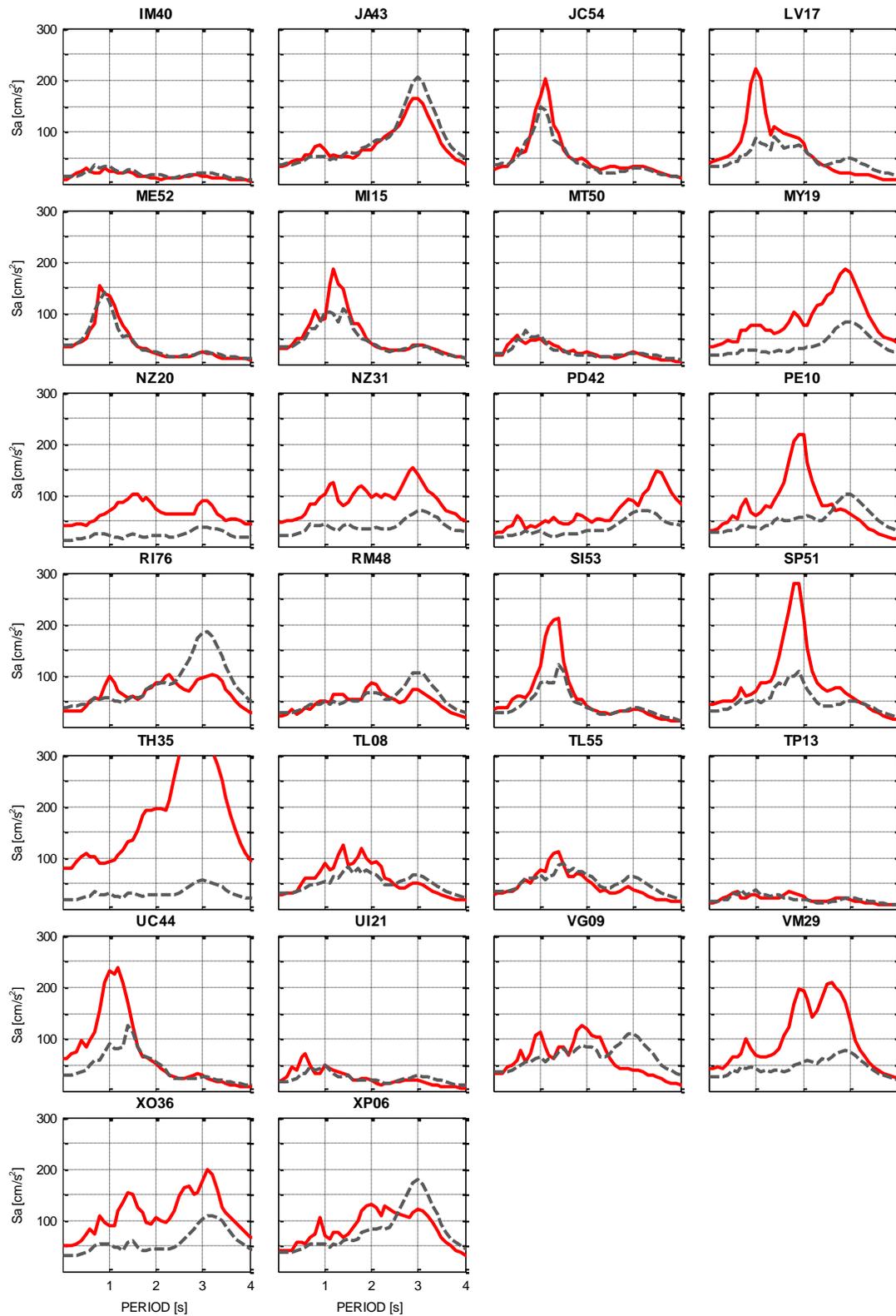
Resumen métrico de SA entre los valores reales y sintéticos CENA 20/03/2012 NS

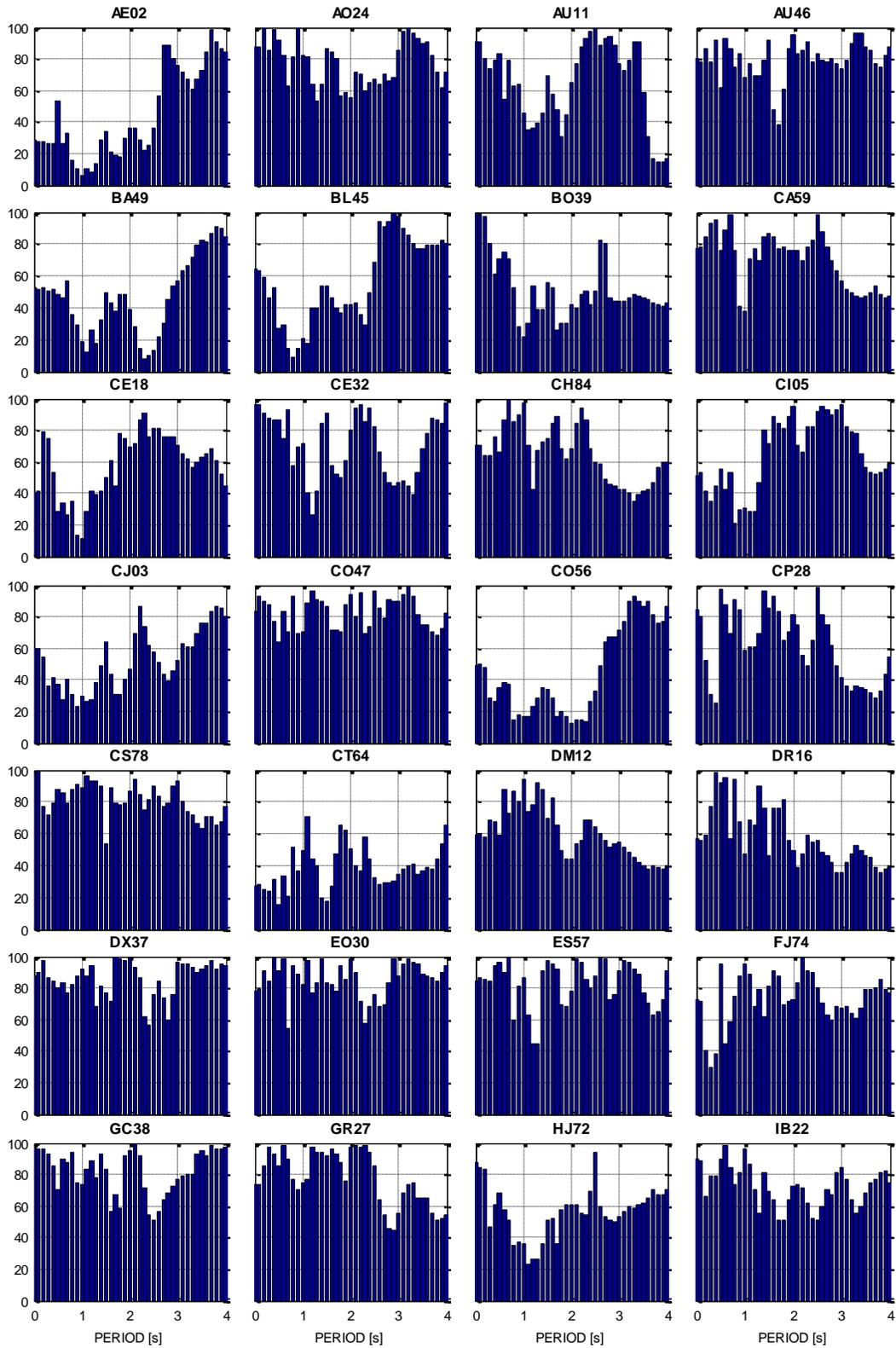
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| AE02 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| AO24 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| AU11 | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit |
| AU46 | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit |
| BA49 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit |
| BL45 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit |
| BO39 | 35-45 poor fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit |
| CA59 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit |
| CE18 | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit |
| CE32 | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit |
| CH84 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| CI05 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| CJ03 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit |
| CO47 | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit |
| CO56 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| CP28 | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit |
| CS78 | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| CT64 | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit |
| DM12 | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit |
| DR16 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 65-80 very good fit |
| DX37 | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| EO30 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit |
| ES57 | 35-45 poor fit | 35-45 poor fit | 35-45 poor fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit |
| FJ74 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| GC38 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| GR27 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit |
| HJ72 | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit |
| IB22 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit |

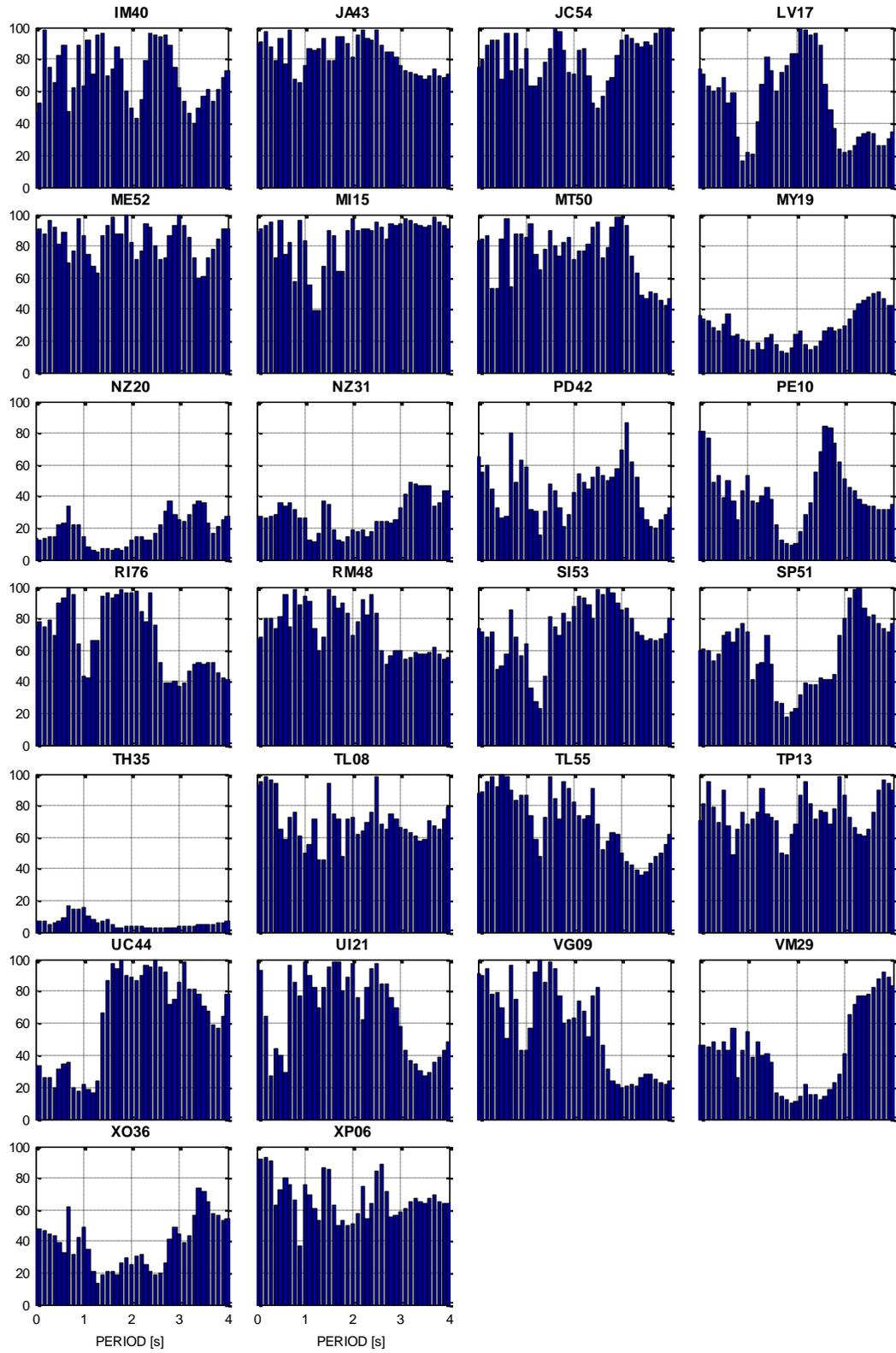
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| IM40 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| JA43 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| JC54 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| LV17 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | □ | □ |
| MES2 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| M15 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| MT50 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| MY19 | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | ■ | ■ |
| NZ20 | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ |
| NZ31 | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | □ | ■ | ■ | ■ |
| PD42 | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ | □ |
| PE10 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | □ |
| R176 | □ | □ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | □ |
| RM48 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| SI63 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| SP51 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| TH35 | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ |
| TL08 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | □ |
| TL55 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | □ |
| TP13 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| UC44 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| UI21 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| VG09 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | □ |
| VM29 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| XO36 | ■ | ■ | ■ | □ | □ | ■ | ■ | □ | ■ |
| XP06 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ |

Comparación de espectros de respuesta real (rojo) y calculado CUmud (gris) 20/03/2012 EW







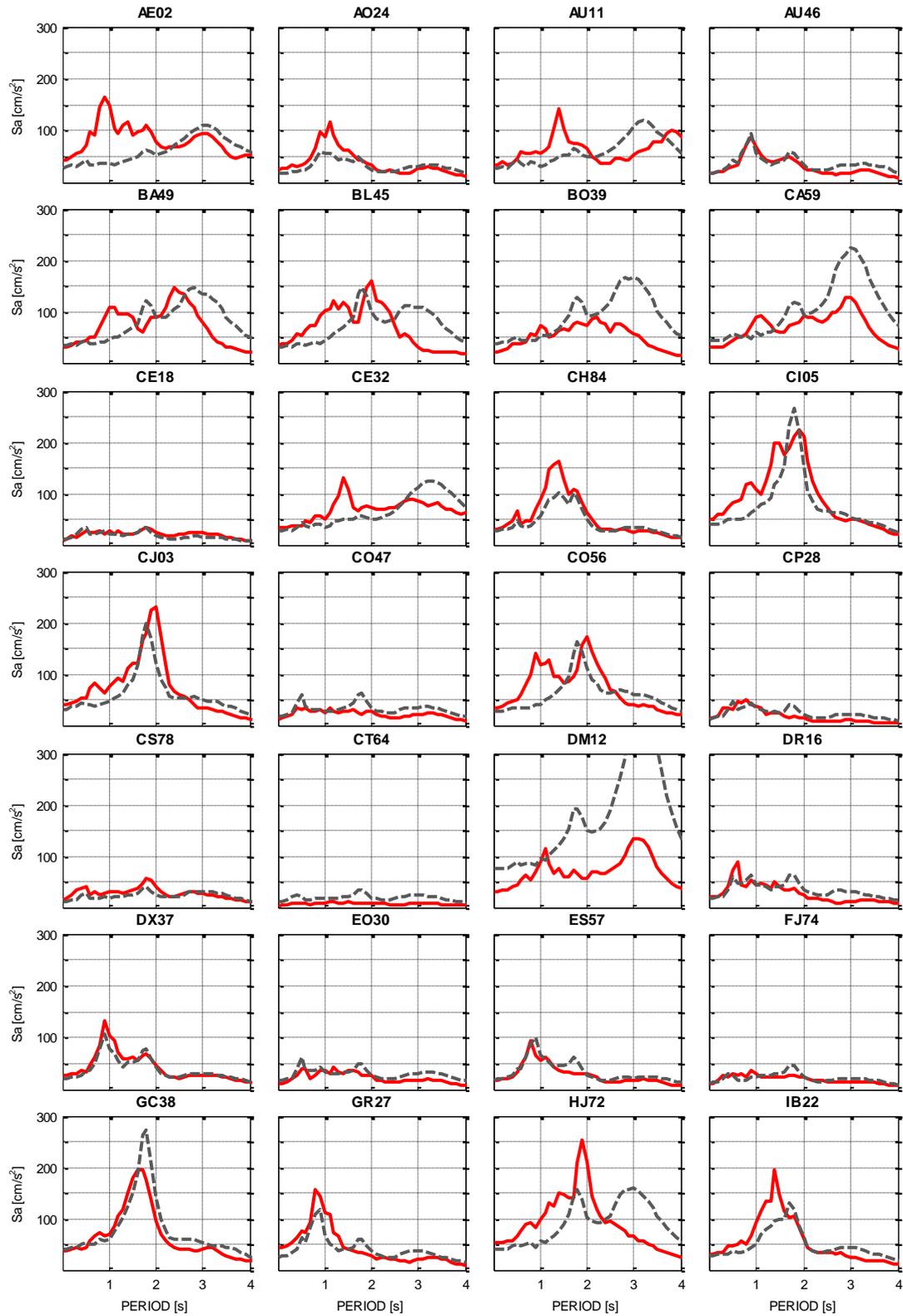


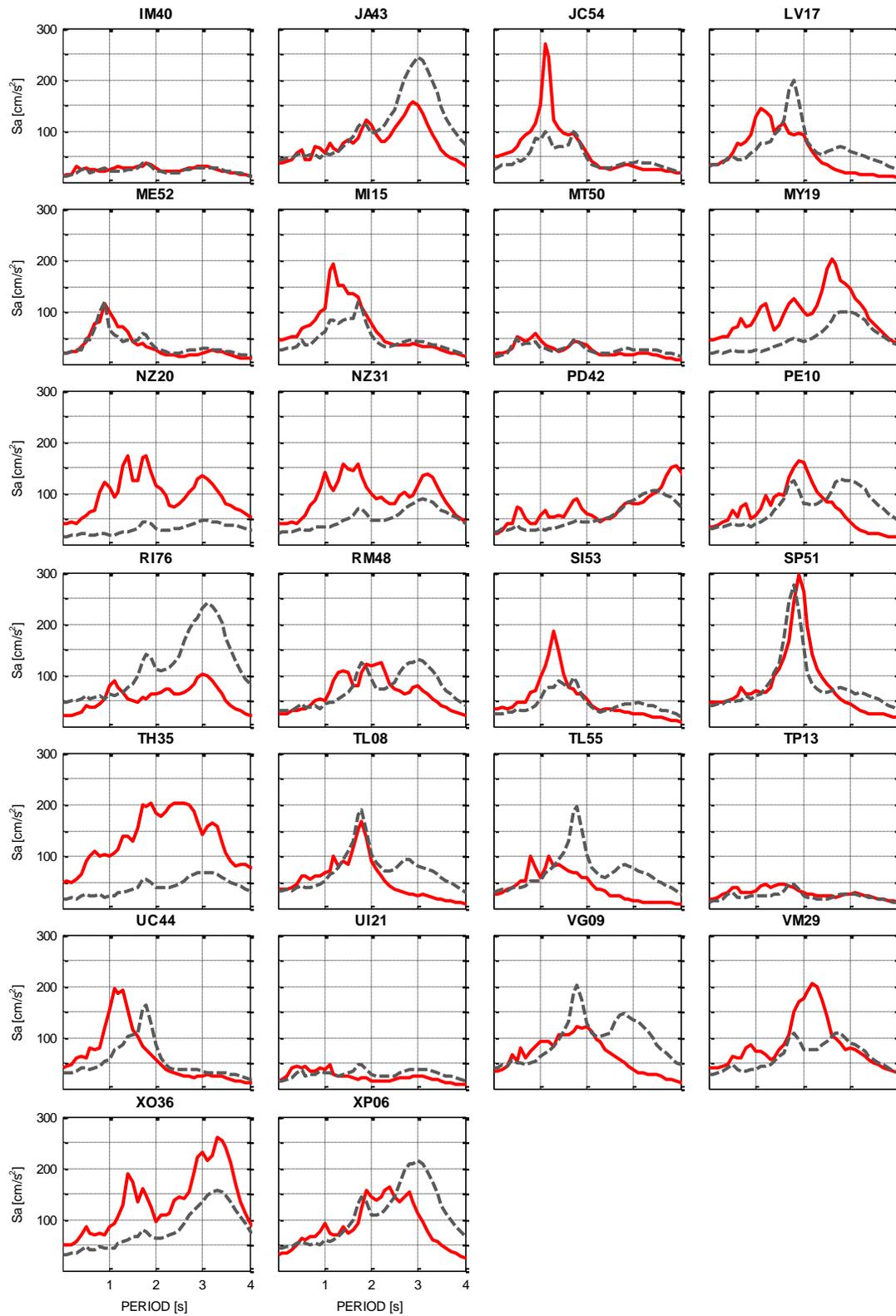
Resumen métrico de SA entre los valores reales y sintéticos CMod 20/03/2012 EW

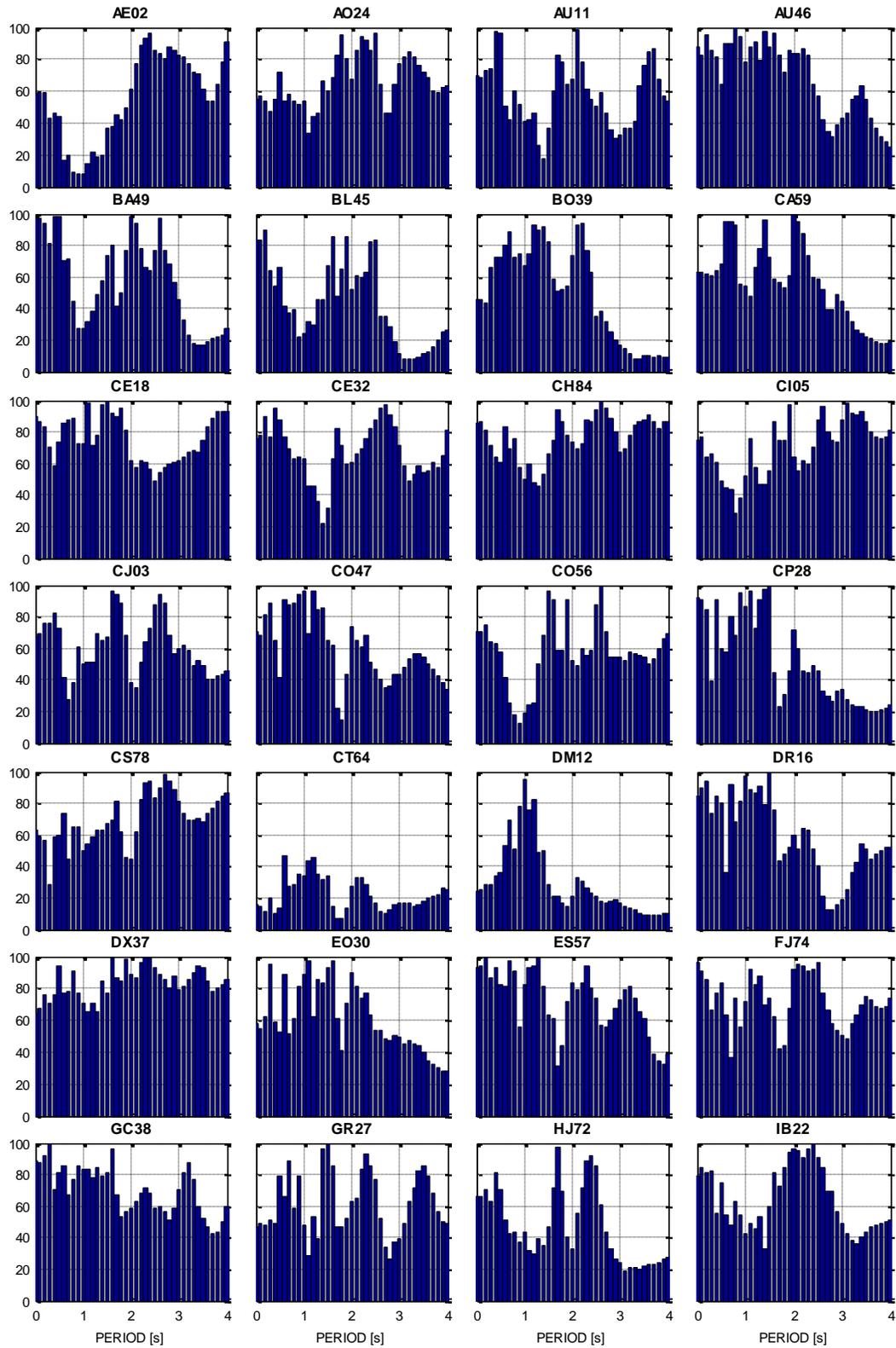
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| AE02 | □ | □ | □ | □ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |
| AO24 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| AU11 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ |
| AU46 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| BA49 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |
| BL45 | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | □ | ■ | ■ | ■ |
| BO39 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |
| CA59 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| CE18 | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | □ | ■ | ■ | ■ |
| CE32 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| CH84 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| CI05 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |
| CJ03 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ |
| CO47 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| CO66 | ■ | ■ | □ | □ | ■ | □ | □ | ■ | ■ |
| CP28 | ■ | ■ | □ | □ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| CS78 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| CT64 | □ | □ | □ | □ | □ | ■ | ■ | □ | ■ |
| DM12 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| DR16 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| DX37 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| EO30 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| ES57 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| FJ74 | ■ | ■ | □ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| GC38 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| GR27 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| HJ72 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| IB22 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

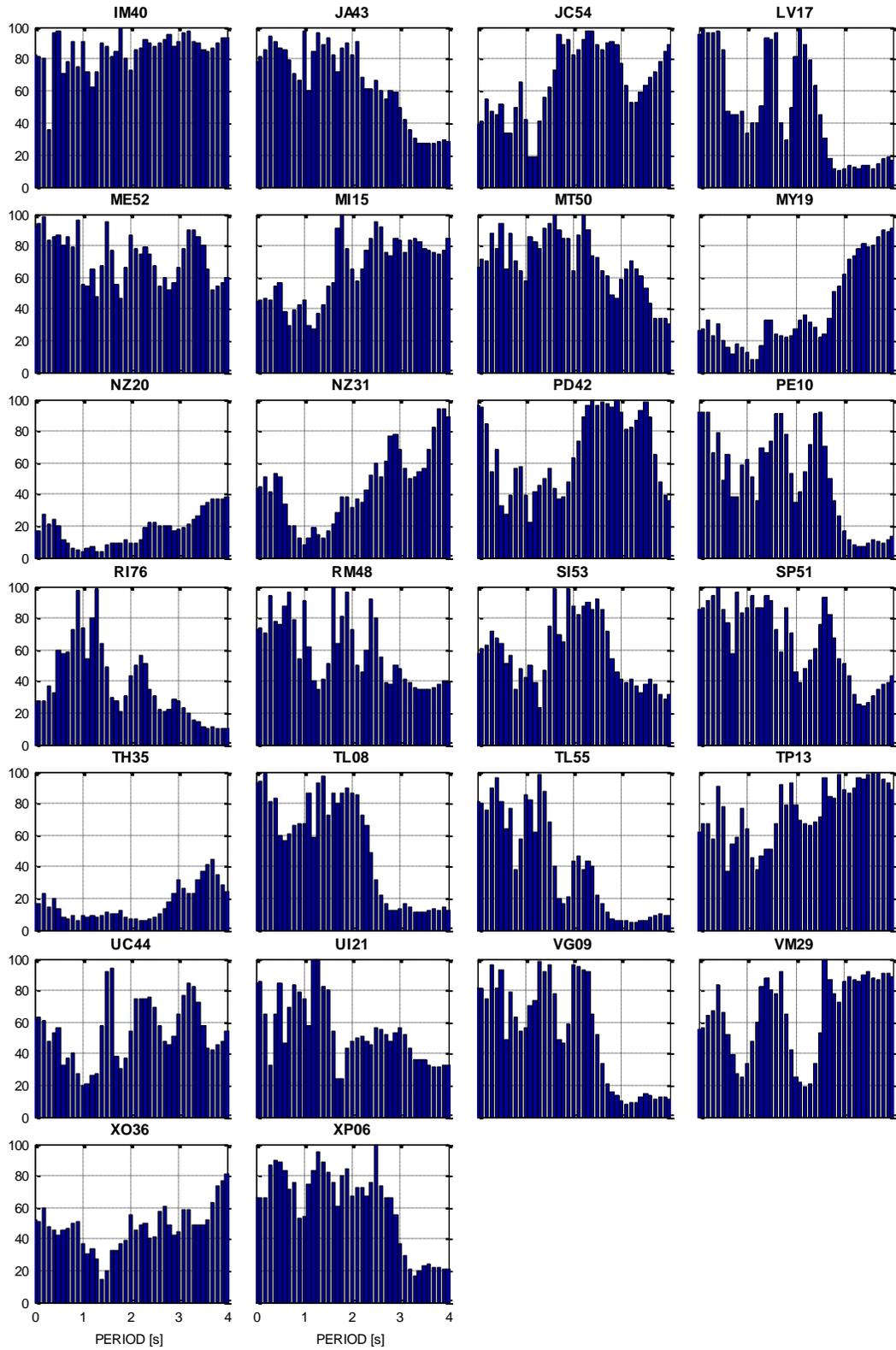
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| IM40 | Orange | Blue | Teal | Teal | Blue | Orange | Orange | Orange | Teal |
| JA43 | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Teal | Blue | Teal | Teal |
| JC54 | Teal | Blue | Blue | Blue | Teal | Blue | Teal | Blue | Blue |
| LV17 | Teal | Orange | Orange | Orange | Teal | White | Blue | White | Red |
| MES2 | Blue |
| M15 | Blue | Blue | Blue | Teal | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue |
| MT50 | Blue | Blue | Orange | Orange | Blue | Blue | Teal | Blue | Orange |
| MY19 | White | Red |
| NZ20 | White |
| NZ31 | White | White | White | White | Red | White | White | White | Red |
| PD42 | Orange | Orange | Orange | White | White | Orange | Red | Teal | White |
| PE10 | Blue | Teal | Orange | Orange | Red | Orange | White | Orange | Red |
| R176 | Teal | Teal | Teal | Teal | Blue | Red | Blue | Red | Red |
| RM48 | Teal | Blue | Blue | Teal | Blue | Blue | Teal | Orange | Orange |
| SI63 | Teal | Teal | Teal | Orange | Orange | Orange | Blue | Blue | Blue |
| SP51 | Orange | Orange | Orange | Orange | Teal | Teal | White | Blue | Teal |
| TH35 | White |
| TL08 | Blue | Blue | Blue | Blue | Teal | Orange | Teal | Teal | Teal |
| TL55 | Blue | Orange | Orange |
| TP13 | Blue | Blue | Teal | Teal | Blue | Teal | Teal | Blue | Blue |
| UC44 | White | White | White | White | White | White | Blue | Blue | Teal |
| UI21 | Blue | Orange | White | Red | Red | Blue | Blue | Orange | Orange |
| VG09 | Blue | Blue | Teal | Blue | Teal | Red | Orange | White | White |
| VM29 | Orange | Orange | Orange | Red | Orange | Orange | White | Red | Blue |
| XO36 | Orange | Orange | Orange | Red | Red | Orange | White | Orange | Orange |
| XP06 | Blue | Blue | Blue | Orange | Teal | Teal | Orange | Orange | Orange |

Comparación de espectros de respuesta real (rojo) y calculado CUmud (gris) 20/03/2012 NS









Resumen métrico de SA entre los valores reales y sintéticos CUmod 20/03/2012 NS

| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| AE02 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| AO24 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit |
| AU11 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit |
| AU46 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit |
| BA49 | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit |
| BL45 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit |
| BO39 | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit |
| CA59 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit |
| CE18 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit |
| CE32 | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| CH84 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| CI05 | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| CJ03 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit |
| CO47 | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit |
| CO66 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit |
| CP28 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit |
| CS78 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit |
| CT64 | 0-35 bad fit |
| DM12 | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit |
| DR16 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit | 45-65 fair fit |
| DX37 | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit |
| EO30 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 0-35 bad fit |
| ES57 | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit |
| FJ74 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit |
| GC38 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit |
| GR27 | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit | 35-45 poor fit | 45-65 fair fit |
| HJ72 | 65-80 very good fit | 65-80 very good fit | 45-65 fair fit | 80-100 excellent fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit | 0-35 bad fit |
| IB22 | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 65-80 very good fit | 35-45 poor fit | 80-100 excellent fit | 45-65 fair fit | 45-65 fair fit |

| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| IM40 | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Blue | Teal | Blue | Blue |
| JA43 | Blue | Orange | White |
| JC54 | Red | Orange | Orange | Orange | Orange | Red | Blue | Teal | Blue |
| LV17 | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | White | Blue | White | White |
| ME52 | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Orange | Blue | Teal | Orange |
| M15 | Orange | Orange | Orange | Orange | Orange | Orange | Teal | Blue | Blue |
| MT50 | Teal | Teal | Blue | Teal | Blue | Orange | Orange | Orange | White |
| MY19 | White | Orange | Blue |
| NZ20 | White | Red |
| NZ31 | Orange | Orange | Red | Orange | Orange | White | White | Teal | Blue |
| PD42 | Blue | Blue | Orange | Teal | White | Red | Orange | Blue | Red |
| PE10 | Blue | Blue | Teal | Teal | Orange | Orange | Red | White | White |
| R176 | White | White | Red | White | Orange | Teal | Red | White | White |
| RM48 | Teal | Teal | Blue | Teal | Teal | Blue | Teal | Orange | Red |
| SI53 | Orange | Orange | Teal | Teal | Orange | Red | Blue | Red | White |
| SP51 | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Orange | Orange | Red |
| TH35 | White |
| TL08 | Blue | Blue | Blue | Blue | Orange | Teal | Blue | White | White |
| TL55 | Blue | Teal | Blue | Blue | Blue | Blue | Red | White | White |
| TP13 | Teal | Teal | Orange | Blue | Teal | Orange | Teal | Blue | Blue |
| UC44 | Orange | Orange | Orange | Orange | Orange | White | Orange | Teal | Orange |
| UI21 | Blue | Teal | White | Teal | Blue | Teal | Orange | Orange | White |
| VG09 | Blue | Teal | Blue | Blue | Blue | Orange | Blue | White | White |
| VM29 | Orange | Orange | Teal | Blue | Teal | White | White | Blue | Blue |
| XO36 | Orange | Orange | Orange | Orange | Red | Red | Orange | Orange | Blue |
| XP06 | Teal | Teal | Blue | Blue | Blue | Orange | Teal | Red | White |