



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría En Ciencias Línea Terminal Estructuras

INTENSIDAD SÍSMICA EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO, CONSIDERANDO
SISMOS DE FALLA INVERSA Y NORMAL, PARA ACOTAR EL RIESGO DE
EDIFICACIONES.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias Línea Terminal Estructuras

Presenta:

Ing. Noel Zavala Gutiérrez

Dirigido por:

M.C. Alejandro Clemente Chávez
Director

Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto
Co-Director

M.C. Alejandro Clemente Chávez
Presidente

Firma

Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto
Secretario

Firma

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Vocal

Firma

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras
Suplente

Firma

M.C. Mario González Martínez
Suplente

Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría En Ciencias Línea Terminal Estructuras

INTENSIDAD SÍSMICA EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO, CONSIDERANDO
SISMOS DE FALLA INVERSA Y NORMAL, PARA ACOTAR EL RIESGO DE
EDIFICACIONES.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias Línea Terminal Estructuras

Presenta:

Ing. Noel Zavala Gutiérrez

Dirigido por:

M.C. Alejandro Clemente Chávez
Director

Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto
Co-Director

M.C. Alejandro Clemente Chávez

Presidente

Firma

Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto

Secretario

Firma

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Vocal

Firma

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras

Suplente

Firma

M.C. Mario González Martínez

Suplente

Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Junio de 2019.

RESUMEN

Cuando se habla de la ciudad de Querétaro referente a actividad sísmica, es común escuchar que ésta no se ve afectada por este tipo de fenómenos, resulta entonces en una incertidumbre el determinar si los edificios actualmente construidos fueron diseñados de manera óptima ante estos efectos. Además, la ciudad cuenta con uno de los mayores desarrollos poblacionales (y por ende habitacionales, comerciales e industriales) del país. Por esta razón, en el presente trabajo se planteó como objetivo delimitar el riesgo en las edificaciones a causa de los efectos sísmicos que caracterizan a la ciudad. Para esto, fue necesario conocer los niveles de intensidad sísmica en función de las máximas pseudoaceleraciones para un periodo estructural determinado, presentes en toda la ciudad durante la ocurrencia de diferentes sismos. La metodología consistió en la implementación de un sismógrafo de banda ancha para el registro de microtemores (vibración ambiental) a lo largo y ancho de la ciudad y su zona conurbada. La técnica aplicada fue *HVNR (Horizontal to Vertical Noise Ratio)* para determinar la frecuencia y amplificación de las ondas que viajan a través del terreno. Posteriormente se generaron acelerogramas sintéticos (AS) utilizando registros sísmicos de variada magnitud, tipo de sismicidad y distancia epicentral registrados en la estación sísmica del Centro de Geociencias de la UNAM, campus Juriquilla, ubicada en la ciudad, con la intención de conocer la aceleración en diferentes partes del área de estudio. Finalmente, mediante espectros de respuesta en pseudoaceleración se determinaron los niveles de intensidad sísmica que afectan a estructuras con un periodo estructural determinado, permitiendo así acotar el riesgo sísmico dependiendo de la zona y la construcción que se encuentre edificada sobre ésta. Los resultados demuestran que la ciudad cuenta con amplificaciones de onda (cociente espectral *HVNR*) de hasta 10 veces, lo que se traduce en aceleraciones máximas de hasta 20 gal y ordenadas espectrales cercanas a 80 gal para varios puntos en la ciudad. Se concluye que, acotando el riesgo sísmico considerando tanto el movimiento del terreno como el de las edificaciones, la ciudad puede presentar riesgos elevados para cierto tipo de sismos. Esta información puede ser contrastada respecto a los códigos vigentes de construcción y determinar si son apropiados para el caso particular que representa la ciudad de Querétaro y sus anexos.

(Palabras clave: intensidad sísmica, mapa de riesgo sísmico, microtemores, efecto de sitio, periodo fundamental, microzonificación).

SUMMARY

When talking about the city of Querétaro referring to seismic activity, it is common to hear that this is not affected by this type of phenomena, it is then an uncertainty to determine if the buildings currently constructed were optimally designed for these effects. In addition, the city has one of the largest population developments (and therefore residential, commercial and industrial) of the country. For this reason, in the present work the objective was to define the risk in the buildings due to the seismic effects that characterize the city. For this, it was necessary to know the levels of seismic intensity in function of the maximum pseudoaccelerations for a determined structural period, present in all the city during the occurrence of different earthquakes. The methodology consisted in the implementation of a broadband seismometer for the registration of microtremors (environmental vibration) throughout the city and its conurbation. The applied technique was HVNR (Horizontal to Vertical Noise Ratio) to determine the frequency and amplification of the waves traveling through the ground. Subsequently, synthetic accelerograms (AS) were generated using seismic records of varying magnitude, type of seismicity and epicentral distance recorded in the seismic station at the Centro de Geociencias of the UNAM, Juriquilla campus, located in the city, with the intention of knowing the acceleration in different parts of the study area. Finally, by means of pseudo-acceleration response spectra, seismic intensity levels affecting structures with a specific structural period were determined, thus limiting the seismic risk depending on the area and the construction that is built on it. The results show that the city has wave amplifications (HVNR spectral quotient) of up to 10 times, which translates into maximum accelerations of up to 20 gal and spectral ordinates close to 80 gal for several points in the city. It is concluded that, limiting the seismic risk considering both the movement of the ground and that of buildings, the city may present high risks for certain types of earthquakes. This information can be contrasted with the current construction codes and determine if they are appropriate for the particular case that represents the city of Querétaro and its annexes.

(Key words: Seismic Intensity, hazard seismic map, microtremors, site effect, fundamental period, microzonation).

DEDICATORIAS

A dios, por permitirme estar en esta vida y
disfrutar de las emociones que conlleva.

A mis padres, por educarme según su leal saber
y entender, me han hecho la persona
que soy hoy en día.

A mis hermanos, por motivarme a superarme y
presionarme en todo momento.

A mi novia, por ser el soporte emocional que
necesitaba durante esta etapa.

A mis compañeros, por estar motivando a
permanecer en la maestría.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada. El apoyo financiero y la confianza depositada en mí me permitieron llegar a la conclusión de mi posgrado.

A la Universidad Nacional Autónoma de Querétaro (UAQ), por permitirme cursar mis estudios de posgrado en tan prestigiosa institución.

A mi director de tesis, el M. en C. Alejandro Clemente Chávez, por haberme aceptado como su tesista y estar siempre presente para despejar mis dudas.

A mi co-director de tesis, el Dr. Ángel Figueroa Soto, mediante el Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), por el apoyo con el manejo de las herramientas y equipo utilizado durante la experimentación.

A mis colaboradores, por haber aceptado formar parte de este equipo, en especial al M. en C. Mario González Martínez, sé que sin su apoyo no hubiera sido posible la pronta culminación de mis estudios.

A los miembros de la maestría en ciencias por ser motivo de inspiración para continuar mejorando en mi trabajo y permitirme ver los distintos enfoques de investigación para aprender nuevas perspectivas de la ciencia, mención especial a los miembros de mi generación con quien logré tener una etapa muy satisfactoria.

CONTENIDO

RESUMEN.....	I
SUMMARY	II
DEDICATORIAS	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN	4
1.2 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	6
1.2.1 Hipótesis.....	6
1.2.2 Objetivo general	6
1.2.3 Objetivos particulares.....	6
2. ANTECEDENTES	8
2.1 ESTUDIOS PREVIOS EN DIFERENTES PARTES DEL MUNDO.....	8
2.2 ESTUDIOS PREVIOS EN EL MUNICIPIO DE QUERÉTARO	14
2.3 EL CASO PARTICULAR DE LA CIUDAD DE QUERÉTARO Y SU GEOENTORNO	20
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	23
3.1 CONCEPTOS BÁSICOS	23
3.2 TÉCNICA DE COCIENTES ESPECTRALES CON RUIDO AMBIENTAL (<i>HORIZONTAL TO VERTICAL NOISE RATIO</i> o <i>HVNR</i>)	26
3.2.1 HVNR mediante Media Cuadrática (MC).....	29
3.2.2 HVNR mediante densidades espectrales direccionales (DED).....	31
3.3 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA TEÓRICAS (FTT).....	32
3.4 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS (FTE)	33
3.5 ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS.....	34

3.6	EVALUACIÓN DE RESPUESTA DINÁMICA DE ESTRUCTURAS	36
3.7	MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN EN DISTRIBUCIONES.	40
4.	METODOLOGÍA.....	42
4.1	ADQUISICIÓN DE DATOS.....	43
4.1.1	<i>Equipo.....</i>	43
4.1.2	<i>Registro de microtemores.....</i>	45
4.1.3	<i>Registros sísmicos.....</i>	51
4.2	ESTIMACIÓN DEL EFECTO DE SITIO.....	54
4.3	ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS.....	57
4.4	DISTRIBUCIÓN DE SEUDOACELERACIONES (SA).....	61
4.5	MAPAS DE INTENSIDAD SÍSMICA.....	63
4.6	MAPAS DE RIESGO SÍSMICO	66
5.	RESULTADOS	69
5.1	FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS	69
5.2	INTENSIDAD SÍSMICA	71
5.2.1	<i>Sismo del 01 de mayo del 2012</i>	71
5.2.2	<i>Sismo del 11 de abril del 2012.....</i>	73
5.2.3	<i>Sismo del 15 de noviembre del 2012.....</i>	75
5.2.4	<i>Sismo del 21 de agosto del 2013.....</i>	77
5.2.5	<i>Sismo del 19 de septiembre del 2017.....</i>	79
5.3	RIESGO SÍSMICO	81
5.3.1	<i>Sismo del 01 de mayo del 2012</i>	81
5.3.2	<i>Sismo del 11 de abril del 2012.....</i>	84
5.3.3	<i>Sismo del 15 de noviembre del 2012.....</i>	86
5.3.4	<i>Sismo del 21 de agosto del 2013.....</i>	88
5.3.5	<i>Sismo del 19 de septiembre del 2017.....</i>	90
6.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	92
6.1	DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS	92
6.2	DEL EFECTO DE SITIO EN QUERÉTARO	95

6.3	DE LOS ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS (AS) GENERADOS.....	99
6.4	DE LOS ESPECTROS DE SEUDO ACELERACIÓN (ESA) ESTIMADOS	102
6.5	DE LOS MAPAS DE RIESGO SÍSMICO	108
7.	CONCLUSIONES	110
	REFERENCIAS.....	112
	APÉNDICE 1. SEÑALES DE REGISTROS SÍSMICOS Y SU EAF.	120
	APÉNDICE 2. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS (HVNR).....	125
	APÉNDICE 3. ALGORITMO PARA GENERAR ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS.	132
	APÉNDICE 4. VALIDACIÓN DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS.	136
	APÉNDICE 5. ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS.	138
	APÉNDICE 6. ANÁLISIS DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA TEÓRICAS (FTT).....	148

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Comparativa de resultados respecto a frecuencias fundamentales obtenida por Bustillos usando un acelerógrafo en 2005 y González implementando un sismógrafo en 2014 (González, 2014).	16
Tabla 4-1 Localización de los puntos donde se llevaron a cabo registros.....	48
Tabla 4-2 Sismos analizados para tomar como referencia registrados en CGEO.	52
Tabla 4-3 Sismos registrados en CGEO utilizados como referencia para excitar el terreno.....	53
Tabla 6-1 Localización de registro de microtemores y su respectiva referencia. .	92
Tabla 6-2 Información de escenarios utilizados para estimar los niveles de SA. ...	94
Tabla 6-3 Resultados del efecto de sitio (frecuencia, periodo y amplificación fundamentales) para cada registro en la ciudad de Querétaro.....	96
Tabla 6-4 Diferencia en valores de frecuencia y amplitud.....	98
Tabla 6-5 Aceleraciones durante la ocurrencia de distintos eventos sísmicos....	101
Tabla 6-6 Variación del nivel de aceleración por periodo estructural.	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Afectaciones por sismo en CDMX el 19 de septiembre del 2017 (Noticieros Televisa, 2017).....	2
Figura 1.2 Edificio colapsado por sismo en CDMX 19 de septiembre de 2017 (Heraldo de México, 2017).	2
Figura 1.3 Extracto del reglamento de construcción de Querétaro (2008).	3
Figura 1.4 Extracto del reglamento de construcción de Querétaro (2008).	3
Figura 1.5 Regionalización sísmica en México establecida por CFE (2015).....	4
Figura 1.6 Zona metropolitana de Querétaro (Obregón y Bueno, 2015).	5
Figura 2.1 Mapa de tasas de ocurrencia para eventos predichos por el modelo de doble derivación para el periodo del 01 de enero del 2009 al 31 de diciembre del 2009 (Lombardi y Marzocchi, 2011).	9
Figura 2.2 Diagrama mostrando los tres tipos principales de movimientos de fallas (Bolt, 2003).	11
Figura 2.3 Mapa de la amplificación relativa de las aceleraciones del terreno en el municipio de Naucalpan de Juárez (Sánchez, 2015).	13
Figura 2.4 Distribución de sitios registrados (González, 2014).	15
Figura 2.5 Comparativa entre los espectros de aceleración de Fourier (EAF) del ruido ambiental registrado de manera simultánea con el sismógrafo SARA (línea continua negra) usado por González en 2014 y el acelerógrafo Terra (línea continua gris) usado por Bustillos en 2005 (González, 2014).	15

Figura 2.6 Clasificación de velocidades de corte de acuerdo con el IBC (2009) modificado para las secuencias del valle de Querétaro: S1, S2 y S3 (S3a, S3b y S3c) (Álvarez-Manilla et al., 2017).	18
Figura 2.7 Mapa de período fundamental para la Ciudad de Querétaro (Álvarez-Manilla et al., 2017).	19
Figura 2.8 Carta geológica del valle de Querétaro (Pacheco, 2007).	21
Figura 2.9 Zonificación geotécnica de Querétaro (Álvarez-Manilla et al., 2017). ..	22
Figura 3.1 Espectro de respuesta en términos de aceleración para distintos factores de amortiguamiento (Crisafulli y Villafaña, 2002).	24
Figura 3.2 Mapa de intensidad sísmica para la ciudad de Apizaco (Ismael-Hernández et al., 2011).	25
Figura 3.3 FTE obtenidas con la técnica HVNR (Lermo et al., 2013).	33
Figura 3.4 Transición de un registro en roca (real) a una estación en superficie (sintético).	35
Figura 3.5 Notación para interpolación de excitación lineal (Chopra, 2012).	37
Figura 3.6 Ilustración del método kriging ordinario (Bohórquez, 2009).	41
Figura 4.1 Pasos resumidos de metodología utilizada.	42
Figura 4.2 Diagrama de Bode que describe la respuesta instrumental del sensor Trillium Compact 120s.	43
Figura 4.3 Componentes básicos del sismógrafo utilizado en las mediciones.	44
Figura 4.4 Comparativa de fichas técnicas entre sismógrafo (izquierda), acelerógrafo (centro) y geófonos (derecha).	44

Figura 4.5 Procedimiento para adquirir la señal de microtremores.	45
Figura 4.6 Mapa de mediciones propuesto para la ciudad de Querétaro y su zona conurbada.	46
Figura 4.7 Mapa de mediciones con los registros de microtremores llevados a cabo en la ciudad de Querétaro y su zona conurbada.....	49
Figura 4.8 Colocación del sismógrafo para el registro en campo.....	50
Figura 4.9 Sismos utilizados para estimar el nivel de intensidad en la ciudad.	53
Figura 4.10 Diagrama de polos y ceros del sensor Trillium.....	55
Figura 4.11 Efecto de sitio representado mediante FTE obtenida con técnica <i>HVNR</i> para un sitio categorizado como roca.....	56
Figura 4.12 Señales de microtremores para el punto 0 (arriba) y para la parte intensa del sismo de referencia (abajo) en ventana de 100 segundos.	59
Figura 4.13 EAF para cada una de las componentes involucradas.	59
Figura 4.14 Evolución de las señales hasta generar un acelerograma sintético...	60
Figura 4.15 Traza sísmica de AS (izquierda) y ESA correspondiente (derecha)...	62
Figura 4.16 Diagrama de flujo para trazar mapas de intensidad sísmica considerando la distribución de SA para distintos periodos estructurales.	63
Figura 4.17 Diagrama de flujo para la toma de decisiones al momento de definir el riesgo sísmico.	66
Figura 4.18 Distribución de SA en la ciudad de Querétaro para un periodo estructural de 2.0 s considerando el sismo del 01 de mayo del 2012 de Mw 5.6 ocurrido en Ciudad Altamirano, Guerrero.....	68

Figura 5.1 Mapa de la ciudad de Querétaro y su zona conurbada divida en zonas según la familia espectral que la caracteriza (Roca, 5 Hz, 1 Hz, 0.50 Hz, 1 y 5 Hz, y 0.50 y 3 Hz).	70
Figura 5.2 ESA calculados considerando que el terreno está siendo excitado por el sismo del 01 de mayo del 2012 en cada registro donde se realizaron mediciones de microtremores.	71
Figura 5.3 Mapas de intensidad sísmica generados con el sismo del 01 de mayo del 2012 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (0.55 s).	72
Figura 5.4 ESA calculados considerando que el terreno está siendo excitado por el sismo del 11 de abril del 2012 en cada registro donde se realizaron mediciones de microtremores.	73
Figura 5.5 Mapas de intensidad sísmica generados con el sismo del 11 de abril del 2012 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (1.88 s).	74
Figura 5.6 ESA calculados considerando que el terreno está siendo excitado por el sismo del 15 de noviembre del 2012 en cada registro donde se realizaron mediciones de microtremores.	75
Figura 5.7 Mapas de intensidad sísmica generados con el sismo del 15 de noviembre del 2012 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (0.74 s).	76
Figura 5.8 ESA calculados considerando que el terreno está siendo excitado por el sismo del 21 de agosto del 2013 en cada registro donde se realizaron mediciones de microtremores.	77

Figura 5.9 Mapas de intensidad sísmica generados con el sismo del 21 de agosto del 2013 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (1.44 s).....	78
Figura 5.10 ESA calculados considerando que el terreno está siendo excitado por el sismo del 19 de septiembre del 2017 en cada registro donde se realizaron mediciones de microtemores.	79
Figura 5.11 Mapas de intensidad sísmica generados con el sismo del 19 de septiembre del 2017 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (5.0 s).	80
Figura 5.12 Mapas de riesgo, en función de las estructuras que se encuentran edificadas en la ciudad, considerando el sismo del 01 de mayo del 2012 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (0.55 s), resaltando en círculo azul edificios de importancia en la zona.....	83
Figura 5.13 Mapas de riesgo, en función de las estructuras que se encuentran edificadas en la ciudad, considerando el sismo del 11 de abril del 2012 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (1.88 s), resaltando en círculo azul edificios de importancia en la zona.....	85
Figura 5.14 Mapas de riesgo, en función de las estructuras que se encuentran edificadas en la ciudad, considerando sismo de 15 de noviembre de 2012 para periodos estructurales a) 0.1s, b) 0.5s, c) 1.0s, d) 2.0s, e) 5.0s y f) SA máxima (0.74s), resaltando en círculo azul edificios de importancia en la zona.....	87
Figura 5.15 Mapas de riesgo, en función de las estructuras que se encuentran edificadas en la ciudad, considerando el sismo del 21 de agosto de 2013 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5s, c) 1.0s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (1.44 s), resaltando en círculo azul edificios de importancia en la zona.....	89

Figura 5.16 Mapas de riesgo, en función de las estructuras que se encuentran edificadas en la ciudad, considerando sismo del 19 de septiembre de 2017 para periodos estructurales de a)0.1s, b)0.5s, c)1.0s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (5.7 s), resaltando en círculo azul edificios de importancia en la zona.....	91
Figura 6.1 Epicentro de sismos utilizados para simular la excitación del terreno..	94
Figura 6.2 Zonificación sísmica para la ciudad de Querétaro y su zona conurbada según la familia espectral que caracteriza al sitio.	97
Figura 6.3 ESA para el sismo del 01 de mayo del 2012 Mw 5.6.	102
Figura 6.4 ESA para el sismo del 11 de abril del 2012 Mw 6.4.	103
Figura 6.5 ESA para el sismo del 15 de noviembre del 2012 Mw 6.1.	103
Figura 6.6 ESA para el sismo del 21 de agosto del 2013 Mw 6.0.	104
Figura 6.7 ESA para sismo del 19 de septiembre del 2017 Mw 7.1.	105
Figura 6.8 Comparativa entre espectros de sitio para sismos similares (a la izquierda para el sismo Mw 8.1 ocurrido el 19 de septiembre de 1985 registrado en UAQ y a la derecha para el sismo Mw 7.1 ocurrido el 19 de septiembre de 2017 registrado en CGEO).....	106
Figura A. 1 Trazas sísmicas del evento ocurrido el 01 de mayo del 2012 en su componente a) Este, b) norte y c) vertical con el EAF correspondiente en su parte derecha.	120
Figura A. 2 Trazas sísmicas del evento ocurrido el 11 de abril del 2012 en su componente a) Este, b) norte y c) vertical con el EAF correspondiente en su parte derecha.	121

Figura A. 3 Trazas sísmicas del evento ocurrido el 15 de noviembre del 2012 en su componente a) Este, b) norte y c) vertical con el EAF correspondiente en su parte derecha.	122
Figura A. 4 Trazas sísmicas del evento ocurrido el 21 de agosto del 2013 en su componente a) Este, b) norte y c) vertical con el EAF correspondiente en su parte derecha.	123
Figura A. 5 Trazas sísmicas del evento ocurrido el 19 de septiembre del 2017 en su componente a) Este, b) norte y c) vertical con el EAF correspondiente en su parte derecha.	124
Figura A. 6 Funciones de Transferencia Empírica obtenidas aplicando la técnica <i>HVNR</i> en todos los sitios donde se realizaron registros de microtemores.	131
Figura A. 7 Validación de AS utilizando una sola estación de referencia (arriba) y comparando dos registros del mismo sismo en dos estaciones diferentes CU UAQ y CGEO (abajo).....	137
Figura A. 8 AS para el sismo del 01 de mayo del 2012 agrupados por familia espectral a) en roca, b) 5 Hz, c) 1 Hz, d) 0.50 Hz, e) 1 y 5 Hz, f) 0.50 y 3 Hz, (izquierda), así como el promedio de ellos que caracteriza a la zona (derecha). 139	
Figura A. 9 AS para el sismo del 11 de abril del 2012 agrupados por familia espectral a) en roca, b) 5 Hz, c) 1 Hz, d) 0.50 Hz, e) 1 y 5 Hz, f) 0.50 y 3 Hz, (izquierda), así como el promedio de ellos que caracteriza a la zona (derecha).	141
Figura A. 10 AS para el sismo del 15 de noviembre del 2012 agrupados por familia espectral a) en roca, b) 5 Hz, c) 1 Hz, d) 0.50 Hz, e) 1 y 5 Hz, f) 0.50 y 3 Hz, (izquierda), así como el promedio de ellos que caracteriza a la zona (derecha). 143	

Figura A. 11 AS para el sismo del 21 de agosto del 2013 agrupados por familia espectral a) en roca, b) 5 Hz, c) 1 Hz, d) 0.50 Hz, e) 1 y 5 Hz, f) 0.50 y 3 Hz, (izquierda), así como el promedio de ellos que caracteriza a la zona (derecha). 145

Figura A. 12 AS para el sismo del 19 de septiembre del 2017 agrupados por familia espectral a) en roca, b) 5 Hz, c) 1 Hz, d) 0.50 Hz, e) 1 y 5 Hz, f) 0.50 y 3 Hz, (izquierda), así como el promedio de ellos que caracteriza a la zona (derecha). 147

Figura A. 13 Funciones de transferencia teóricas y empíricas para familias espectrales a) en roca, b) 5 Hz, c) 1 Hz, d) 0.50 Hz, e) 1 y 5 Hz y f) 0.50 y 3 Hz utilizando la técnica de Haskell y *HVNR*. 149

Figura A. 14 Modelos estratigráficos unidimensionales utilizados para obtener FTT correspondiente a la familia espectral a) en roca, b) 5 Hz, c) 1 Hz, d) 0.50 Hz, e) 1 y 5 Hz y f) 0.50 y 3 Hz. 150

1. INTRODUCCIÓN

En respuesta a los problemas recientes ocasionados por la actividad sísmica que ha sacudido al país (sismo del 19 de septiembre de 2017 en Puebla, Mw 7.1), queda en evidencia que aún existen muchos aspectos de la ingeniería sísmica que deben ser analizados en lo particular y en lo general para tener una mayor certeza al momento de diseñar por sismo cualquier infraestructura, debiendo tomar en cuenta varios factores que influyan en el diseño estructural de cualquier obra civil. Se debe tener una formación multidisciplinaria para poder abarcar el problema en conjunto, partiendo desde un punto de vista geológico, geotécnico, hidrológico y estructural, considerar aspectos como el efecto del sitio, periodo fundamental del suelo, entre otros (Lermo y Limaymanta, 2007).

En la actualidad, el impacto que tienen los sismos sobre la sociedad (pérdidas económicas y humanas) es muy grande y se ha reconocido en todo el mundo la importancia de la mitigación del riesgo relacionado con este fenómeno (Ismael-Hernández *et al.*, 2011). Los sismos se presentan con gran frecuencia en todo el país dejando a muchas ciudades con grandes derrames económicos y conflictos sociales (Figura 1.1 y Figura 1.2). Uno de los mayores problemas con este tipo de fenómenos es que no pueden ser predichos y por lo tanto lo único que se puede hacer al respecto es estar preparado con mapas de las zonas con mayor riesgo-peligro sísmico, para que se puedan tomar acciones inmediatas sobre en qué zona se debe intensificar los criterios de diseño de edificaciones considerando el efecto del sitio, o también, para que las dependencias de protección civil den prioridad a las labores de atención inmediata posterior al evento sísmico, evitando así grandes pérdidas antes, durante y posterior al evento sísmico.



Figura 1.1 Afectaciones por sismo en CDMX el 19 de septiembre del 2017 (Noticieros Televisa, 2017).



Figura 1.2 Edificio colapsado por sismo en CDMX 19 de septiembre de 2017 (Heraldo de México, 2017).

En lo que respecta a la ciudad de Santiago de Querétaro, el riesgo-peligro sísmico no ha sido considerado como un aspecto fundamental a desarrollar, prueba de esto es el reglamento de construcción que actualmente rige en el municipio el cual solo considera aspectos muy generalizados en lo que a diseño por sismo se refiere (Figura 1.3 y Figura 1.4), esto se debe a que se considera una zona de baja sismicidad y por lo tanto se cree estar exentos de este tipo de problemas, solo generando preocupación en el entorno cuando un evento sísmico se presenta en alguna fuente cercana y empiezan a ocurrir pérdidas humanas y económicas. Sin embargo, resulta en un riesgo potencial construir en lugares donde se desconoce la amplificación de las ondas que pasan a través del suelo y donde se pueden presentar aceleraciones mayores a lo predicho por las leyes de atenuación (Ordaz, 1989; Zúñiga *et al.*, 2003; García, 2006; Clemente-Chavez *et al.*, 2013).

ARTÍCULO 121. Para fines de estas disposiciones, el Municipio de Querétaro se considera dividido en las zonas A y B, dependiendo del tipo de suelo y periodos naturales de vibrar.

Zona A: Lomas formadas por rocas o suelos generalmente firmes con periodos naturales de vibrar menores a 0.40

Zona B: Suelos formados por depósitos aluviales, con periodos naturales de vibrar entre 0.40 y 1.00

Esta zonificación deberá tomarse en cuenta para el Diseño Sísmico de las construcciones.

Figura 1.3 Extracto del reglamento de construcción de Querétaro (2008).

ARTÍCULO 151. El coeficiente sísmico, c , es el cociente de la fuerza cortante horizontal que debe considerarse que actúa en la base de la estructura por efecto del sismo, entre el peso de ésta sobre dicho nivel.

Con este fin se debe tomar como base de la estructura el nivel a partir del cual sus desplazamientos con respecto al terreno circundante comienzan a ser significativos. Para calcular el peso total se deben tomar en cuenta las cargas muertas y vivas que correspondan según los señalan los Capítulos IV y V de este Título.

El coeficiente sísmico para las Construcciones clasificadas como del grupo B en el artículo 120 se debe tomar igual a 0.10 en la zona A y 0.20 en la zona B, a menos que se emplee el método simplificado de análisis, en cuyos casos se deben aplicar los coeficientes que fijan las Normas Técnicas Complementarias, y a excepción de las zonas especiales en las que dichas Normas especifiquen otros valores de c . Para las estructuras del grupo A se incrementará el coeficiente sísmico en 50 por ciento.

Figura 1.4 Extracto del reglamento de construcción de Querétaro (2008).

1.1 Justificación

Como se ha mencionado anteriormente, a pesar de que existe información en relación al tema de estudio, se ha observado que la reglamentación por sismo que existe en el reglamento de construcción de Querétaro (2008) está establecida de una manera muy generaliza, al igual que lo está la regionalización sísmica para la república mexicana en el manual de diseño de obras civiles emitido por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) (2015) (Figura 1.5), por lo que se considera fundamental hacer estudios específicos de las zonas de trabajo en las que se desea diseñar, conociendo realmente cuáles son los niveles de aceleración a los que estará sometida una estructura, permitiendo diseñar de manera óptima en cuanto a peso y eficiencia.

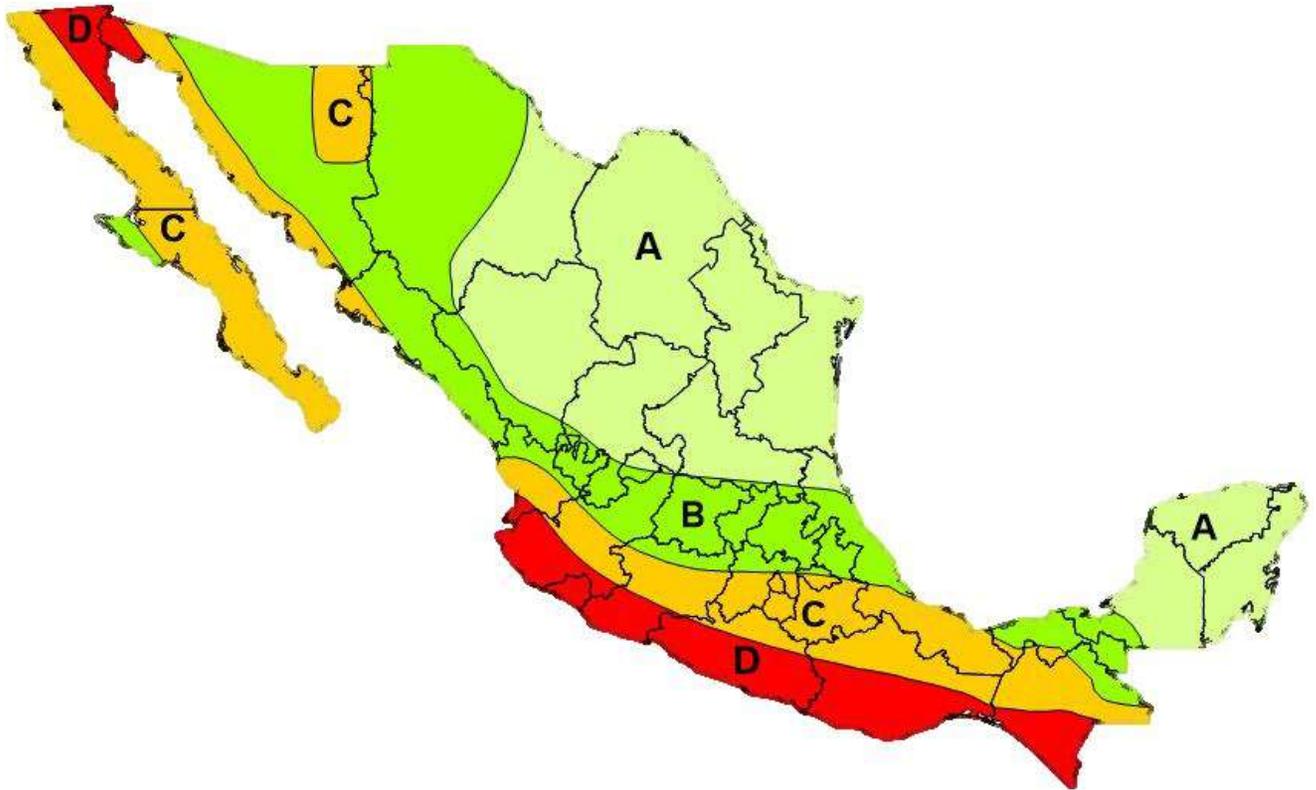


Figura 1.5 Regionalización sísmica en México establecida por CFE (2015).

A pesar que ya se tiene establecido el procedimiento para la estimación del efecto sitio con base en la frecuencia fundamental, no se tiene una certeza respecto a la amplificación que presentan las ondas en el suelo de Querétaro aplicando el registro de microtemores. Considerando esta situación, es de vital importancia tener un estudio particular del sitio de interés (Figura 1.6) considerando tanto la frecuencia fundamental como el nivel de amplificación para el desarrollo de mapas de zonificación en función de la intensidad sísmica que nos permita hacer conciencia y estar prevenidos ante la posibilidad de un evento sísmico, debido a que la ciudad de Querétaro se encuentra dentro del eje neovolcánico mexicano (*MVB*, por sus siglas en inglés), el cual se ve afectado por la zona de subducción.

Finalmente, se tendrán las herramientas para implementar criterios más específicos en el diseño por sismo en estructuras de obra civil al delimitar el riesgo sísmico en diferentes partes de la ciudad. Además, se puede estar monitoreando las zonas más vulnerables en lo que a riesgo sísmico se refiere, tomando medidas preventivas y/o correctivas para el futuro desarrollo en la zona conurbana de Querétaro, aportando información clave para el municipio debido a que actualmente carecemos de dicha información y esto se traduce automáticamente en una aportación que se debe entregar a la sociedad en general.

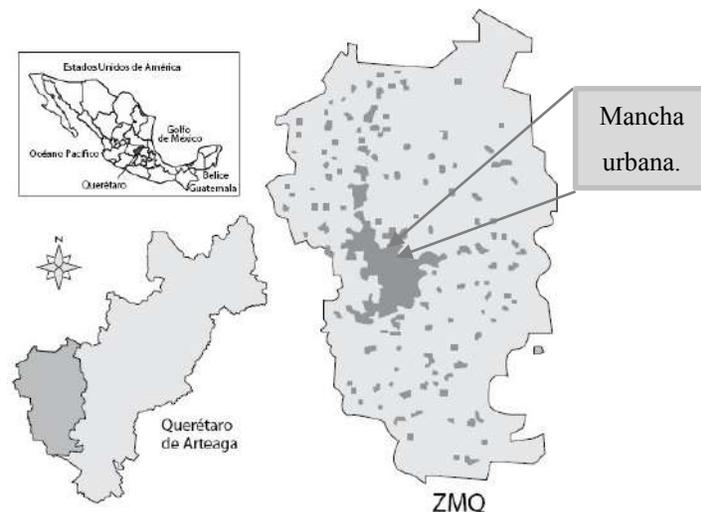


Figura 1.6 Zona metropolitana de Querétaro (Obregón y Bueno, 2015).

1.2 Hipótesis y objetivos

1.2.1 Hipótesis

Con la implementación de un sismógrafo de banda ancha en las mediciones de campo, se conocerá el riesgo sísmico de la zona mediante la elaboración de mapas de intensidad sísmica, en términos de pseudoaceleraciones, ante sismos de falla inversa y normal, que permita delimitar el riesgo de las edificaciones, visto desde un enfoque sísmico, para la ciudad de Querétaro.

1.2.2 Objetivo general

Delimitar el riesgo de las edificaciones para la ciudad de Querétaro, conociendo el riesgo sísmico de la zona mediante la elaboración de mapas de intensidad sísmica ante sismos de falla inversa y normal, con la implementación de un sismógrafo de banda ancha en las mediciones de campo.

1.2.3 Objetivos particulares

1.- Realizar registros de microtemores en la ciudad, considerando las recomendaciones establecidas por *SESAME* (2004) y Martínez (2015).

2.- Procesar registros obtenidos mediante la técnica *HVNR* y las herramientas para el tratamiento de la señal digital que se mencionarán en la metodología.

3.- Estimar el comportamiento dinámico del suelo, visto desde el enfoque sísmico, mediante funciones de transferencia empíricas.

4.- Zonificar la ciudad de Querétaro en función de las familias espectrales que caracterizan al suelo.

5.- Generar acelerogramas sintéticos (AS), que permitan estimar los niveles de aceleración que se presentan en diferentes puntos de la ciudad para un sismo determinado.

6.- Elaborar mapas de intensidad sísmica considerando la distribución de pseudoaceleraciones durante la ocurrencia de un evento sísmico definido.

7.- Delimitar el riesgo de edificaciones, estableciendo las zonas que se verían afectadas por un sismo determinado, considerando el comportamiento dinámico tanto de la estructura como del suelo donde ésta se encuentra asentada.

2. ANTECEDENTES

2.1 Estudios previos en diferentes partes del mundo

Desde principios del siglo XX se han realizado diversos estudios sobre sismos (Nogoshi y Igarashi, 1971; Nakamura, 1989; Lermo y Chávez-García, 1994), llegando a conclusiones importantes hasta llegar a fechas recientes con la emisión de reglamentos para el diseño por sismo como el manual de la Comisión Federal de Electricidad (2015) y las normas técnicas complementarias para el diseño por sismo (2017). De igual forma se han hecho estudios donde se consideran otro tipo de parámetros los cuales influyen en la respuesta del suelo como son la velocidad de las ondas de cortante, el amortiguamiento del medio, entre otros (Lermo y Limaymanta, 2007).

Empezando desde tiempo remotos, en la zona oriente, principalmente Japón, se ha buscado la manera de generar modelos que den un pronóstico acertado sobre la ocurrencia de sismos (Figura 2.1) en el país nipón (Lombardi y Marzocchi, 2011), sin tener aún un éxito contundente (Geller, 2011; Clancey, 2012) pese a los esfuerzos que se hacen por determinar las variaciones de sismicidad en el área para intentar predecir la ubicación del epicentro, tomando en consideración la ocurrencia de sismos de magnitud fuerte (mayor a Mw 6.0) y la posible influencia de fluidos de la corteza producto de los volcanes cercanos con repercusiones en la detonación de actividad sísmica para la zona (Sarlis *et al.*, 2015; Enescu *et al.*, 2016).

Los estudios de sismología e ingeniería sísmica han ido evolucionando conforme la ciencia y tecnología producen información y equipo respectivamente para profundizar aún más en el tema.

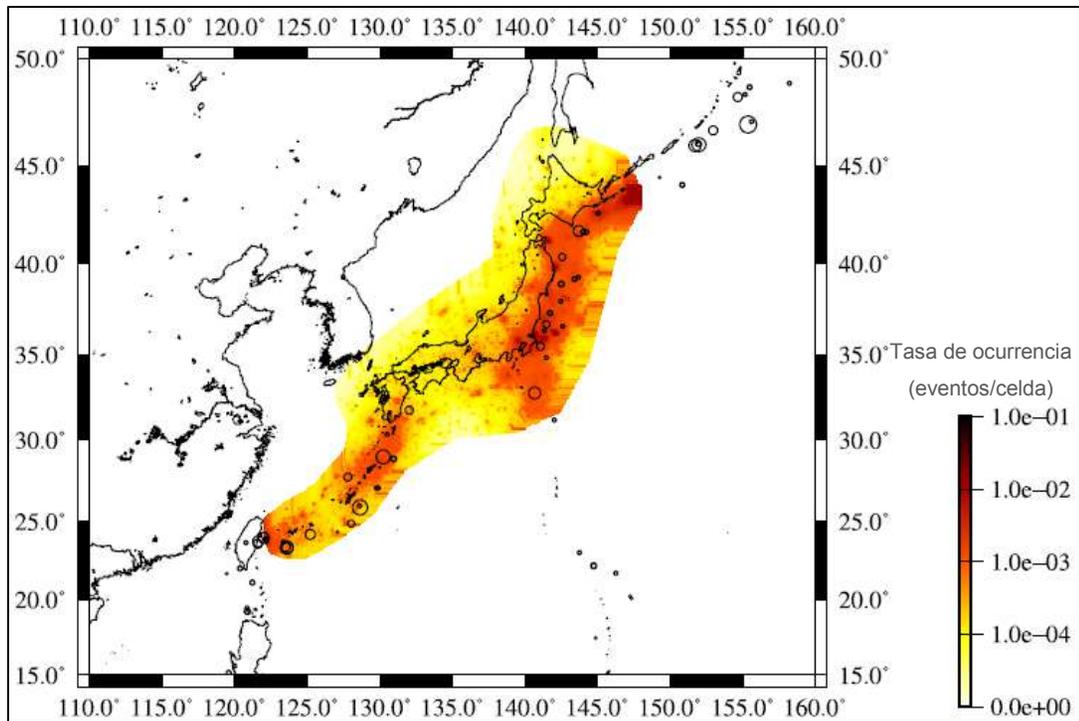


Figura 2.1 Mapa de tasas de ocurrencia para eventos predichos por el modelo de doble derivación para el periodo del 01 de enero del 2009 al 31 de diciembre del 2009 (Lombardi y Marzocchi, 2011).

Recordemos que en el mundo, la zona con mayor actividad sísmica corresponde a los límites de placas tectónicas donde se ven afectados países como Rusia, Japón, Filipinas, Indonesia, Nueva Zelanda, Estados Unidos, Canadá, México, Colombia, Ecuador, Perú, Chile entre otros. No obstante, aunque la actividad al interior del continente es menos frecuente, no debe desestimarse la posibilidad de daños en zonas con baja sismicidad dada la información histórica que se tiene en lugares que se vieron afectados por eventos sísmicos pese a encontrarse en zonas sísmicamente “estables”, un ejemplo de ellos son sismos como los ocurridos en João Câmara (Brasil), Catania (Italia), Acambay (México), Kalemie (República democrática del Congo).

Esta gran actividad sísmica lleva a la implementación de nuevas técnicas para entender un poco más este fenómeno, no sin olvidar que cada zona o región tiene sus propias particularidades que obligan a orientar la investigación a un campo específico. Por ejemplo, en Estados Unidos, donde la sismicidad está más asociada a la gran cantidad de fallas geológicas que contiene la zona, existen trabajos donde se busca determinar los movimientos verticales a precisiones sub milimétricas con la combinación de mediciones *Global Position System (GPS)* y el método radar de apertura interferométrica sintética (InSAR, por sus siglas en inglés) para definir la tectónica de un sitio es específico (Bürgmann *et al.*, 2006). Además de contar con técnicas que resuelvan un problema determinado, se busca la solución al problema con el menor costo posible. Es aquí donde entra el uso de microtemores con la técnica *HVNR* y su correlación con la intensidad sísmica para un sismo determinado, como el ocurrido en Maule, Chile (Leyton *et al.*, 2012).

Entonces, gran parte del territorio de la república mexicana se encuentra inmerso en una gran cantidad de actividad sísmica debido a las diferentes placas que inciden en el mismo, un ejemplo de ello se aprecia con la placa Norteamericana que interactúa con las placas del Pacífico, Rivera, de Cocos y del Caribe, lo que explica en gran medida las numerosas zonas sísmicas con las que cuenta el país (Sánchez, 2015; Zúñiga *et al.*, 2017).

El cinturón volcánico mexicano (*MVB*, por sus siglas en inglés), localizado en las faldas volcánicas de la parte central del país, está expuesto a una gran actividad sísmica, donde destacan sismos de subducción (falla inversa), que se caracterizan por ocurrir a una profundidad menor a 50 km y, como su nombre lo indica, tienden a presentar una subducción entre la placa de cocos con la placa norteamericana localizadas en las costas mexicanas del pacífico; sismos de tipo cortical (falla local), como los originados en Acambay, estado de México debido a los diversos sistemas de fallas que hay en el propio *MVB* (Rivera *et al.*, 2013) que han producido daños en construcciones pese a ser sismos con magnitud baja (menor a 4 Mw); y finalmente sismos intraplaca (falla normal), como el ocurrido en Puebla el 19 de septiembre del 2017 (Mw= 7.1, profundidad= 53 km) que se presentan al momento de la ruptura dentro de una misma placa tectónica y ocurren a profundidades mayores a los 50 km (Ismael-Hernández *et al.*, 2011) (Figura 2.2).

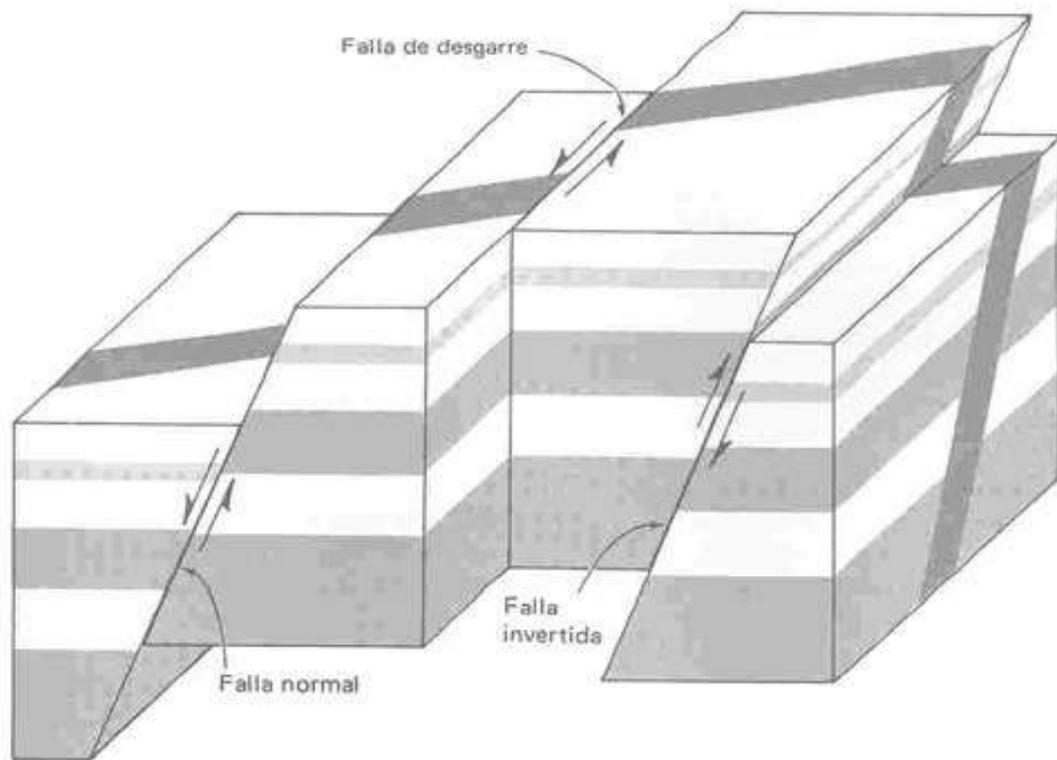


Figura 2.2 Diagrama mostrando los tres tipos principales de movimientos de fallas (Bolt, 2003).

Una parte fundamental en el estudio de la sismicidad en México es la evaluación del riesgo-peligro sísmico, el cual se concibe como el grado de exposición que un sitio tiene a los movimientos sísmicos en lo referente a las máximas intensidades que en él pueden presentarse (Bazán y Meli, 2004). El peligro sísmico se presenta gráficamente por una curva llamada curva de tasas de excedencia, la cual representa la frecuencia (número de eventos por unidad de tiempo) con la que se espera que un valor ocurra o que sea excedido, seleccionando parámetros de peligro sísmico como la amplitud máxima del movimiento del terreno (Sánchez, 2015).

Además, se han realizado estudios de peligro sísmico en municipios de la república mexicana donde no se le ha prestado atención a este fenómeno y por consiguiente adolece de criterios para el diseño por sismo en su reglamento de construcción. El objetivo de estos estudios es establecer las tasas de intensidades en términos de aceleración en roca de acuerdo al método determinista y probabilista, considerando la correlación entre el régimen tectónico y los efectos del movimiento a nivel regional. Un ejemplo de ello se aprecia en Figura 2.3 donde se estimaron los niveles de amplificación para Naucalpan de Juárez (Sánchez, 2015).

En los últimos años, como lo señala Martínez (2015), a partir de la instalación de redes temporales en toda la república mexicana se han registrado una gran cantidad de sismogramas en diferentes ambientes geológicos con una duración de semanas e incluso meses. Esto ha permitido el registro de sismos de importante magnitud de diferentes fuentes y trayectorias sísmicas para generar catálogos que permitan una regionalización para análisis de riesgo y peligro sísmico (Zúñiga *et al.*, 2017). Al conocer los parámetros de frecuencia fundamental y amplificación relativa con base en la técnica de Nakamura *HVNR* (*Horizontal-Vertical Noise Ratio*) se obtuvieron 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, hasta consideraciones en el procesado de señales.

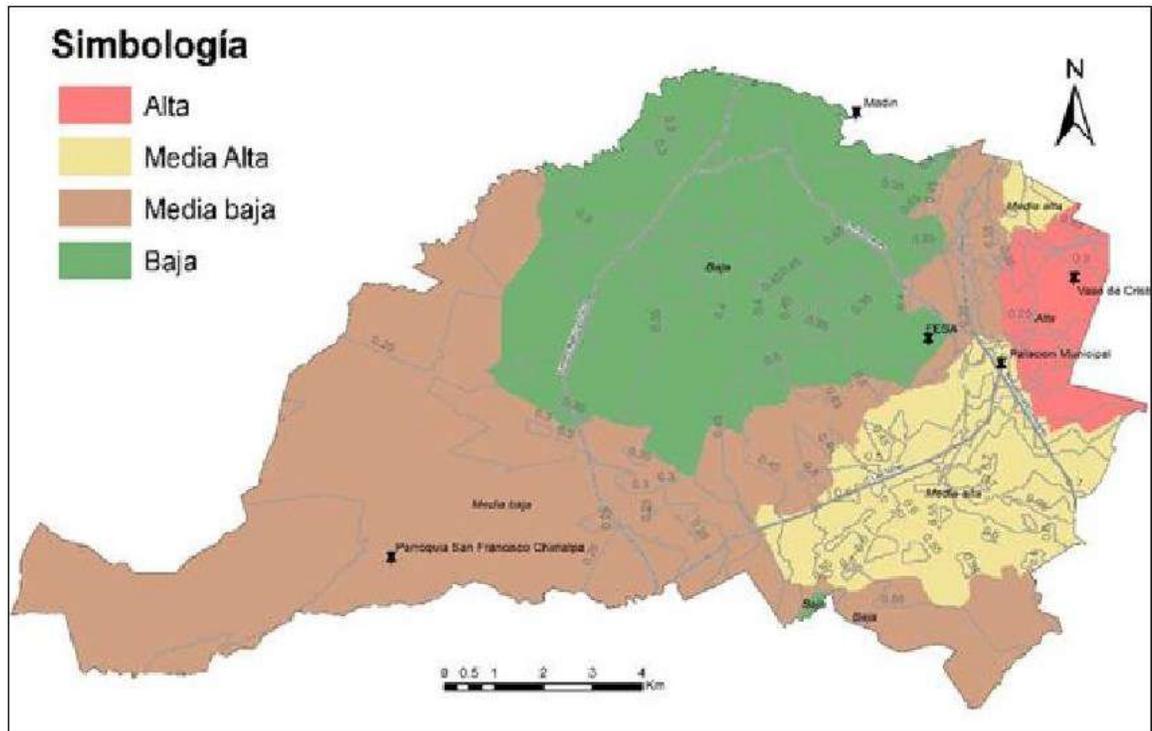


Figura 2.3 Mapa de la amplificación relativa de las aceleraciones del terreno en el municipio de Naucalpan de Juárez (Sánchez, 2015).

Los resultados han mostrado que empleando la metodología propuesta, es posible tener una buena aproximación tanto en frecuencia, pero sobre todo en amplitud entre las técnicas con sismo y ruido ambiental.

Se ha comprobado que el equipo que mejor se adecua para la toma de registros de microtemores son los sismógrafos de banda ancha, debido a 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 y 10 Hz (Martínez, 2015).

2.2 Estudios previos en el municipio de Querétaro

Particularmente en la ciudad de Santiago de Querétaro, Querétaro, mediante el apoyo de cartas geológicas elaboradas por Álvarez-Manilla (2002) y Pacheco (2007) que caracterizan los tipos de suelo en la ciudad, se han realizado trabajos de investigación en el tópico de sismicidad. Un ejemplo de ellos es el de Bustillos (2005) quien fue el primer investigador en realizar una zonificación sísmica para la ciudad de Querétaro en función del periodo fundamental del suelo, pero utilizó un acelerógrafo marca Terra SSA-320, el cual no estima el efecto de sitio en bajas frecuencias (0.1-1 Hz), lo cual se ha comprobado como verídico en trabajos recientes (Chávez-García y Tejeda-Jácome, 2010), además, bajo esta línea de trabajo Arroyo *et al.* (2012) ratificó este trabajo aplicando la misma metodología con un acelerógrafo GSR18 pese a demostrarse la ineficiencia de este tipo de sensores en cuanto a zonificación sísmica se refiere utilizando vibraciones ambientales. Por esto, González (2014) decidió replantear estos trabajos con la implementación de un equipo más apropiado para el registro de microtemores, el cual se ha demostrado que da una buena estimación del efecto de sitio tanto en bajas como en altas frecuencias, sin embargo, este solo consideró las mediciones para un primer cuadrante de la ciudad de Querétaro (Figura 2.4), quedando inconclusa la estimación del efecto del sitio para la parte restante del cuadrilátero general. Finalmente se obtuvieron resultados discrepantes entre sí, con diferencia significativa para el tipo de estudio que se pretendía realizar (microzonificación sísmica de la ciudad de Querétaro), debido principalmente al tipo de equipo utilizado en las mediciones (ver Figura 2.5 y Tabla 2-1).

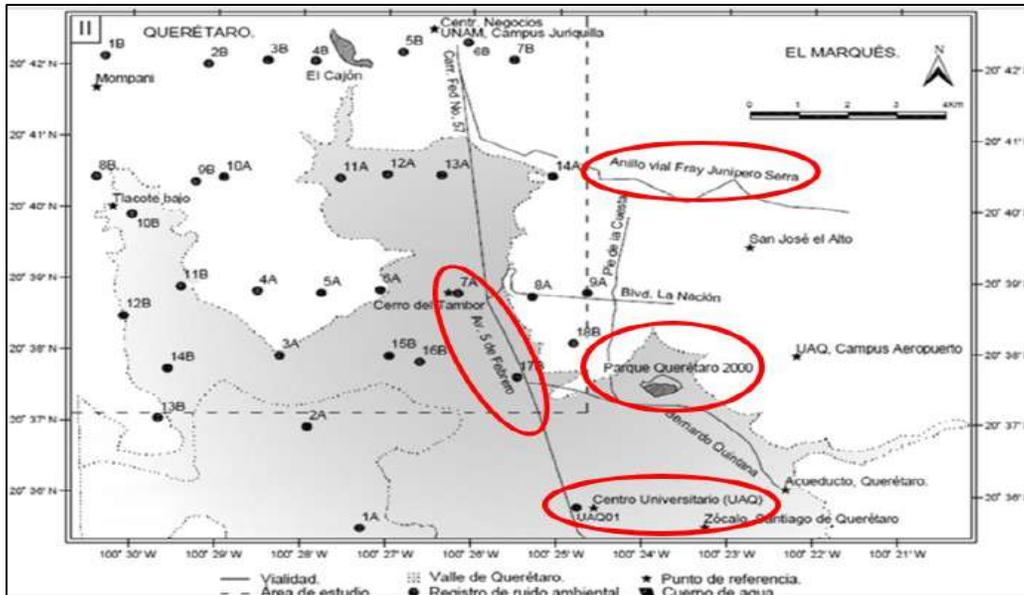


Figura 2.4 Distribución de sitios registrados (González, 2014).

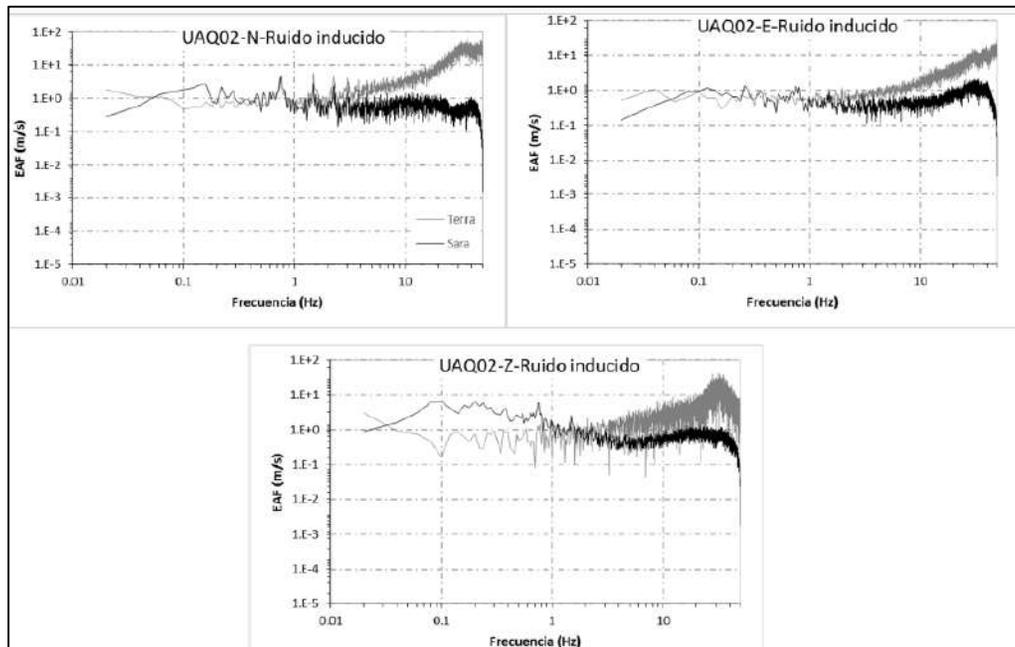


Figura 2.5 Comparativa entre los espectros de aceleración de Fourier (EAF) del ruido ambiental registrado de manera simultánea con el sismógrafo SARA (línea continua negra) usado por González en 2014 y el acelerógrafo Terra (línea continua gris) usado por Bustillos en 2005 (González, 2014).

Tabla 2-1 Comparativa de resultados respecto a frecuencias fundamentales obtenida por Bustillos usando un acelerógrafo en 2005 y González implementando un sismógrafo en 2014 (González, 2014).

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

De la misma Tabla 2-1 se concluye que efectivamente, el equipo de medición utilizado influye de manera significativa en los resultados obtenidos, lo cual da énfasis a la problemática que se tiene, y se hace importante realizar el estudio que se viene proponiendo en la justificación del capítulo anterior.

Por esta razón, La Universidad Autónoma de Querétaro ha acudido al Centro de Geociencias (CGEO) de la UNAM (campus Juriquilla) para establecer relaciones de trabajo que permitan incorporar ambos campos científicos que generen aportaciones a la sociedad, debido a que el instituto cuenta con una gran base de datos que son de utilidad para realizar trabajos aplicados al ámbito estructural.

De lo anterior se han logrado trabajos de investigación relacionados con el tema tales como el de Bustillos (2005) quien realizó una zonificación sísmica para la ciudad de Querétaro con la implementación de un acelerógrafo, Rocha (2011) quien conformó una base de datos sísmica obtenida con la información de la estación JUR1 que se encontraba precisamente en CGEO UNAM, Clemente-

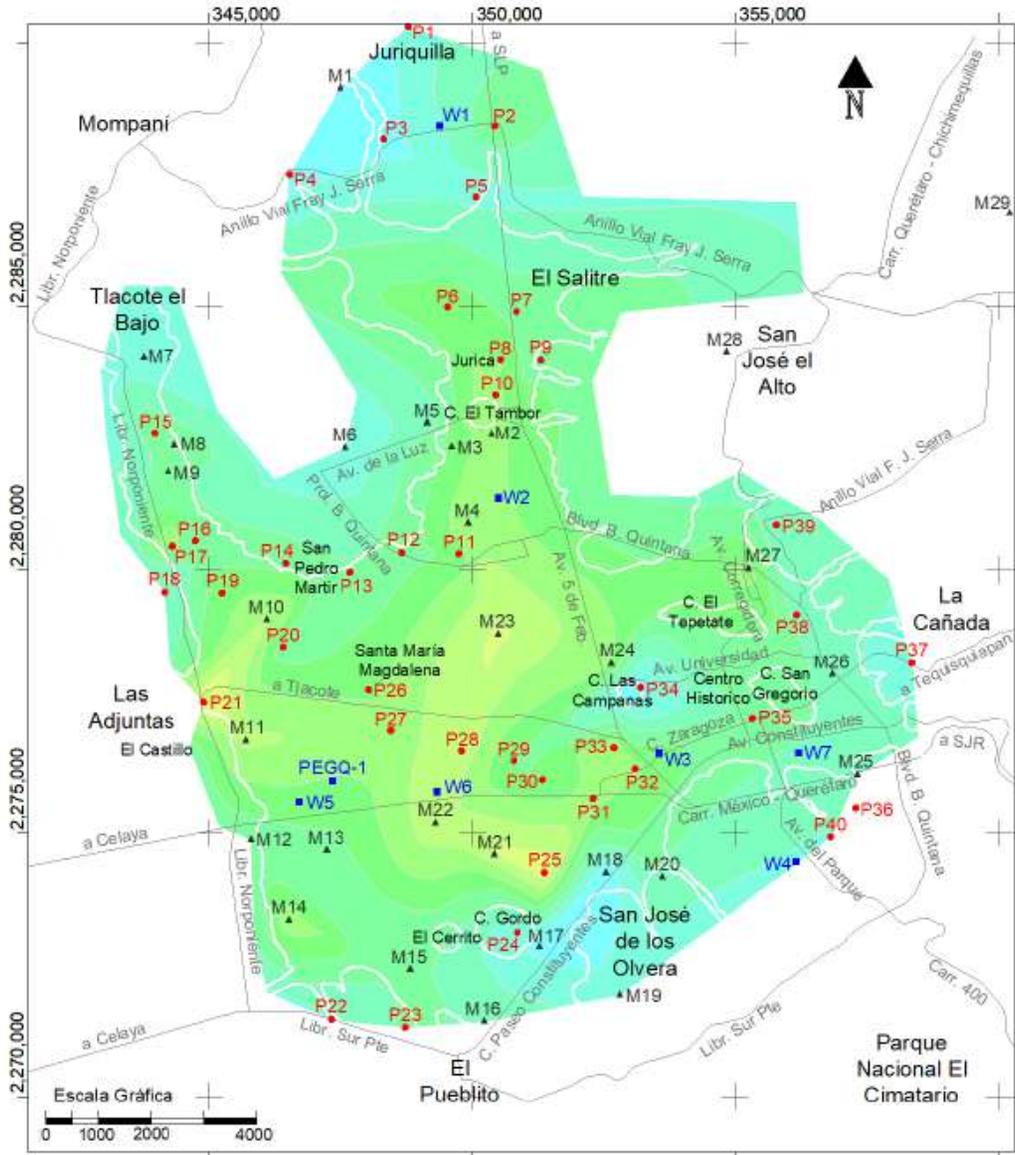
Chávez y Arroyo (2012) quienes elaboraron la primera caseta sísmica en la Universidad Autónoma de Querétaro, Clemente-Chávez *et al.* (2012) desarrollando una nueva ley de atenuación para el *MVB* en la trayectoria Guerrero-Querétaro, Clemente *et al* (2013) donde se analizó la sismicidad que caracteriza al suelo en el municipio de Peñamiller, Querétaro; Clemente-Chávez *et al* (2014) nuevamente estimando el efecto de sitio en el *MVB* pero aplicado a sismos corticales, González (2014) que se encargó de hacer un replanteamiento del trabajo de Bustillos (2005) pero esta vez con la implementación de un equipo de medición más apropiado (sismógrafo) y Pérez (2018) quien deduce, mediante regresión Bayesiana, leyes de atenuación de la aceleración espectral y aceleración máxima del terreno.

En fechas recientes Álvarez-Manilla *et al* (2017) logró estimar los periodos de vibración del suelo para la ciudad de Querétaro integrando los resultados de la inversión de curvas de dispersión en el análisis espectral de ondas superficiales que se obtuvieron al definir las velocidades de corte en una secuencia estratificada de la ciudad (Figura 2.6). Se consideraron los criterios formulados por el *International Building Code* (2009) para categorizar la velocidad de corte ponderadas para una profundidad de 30 metros considerando tres secuencias estratigráficas de acuerdo a su localización y relieve: Rocosa, Ladera y Planicie. Posteriormente, mediante los procedimientos establecidos por Dobry *et al* (1976), los autores obtuvieron los periodos fundamentales mostrados en la Figura 2.7 para cada secuencia estratigráfica. La adquisición de datos se realizó con la implementación de una línea de geófonos de componente vertical de baja frecuencia (2 Hz, 4 Hz, u 8 Hz) equidistantes (dx) y una distancia entre la fuente y el geófono mínima de $2dx$ para poder separar las ondas de cuerpo de las superficiales y, combinando la metodología de campo de la refracción sísmica con la fuente activa de ondas superficiales, se registran y graban sismogramas que permitan obtener curvas de dispersión representativas del medio (Álvarez-Manilla *et al.*, 2017).

Sin embargo, dada la importancia que juega el rango de interés en la ingeniería sísmica, resulta insuficiente estimar solo altas frecuencias con equipos como geófonos o acelerógrafos ((SESAME, 2004; Chávez-García y Tejeda-Jácome, 2010; González, 2014; Martínez, 2015; Molnar *et al.*, 2018) debido al desarrollo en cuanto a infraestructura donde cada vez es más común encontrar edificios que responden a bajas frecuencias (periodos estructurales mayores a 1 segundo). En el presente trabajo, se realizó una comparación entre el uso de los equipos sismológicos y se demostró la influencia en los resultados al usar uno u otro equipo para finalmente ver su repercusión al analizar el tipo de construcción afectada en la ciudad.

Velocidad de corte m/s	IBC-2009, Categorías de velocidades	Secuencias estratigráficas y sus velocidades de corte por punto				
		S1	S2	S3		
				S3a	S3b	S3c
$V_s > 1524$	A, roca dura	P18-1644	P3-1525, P4-1525	P34-1964		
$762 < V_s < 1524$	B, roca	P1-1065, P24-1101, P37-1125, P39-822	P5-841, P36-789	P22-801		
$366 < V_s < 762$	C, suelo muy denso o roca suave	P40-702	P2-493	P35-556, P38-570	P6-365, P7-516, P10-396, P15-465, P16-611, P19-447	P11-407, P12-582, P13-702, P20-660, P23-589, P26-493, P29-621, P30-477, P32-383, P33-381, M15-510, M22-371
$183 < V_s < 366$	D, suelo rígido		P9-295		P8-357, P17-318	P14-312, P21-256, P25-207, P27-351, P28-321, P31-327

Figura 2.6 Clasificación de velocidades de corte de acuerdo con el IBC (2009) modificado para las secuencias del valle de Querétaro: S1, S2 y S3 (S3a, S3b y S3c) (Álvarez-Manilla et al., 2017).



Simbología

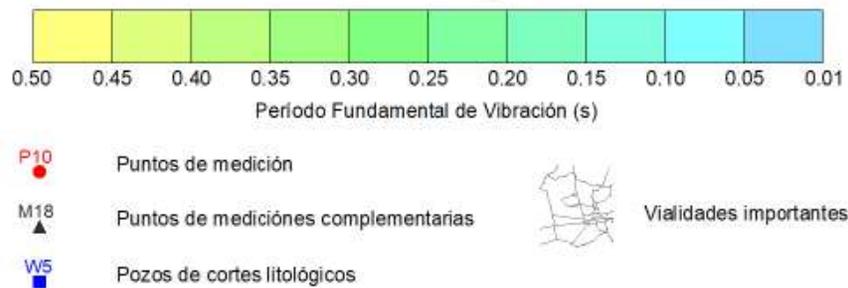


Figura 2.7 Mapa de período fundamental para la Ciudad de Querétaro (Álvarez-Manilla et al., 2017).

2.3 El caso particular de la ciudad de Querétaro y su geotorno

Siempre que se desea analizar un sitio en específico para cumplimentar el objetivo final de un estudio, el punto de partida será los antecedentes que sustentan la información de conocimiento público. Particularmente en la ciudad de Santiago de Querétaro, Querétaro, mediante el apoyo de cartas geológicas elaboradas por Pacheco (2007) y Álvarez-Manilla et al (2017) se caracterizan los tipos de suelo en la ciudad (Figura 2.8 y Figura 2.9 respectivamente). Se opta por considerar estas 2 últimas cartas debido a que son las más recientes que se han publicado en los últimos años y esto es una ventaja sobre aquellas cartas geológicas que se emitieron en la década de los 70's como las que se encuentran en el portal de INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) que si bien fueron útiles para el periodo en que se utilizaban, hoy en día se tienen avances en los métodos de exploración geofísica que implican una aproximación más cercana a la realidad en la composición de los estratos del suelo.

Es importante hacer énfasis en la necesidad de estudios geológicos de la zona de interés, debido a que esto se traduce en una forma de poder validar resultados obtenidos con otras metodologías o fundamentaciones teóricas mediante la asociación a modelos de estratigrafías mínimamente unidimensionales.

Durante el desarrollo del presente trabajo se mostrará una forma de validar los resultados asociados a los perfiles estratigráficos que componen la ciudad de Querétaro y su zona conurbada.

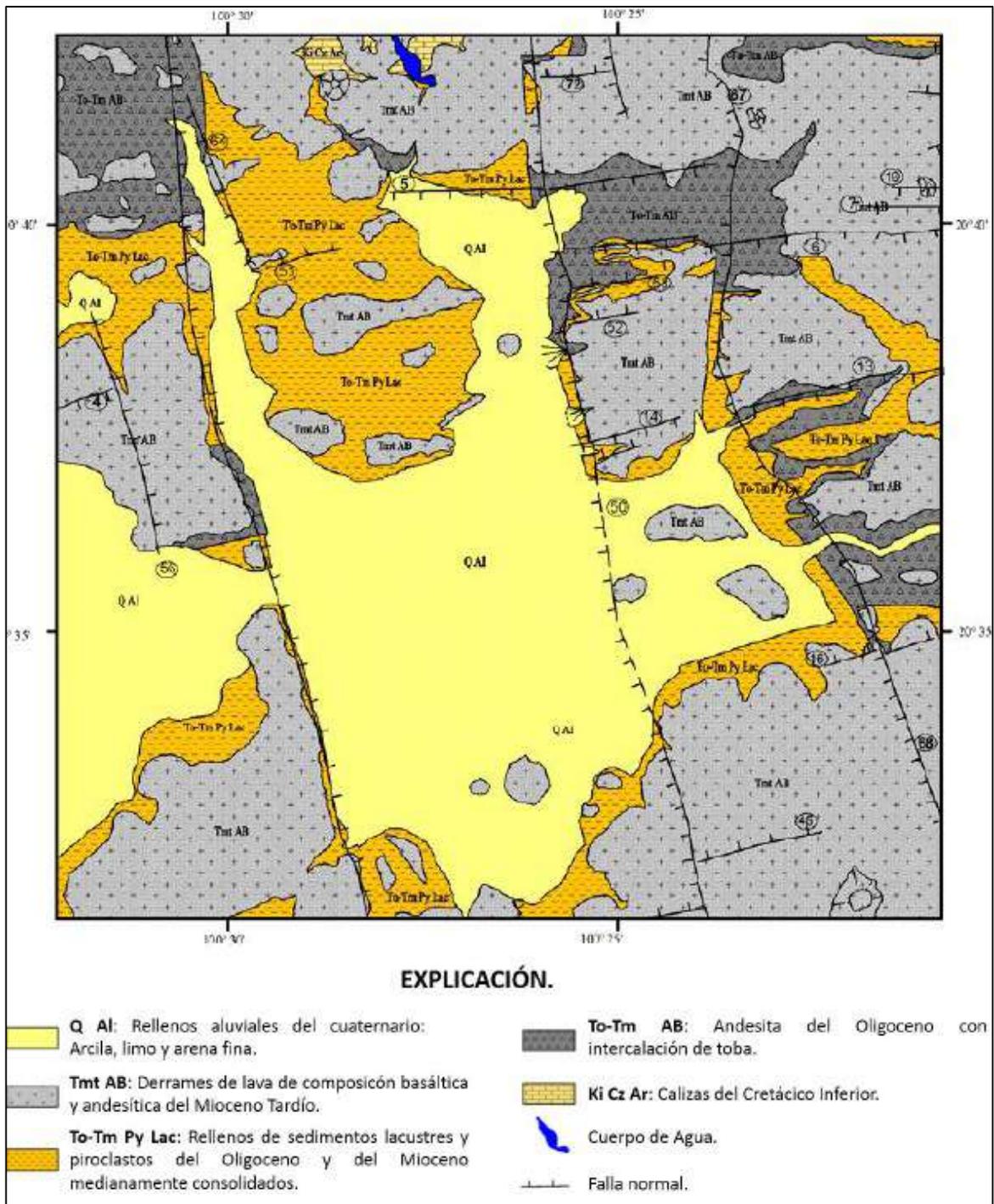


Figura 2.8 Carta geológica del valle de Querétaro (Pacheco, 2007).

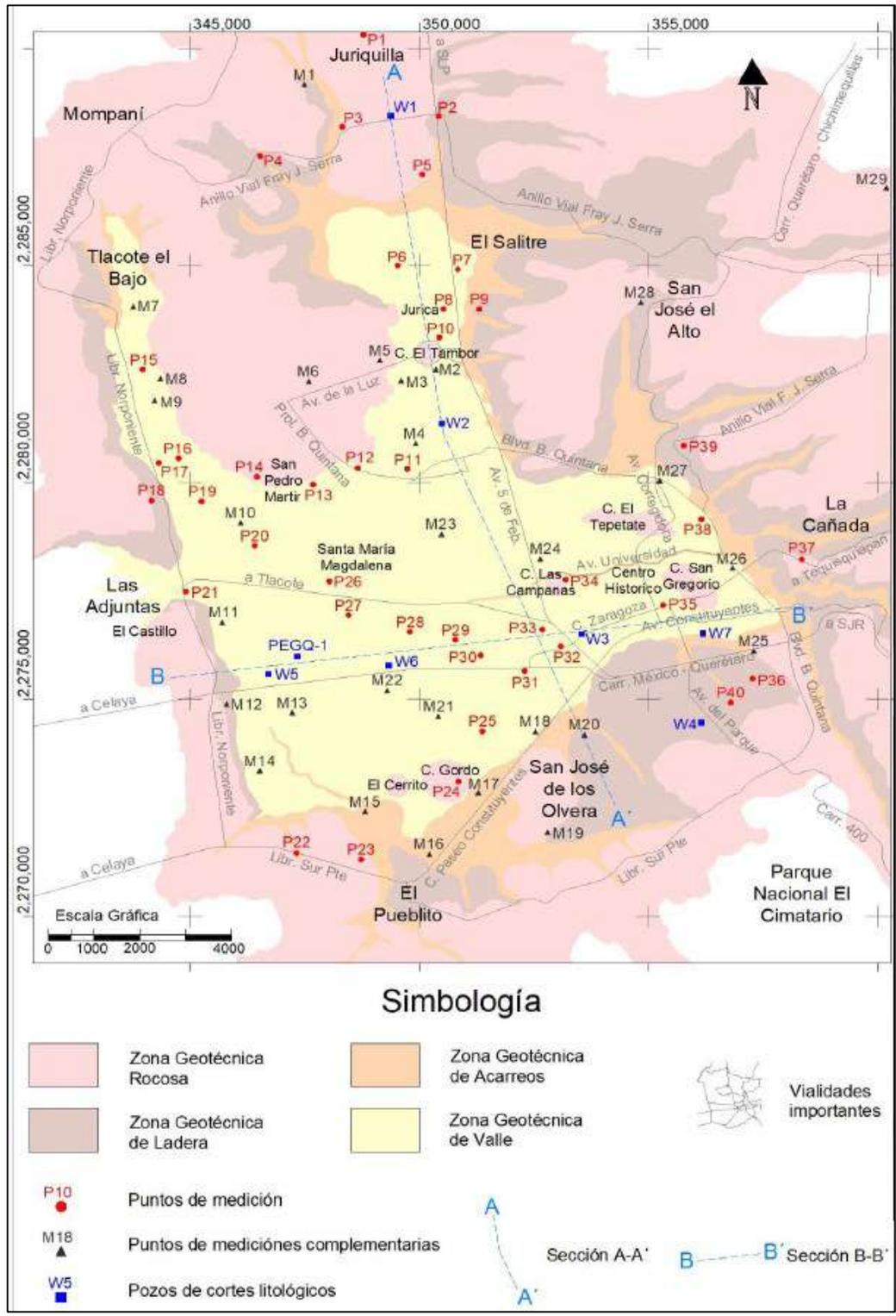


Figura 2.9 Zonificación geotécnica de Querétaro (Álvarez-Manilla et al., 2017).

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Como se ha venido estableciendo, se desarrollarán mapas de intensidades sísmicas para delimitar el riesgo en las estructuras, y para llegar a este punto se deberán utilizar herramientas que están basadas en aspectos teóricos aplicativos y por lo tanto, para un mejor entendimiento de las variables con las que se va a interactuar y de los instrumentos que serán implementados al momento de realizar las mediciones correspondientes, se definirán algunos conceptos para que se tenga una perspectiva clara de los elementos más significativos en el trabajo de investigación.

3.1 Conceptos básicos

Periodo estructural y del suelo: El concepto de periodo es definido como el tiempo que transcurre en que se complete un ciclo de oscilación. En ambos casos el periodo es obtenido al someter a una excitación al sistema (suelo o estructura) que hace que se produzca un movimiento alternante partiendo del reposo. El periodo es uno de los indicadores más utilizados para determinar la respuesta del sistema ante efectos sísmicos (Geofísicasismospgf, 2012).

Resonancia: El efecto de resonancia es muy utilizado en la ingeniería estructural, dado que es algo que intentamos evitar cuando se diseña una obra del tipo civil. La resonancia se produce al coincidir la forma de vibrar del suelo con la de cualquier estructura edificada sobre éste y genera una amplificación del movimiento sobre todo el sistema (Ambher, 2014).

Espectro de respuesta y pseudoaceleración: El término de espectro de respuesta es ampliamente utilizado a nivel mundial. Se define como la respuesta que tiene una estructura ante movimientos vibratorios (e.g. sismos) y es representado por gráficas de periodo de la estructura en el eje de las abscisas contra la respuesta máxima (desplazamiento, velocidad o aceleración) para distintos factores de amortiguamiento (Figura 3.1) en el eje de las ordenadas. Es común que los ingenieros estructurales generen espectros de respuesta asumiendo ciertos parámetros que terminan por expresar un valor máximo para un periodo determinado (espectro de diseño). Estas aproximaciones, al no ser obtenidas mediante registros empíricos o ser elaboradas bajo ciertos supuestos, adoptan el término “pseudo” para definir que se tratan de valores estimados. Tal es el caso del espectro de respuesta en pseudoaceleración (ESA), donde la aceleración real puede diferir respecto a los modelos matemáticos (Crisafulli y Villafañe, 2002).

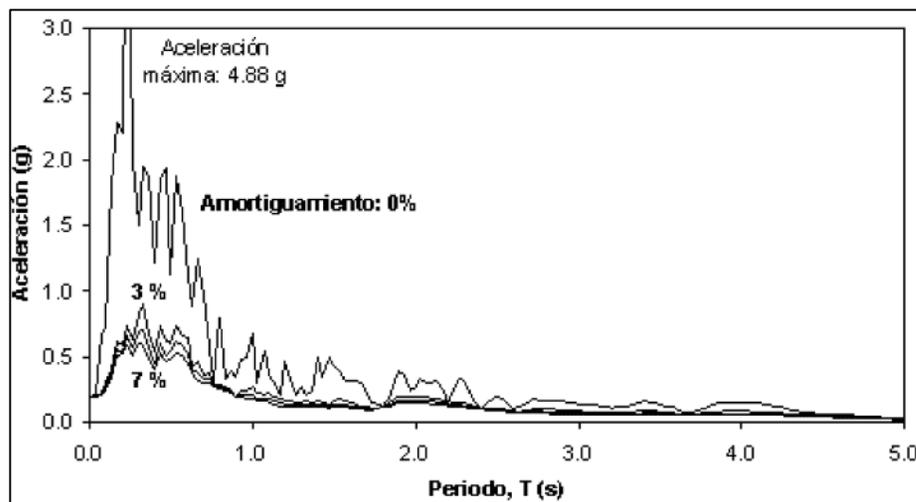


Figura 3.1 Espectro de respuesta en términos de aceleración para distintos factores de amortiguamiento (Crisafulli y Villafañe, 2002).

Riesgo y peligro sísmico: Se define al riesgo sísmico como el daño esperado durante y posterior a un evento sísmico (pérdidas humanas y económicas) mientras que el peligro sísmico está asociado a la probabilidad de ocurrencia de un sismo de determinada magnitud en una zona (periodo de retorno) (Pérez, 2018).

Intensidad sísmica y escala de Mercalli: Un aspecto de la sismología está referida a la cantidad de daños que se producen a causa de un sismo. La intensidad sísmica está dada en función de estos daños o pérdidas que se tengan durante y posterior a un evento sísmico. En la actualidad la intensidad sísmica sigue siendo evaluada mediante la escala de Mercalli que ha sufrido distintas transformaciones a lo largo del tiempo. Esta escala se divide en doce niveles en función del registro de aceleración en roca en un lugar determinado (Zavala *et al.*, 2017).

Mapas de intensidad y riesgo sísmico: La finalidad de estos mapas es mostrar de manera gráfica dónde se presentan los niveles máximos, de manera que sea posible identificar qué valores corresponden a una determinada zona. Existe una gran cantidad de mapas que acotan el nivel de intensidad en función de las aceleraciones o la tasa de ocurrencia. Sin embargo, no existen mapas de riesgo que consideren todos los factores que conlleva el término. La Figura 3.2 muestra cómo se distribuye el nivel de un valor determinado (en este caso aceleración).

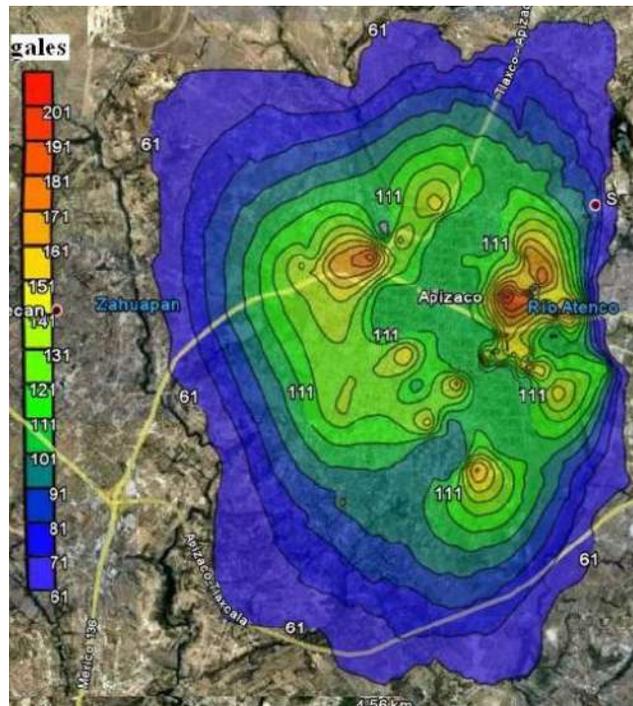


Figura 3.2 Mapa de intensidad sísmica para la ciudad de Apizaco (Ismael-Hernández *et al.*, 2011).

3.2 Técnica de cocientes espectrales con ruido ambiental (*Horizontal to Vertical Noise Ratio o HVNR*)

Esta técnica desarrollada por Nakamura (1989) y aplicada por Lermo y Chávez-García (1994), consiste en obtener la amplificación del suelo usando señales de vibración ambiental (microtremores) y en dividir el registro ambiental en ondas de cuerpo y superficiales para ambas componentes (Horizontal y vertical) donde desarrollaron una serie de ecuaciones (1-11) considerando los tres supuestos de Nakamura para la utilización de registros de ruido ambiental en estaciones puntuales (Bard, 1999). Ésta técnica puede ser calculada mediante el algoritmo de la Media Cuadrática (MC) o por Densidades Espectrales Direccionales (DED) desarrollada por Sánchez-Sesma *et al.* (2011).

$$H(f) = H_c(f) + H_s(f) = A_c^H(f) \cdot R_c^H(f) + H_s(f) \quad (1)$$

$$V(f) = V_c(f) + V_s(f) = A_c^V(f) \cdot R_c^V(f) + V_s(f) \quad (2)$$

donde:

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

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

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

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

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

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

$$S(f) = \frac{H(f)}{V(f)} = \frac{A_C^H(f) \cdot R_C^H(f) + H_s(f)}{A_C^V(f) \cdot R_C^V(f) + V_s(f)} \quad (3)$$

Para fines de manejo algebraico, de la expresión de la figura anterior se definirá la proporción de las ondas superficiales en base a las ondas de cuerpo en la componente vertical como α y de igual manera el cociente de ondas superficiales como $s_s(f)$.

$$\alpha = \frac{V_s(f)}{R_C^V(f)} \quad (4)$$

$$s_s(f) = \frac{H_s(f)}{V_s(f)} \quad (5)$$

Sustituyendo entonces las ecuaciones 4 y 5 en la ecuación 3 se obtiene que:

$$S(f) = \frac{A_C^H(f) \cdot \frac{R_C^H}{R_C^V} + s_s(f) \cdot \alpha}{A_C^V(f) + \alpha} \quad (6)$$

Tomando como base la ecuación 6, Nakamura (1989) toma tres supuestos para la utilización de registros de ruido ambiental en estaciones puntuales. El

primero consiste en considerar que la componente vertical no es amplificada para la frecuencia fundamental de vibración (f_0^H), por lo que:

$$A_C^V(f_0^H) \approx 1 \tag{7}$$

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

$$\frac{R_C^H(f)}{R_C^V(f)} = 1 \tag{8}$$

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

$$\alpha = \frac{Vs(f)}{R_C^V(f)} \approx 0 \tag{9}$$

$$Ss(f_0^H). \alpha \ll A_C^H(f_0^H) \tag{10}$$

$$S(f_0^H) = A_C^H(f_0^H) \tag{11}$$

3.2.1 HVNR mediante Media Cuadrática (MC).

La media cuadrática es un método matemático para la evaluación de la técnica de Nakamura (HVNR). Uno de los programas más utilizados para el tratamiento de señales sísmicas es GEOPSY (*GEOPhysical Signal database for noise arraY*) (SESAME, 2004). Este software tiene entre sus funciones el cálculo del método H/V (Horizontal-Vertical) mediante este algoritmo MC. Primeramente estima 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, 1994).

El algoritmo empleado por este programa para el cálculo del cociente H/V se compone de los siguientes pasos (Martínez, 2015):

- 1.- Leer la señal del 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).

$$H(i) = \sqrt{\frac{H_N^2(i) + H_E^2(i)}{2}} \quad (12)$$

5.- Calcular la relación H/V para cada ventana.

$$[H/V](i) = \frac{H(i)}{Z(i)} \quad (13)$$

Donde i es el número de ventana calculada.

6.- Calcular el cociente promedio de H/V.

$$[H/V] = \frac{1}{n} \sum_1^n [H/V](i) \quad (14)$$

Donde n es el número de ventanas calculadas.

Resumiendo, el cociente espectral obtenido de *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.

3.2.2 HVNR mediante densidades espectrales direccionales (DED).

Es un método alternativo para el cálculo de la relación H/V. Consiste en obtener la sumatoria de todos los espectros de la amplitud de Fourier para cada una de las componentes horizontales y verticales.

$$E_N = \sum_1^i [H_N(i)]^2 \quad (15)$$

$$E_E = \sum_1^i [H_E(i)]^2 \quad (16)$$

$$E_Z = \sum_1^i [H_Z(i)]^2 \quad (17)$$

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

$$[H/V] = \sqrt{\frac{E_N + E_E}{E_Z}} \quad (18)$$

Este método difiere esencialmente en que solo se realiza durante el cálculo un único promedio espectral, así como también en que se tiene que multiplicar por un factor de ponderación para que cada ventana de tiempo sea de igual energía (Sánchez-Sesma *et al.*, 2011).

3.3 Funciones de transferencia teóricas (FTT)

Es un método numérico que consiste en obtener, mediante el método Thompson-Haskell, la función de transferencia teórica de un medio estratificado y unidimensional del suelo ante la incidencia oblicua de ondas de cuerpo, cuyo resultado es un modelo teórico basado en la propagación de ondas verticales (Thomson, 1950; Haskell, 1962). Este método requiere características de los estratos como: espesor, velocidad de propagación de ondas, densidad y factor de amortiguamiento de cada estrato del cual esté compuesto el suelo.

Con base en información geotécnica, conociéndose el espesor de los estratos de suelo y el número de golpes, se estima la velocidad de onda de corte por medio de la correlación propuesta por Seed *et al* (1986) (Martínez, 2015).

$$V_s = C_1 * N^{0.17} * Z^{0.2} * F^1 * F^2 \quad (19)$$

Donde:

Vs= velocidad de onda de corte, (m/s).

C1= 69 (constante empírica).

N= número de golpes de la prueba SPT.

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

F1= factor de edad; = 1 para edad del Holoceno (depósitos aluviales).

F2= 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.

3.4 Funciones de transferencia empíricas (FTE)

Primero definamos a una FTE como el espectro que representa el nivel de amplificación del suelo para una frecuencia determinada, para obtenerlas es necesario aplicar la técnica establecida por Nakamura (1989). Las FTE se representan mediante gráficas de frecuencia contra cociente espectral $HVNR$ que definen el comportamiento dinámico del suelo en función de la frecuencia en la que se produce la mayor amplificación (frecuencia fundamental) (Zavala *et al.*, 2018). Un ejemplo de ellas se muestra en Figura 3.3 donde se tiene que mientras para los sitios caracterizados por estratos rocosos el cociente $HVNR$ se mantiene prácticamente constante, en el caso de suelos compuestos por sedimentos aluviales entre otros, existe una variación en la amplificación de las ondas para un rango variado de frecuencias (Lermo *et al.*, 2013).

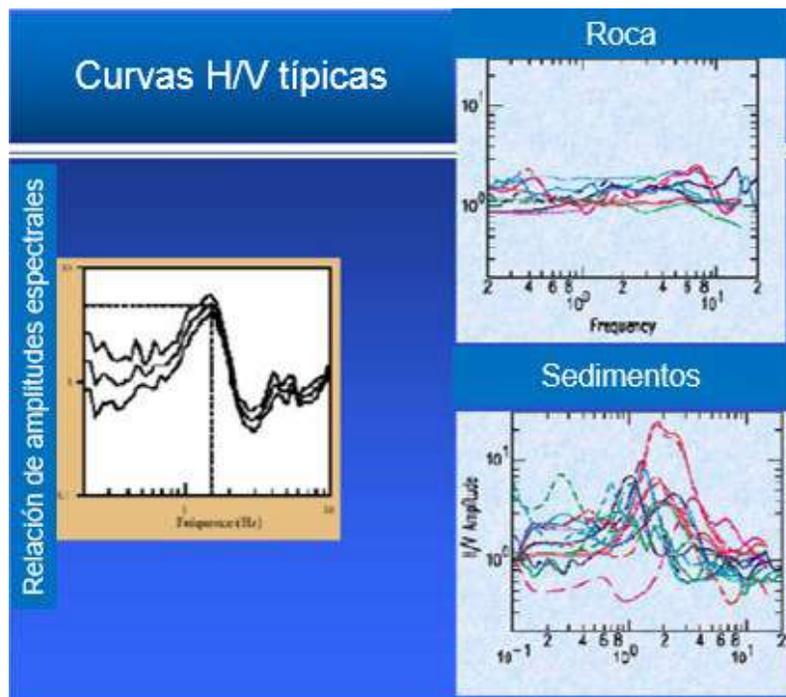


Figura 3.3 FTE obtenidas con la técnica $HVNR$ (Lermo *et al.*, 2013).

3.5 Acelerogramas sintéticos.

Existen diferentes métodos para generar acelerogramas sintéticos, todos ellos con ventajas y desventajas respecto a uno u otro (Flores-López y Ayes-Zamudio, 2018; Vázquez *et al.*, 2018):

- a) Funciones de Green empíricas.
- b) Escalamiento en el dominio de las frecuencias.
- c) Escalamiento en el dominio del tiempo.
- d) Ajuste de espectro objetivo.

Gracias a estudios realizados de forma empírica con el apoyo de registros sísmicos en gran parte del país, se logró determinar aspectos fundamentales para la predicción del movimiento del terreno ante efectos telúricos. Prueba de ello es el estudio del comportamiento al que se ven sometidos dos lugares diferentes ante la ocurrencia de un mismo evento sísmico. Se tiene que el Espectro de Amplitudes de Fourier (EAF) de un sismo registrado en roca en relación con el EAF registrado en otra estación alejada de la primera permanece constante (Singh *et al.*, 1988). Entonces se vuelve posible determinar el EAF de un sitio, separado a una distancia x de la estación de registro, haciendo un escalonamiento de amplitudes entre el sismo seleccionado y el sitio de interés tomando en consideración (20) reportada por Sing (1988). Además, se puede reescribir la ecuación anterior para obtener (21) la cual permite obtener el EAF para el sitio deseado mediante la multiplicación del EAF del sismo y la FTE del punto de interés, siendo éste un seudoespectro debido a que en realidad no se está registrando el sismo en cuestión en el lugar de interés (Figura 3.4), seudoespectro perteneciente al dominio de las frecuencias que deberá ser trasladado al dominio del tiempo mediante la transformada inversa de Fourier para así obtener un AS (Martínez, 2015).

$$FTE_i = \frac{|EAF_i(\omega)|}{|EAF_R(\omega)|} \tag{20}$$

$$EAF_i(\omega) = EAF_R(\omega) \cdot FTE_i \tag{21}$$

donde:

FTE_i = Función de transferencia empírica del sitio de interés.

EAF_i= Espectro de amplitudes de Fourier del movimiento del sitio de interés.

EAF_R=Espectro de amplitudes de Fourier en el sitio de referencia

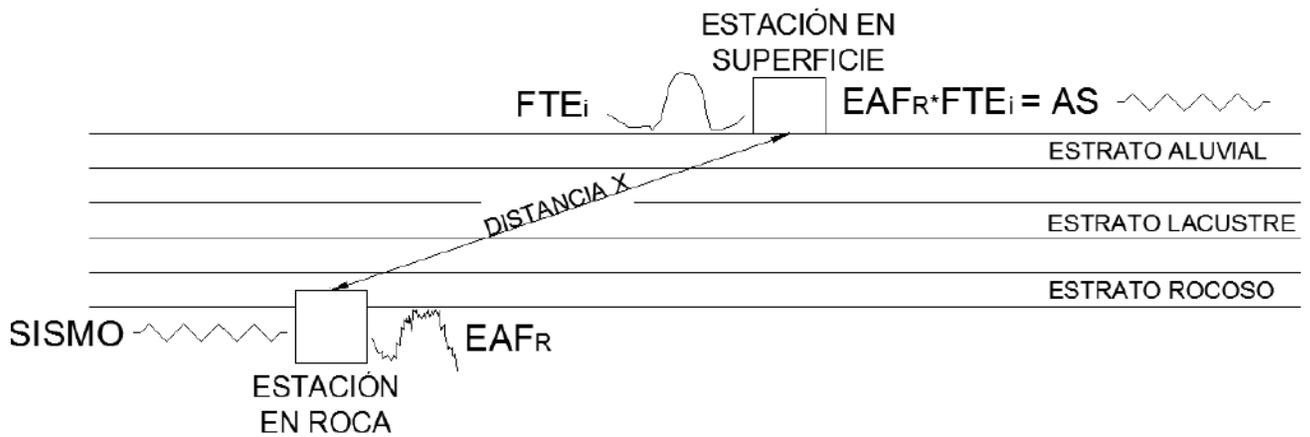


Figura 3.4 Transición de un registro en roca (real) a una estación en superficie (sintético).

3.6 Evaluación de respuesta dinámica de estructuras

El principal problema de la dinámica de estructuras es el comportamiento de éstas ante el movimiento que induce el sismo en la base de la estructura. Las ecuaciones de toda esta sección son acorde a lo establecido por Chopra (2012). Lo desplazamientos en cada instante de tiempo están dados por la ecuación

$$u^t(t) = u_g(t) + u(t) \quad (22)$$

donde

u^t =Desplazamiento total de la masa

u_g = Desplazamiento del terreno

u =Desplazamiento relativo entre la masa y el terreno

La ecuación de movimiento para una estructura de un sistema lineal de un grado de libertad está derivada por la ecuación diferencial de segundo orden

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (23)$$

donde

m = masa del sistema

c = coeficiente de amortiguamiento del sistema

k = rigidez del sistema

u = desplazamiento del sistema

\dot{u} = velocidad del sistema

\ddot{u} = aceleración del sistema

Esta ecuación puede ser solucionada mediante distintos métodos como la solución clásica, integral de Duhamel, método del dominio de la frecuencia y métodos numéricos, soluciones que no serán abordadas en el presente documento con excepción del último método debido a que éste no está restringido a sistemas lineales además de proporcionar el comportamiento inelástico anticipado de estructuras durante eventos sísmicos.

En la literatura existe una vasta cantidad de libros que tratan distintas soluciones a ecuaciones diferenciales y el desarrollo matemático paso a paso hasta converger al resultado. Específicamente hablando del área de la ingeniería, se destacan algunos métodos numéricos para dar solución a la respuesta dinámica de una estructura ante el movimiento sísmico:

- a) Intervalos de tiempo
- b) Interpolación de excitación
- c) Diferencia central
- d) Método de Newmark

No obstante, para la presente investigación se utilizará el método de interpolación de excitación debido a su alta eficiencia para sistemas lineales.

Para el intervalo de tiempo $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ la función de excitación está dada por

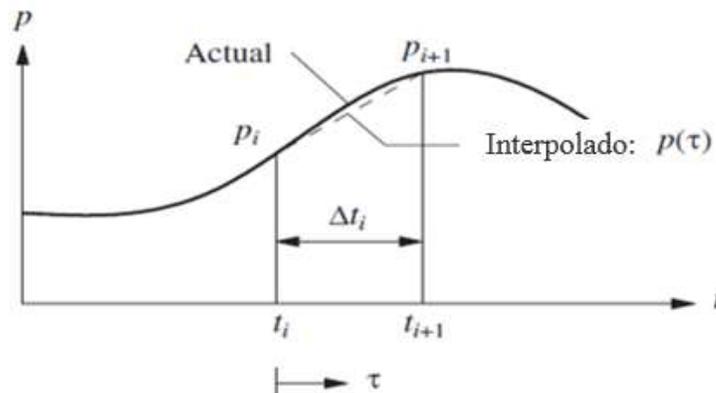


Figura 3.5 Notación para interpolación de excitación lineal (Chopra, 2012).

$$p(\tau) = p_i + \frac{\Delta p_i \tau}{\Delta t_i} \quad (24)$$

donde $\Delta p_i = p_{i+1} - p_i$ y τ varía de 0 a Δt_i

Entonces, la ecuación a resolver para un sistema no amortiguado es

$$m\ddot{u} + ku = p(t) = p_i + \frac{\Delta p_i \tau}{\Delta t_i} \quad (25)$$

Esta ecuación es desarrollada bajo la condición inicial que $u(0) = u_i$ y $\dot{u}(0) = \dot{u}_i$ y expresándola en términos de la solución para vibración libre, respuesta a una fuerza de paso y respuesta a una fuerza de rampa para $u(t)$ y $\dot{u}(t)$.

Ahora, evaluado en $\tau = \Delta t_i$, obtenemos el desplazamiento u_{i+1} y la velocidad \dot{u}_{i+1} en el tiempo $i+1$

$$u_{i+1} = u_i \cos(\omega_n \Delta t_i) + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \text{sen}(\omega_n \Delta t_i) + \frac{p_i}{k} [1 - \cos(\omega_n \Delta t_i)] \quad (26)$$

$$\frac{\dot{u}_{i+1}}{\omega_n} = -u_i \text{sen}(\omega_n \Delta t_i) + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \cos(\omega_n \Delta t_i) + \frac{p_i}{k} \text{sen}(\omega_n \Delta t_i) + \frac{\Delta p_i}{k} \frac{1}{\omega_n \Delta t_i} [1 - \cos(\omega_n \Delta t_i)] \quad (27)$$

Estas ecuaciones pueden ser reescritas para simplificar

$$\begin{aligned} u_{i+1} &= Au_i + B\dot{u}_i + Cp_i + Dp_{i+1} \\ \dot{u}_{i+1} &= A'u_i + B'\dot{u}_i + C'p_i + D'p_{i+1} \end{aligned} \quad (28)$$

donde:

$$A = e^{-\xi\omega_n\Delta t} \left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \text{sen}\omega_D \Delta t + \text{cos}\omega_D \Delta t \right) \quad (29)$$

$$B = e^{-\xi\omega_n\Delta t} \left(\frac{1}{\omega_D} \text{sen}\omega_D \Delta t \right) \quad (30)$$

$$C = \frac{1}{K} \left\{ \frac{2\xi}{\omega_n \Delta t} + e^{-\xi\omega_n\Delta t} \left[\left(\frac{1-2\xi^2}{\omega_D \Delta t} - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \right) \text{sen}\omega_D \Delta t - \left(1 + \frac{2\xi}{\omega_n \Delta t} \right) \text{cos}\omega_D \Delta t \right] \right\} \quad (31)$$

$$D = \frac{1}{K} \left[1 - \frac{2\xi}{\omega_n \Delta t} + e^{-\xi\omega_n\Delta t} \left(\frac{2\xi^2 - 1}{\omega_D \Delta t} \text{sen}\omega_D \Delta t + \frac{2\xi}{\omega_n \Delta t} \text{cos}\omega_D \Delta t \right) \right] \quad (32)$$

$$A' = -e^{-\xi\omega_n\Delta t} \left(\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} \text{sen}\omega_D \Delta t \right) \quad (33)$$

$$B' = e^{-\xi\omega_n\Delta t} \left(\text{cos}\omega_D \Delta t - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \text{sen}\omega_D \Delta t \right) \quad (34)$$

$$C' = \frac{1}{K} \left\{ -\frac{1}{\Delta t} + e^{-\xi\omega_n\Delta t} \left[\left(\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} + \frac{\xi}{\Delta t \sqrt{1-\xi^2}} \right) \text{sen}\omega_D \Delta t + \frac{1}{\Delta t} \text{cos}\omega_D \Delta t \right] \right\} \quad (35)$$

$$D' = \frac{1}{K \Delta t} \left[1 - e^{-\xi\omega_n\Delta t} \left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \text{sen}\omega_D \Delta t + \text{cos}\omega_D \Delta t \right) \right] \quad (36)$$

3.7 Métodos de interpolación en distribuciones.

En la actualidad existen métodos de interpolación para distribuciones utilizados en el análisis espacial aplicado desde enfoques estadísticos y determinísticos. El método de predicción, kriging ordinario, posee ventajas sobre los demás métodos determinísticos (distancia inversa, interpolación polinomial global, interpolación polinomial local, triangulación lineal, funciones de base radial, entre otros) respecto a la estimación de la varianza del error de predicción, lo cual permite además estimar intervalos de confianza para dicha predicción además de que el kriging es un método de estimación que da el mejor estimador lineal insesgado (cuando se cumplen todos los supuestos). No obstante depende de varios factores como el número de muestras tomadas, la distancia entre las muestras, entre otras. Este método se usa cuando la variable es estacionaria (Figura 3.6) con covarianza conocida y media desconocida (Bohórquez, 2009).

$$Z(s) = \mu + e(s) \quad s \in D, \quad \mu \in R \quad \text{y } \mu \text{ es desconocida} \quad (37)$$

Por lo tanto

$$\hat{Z}(s_0) = \lambda_1 Z(s_1) + \lambda_2 Z(s_2) + \lambda_3 Z(s_3) + \dots + \lambda_n Z(s_n) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i) \quad (38)$$

donde:

$\hat{Z}(s)$ = Valor predicción.

μ = La media del proceso.

λ_i = Factor de ponderación.

$e(s)$ = Covariancia conocida.

$Z(s)$ = Valor medido en el punto.

Y además el valor de predicción $\hat{Z}(s_0)$ debe cumplir las condiciones siguientes:

- a) Linealidad.
- b) Insesgamiento.
- c) Varianza mínima.
- d) Función de covariancia.

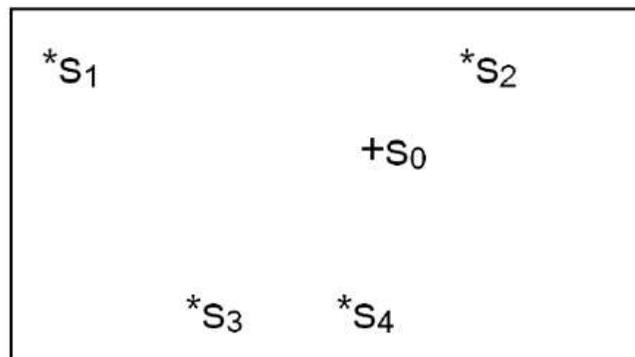


Figura 3.6 Ilustración del método kriging ordinario (Bohórquez, 2009).

4. METODOLOGÍA

Los subcapítulos referentes a la metodología a utilizar, se resumen mediante Figura 4.1 donde se muestra de manera generalizada los pasos a seguir durante esta etapa. Los pasos a detalles se mostrarán a lo largo de este capítulo.

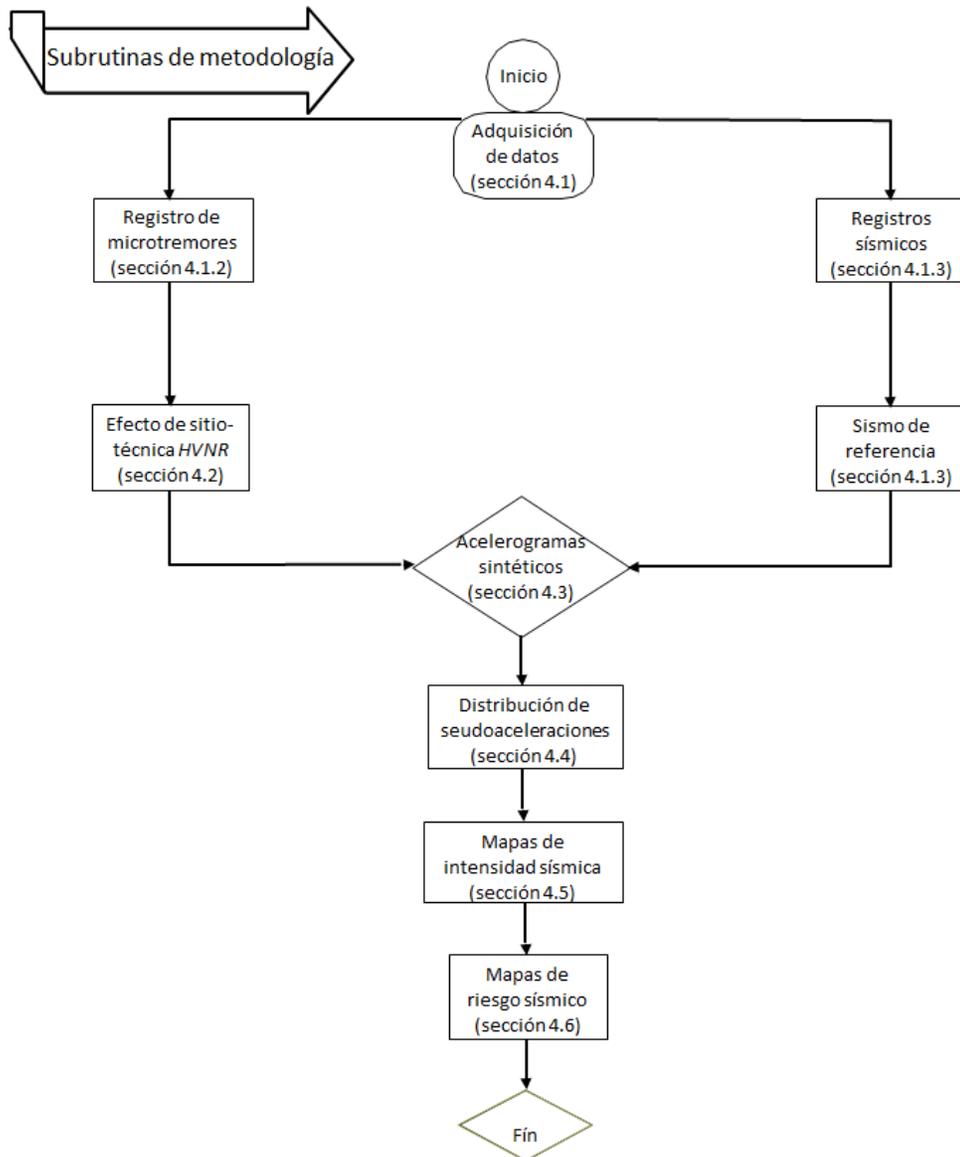


Figura 4.1 Pasos resumidos de metodología utilizada.

4.1 Adquisición de datos

4.1.1 Equipo

Las mediciones de vibración ambiental, también conocida como microtremores, se realizaron en la ciudad de Querétaro, mediante la implementación de un sismógrafo de banda ancha marca Trillium Compact 120s que cuenta con un rango amplio de frecuencias así como un bajo ruido instrumental (Figura 4.2), en conjunto con un digitalizador marca Reftek y demás accesorios mostrados en Figura 4.3. Lo anterior debido a que los sismógrafos de banda ancha son el mejor equipo, comparado con acelerógrafos, geófonos, y sismógrafos de periodo corto, para trabajos de zonificación sísmica en función de los niveles de aceleración (SESAME, 2004; Chávez-García y Tejeda-Jácome, 2010; González, 2014; Martínez, 2015; Molnar *et al.*, 2018) considerando su rango operativo en frecuencia y amplitud (Figura 4.4) donde se puede decir de manera general que la parte confiable empieza en 0.05 Hz para el sismógrafo, 1 Hz para el acelerógrafo y 2 Hz para los geófonos.

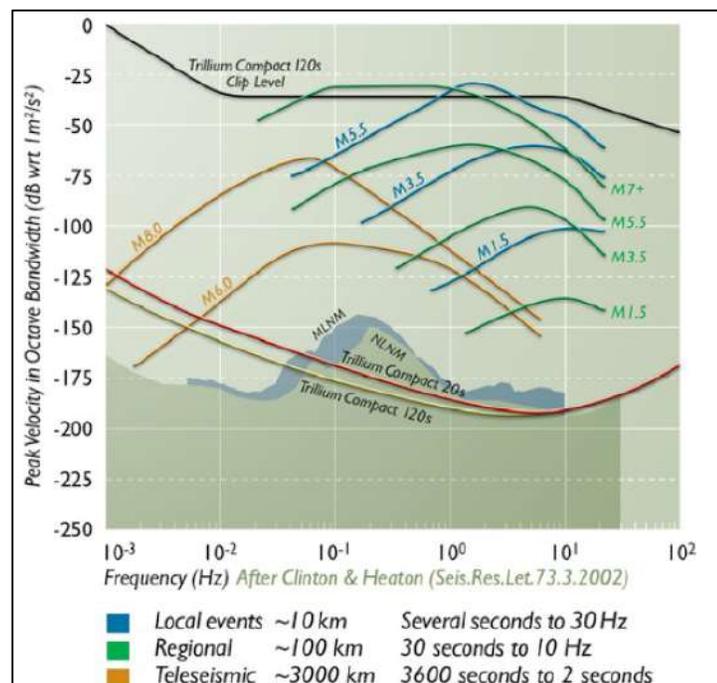


Figura 4.2 Diagrama de Bode que describe la respuesta instrumental del sensor Trillium Compact 120s



Figura 4.3 Componentes básicos del sismógrafo utilizado en las mediciones.

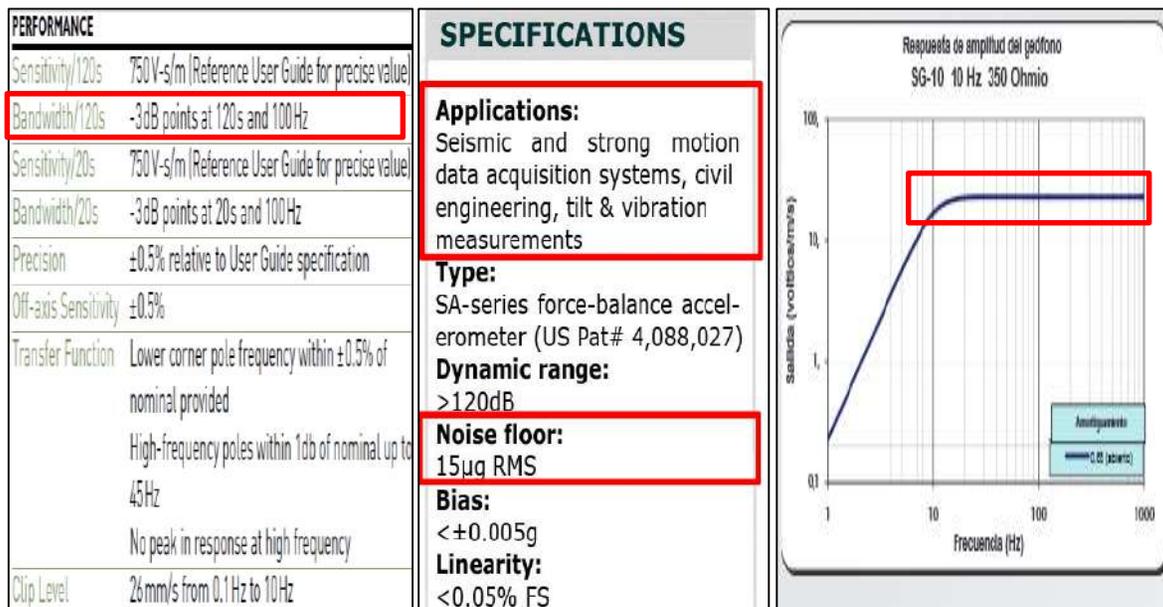


Figura 4.4 Comparativa de fichas técnicas entre sismógrafo (izquierda), acelerógrafo (centro) y geófonos (derecha).

4.1.2 Registro de microtremores

Para la adquisición de estos datos se sigue el procedimiento resumido en Figura 4.5. Primero se definieron los sitios para hacer el registro temporal de vibración ambiental, los cuales se eligen utilizando como referencia los estudios previos del suelo (cartas geológicas, modelos de velocidad de onda de corte, entre otros) que están asociados con el comportamiento dinámico de éste. Para esto se elaboró un mapa de mediciones propuesto para ejecutar estos registros temporales tal y como se puede apreciar en la Figura 4.6. Una señal estable es aquella que se obtiene en donde la actividad humana no esté tan cercana al sensor como para generar componentes horizontales mucho mayores que la componente vertical.

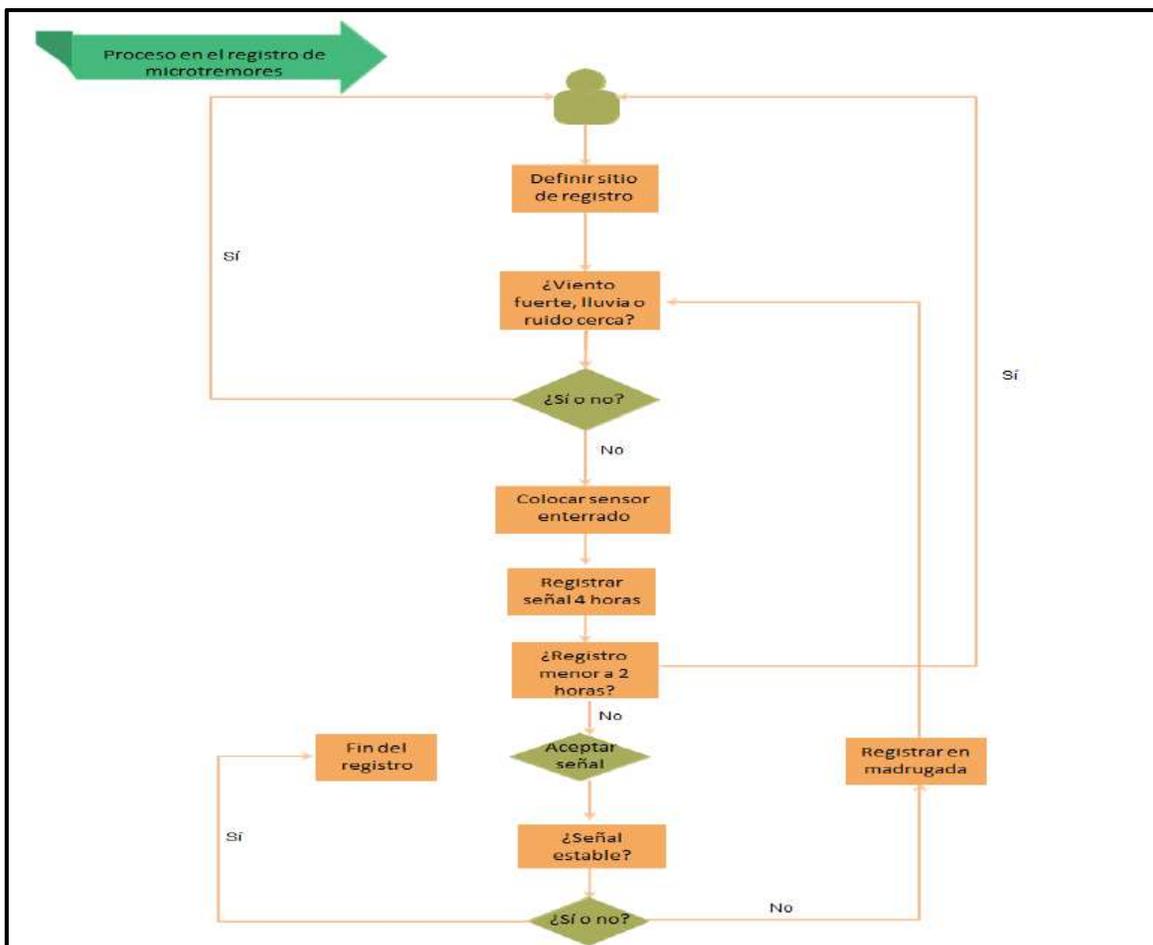


Figura 4.5 Procedimiento para adquirir la señal de microtremores.

Habiendo definido el número de puntos, la ubicación y el orden en que se obtendrían los datos, se registró la señal con el sismógrafo de banda ancha, acorde a lo establecido en las técnicas para el registro de ruido ambiental del proyecto SESAME (2004), haciendo algunas excepciones en cuanto al tiempo de registro para cada punto estratégico. Lo anterior debido a como se ha mencionado en estudios recientes elaborados por Martínez (2015), se ha inferido que se observa una deficiencia en la respuesta hacia bajas frecuencias en la relación espectral, y que a medida que el tiempo aumenta, este comportamiento se normaliza.

Los registros fueron obtenidos tomando en cuenta las siguientes recomendaciones:

Colocación: Se realizó una excavación de 50 cm de profundidad para resguardar el sensor y evitar perturbaciones por viento. En los sitios donde no fuera esto posible (banquetas, pavimento, piso cerámico) se colocó sobre la superficie y se buscó la manera de que el sensor no fuera perturbado por peatones, autos, animales o viento (esto solo se pudo corroborar hasta procesar la señal). En aquellos casos donde la señal no fue estable y/o que el espectro *HVNR* (resultado de efecto de sitio) produjo resultados atípicos en cuanto a forma espectral y nivel de amplificación (mayor a 10 veces), se repitió la medición en el sitio.

Nivelación: El sensor debe estar nivelado todo el tiempo. En aquellos lugares donde la pendiente no permitía nivelar se optó por excavar un volumen de 30x30x50 cm para alojar una interfaz con placa de vidrio y sobre esta posicionar el sensor.

Duración: El tiempo de registro promedio fue de 4 horas en cada punto. Los registros con duración entre 2 y 3 horas (debido a causas climatológicas o inesperadas) fueron analizados de manera más profunda, al analizar distintas ventanas de tiempo y tener la certeza que los resultados no variaban desde los primeros 30 minutos hasta el final del registro. Los registros con duración menor a 2 horas (debido a causas climatológicas) fueron descartados.

Clima: Se eligió no medir durante la ocurrencia de lluvias y días posteriores a ésta para evitar colocar el sensor en suelos saturados. Se trató de evitar la influencia del viento al enterrar el sensor o colocarlo en espacios cerrados.

Hora: Las horas de medición fueron mayoritariamente durante el día, entre 6:00 a.m y 9:00 p.m. Los registros que arrojaron resultados cuestionables se reprodujeron en un horario de 10:00 p.m a 06:00 a.m con fines de darle mayor estabilidad al sensor.

Durante esta etapa de registro de datos se realizaron 76 mediciones de microtemores a lo largo y ancho de la zona conurbana de la ciudad de Querétaro, en función del mapa previamente establecido. En Tabla 4-1 se muestra la ubicación geográfica de los puntos y de la misma manera la Figura 4.7 muestra el mapa con estos registros de microtemores llevados a cabo durante la etapa de mediciones.

Tabla 4-1 Localización de los puntos donde se llevaron a cabo registros.

Punto	Latitud (°)	Longitud (°)	Punto	Latitud (°)	Longitud (°)	Punto	Latitud (°)	Longitud (°)
0	20.59058	-100.41253	26	20.53647	-100.48395	52	20.63587	-100.49805
1	20.62120	-100.42630	27	20.58542	-100.45490	53	20.60902	-100.46572
2	20.57890	-100.40945	28	20.51330	-100.47773	54	20.66307	-100.42023
3	20.59302	-100.40925	29	20.60828	-100.49702	55	20.68945	-100.43845
4	20.57099	-100.39941	30	20.56080	-100.24493	56	20.63057	-100.37715
5	20.56083	-100.42632	31	20.54632	-100.27357	57	20.69433	-100.48447
6	20.57887	-100.38755	32	20.58125	-100.27588	58	20.65355	-100.51647
7	20.55092	-100.38278	33	20.56870	-100.32773	59	20.56745	-100.28748
8	20.66582	-100.37348	34	20.60983	-100.36498	60	20.56170	-100.26707
9	20.58032	-100.43183	35	20.59394	-100.39756	61	20.58392	-100.36322
10	20.64357	-100.43505	36	20.61315	-100.32298	62	20.56135	-100.37622
11	20.67039	-100.31597	37	20.68737	-100.45618	63	20.60533	-100.48908
12	20.65537	-100.38060	38	20.71717	-100.45898	64	20.66415	-100.34385
13	20.68583	-100.35548	39	20.74180	-100.44722	65	20.64465	-100.35862
14	20.59195	-100.38170	40	20.66640	-100.45883	66	20.60212	-100.34970
15	20.60006	-100.39748	41	20.67063	-100.43808	67	20.52842	-100.46825
16	20.61835	-100.39650	42	20.66480	-100.48257	68	20.63912	-100.48557
17	20.58920	-100.42844	43	20.55610	-100.44900	69	20.70835	-100.47467
18	20.60766	-100.42450	44	20.56462	-100.43338	70	20.68062	-100.49482
19	20.58810	-100.44426	45	20.64090	-100.41118	71	20.64392	-100.39303
20	20.70505	-100.45522	46	20.57232	-100.36825	72	20.72505	-100.43828
21	20.61379	-100.44121	47	20.58835	-100.34198	73	20.73710	-100.46775
22	20.66803	-100.51067	48	20.63077	-100.34732	74	20.68692	-100.33125
23	20.61322	-100.49318	49	20.52683	-100.41900	75	20.62402	-100.46207
24	20.54607	-100.41045	50	20.64033	-100.46472			
25	20.53440	-100.45108	51	20.56473	-100.46255			

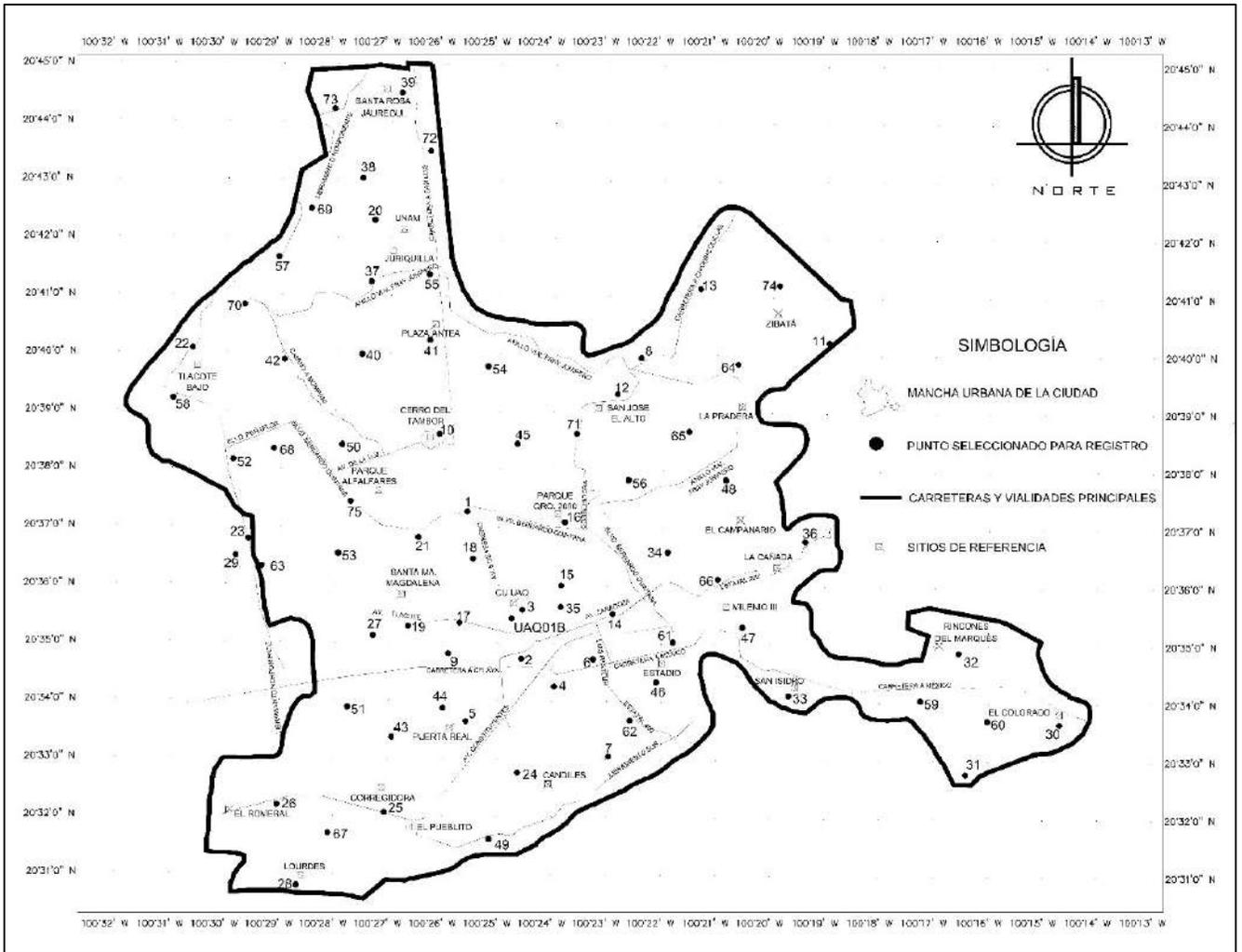


Figura 4.7 Mapa de mediciones con los registros de microtemores llevados a cabo en la ciudad de Querétaro y su zona conurbada.

Algunas de las generalidades de los trabajos en campo se muestran en Figura 4.8. Es importante recordar que en cada punto registrado se adoptaron las recomendaciones del proyecto SESAME (2004) y las realizadas Martínez (2015) en cuanto localización, duración de registro, hora de registro, condiciones climatológicas y otros aspectos.

Además podemos apreciar que las mediciones fueron llevadas a cabo en diferentes horas del día, dándole preferencia a los registros nocturnos en lugares donde el ruido antrópico era muy elevado por la cercanía de la fuente, esto para un comportamiento estable de la señal que permita no tener afectaciones en los resultados debido a que movimientos muy cercanos al sensor alteran la componente vertical generando amplificaciones que no son propias del suelo.

Por esto se trata de encontrar lugares alejados de la actividad humana y en caso de no ser posible se opta por hacer el registro en horas posteriores a las 9:00 p.m. y antes de las 06:00 a.m. En cada registro se enterró el sensor para evitar perturbaciones ocasionadas por viento y el tiempo de registro fue de 4 horas, con excepción de aquellos puntos donde debido a causas de fuerza mayor se tuvo que retirar el sismógrafo y solo fue posible registrar un lapso de 2 a 3 horas; aquellos puntos donde la duración del registro fue menor a 1 hora efectiva fueron descartados.



Figura 4.8 Colocación del sismógrafo para el registro en campo.

4.1.3 Registros sísmicos

Para los métodos utilizados en la siguientes subsecciones fue necesario contar con registros sísmicos reales que se hayan registrado en alguna estación sísmica cercana. Para tales efectos se contó con la estación sísmica ubicada en el Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) campus Juriquilla que cuenta con sismógrafo marca STS-2 y la estación CU-UAQ de la Universidad Autónoma de Querétaro con un acelerógrafo marca Kinematics modelo Altus K-2 donde ésta última cuenta con un único registro de sismo. La importancia de estas estaciones es que facilitan el análisis de cómo llega la señal del sismo a la ciudad sin necesidad de considerar la probabilidad de ocurrencia ni las tasas de excedencia asociadas a la fuente. Además una ventaja de contar con casetas sísmicas es que son edificadas, principalmente, sobre suelos libres de efecto de sitio (amplificación menor a dos veces), lo cual es fundamental para validar registros obtenidos en un sitio tomando como referencia la estación donde fue registrado el sismo.

Posteriormente, se procede a realizar una búsqueda exhaustiva en la base de datos del Servicio Sismológico Nacional (SSN) filtrando los resultados para los datos en los que se está interesado. Para este proyecto de investigación se tiene especial interés en los sismos de subducción o de falla inversa producidos en las costas mexicanas del pacífico por la subducción de la placa de cocos dentro de la placa norteamericana y en los sismos intraplaca o de fallamiento normal producidos dentro de una misma placa oceánica, debido a la gran cantidad de energía que liberan este tipo de fenómenos. En Tabla 4-2 se listan los sismos ocurridos durante los últimos 6 años que fueron reportados con magnitudes superiores a 5.5 en la escala de magnitud de momento (M_w) para un radio de 500 km a partir de la ciudad de Querétaro.

Tabla 4-2 Sismos analizados para tomar como referencia registrados en CGEO.

Evento	Fecha	Referencia	Distancia epicentral		Coordenadas		Profundidad (km)	Magnitud (Mw)
			Km***	Latitud (°)	Longitud (°)			
1**	11/04/2012	79 km al OESTE de LA MIRA, MICHOACÁN.	405	17.9217	-103.068	20.0	6.4	
2*	01/05/2012	46 km al SUROESTE de CD. ALTAMIRANO, GRO.	268	18.2507	-101.085	51.1	5.6	
3**	15/11/2012	24 km al SURESTE de CD. ALTAMIRANO, GRO.	269	18.1832	-100.529	45.4	6.1	
4**	20/02/2013	46 km al SUROESTE de TECOMÁN, COL.	442	18.5043	-103.989	3.20	5.6	
5*	21/04/2013	13 km al SUROESTE de CD. LÁZARO CÁRDENAS, MICH.	348	17.8568	-102.280	40.5	5.9	
6*	16/06/2013	24 km al SURESTE de CD DE HUITZUCO, GRO.	302	18.1130	-99.2283	55.1	5.8	
7**	21/08/2013	21 km al OESTE de SAN MARCOS, GRO.	433	16.7527	-99.5812	5.0	6.0	
8**	18/04/2014	61 km al SUROESTE de PETATLÁN, GRO.	410	17.0110	-101.460	18.0	7.2	
9**	08/05/2014	40 km al SUROESTE de TÉCPAN, GRO.	400	16.9860	-100.916	10.0	6.5	
10**	10/05/2014	35 km al SUROESTE de TÉCPAN, GRO.	395	17.0360	-100.893	10.0	6.1	
11*	30/09/2015	22 km al NORTE de ZIHUATANEJO, GRO.	326	17.8388	-101.523	49.5	5.5	
12**	23/11/2015	53 km al ESTE de SAN MARCOS, GRO.	438	16.8895	-98.8985	25.6	5.6	
13**	23/10/2016	50 km al SUROESTE de CIHUATLÁN, JAL.	494	18.8210	-104.742	13.5	5.6	
14*	19/09/2017	9 km al NOROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE.	320	18.3353	-98.6763	38.5	7.1	
15*	19/07/2018	13 km al SUROESTE de HUAJUAPAN DE LEÓN, OAX.	412	17.7700	-97.890	63.0	5.9	

* = sismo intraplaca, ** = sismo subducción, ***= medidos entre la ciudad de Querétaro y el epicentro.

De esta búsqueda resultaron un total de 15 sismos para simular la excitación del terreno durante la ocurrencia de alguno de ellos. No obstante, el objetivo del presente documento es delimitar el riesgo ocasionado por las estructuras edificadas sobre el suelo y para ello es suficiente con postular escenarios que contengan diferente magnitud, tipo de sismicidad y distancia epicentral. Por esta razón solo se eligieron 5 eventos para demostrar el comportamiento del suelo cuando estos atraviesan el suelo de la ciudad. Los sismos utilizados se muestran en Tabla 4-3 y su ubicación gráfica se muestra en Figura 4.9 donde se resalta el lugar donde ocurrió el epicentro y la magnitud del sismo en cuestión.

Tabla 4-3 Sismos registrados en CGEO utilizados como referencia para excitar el terreno.

Evento	Fecha	Referencia	Distancia epicentral		Coordenadas		Profundidad (km)	Magnitud (Mw)
			Km***	Latitud (°)	Longitud (°)			
1**	11/04/2012	79 km al OESTE de LA MIRA, MICHOACÁN.	405	17.9217	-103.068	20.0	6.4	
2*	01/05/2012	46 km al SUROESTE de CD. ALTAMIRANO, GRO.	268	18.2507	-101.085	51.1	5.6	
3**	15/11/2012	24 km al SURESTE de CD. ALTAMIRANO, GRO.	269	18.1832	-100.529	45.4	6.1	
4**	21/08/2013	21 km al OESTE de SAN MARCOS, GRO.	433	16.7527	-99.5812	5.0	6.0	
5*	19/09/2017	9 km al NOROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE.	320	18.3353	-98.6763	38.5	7.1	

* = sismo intraplaca, ** = sismo subducción, ***= medidos entre la ciudad de Querétaro y el epicentro.

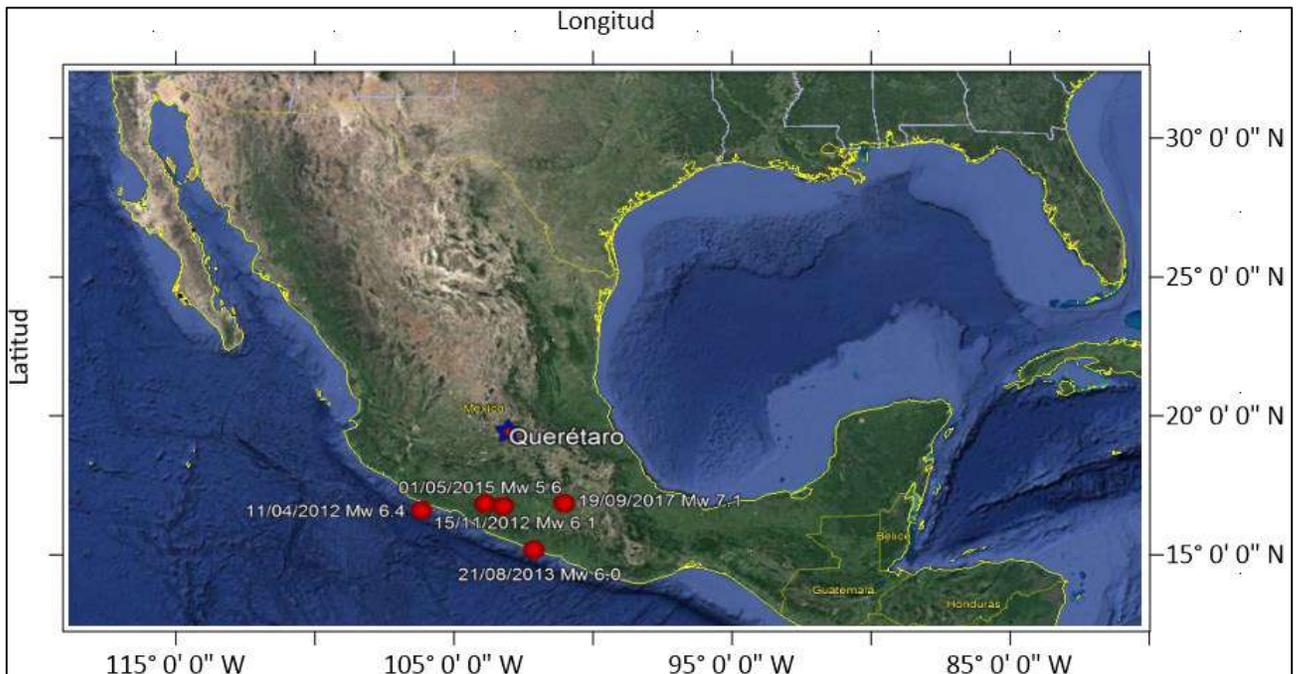


Figura 4.9 Sismos utilizados para estimar el nivel de intensidad en la ciudad.

En apéndice 1 se muestran las trazas sísmicas en sus tres componentes (este, norte y vertical) de cada uno de los cinco eventos elegidos con su respectivo EAF. Se agradece al M. en C. Francisco Pérez Moreno por la asesoría en la descarga de datos del SSN.

4.2 Estimación del efecto de sitio

Definiendo al efecto de sitio como el comportamiento dinámico que tiene el suelo ante el paso de las ondas a través de él, o bien, como la respuesta del suelo cuando éste es excitado por algún tipo de movimiento en función de la frecuencia de resonancia y el factor de amplificación (Lermo, 1992), es posible realizar una zonificación sísmica de la ciudad en función de éste término.

Con los datos obtenidos en la sección anterior se pueden obtener las FTE que representan a la ciudad, sin embargo, las señales obtenidas en los registros de microtemores deben ser tratadas previamente para manejar las unidades apropiadas tanto de la traza sísmica como del valor real de la amplitud de la señal. Primeramente, se obtiene la señal en formato *rt* que es la que viene predeterminada en el digitalizador *reftek*, luego ésta se convierte a formato *sac* para deconvolucionar. Se puede seguir el procedimiento indicado por Rocha (2011) para hacer este tratamiento, solo es necesario contar con los parámetros de ganancia del sensor y digitalizador así como el diagrama de polos y ceros del sensor, el cual se muestra en Figura 4.10. Otro aspecto a considerar son las unidades de la traza, la mayoría de los sismógrafos de banda ancha expresan las trazas en velocidad con unidades de metros por segundo, por lo que si se desea obtener valores de aceleración, metros por segundo cuadrado, la traza debe ser derivada. En este caso las señales fueron tratadas con el procedimiento anterior hasta obtener las trazas de los microtemores en unidades de aceleración y deconvolucionadas.

Con las señales tratadas apropiadamente se puede estimar el efecto de sitio mediante la técnica *HVNR* para obtener la FTE de cada uno de los 76 lugares registrados. Para esto fue utilizado el software *Geopsy* por la facilidad que este representa para generar el espectro.

Symbol	Parameter	Nominal Values	Units
z_n	Zeros	0 0 -392 -1960 $-1490 \pm 1740i$	rad/s
p_n	Poles	$-0.03691 \pm 0.03702i$ -343 -370 $\pm 467i$ $-836 \pm 1522i$ $-4900 \pm 4700i$ -6900 -15000	rad/s
k	Normalization factor	4.34493×10^{17}	(rad/s) ⁵
f_0	Normalization frequency	1	Hz
S	Ground motion sensitivity at f_0	754.3	V s/m

Figura 4.10 Diagrama de polos y ceros del sensor Trillium.

De manera concreta, el procedimiento consiste en lo siguiente:

1. Obtener la señal pura del sismógrafo y convertirla a formato SAC para deconvolucionarla de acuerdo al procedimiento mencionado por Figueroa-Soto *et al.* (2010) y Rocha (2011).
2. Importar las señales deconvolucionadas en Geopsy en sus tres componentes.
3. Se abre una ventana de tabla y otra de gráfica para introducir las señales indicando la componente que corresponde.
4. Se selecciona el espectro H/V de la barra de herramientas y se configuran los parámetros que se desea aplicar.
5. En este caso se escogieron ventanas de 300 segundos con función de suavizado de Konno y Ohmachi aplicando un filtro pasa bandas de 0.1 a 40 Hz con un *taper* de 5%.
6. Por último se escoge el intervalo de tiempo que será analizado y con eso obtener el total de ventanas que serán usadas para aplicar la técnica *HVNR*.

Una vez aplicado este procedimiento y habiendo exportado los resultados a formato ASCII fue posible determinar el efecto de sitio que presenta cada uno de los 76 sitios analizados en el presente estudio. Un ejemplo de ello se puede apreciar aplicando esta metodología al punto 0 (o la referencia del sitio que en este caso es el punto en la UAQ).

La metodología anterior se ha valido en diferentes estudios a lo largo del *MVB* (Lermo y Limaymanta, 2007; Chávez-García y Tejeda-Jácome, 2010; Ismael-Hernández *et al.*, 2011; Arroyo *et al.*, 2012; González y Clemente-Chávez, 2013; Lermo *et al.*, 2013; Clemente-Chavez *et al.*, 2014; González, 2014; Martínez, 2015) por lo que no es necesario corroborarla en este estudio, no obstante, se motiva al lector a resolver dudas al respecto haciendo una búsqueda de la literatura citada en este párrafo. Lo anterior con la intención de enfocarse en el objetivo principal de la investigación y profundizar más en los siguientes apartados.

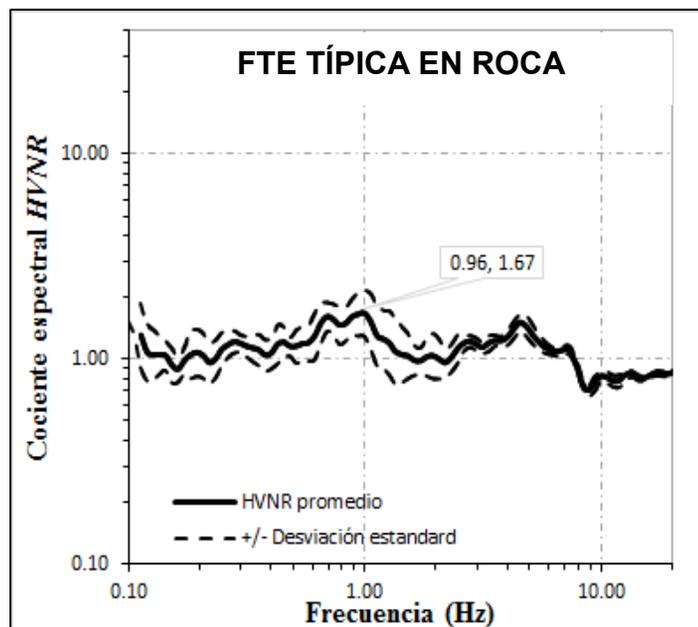


Figura 4.11 Efecto de sitio representado mediante FTE obtenida con técnica HVNR para un sitio categorizado como roca.

4.3 Acelerogramas Sintéticos

Como se mencionó en la sección 2.2 del presente trabajo, algunos estudios previos se han realizado para zonificar la ciudad de Querétaro en función de la frecuencia fundamental o, de manera indirecta, el periodo natural de vibración (Bustillos, 2005; Arroyo *et al.*, 2012; González, 2014; Álvarez-Manilla *et al.*, 2017), sin embargo, no se han realizado estimaciones de los niveles de aceleración que presentan diferentes puntos en la ciudad. Es por esto que en el presente subcapítulo se muestra el procedimiento para generar acelerogramas sintéticos (en superficie) en base al conocimiento de la señal de entrada en roca.

Para poder generar estos acelerogramas se implementó un algoritmo (ver apéndice 3) que realiza las operaciones matemáticas con la finalidad de acelerar el proceso de ejecución y procesamiento de los datos. Este algoritmo fue desarrollado por Zavala *et al.* (2018) y ahí explican paso a paso el funcionamiento de la metodología. Para este caso solo se resumirá la información:

En primera instancia, recordando los datos utilizados para los sismos de referencia tratados en la sección 4.1.2 donde se escogieron 5 eventos de diferente magnitud, distancia epicentral y tipo de sismicidad para que simulen la excitación del terreno, se obtiene el EAF de la componente horizontal con la parte intensa del sismo correspondiente. Posteriormente, con base al efecto de sitio determinado para cada sitio de la ciudad, se realiza la multiplicación de estos dos espectros para formar un seudoespectro de las amplitudes que presenta un sitio determinado, espectro al cual se le aplica la Transformada Inversa de Fourier (IFFT por sus siglas en inglés), para ser trasladado del dominio de las frecuencias al dominio del tiempo (Zavala *et al.*, 2018).

En Figura 4.12 se muestra el comportamiento de las señales tanto para los microtremores como para la componente horizontal (norte) del sismo de referencia seleccionado (Sismo del 01 de Mayo del 2012 de Mw 5.6 ocurrido en Cd. Altamirano, Guerrero). Además, calculando los EAF tanto para las componentes de los microtremores (este, norte y vertical) como para el sismo de referencia (este o norte) se obtiene la transformada rápida de Fourier (*FFT*, por sus siglas en inglés) para determinar el contenido de frecuencias de cada una de ellas (Figura 4.13).

Finalmente, generando la FTE con la técnica HVNR en el algoritmo, se realiza la multiplicación elemento a elemento (producto punto) con el EAF del sismo de referencia para generar el seudoespectro que demuestra el contenido de frecuencias al que se encuentra sometido el suelo durante el movimiento del terreno siendo excitado por el sismo. Los resultados arrojan un acelerograma en superficie (sintético) habiendo pasado por varias etapas (estimación de los EAF, cálculo de la FTE con *HVNR*, creación de seudoespectro y AS). Esta evolución de las señales se puede apreciar en Figura 4.14 donde se muestran los aspectos más relevantes del algoritmo utilizado. Con fin de evaluar la confiabilidad de los resultados respecto a los AS generados, en apéndice 4 se muestra un ejemplo que permite validar esta metodología.

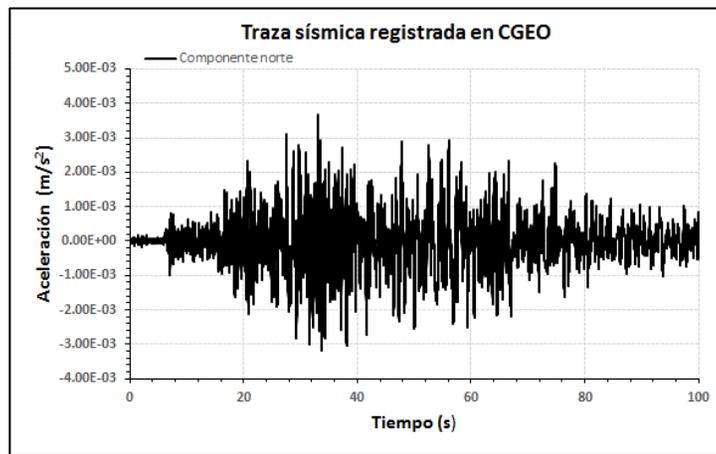
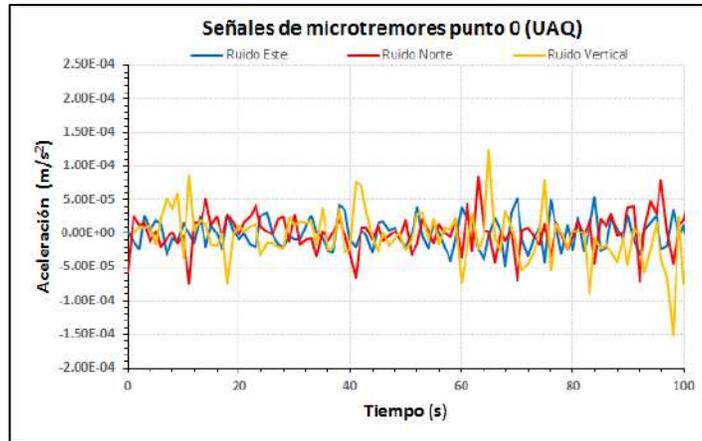


Figura 4.12 Señales de microtemores para el punto 0 (arriba) y para la parte intensa del sismo de referencia (abajo) en ventana de 100 segundos.

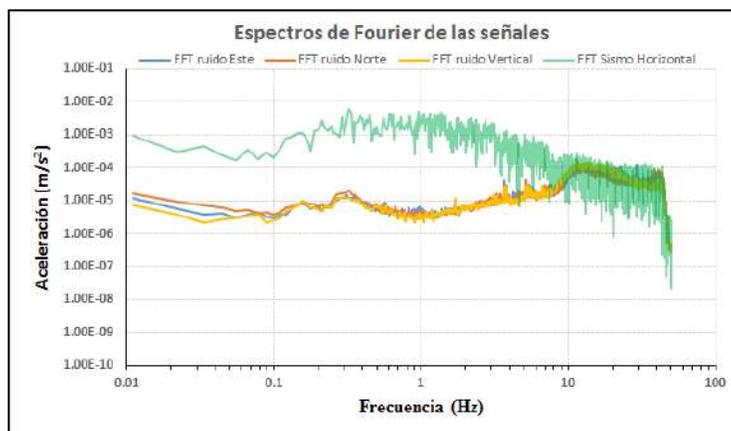


Figura 4.13 EAF para cada una de las componentes involucradas.

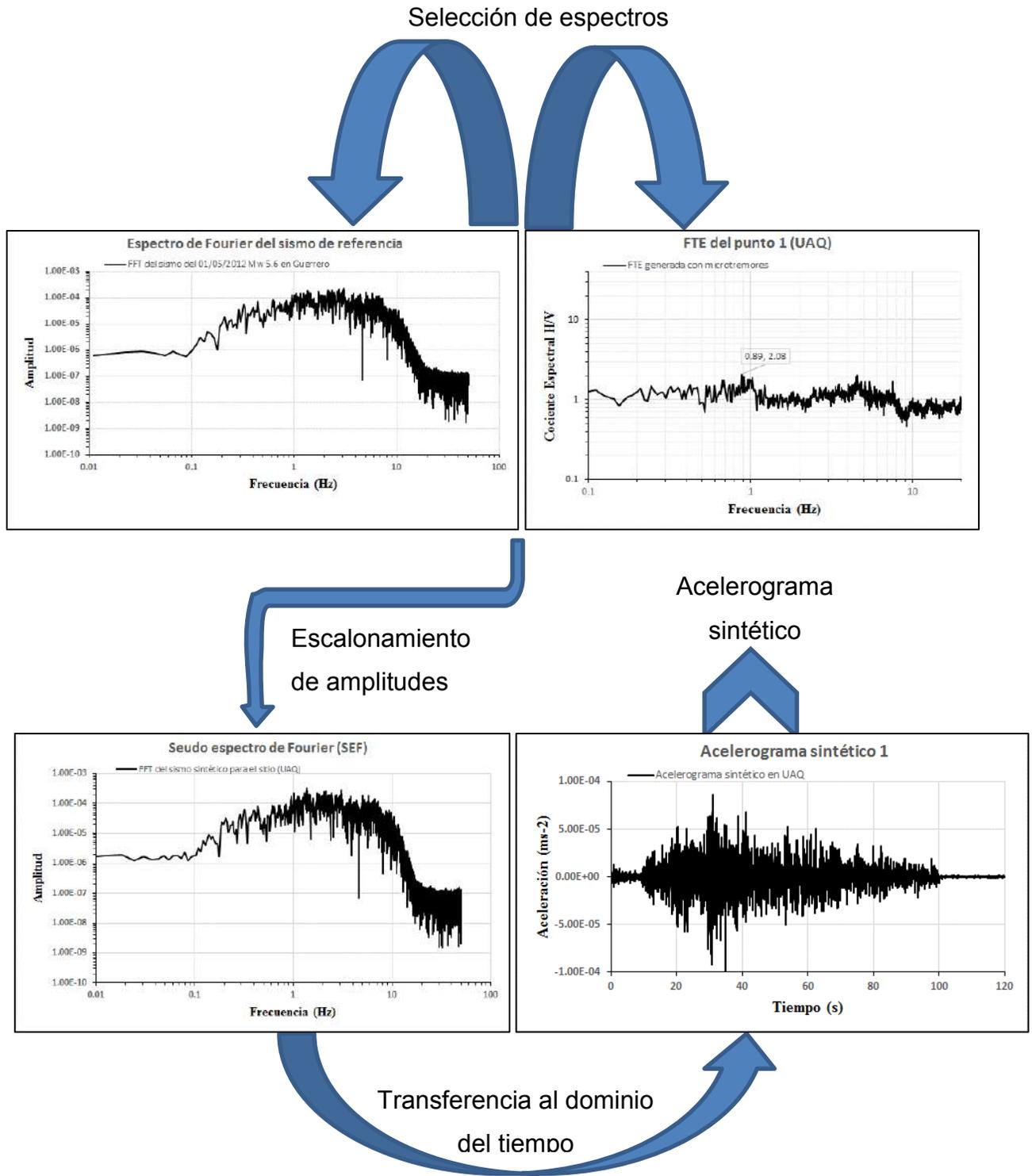


Figura 4.14 Evolución de las señales hasta generar un acelerograma sintético.

4.4 Distribución de pseudoaceleraciones (SA)

Ahora, conociendo los AS en cada uno de los sitios donde se tomaron registros de microtembres (ver Apéndice 5), fue posible conocer cuánta aceleración se registra en diferentes lugares de la ciudad, sin embargo, es insuficiente conocer estos valores por sí solos. Por esta razón, resultó necesario generar espectros de respuesta que permitieron conocer cuáles fueron los valores en términos de SA al interactuar el movimiento del suelo con el de los edificios. Para esto el método que mejor se adecúa al tipo de excitación que se está presentando es el de aceleración lineal representado por sistemas de un grado de libertad con un periodo estructural determinado (Chopra, 2012).

Por otro lado, con la intención de expresar el comportamiento de los sismos y cómo afectan a las estructuras, es fundamental recordar que los temblores poseen diferentes tipos de contenido de frecuencias que se producen con el movimiento del suelo en el que están construidas estructuras de tipo civil y esto influye en la manera en que estas estructuras responden a la excitación del terreno. Una prueba de ello es que, para temblores de falla inversa, generado en las costas mexicanas del pacífico donde las ondas se trasladan a un lugar alejado del epicentro, las frecuencias de éstas están compuestas mayormente por bajas frecuencias que suelen perturbar a edificios con periodos estructurales elevados (Mayor a 2 segundos). De igual manera, los temblores de falla normal son reconocidos por su elevada composición de altas frecuencias (además de la profundidad y ubicación a la que ocurren), esto por la poca distancia que existe entre el lugar donde se origina el sismo y el lugar que éste afecta, produciendo más aceleración en construcciones con periodos estructurales cortos, no obstante, se debe mencionar que este tipo de eventos puede contener en igual manera frecuencias bajas, excitando al terreno en ambas formas.

Por este motivo, es fundamental conocer que la aceleración que se transmite a los edificios al momento de la excitación producida por un movimiento telúrico tomará en consideración el tipo de falla, la cantidad de energía liberada y la distancia epicentral del sismo que está moviendo los estratos del terreno. En el presente trabajo de investigación, como se declaró en las secciones anteriores, los sismos analizados corresponden tanto a eventos de falla normal (intraplaca) así como los de falla inversa (subducción).

Por último, estimando los valores de SA en los sitios de análisis del presente estudio, se realizó una distribución de éstas mediante técnicas geoestadísticas de correlación cruzada generando valores en toda el área de análisis, lo anterior con la intención de diseñar mapas que proporcionen de manera gráfica los niveles máximos de SA y el lugar donde estos ocurren.

Aplicando lo establecido en esta subsección, el primer paso consistió en leer la traza sísmica del AS y generar el espectro de respuesta en pseudoaceleración (ESA) para conocer en dónde se produce la mayor aceleración y a qué periodo estructural corresponde. Por último se exportó cada valor de SA y con esto se obtuvo la distribución para cada periodo estructural. En este caso se utilizó el software Degtra A4 V5, con un número de periodos igual a 100 con un periodo mínimo de 0.1 s y máximo de 5.0 s considerando un factor de amortiguamiento de 0.05 (5%) de su amortiguamiento crítico.

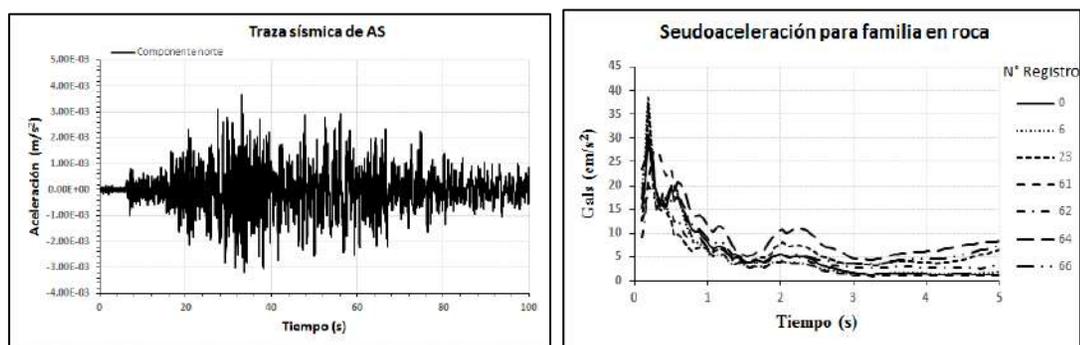


Figura 4.15 Traza sísmica de AS (izquierda) y ESA correspondiente (derecha).

4.5 Mapas de intensidad sísmica

Las secciones 4.4 y 4.5 pueden ser resumidas mediante el diagrama mostrado en la Figura 4.16 donde se ilustra los pasos a seguir para generar mapas de intensidad en función de SA, o bien, mapas en general para un valor de distribución deseado. Los pasos completos se detallan a lo largo de los párrafos de los citados subcapítulos.

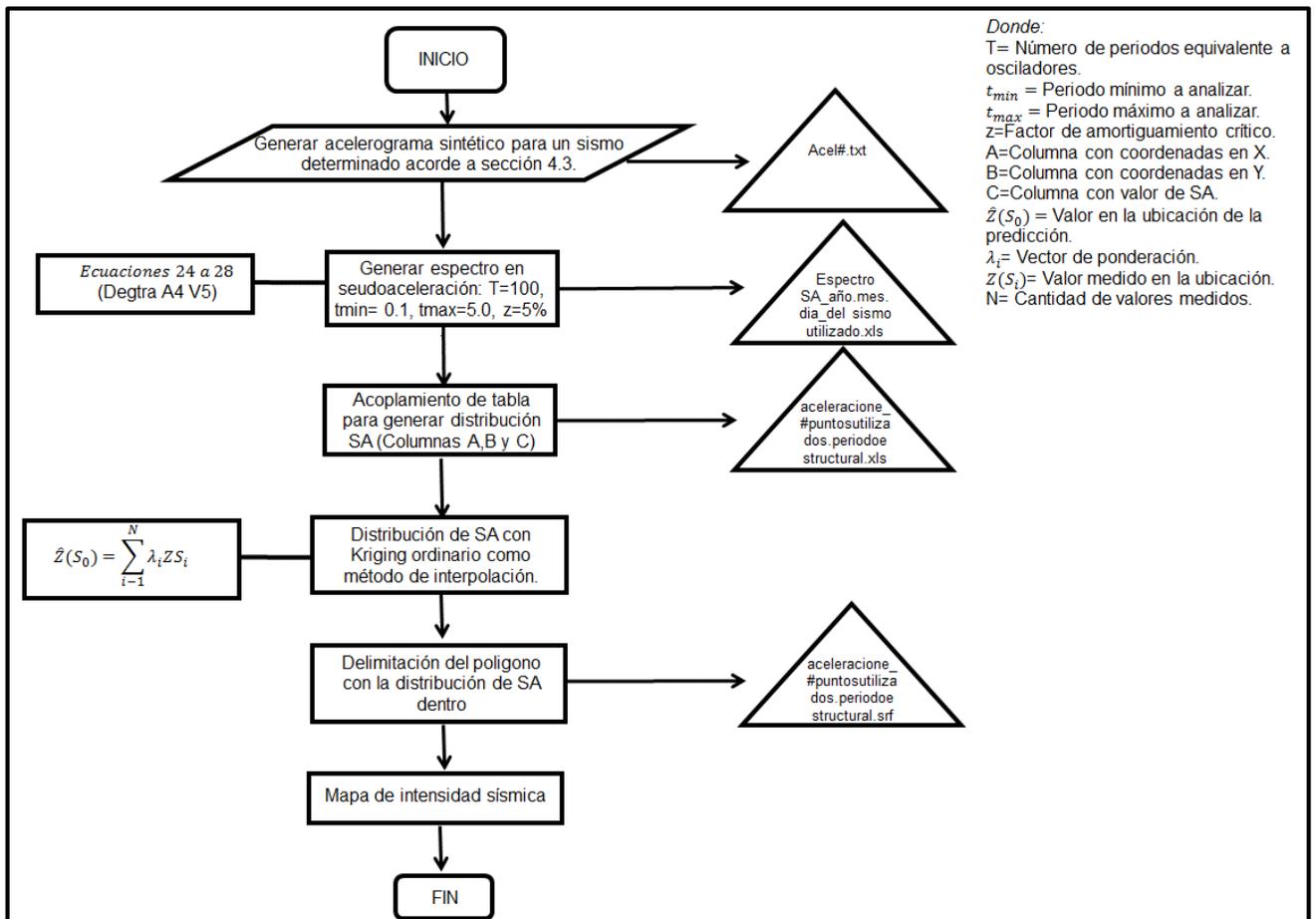


Figura 4.16 Diagrama de flujo para trazar mapas de intensidad sísmica considerando la distribución de SA para distintos periodos estructurales.

Es necesario demostrar el riesgo sísmico en que se encuentra inmersa la ciudad de Querétaro, por esta razón fue requerido trazar mapas de intensidad sísmica que lo delimiten en función de las SA que se presentan durante un evento sísmico determinado. Entonces, para ello, se generaron de manera gráfica las distribuciones de SA obtenidas para un sismo de referencia.

Primeramente es necesario definir los escenarios con los que se va a interactuar, es decir, no solo debemos conocer el sismo que está excitando al terreno sino también el ESA para un periodo estructural específico para agrupar el valor de SA para cada punto en ese periodo seleccionado. Debido a que la ciudad de Querétaro cuenta con edificios menores a 50 pisos, resulta razonable considerar que ninguno de estos tendrá un periodo estructural mayor a 5 segundos. Entonces se escogieron escenarios con periodos estructurales menores a este valor. Para este trabajo se consideró generar seis escenarios para cada sismo de referencia, el primero fue para edificios con periodo estructural de 0.10 s, el segundo para 0.50 s, el tercero para 1.0 s, el cuarto para 2.0 s, el quinto para 5.0 s y por último un escenario que represente al periodo estructural con mayor SA.

Luego, para generar el mapa que delimite la zona en que se encuentran la totalidad de puntos registrados, se creó una tabla donde se especificaron las coordenadas X y Y de la poligonal que cubre el área de puntos registrados, donde X es el eje de las abscisas y Y el de las ordenadas. De manera análoga se creó otra tabla donde se especificaron las coordenadas X, Y y Z de cada punto de registro, donde X es el eje de las abscisas, Y el de las ordenadas y Z el valor de SA. Estas tablas fueron cargadas en el programa SURFER que nos permite realizar geoestadística mediante diferentes métodos de interpolación.

El método de predicción utilizado fue kriging ordinario debido a la ventaja que tiene sobre los demás métodos determinísticos (distancia inversa, interpolación polinomial global, interpolación polinomial local, triangulación lineal, funciones de base radial, entre otros) respecto a la estimación de la varianza del error de predicción, lo cual permite estimar intervalos de confianza para dicha predicción además de que el kriging es un método de estimación que da el mejor estimador lineal insesgado (cuando se cumplen todos los supuestos). Inicialmente, el kriging fue desarrollado para aquellos casos donde hay presencia de estacionariedad y posteriormente fue extendido para casos donde se cumple la hipótesis intrínseca (Bohórquez, 2009).

Posteriormente se generó un mapa de contorno con los archivos de mallado creados con la tabla de SA y de la poligonal envolvente, y se obtuvo una distribución de SA en la zona de interés donde se pueden apreciar los niveles máximos de intensidad mediante una escala de colores que representa una mayor aceleración (rojo) hasta disminuir a los valores mínimos (azul). Los valores de SA se expresaron en unidades de gal (cm/s^2).

En el capítulo siguiente se muestran los mapas de intensidad sísmica para diferentes escenarios según el periodo estructural y el sismo de referencia al que corresponda. Es importante mencionar que se están incluyendo todos los sismos de referencia en la sección de resultados, omitiendo la sugerencia de anexarlos en los apéndices de este documento dado que se trata de exactamente la misma metodología para todos y pudiera pensarse que no es necesario mostrarlo para no distraer al lector del mensaje principal del tema, sin embargo, es requerido mostrar cómo un mismo suelo varía su comportamiento según el sismo que le está produciendo el movimiento de los estratos más profundos.

4.6 Mapas de riesgo sísmico

Hasta este momento se ha hablado de cómo el riesgo sísmico es acotado en función de los niveles de pseudoaceleración para un periodo estructural determinado, sin embargo, como aporte a la presente investigación, se plantea una nueva forma de acotar el riesgo desde una perspectiva diferente. En Figura 4.17 se muestra un diagrama de flujo para la toma de decisiones al definir un valor de riesgo u otro.

La metodología consistió en delimitar el riesgo sísmico que presenta la ciudad de Querétaro para diferentes tipos de temblores, en función tanto del comportamiento dinámico del suelo como de las edificaciones localizadas en toda la ciudad, debido a que en los estudios de riesgo-peligro sísmico que se han realizado, es común ver que delimitan al riesgo sísmico en función de las máximas pseudoaceleraciones que presenta el sitio para un periodo estructural determinado, sin embargo, dos sitios que presentan la misma aceleración no necesariamente cuentan con el mismo nivel de riesgo porque es posible que las construcciones edificadas en una zona sean de diferentes características con respecto a la primera.

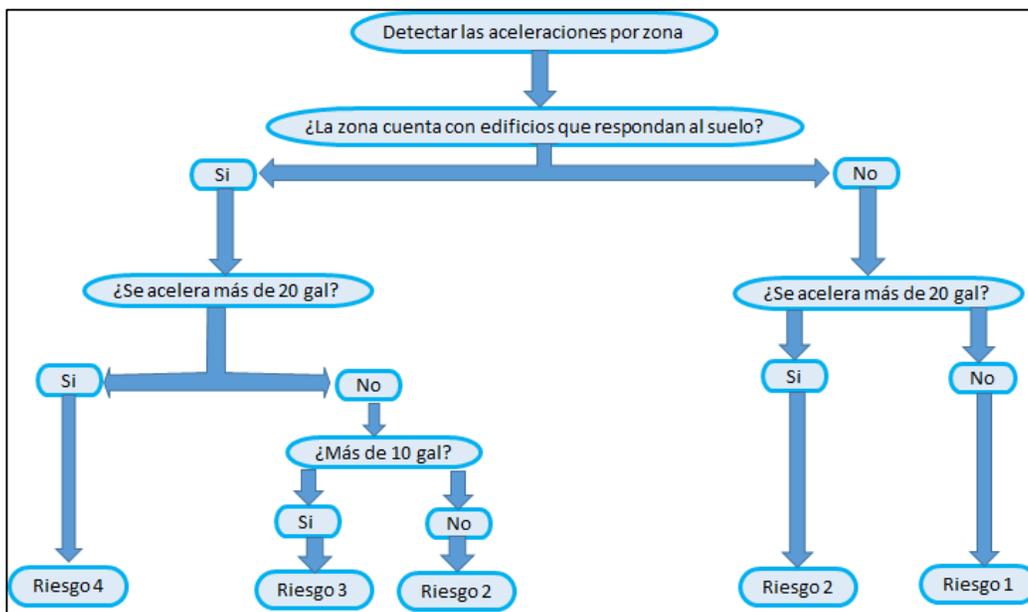


Figura 4.17 Diagrama de flujo para la toma de decisiones al momento de definir el riesgo sísmico.

Por ejemplo, supongamos que se tienen dos áreas con un uso de suelo diferente (habitacional y comercial). Evidentemente el tipo de construcciones que predominarán en la primera zona estará constituida por casa habitación de 1 a 3 niveles, mientras que en la segunda zona pueden existir edificios mayores a 3 niveles. Además, si al estimar los niveles de aceleración en ambas zonas resulta que se aceleran lo mismo en un periodo estructural similar, el pensamiento normal supondría que tienen el mismo riesgo sísmico, pero en este caso no sería así debido que pese a que se aceleren lo mismo, si las construcciones que se encuentran edificadas físicamente no responden a la excitación del terreno, sería más que razonable establecer que se encuentran bajo un nivel de riesgo sísmico distinto.

En otras palabras, no es suficiente conocer los niveles de SA como se mostraron en la sección anterior, sino que además es fundamental delimitar el riesgo considerando si efectivamente existen edificaciones con esas características que puedan dañar a la zona, y en casos extremos hasta cobrar vidas humanas por el colapso de alguna de estas estructuras.

Podemos establecer un ejemplo más específico que el anterior: Consideremos el primer sismo de referencia tratado en la Tabla 4-3 (sismo del 01 de mayo del 2012 de Mw 5.6 ocurrido en Ciudad Altamirano, Guerrero), donde de la Figura 4.18, obtenida aplicando la metodología para mapas de intensidad sísmica, podemos apreciar que la parte suroeste se acelera entre 3 y 5 gal y lo mismo sucede en la parte sureste y noreste de la ciudad. Entonces se pensará en definir que estas zonas poseen el mismo riesgo sísmico, sin embargo, esto resultaría erróneo debido a que la zona suroeste está compuesta básicamente por terrenos agrícolas sin construcciones importantes y algunos fraccionamientos con casa habitación menor a dos niveles, mientras que las zonas sureste y noreste cuentan con edificios importantes de entre 15 y 20 pisos. Entonces la primera zona se vería menos afectada que la segunda por que no cuenta con edificios que entren en resonancia con el movimiento del terreno.

Entonces, el primer paso consistió en realizar un análisis de las construcciones existentes en la ciudad y determinar, en función del número de niveles que poseen, el periodo fundamental de la estructura acorde a lo establecido por Bazán y Meli (2004). Posteriormente se volvió necesario definir un nivel de pseudoaceleración como referencia (en este caso 20 gal dada la muestra de SA que se tenía de los 5 eventos analizados, donde 20 gal representa la media de las SA máximas y mínimas de estos eventos) y el nivel de riesgo para cada punto en el que se tenga registro de microtremor, y por ende, de pseudoaceleración. Para generar los mapas de riesgo se realizó el mismo procedimiento que para los mapas de intensidad, con la única diferencia que en lugar de establecer un valor de SA se introduce el valor de riesgo sísmico (en este estudio se manejaron cuatro niveles de riesgo: bajo, moderado, considerable y alto) y así finalmente se hace una distribución de riesgo en la ciudad.

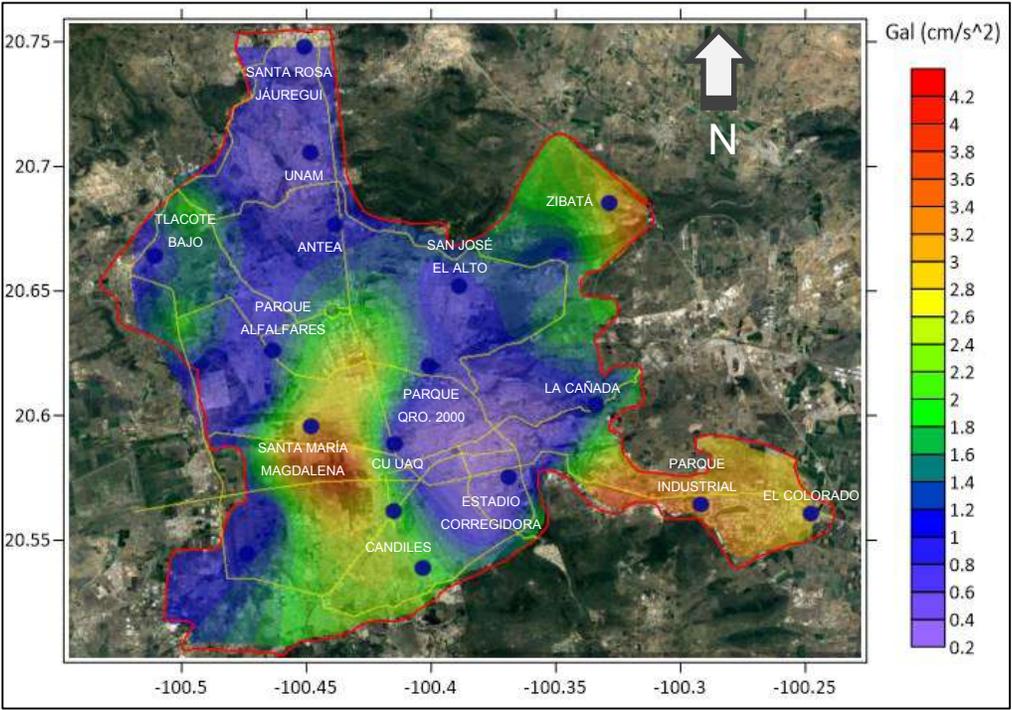


Figura 4.18 Distribución de SA en la ciudad de Querétaro para un periodo estructural de 2.0 s considerando el sismo del 01 de mayo del 2012 de Mw 5.6 ocurrido en Ciudad Altamirano, Guerrero.

5. RESULTADOS

5.1 Funciones de Transferencia Empíricas

Realizando el procedimiento mostrado en la metodología para todos los puntos donde se registraron microtemores, se obtuvieron FTE para conocer el efecto de sitio, las cuales se muestran de manera individual en apéndice 2. Ahora, con fines de zonificar la ciudad, se agruparon estas FTE para formar familias espectrales que describen el comportamiento del terreno. En Figura 5.1 se muestra como se divide la ciudad y se asigna una familia espectral para cada zona. Esta agrupación se hace en función de la forma que posea la FTE considerando si tiene uno o más picos, el nivel de amplificación y la frecuencia en la que ésta ocurre (frecuencia fundamental).

Es importante mencionar que si bien se crearon familias espectrales con base en su forma, la zonificación se elaboró considerando los puntos que predominaban en una zona determinada, es decir, pese que una zona esté constituida principalmente por una familia, esto no significa que no haya otros puntos que tengan un comportamiento o forma espectral diferente. Lo anterior debido a que la ciudad de Querétaro cuenta con estratigrafías complejas que no permiten establecer una zonificación uniforme, esto principalmente en la zona norte, centro y este de la ciudad.

Por esta razón, cuando se desee conocer un valor determinado, se debe elegir un punto específico y asociar a qué familia espectral pertenece o, si se desea profundizar aún más, se debe analizar la FTE individual con fin de evaluar el nivel de amplificación que posee y la frecuencia en que ésta ocurre.

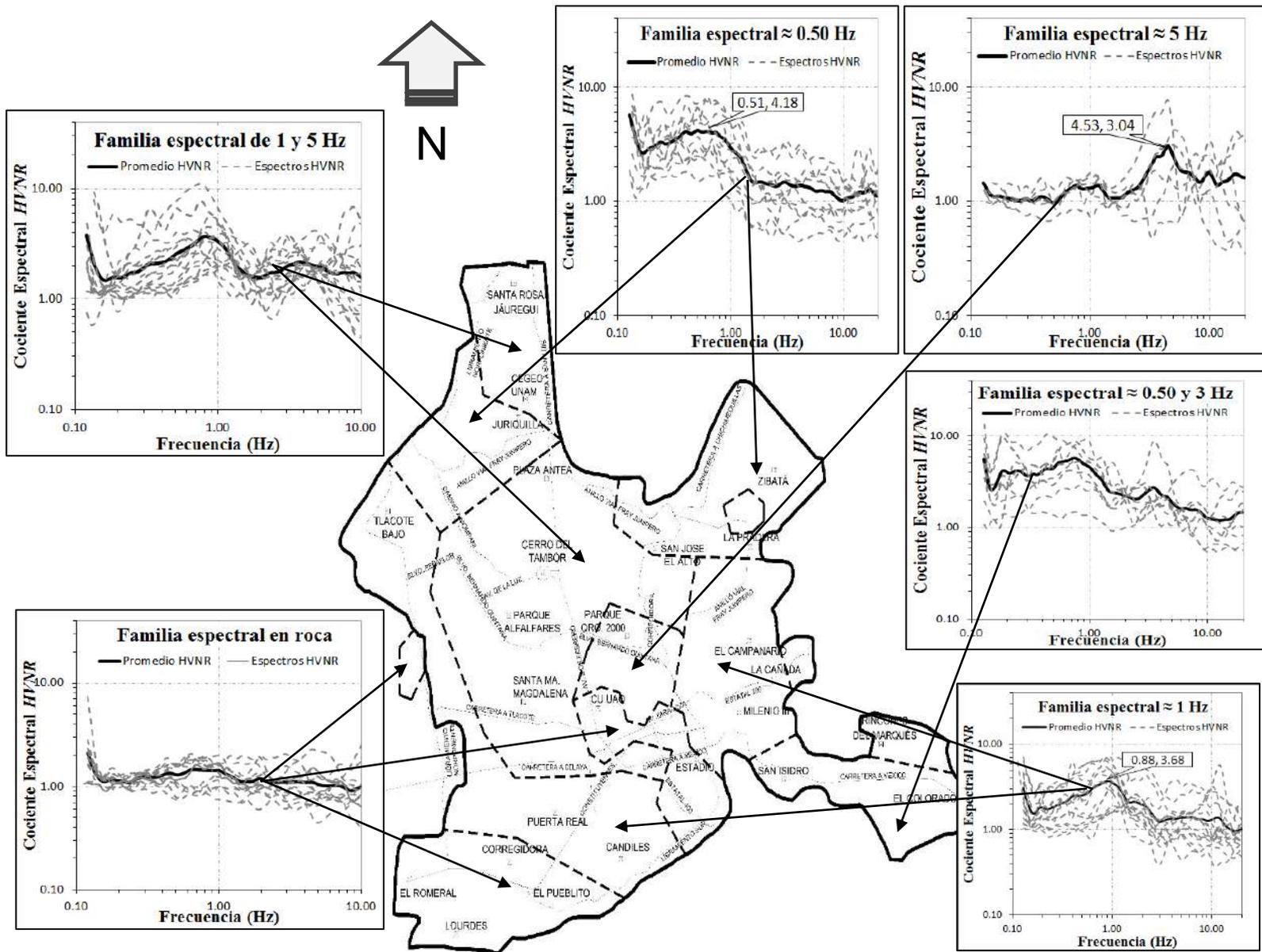


Figura 5.1 Mapa de la ciudad de Querétaro y su zona conurbada dividida en zonas según la familia espectral que la caracteriza (Roca, 5 Hz, 1 Hz, 0.50 Hz, 1 y 5 Hz, y 0.50 y 3 Hz).

5.2 Intensidad sísmica

5.2.1 Sismo del 01 de mayo del 2012

El primer evento seleccionado como sismo de referencia correspondió al ocurrido en los límites entre los estados de Guerrero y Michoacán con Mw 5.6, a 46 km al sureste de Ciudad Altamirano a una profundidad de 51.10 km dentro de la placa de cocos subducida en la placa norteamericana. Este evento presentó una falla normal (intraplaca). En Figura 5.2 se muestran los ESA generados para este sismo considerando un rango de periodo estructural que abarca desde 0.1 hasta 5.0 segundos y se agruparon según la familia espectral a la que pertenecen. Luego, en Figura 5.3 se muestra la distribución de éstas SA según el periodo estructural utilizado conforme a lo establecido en el capítulo anterior.

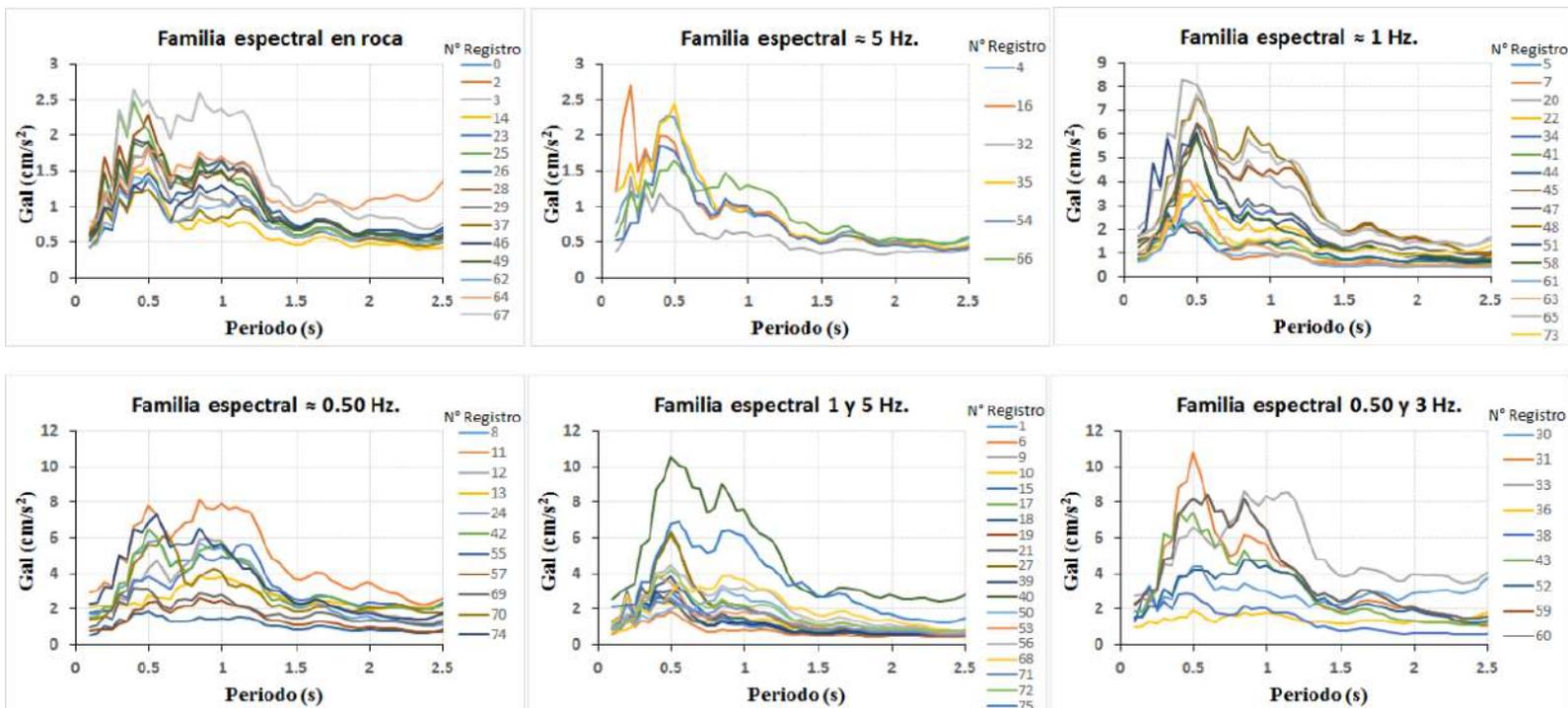


Figura 5.2 ESA calculados considerando que el terreno está siendo excitado por el sismo del 01 de mayo del 2012 en cada registro donde se realizaron mediciones de microtremores.

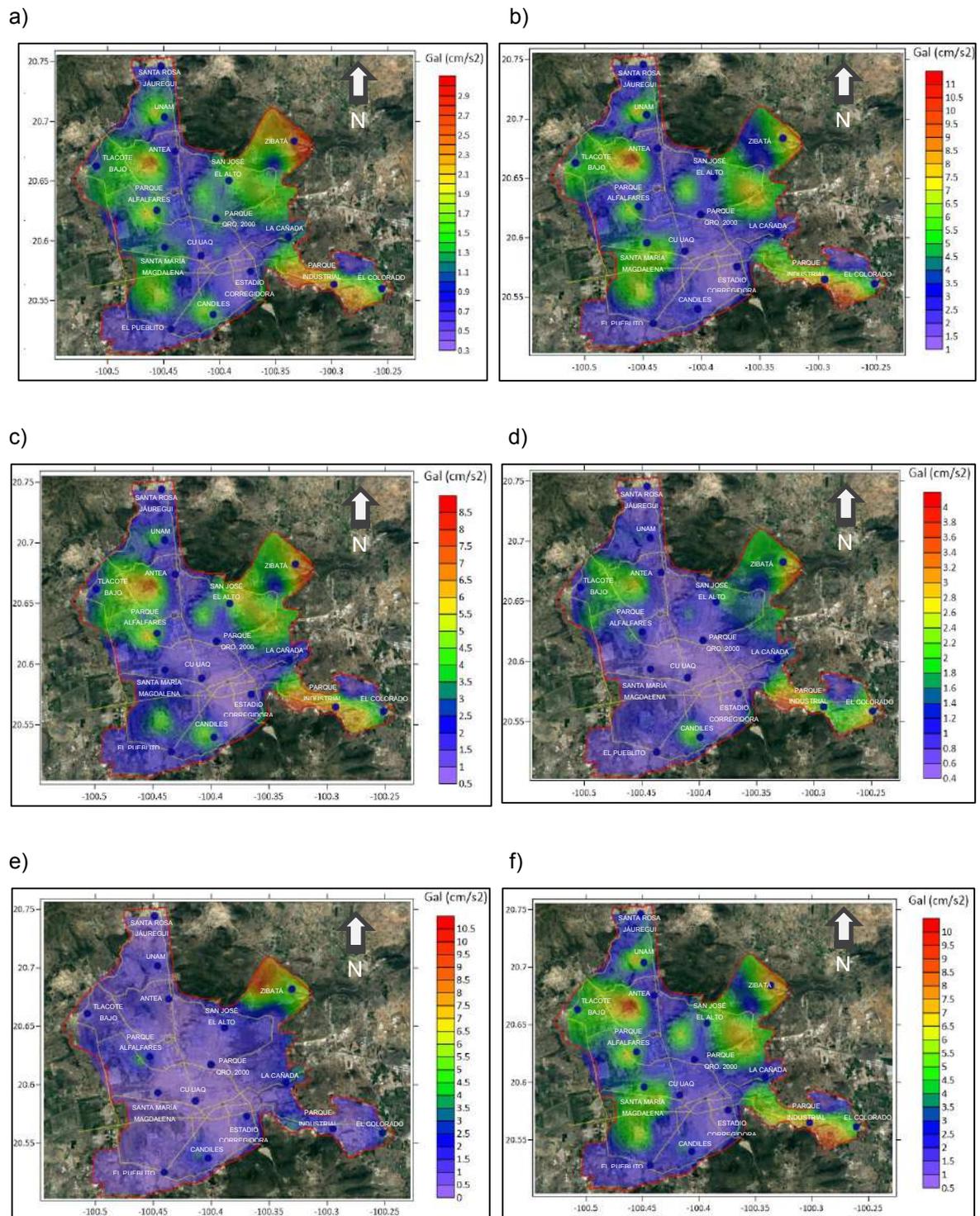


Figura 5.3 Mapas de intensidad sísmica generados con el sismo del 01 de mayo del 2012 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (0.55 s).

5.2.2 Sismo del 11 de abril del 2012

El segundo evento seleccionado como sismo de referencia correspondió al ocurrido en la costa perteneciente al estado de Michoacán con Mw 6.4, a 79 km al oeste de la Mira, Michoacán a una profundidad de 20.00 km en los límites entre la placa de cocos subducida con la placa norteamericana. Este evento presentó una falla inversa (de subducción). En Figura 5.4 se muestran los ESA generados para este sismo considerando un rango de periodo estructural que abarca desde 0.1 hasta 5.0 segundos y se agruparon según la familia espectral a la que pertenecen. Luego, en Figura 5.5 se muestra la distribución de éstas SA según el periodo estructural utilizado conforme a lo establecido en el capítulo anterior.

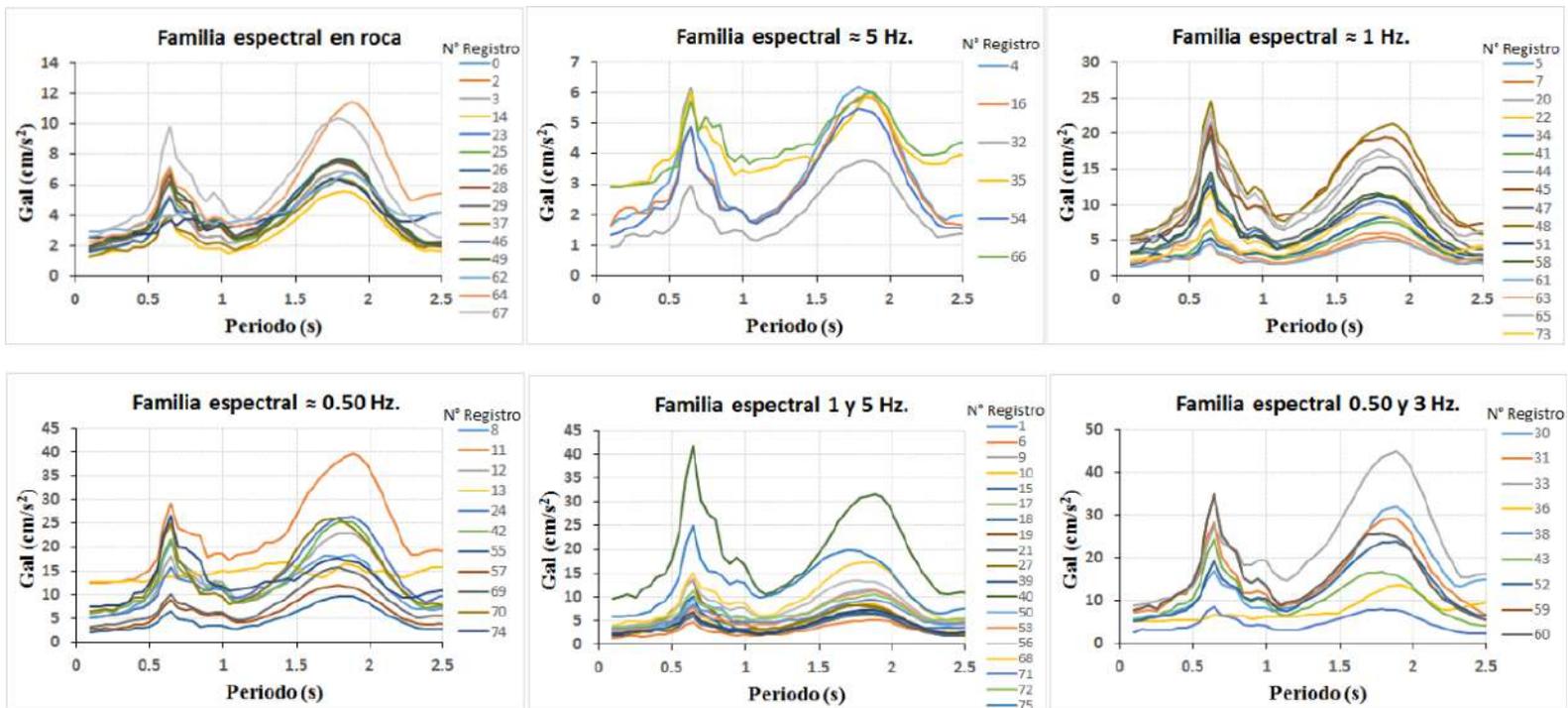


Figura 5.4 ESA calculados considerando que el terreno está siendo excitado por el sismo del 11 de abril del 2012 en cada registro donde se realizaron mediciones de microtremores.

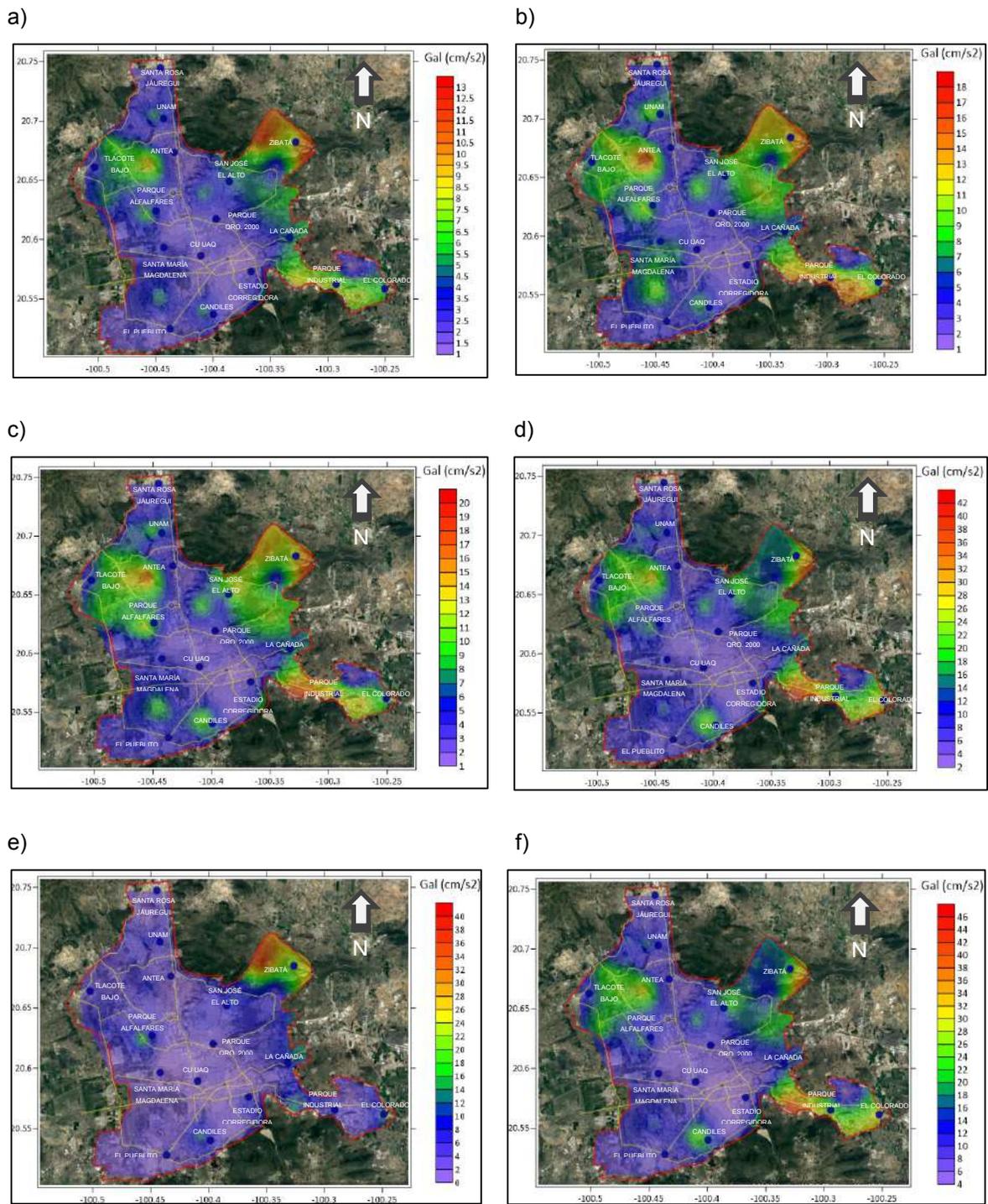


Figura 5.5 Mapas de intensidad sísmica generados con el sismo del 11 de abril del 2012 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (1.88 s).

5.2.3 Sismo del 15 de noviembre del 2012

El tercer evento seleccionado como sismo de referencia correspondió al ocurrido en los límites entre los estados de Guerrero y Michoacán con Mw 6.1, a 24 km al sureste de Ciudad Altamirano a una profundidad de 45.40 km dentro de la placa de cocos subducida dentro de la placa norteamericana. Este evento presentó una falla del tipo normal (intraplaca). En Figura 5.6 se muestran los ESA generados para este sismo considerando un rango de periodo estructural que abarca desde 0.1 hasta 5.0 segundos y se agruparon según la familia espectral a la que pertenecen. Luego, en Figura 5.7 se muestra la distribución de éstas SA según el periodo estructural utilizado conforme a lo establecido en el capítulo anterior.

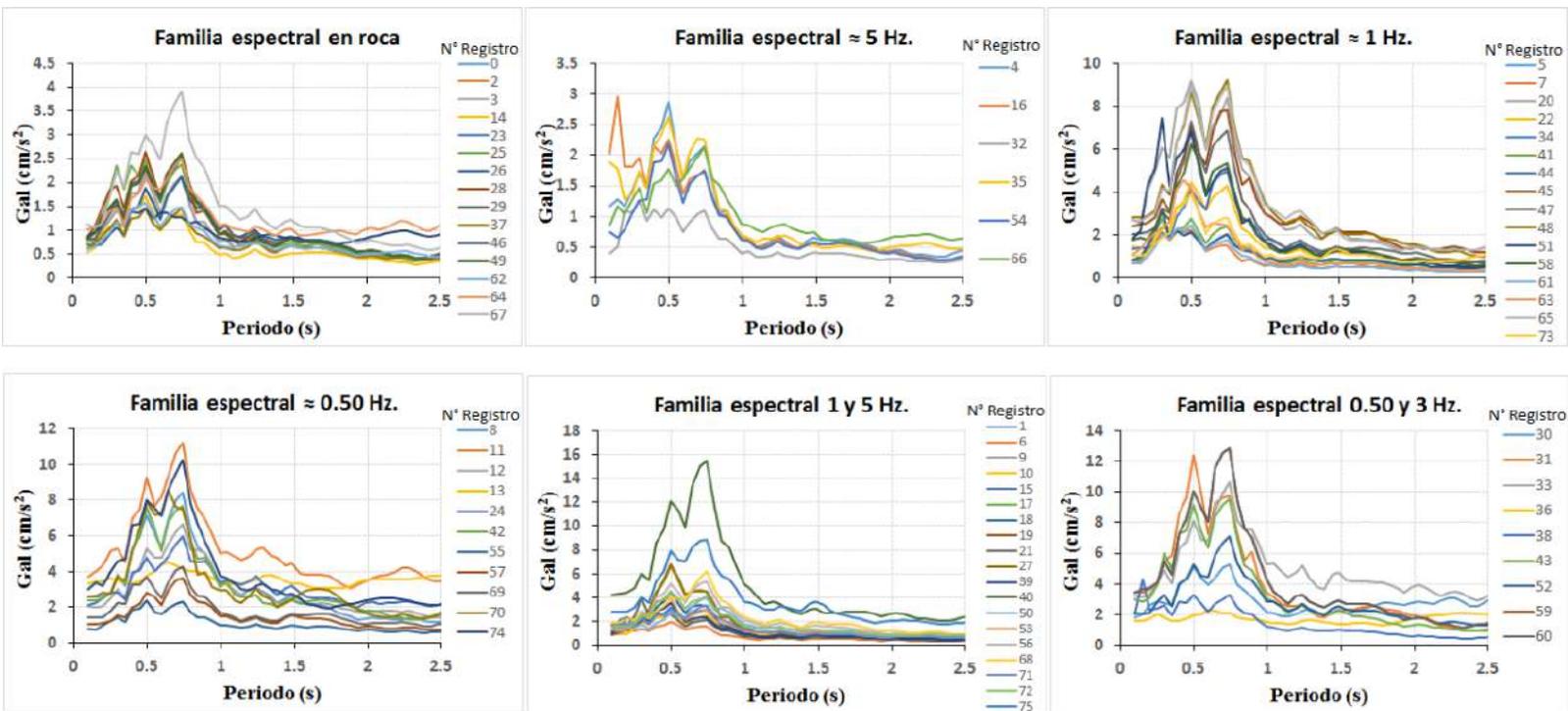


Figura 5.6 ESA calculados considerando que el terreno está siendo excitado por el sismo del 15 de noviembre del 2012 en cada registro donde se realizaron mediciones de microtremores.

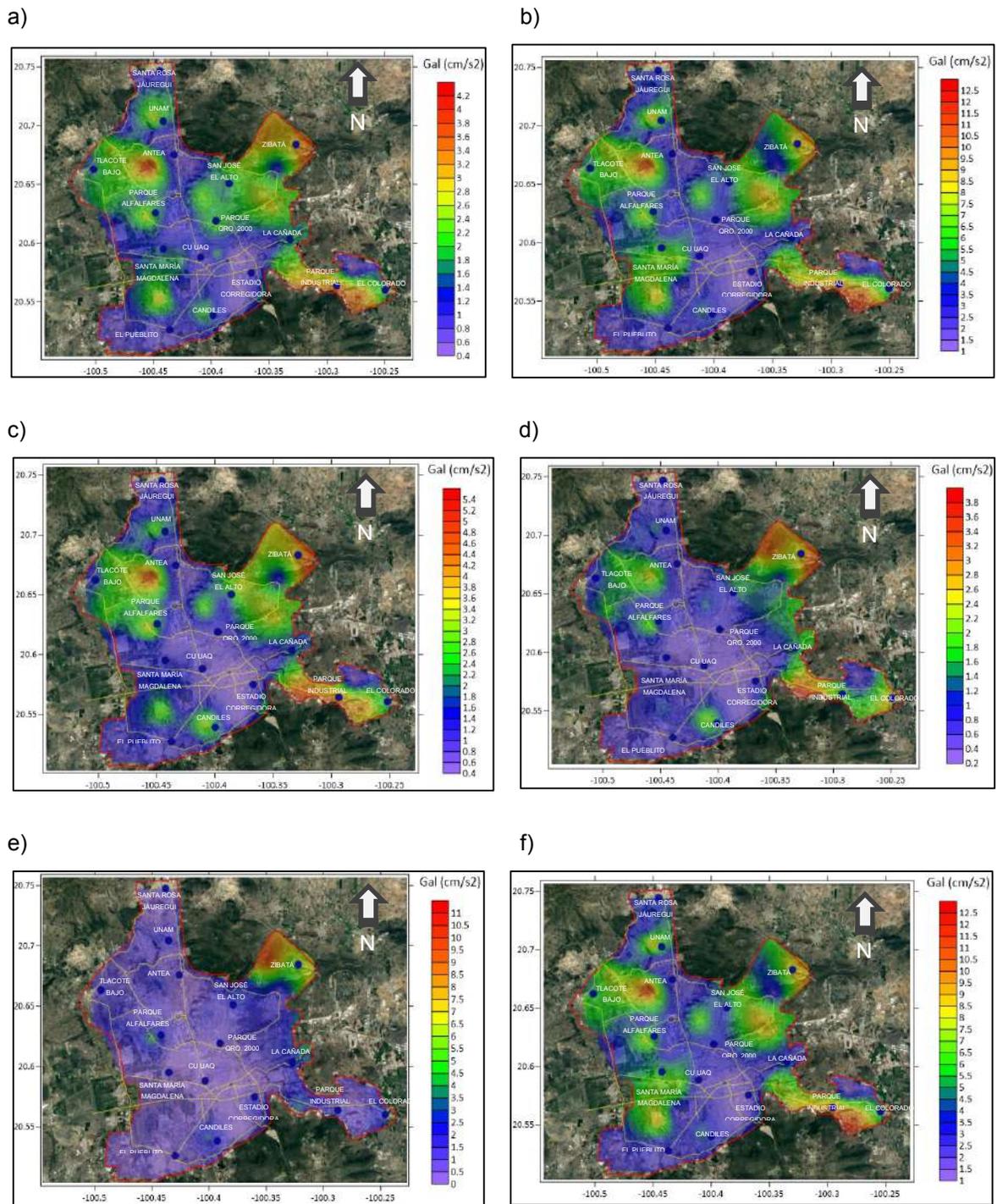


Figura 5.7 Mapas de intensidad sísmica generados con el sismo del 15 de noviembre del 2012 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (0.74 s).

5.2.4 Sismo del 21 de agosto del 2013

El cuarto evento seleccionado como sismo de referencia correspondió al ocurrido en la costa perteneciente al estado de Guerrero con Mw 6.0, a 21 km al oeste de la Ciudad San Marcos, Guerrero, a una profundidad de 5.0 km en los límites entre la placa de cocos subducida con la placa norteamericana. Este evento presentó una falla del tipo inversa (subducción). En Figura 5.8 se muestran los ESA generados para este sismo considerando un rango de periodo estructural que abarca desde 0.1 hasta 5.0 segundos y se agruparon según la familia espectral a la que pertenecen. Luego, en Figura 5.9 se muestra la distribución de éstas SA según el periodo estructural utilizado conforme a lo establecido en el capítulo anterior.

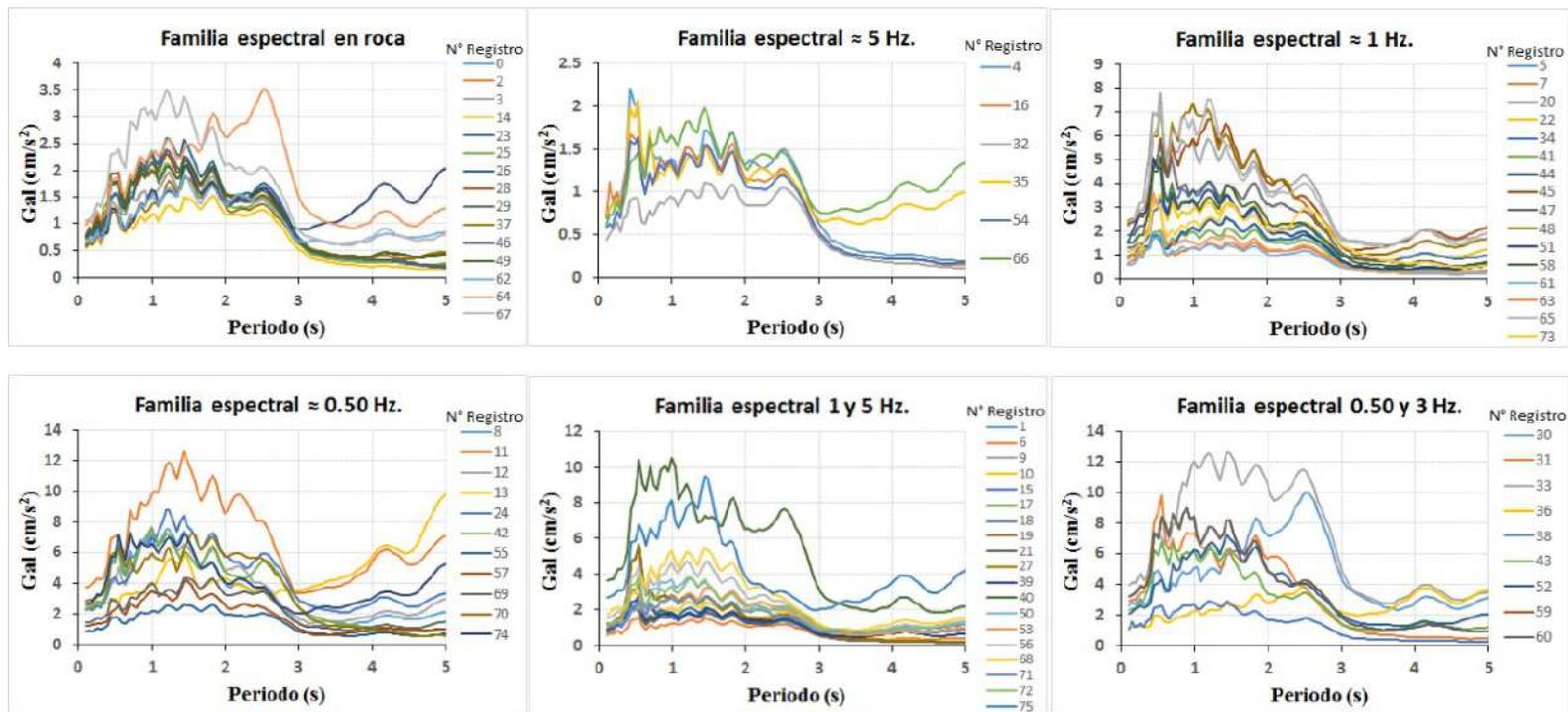


Figura 5.8 ESA calculados considerando que el terreno está siendo excitado por el sismo del 21 de agosto del 2013 en cada registro donde se realizaron mediciones de microtremores.

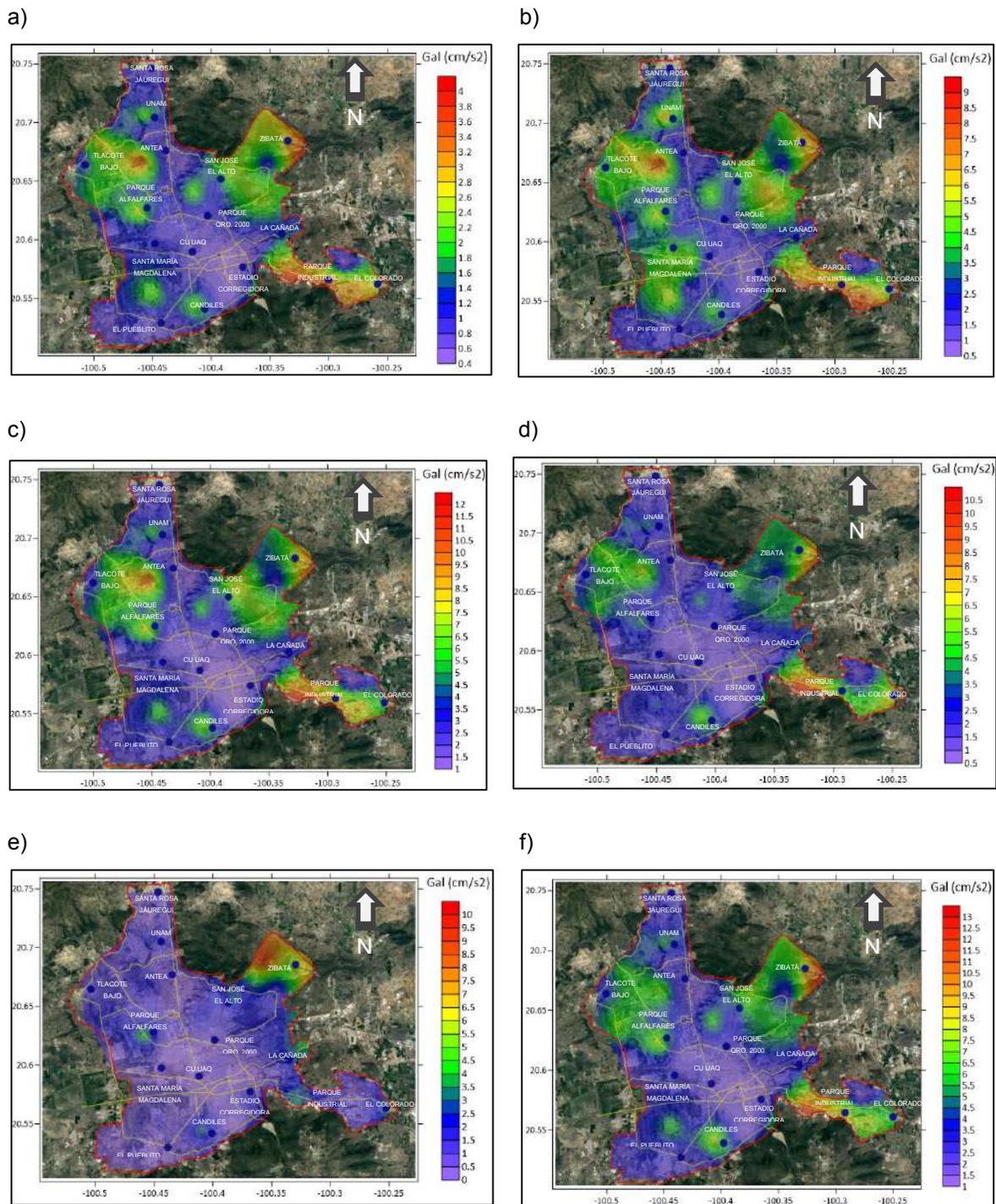


Figura 5.9 Mapas de intensidad sísmica generados con el sismo del 21 de agosto del 2013 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (1.44 s).

5.2.5 Sismo del 19 de septiembre del 2017

El quinto y último evento seleccionado como sismo de referencia correspondió al ocurrido en los límites entre los estados de Puebla y Morelos con Mw 7.1, a 9 km al noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla, a una profundidad de 38.50 km dentro de la placa norteamericana. Este evento presentó una falla del tipo normal (intraplaca). En Figura 5.10 se muestran los ESA generados para este sismo considerando un rango de periodo estructural que abarca desde 0.1 hasta 10.0 segundos y se agruparon según la familia espectral a la que pertenecen. Luego, en Figura 5.11 se muestra la distribución de éstas SA según el periodo estructural utilizado conforme a lo establecido en el capítulo anterior.

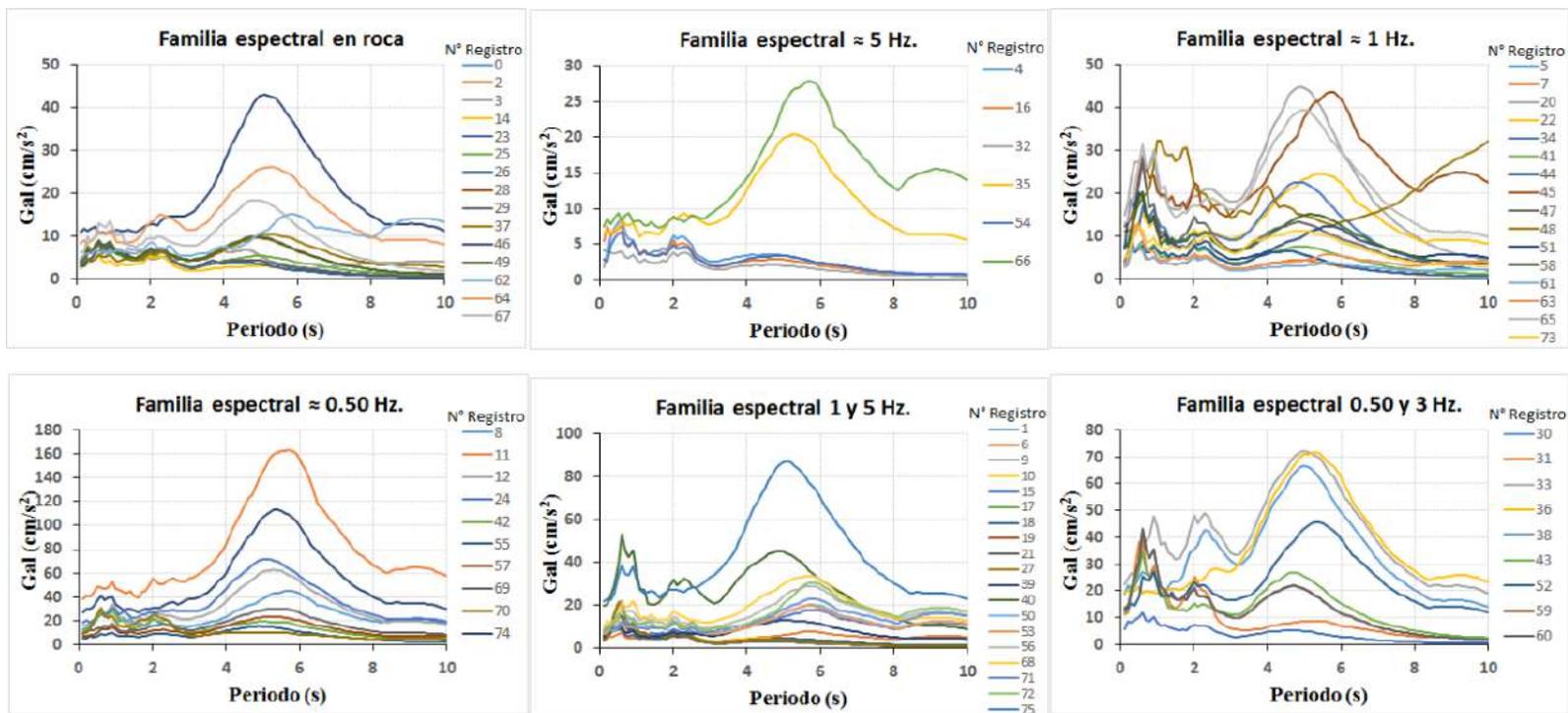


Figura 5.10 ESA calculados considerando que el terreno está siendo excitado por el sismo del 19 de septiembre del 2017 en cada registro donde se realizaron mediciones de microtremores.

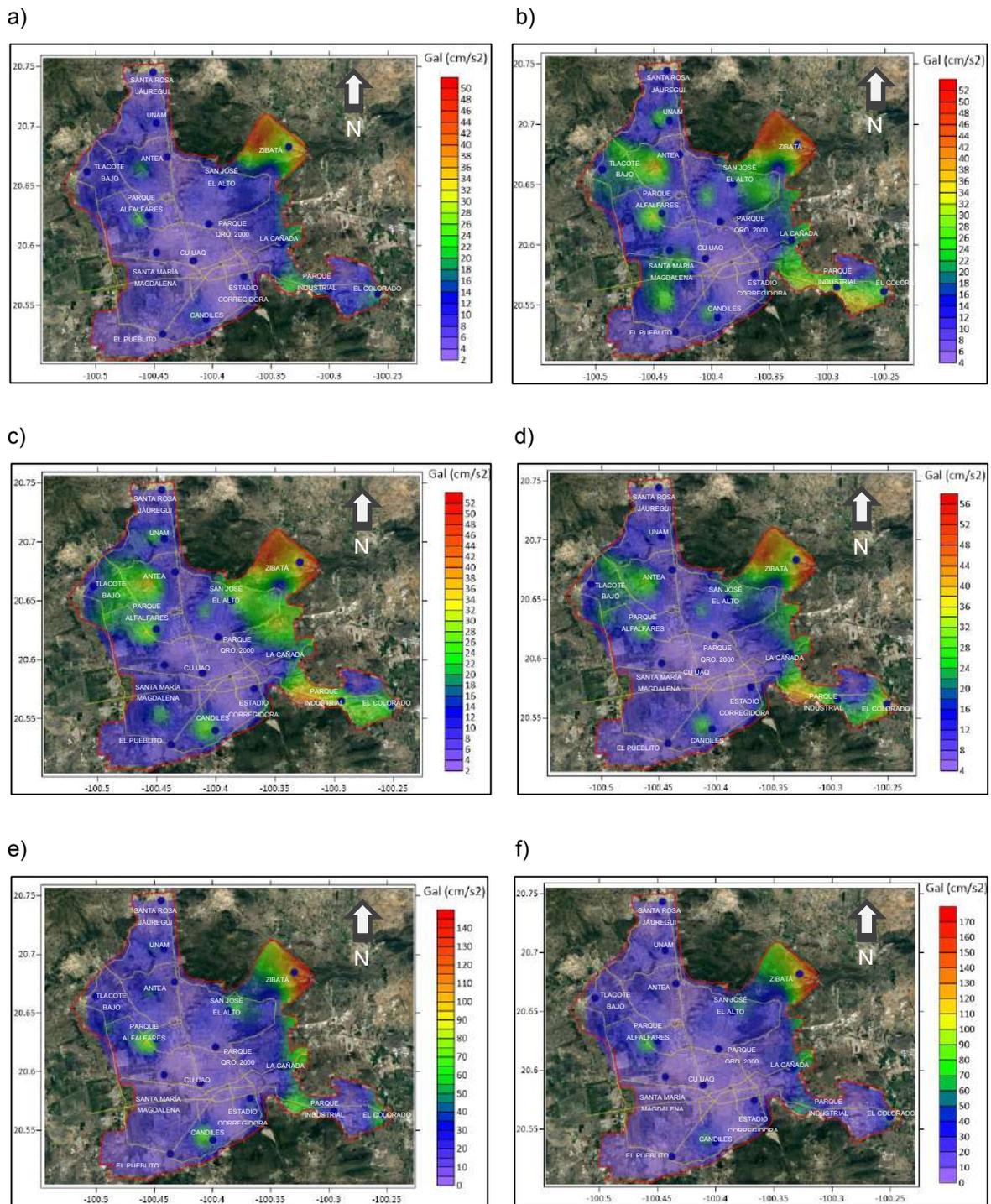


Figura 5.11 Mapas de intensidad sísmica generados con el sismo del 19 de septiembre del 2017 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (5.0 s).

5.3 Riesgo sísmico

Ahora, habiendo expresado los motivos de mostrar una alternativa para delimitar mapas de riesgo sísmico, se empezó por analizar cada sismo de manera particular:

5.3.1 Sismo del 01 de mayo del 2012

En Figura 5.12 se muestran mapas con la misma forma de la sección anterior, sin embargo, ahora la distribución no es de pseudoaceleraciones sino del riesgo que existe considerando tanto la SA como la edificación presente. De esta figura podemos resaltar varios aspectos: el primero de ellos es que se trata de un sismo de baja magnitud y por lo tanto las aceleraciones que se esperan en la ciudad son de carácter menor, además se hicieron seis mapas considerando diferentes periodos estructurales (0.10, 0.50, 1.0, 2.0 y 5.0 segundos, así como el periodo estructural que contenía la mayor SA que en este caso fue de 0.55 segundos). Por otro lado, considerando el tipo de edificaciones, se tiene que la ciudad no cuenta con edificios mayores de 50 pisos (aproximadamente 200 metros), por esta razón el riesgo de las edificaciones está en periodos menores a 5 segundos. Después, se puede apreciar en (a) que el riesgo es moderado puesto que estamos hablando de edificios de 1 a 2 niveles correspondientes a casas habitación las cuales se encuentran en la mayor parte de la ciudad con excepción de aquellas zonas en la parte poniente de la ciudad que aún no han sido explotadas y su uso sigue siendo del tipo agrícola. Cuando hablamos de edificios un poco más altos (3 a 7 niveles) como en (b), el riesgo disminuye para aquellas zonas donde existen asentamientos humanos pero sin ningún crecimiento importante en cuanto a infraestructura, entonces ahora se incluyen áreas cruzando el Blvd. Bernardo Quintana hacia el oriente, donde si bien existen fraccionamientos o colonias populares, las afectaciones se verían reducidas para este tipo de edificios analizados. Luego en (c) y (d), el mayor riesgo se concentra en la zona central de la ciudad debido que es donde se encuentran los edificios de mayor importancia (desde 10 hasta 30 niveles

aproximadamente), aquí se tiene una gama amplia de construcciones con distintos usos de suelo como habitacional, comercial e industrial. Este tipo de zonas representan las de mayor interés por las posibles afectaciones que se pudieran presentar en la zona. En (e) se tiene un riesgo uniforme de nivel bajo debido a que actualmente no se encuentran edificaciones con periodos estructurales iguales a 5 segundos, no obstante, considerando el desarrollo potencial en que se encuentra la ciudad de Querétaro, la construcción de este tipo de edificaciones parece tener una fecha próxima a la vista. Por último, se tiene el caso (f) que representa el periodo estructural con mayor aceleración (0.55 segundos). Resulta obvio que el mapa coincide con aquel que representa el periodo de 0.50 segundos, pero vale la pena mencionar que este tipo de edificaciones se encuentra en la mayor parte de la ciudad y por ende está sujeta a un mayor riesgo. Afortunadamente para este caso en particular, el sismo viene de una fuente lejana y de magnitud moderada, por lo que el nivel de aceleración que se registra en la ciudad no es de preocuparse, sin embargo, resulta interesante la gran cantidad de edificios que responden al movimiento del terreno.

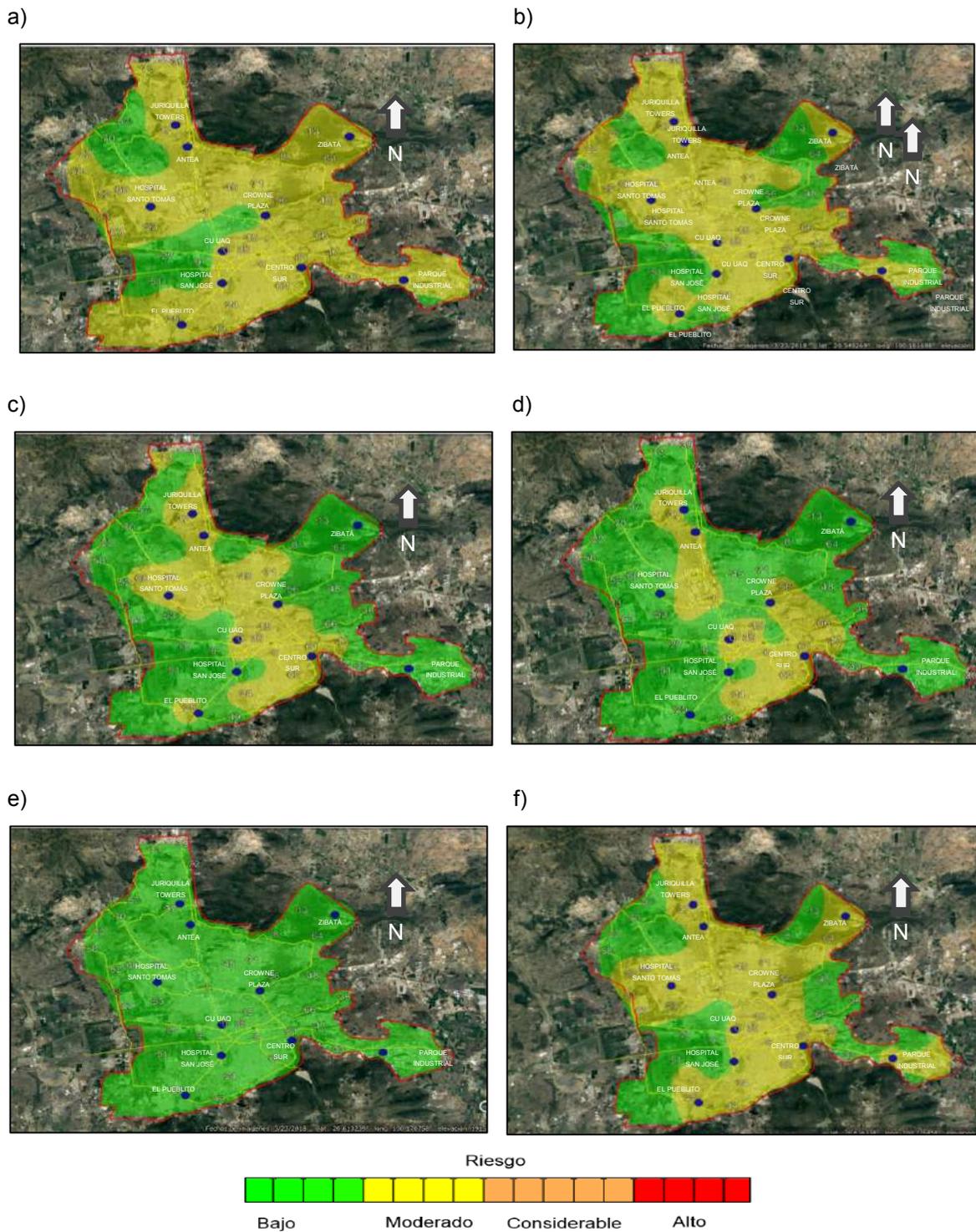


Figura 5.12 Mapas de riesgo, en función de las estructuras que se encuentran edificadas en la ciudad, considerando el sismo del 01 de mayo del 2012 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (0.55 s), resaltando en círculo azul edificios de importancia en la zona.

5.3.2 Sismo del 11 de abril del 2012

En este caso tenemos un sismo de magnitud fuerte (M_w 6.4), por lo que los niveles de aceleración no son tan bajos como en el sismo anterior. Utilizando el mismo criterio para los mapas definidos por un periodo estructural determinado se tiene que el riesgo sísmico llega a ser considerable (Figura 5.13), en (a) podemos apreciar zonas con mayor riesgo en la parte noreste y sureste de la ciudad debido a que la aceleración es considerable y existen edificaciones que respondan al movimiento del suelo, quedando con riesgo bajo solo aquellas zonas donde no existe construcción alguna. En (b) el riesgo se expande en las mismas zonas que el inciso anterior debido a que el número de edificaciones va aumentando. Para (c) y (d) el riesgo es muy variado debido a la heterogeneidad de edificios para una misma zona, solo se aprecia que al tratarse de edificios altos, las zonas con menor desarrollo de infraestructura son las que mantienen un riesgo bajo tales como las periferias que delimitan a la ciudad de Querétaro y su zona conurbada. Respecto a (e), se tiene la misma situación que en el párrafo anterior y en general para todos los casos de la investigación, es decir, actualmente no existen edificaciones que respondan al periodo de 5.0 segundos, por esta razón, el riesgo para este periodo es bajo, con excepción del caso de la zona noreste donde si bien no existen edificaciones de este tipo (40-50 niveles), la aceleración del terreno que se presenta en esa zona es de nivel considerable, por lo cual esa zona debería evitar construir edificios con periodos mayores a 2 segundos. Finalmente, para el caso de la máxima SA (f), ésta se encuentra en el periodo estructural de 1.88 segundos correspondiente a edificios entre 15 y 20 niveles), el riesgo se encuentra en toda la zona central a diferencia del mapa para periodos de 2.0 segundos, esto es importante debido a que a pesar de tratarse de periodos muy cercanos entre sí, el nivel de riesgo varía en distintas zonas de la ciudad.

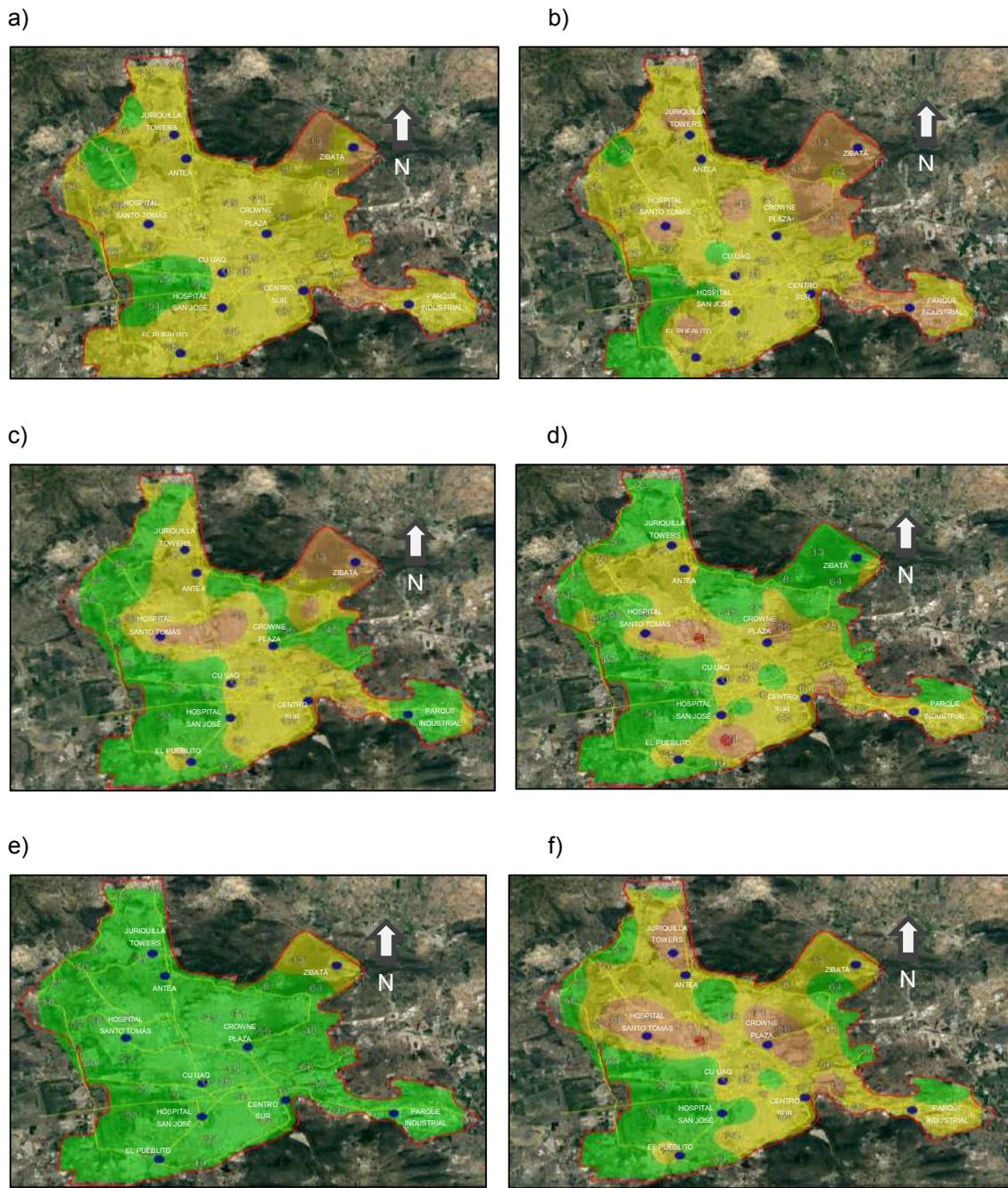
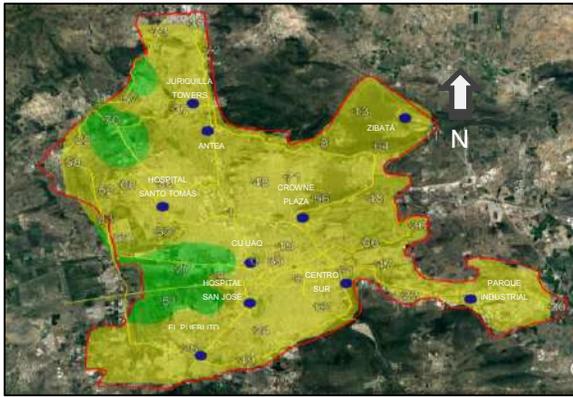


Figura 5.13 Mapas de riesgo, en función de las estructuras que se encuentran edificadas en la ciudad, considerando el sismo del 11 de abril del 2012 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (1.88 s), resaltando en círculo azul edificios de importancia en la zona.

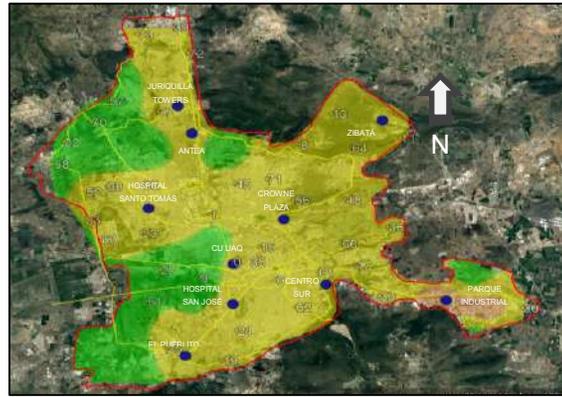
5.3.3 Sismo del 15 de noviembre del 2012

En Figura 5.14 se tiene los escenarios para los seis periodos estructurales definidos en secciones anteriores. Vale la pena mencionar que pese a tratarse de un sismo con mayor magnitud y misma distancia epicentral respecto a la del primer sismo tratado (Mw 5.6) los niveles de SA son muy parecidos. Por un lado tenemos que para el sismo de Mw 5.6 se tienen niveles de casi 3 gal, los mismos que son calculados para este sismo con una magnitud mayor de 0.50 grados en la magnitud de momento Mw. Sería de esperarse que el nivel de aceleración para este caso fuera mucho mayor ya que un aumento de 1 grado en la escala de magnitud de momento representa aproximadamente 32 veces más la energía liberada. Por esta razón los mapas de riesgo son muy similares a los de la sección 5.1, donde (a) y (b) abarcan la mayor parte de la zona con un riesgo moderado mientras que las zonas de riesgo bajo son aquellas carentes de construcciones en el terreno, luego (c) y (d) concentran el mayor riesgo en la zona central de la ciudad, dejando el riesgo bajo para las periferias de la zona y (e) con un riesgo bajo uniforme debido a la falta de construcciones que respondan al movimiento del terreno. Por último el periodo (0.74 segundos) con SA máxima (f) muestra un mayor riesgo en la faja central este de la ciudad.

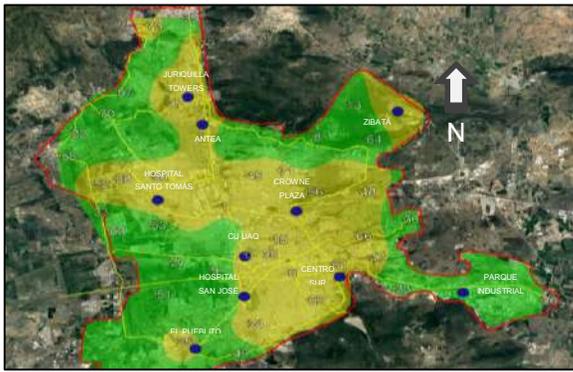
a)



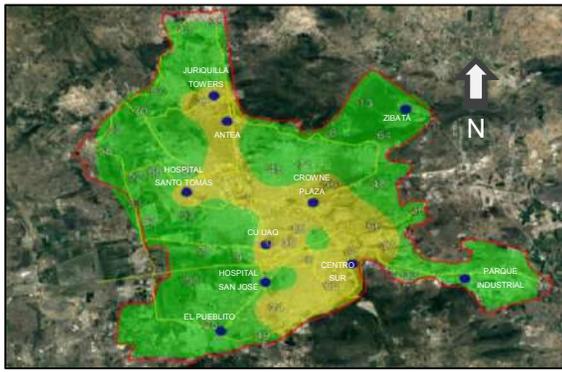
b)



c)



d)



e)



f)

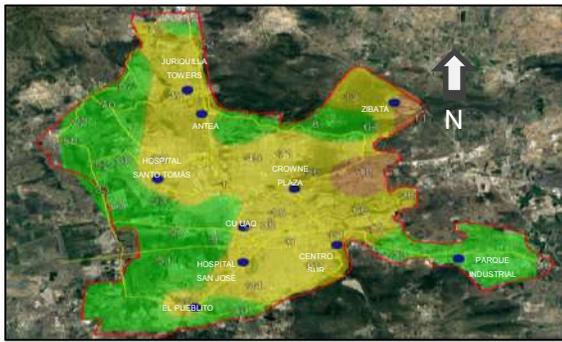
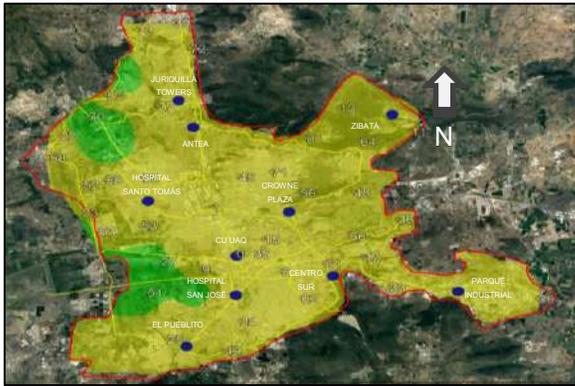


Figura 5.14 Mapas de riesgo, en función de las estructuras que se encuentran edificadas en la ciudad, considerando sismo de 15 de noviembre de 2012 para periodos estructurales a) 0.1s, b) 0.5s, c) 1.0s, d) 2.0s, e) 5.0s y f) SA máxima (0.74s), resaltando en círculo azul edificios de importancia en la zona.

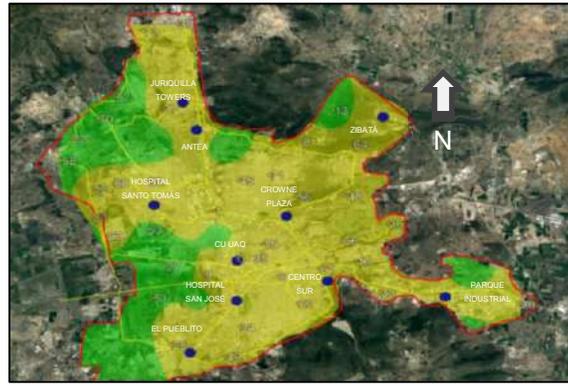
5.3.4 Sismo del 21 de agosto del 2013

Ahora tenemos un sismo costero, o bien de falla inversa con magnitud M_w 6.0, la lejanía del epicentro con la ciudad de Querétaro es considerable (450 km aprox.) En Figura 5.15 se muestran las distribuciones de riesgo, cabe mencionar que los niveles de aceleración son similares a los de la sección 5.3.1 y 5.3.3, por lo que el riesgo, en términos generales el también similar. En (a) y (b), o bien periodos estructurales de 0.10 y 0.50 segundos respectivamente traducibles a edificios de aproximadamente 1 y 5 niveles de edificación, el riesgo se encuentra en zonas alejadas de la mancha urbana, mientras que en (c) se encuentra en la zona centro de la ciudad. Para el caso de (d) se tiene un riesgo muy marcado en la zona centro sur (que es precisamente donde se encuentran la mayor parte de los edificios altos de la ciudad (mayores a 20 pisos), además resulta entendible que esta zona sea la de mayor riesgo debido a que el sismo en cuestión se trata de uno con lejana distancia entre el epicentro y la ciudad, lo que significa que, al ir viajando a través del suelo, las altas frecuencias van decayendo y solo llegan al lugar bajas frecuencias que tienden a excitar edificios altos. Por último, dejando de lado (e) por el poco riesgo que representa acorde con lo establecido en las secciones previas, (f) con un periodo estructural de 1.44 segundos tiende a verse afectado en su zona centro de manera moderada mientras que la periferia de la ciudad mantiene un riesgo sísmico bajo.

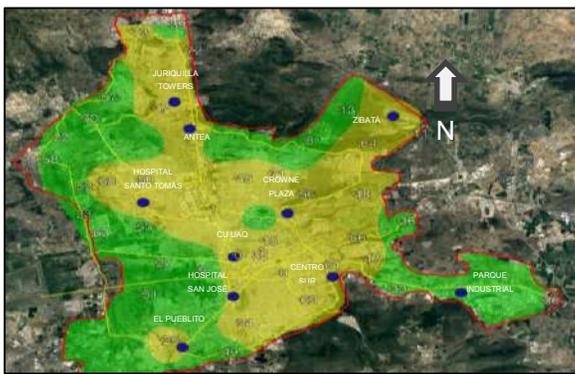
a)



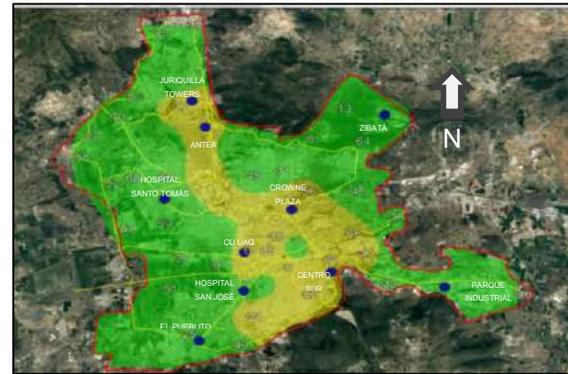
b)



c)



d)



e)



f)

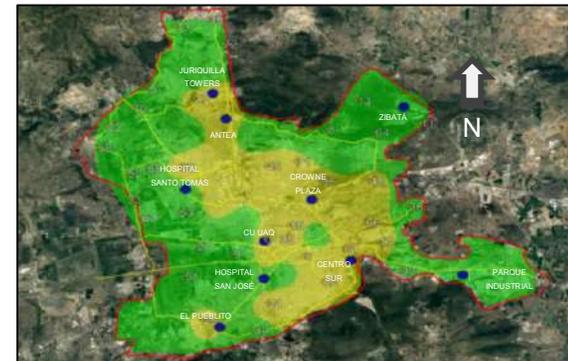
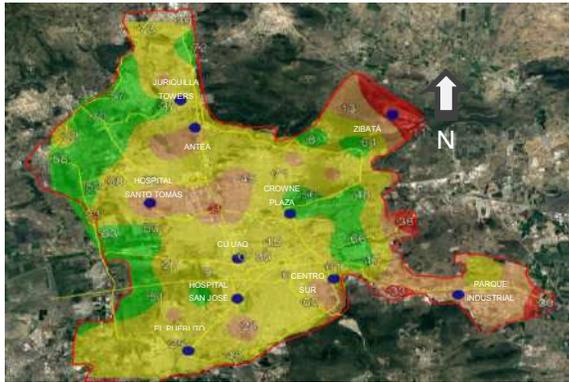


Figura 5.15 Mapas de riesgo, en función de las estructuras que se encuentran edificadas en la ciudad, considerando el sismo del 21 de agosto de 2013 para periodos estructurales de a) 0.1s, b) 0.5s, c) 1.0s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (1.44 s), resaltando en círculo azul edificios de importancia en la zona.

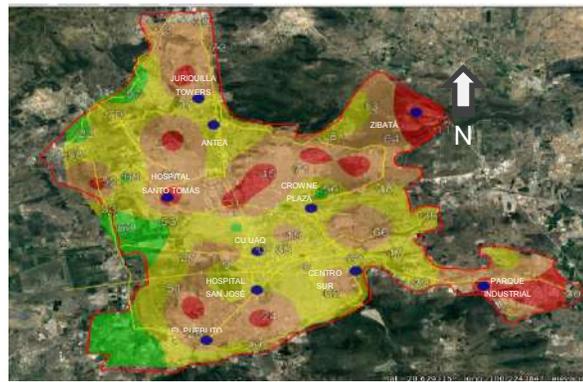
5.3.5 Sismo del 19 de septiembre del 2017

Finalmente se tiene al sismo ocurrido en Puebla, con mayor magnitud y menor distancia epicentral. En Figura 5.16 podemos apreciar por primera vez el nivel de riesgo alto para algunas zonas de la ciudad. Por ejemplo en (a) se presenta un mayor riesgo en la zona sureste y noreste de la ciudad tanto por que el nivel de aceleración es considerable (mayor a 20 gal) como por que existen construcciones que respondan al periodo estructural en cuestión (edificios de 1 a 2 niveles). Luego en (b), (c) y (d) se tiene el mayor riesgo en la zona centro norte, centro sur y sureste de la ciudad que es donde se encuentran estructuras con estos periodos, el riesgo varía dentro de zonas colindantes entre sí pero predomina el nivel moderado a considerable. Finalmente en (e) y (f), el riesgo disminuye a niveles de bajo a moderado por que se tiene que son periodos de 5.0 y 5.7 segundos respectivamente los cuales no representan amenaza debido a la carencia de este tipo de edificaciones, no obstante, dado que se trata de niveles de aceleración que pudieran afectar a las construcciones, se debe tener cuidado a la hora de edificar en zonas que respondan al movimiento del terreno. Este tipo de mapas son de gran utilidad para conocer el riesgo actual en que se encuentra la ciudad de Querétaro y si bien es cierto que las condiciones del riesgo pueden cambiar con la llegada de nuevas construcciones, se puede mantener esta distribución de riesgo si se apegan a evitar construir en zonas donde el riesgo es mayor para un determinado tipo de edificación, manteniendo así un control sobre el riesgo que se tiene para una zona determinada.

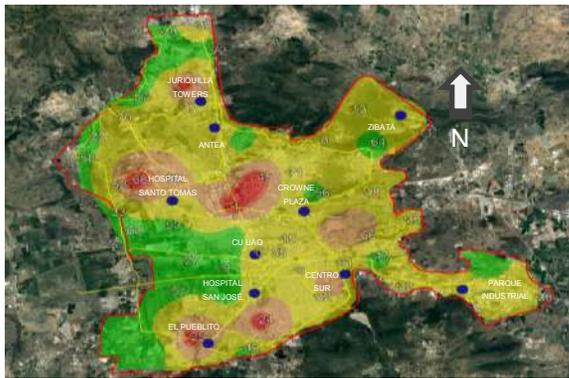
a)



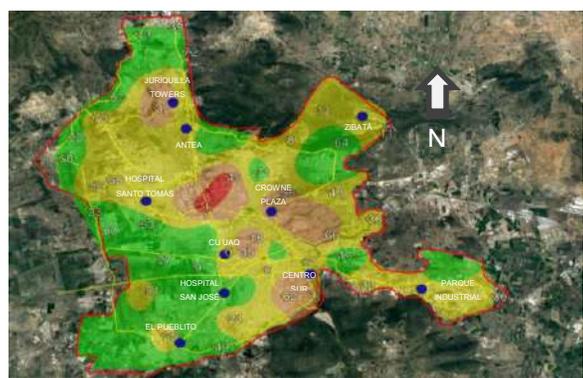
b)



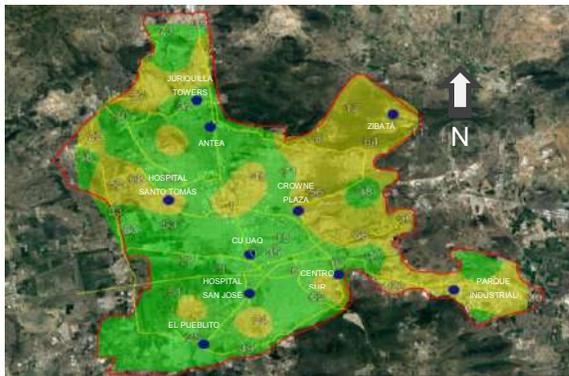
c)



d)



e)



f)

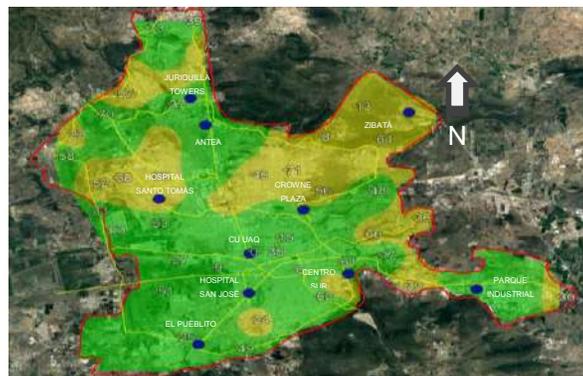


Figura 5.16 Mapas de riesgo, en función de las estructuras que se encuentran edificadas en la ciudad, considerando sismo del 19 de septiembre de 2017 para periodos estructurales de a)0.1s, b)0.5s, c)1.0s, d) 2.0 s, e) 5.0 s y f) SA máxima (5.7 s), resultando en círculo azul edificios de importancia en la zona.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

6.1 De la adquisición de datos

Se realizaron diversas mediciones de microtemores con un sismógrafo de banda ancha a lo largo y ancho de la ciudad de Querétaro, finalizando con un total de 76 registros mostrados en Tabla 6-1 donde se indica su localización geográfica mediante coordenadas y una referencia a algún lugar cercano al punto en cuestión.

Tabla 6-1 Localización de registro de microtemores y su respectiva referencia.

Punto	Latitud (°)	Longitud (°)	Referencia	Punto	Latitud (°)	Longitud (°)	Referencia	Punto	Latitud (°)	Longitud (°)	Referencia
0	20.59058	-100.41253	UAQ	26	20.53647	-100.48395	Esc. Sec. Tec. 33	52	20.63587	-100.49805	Colegio Austriaco
1	20.62120	-100.42630	Col. Obrera	27	20.58542	-100.45490	Milpa Tlacote	53	20.60902	-100.46572	Rancho San Pedro
2	20.57890	-100.40945	La capilla	28	20.51330	-100.47773	Col. Lourdes	54	20.66307	-100.42023	El salitre
3	20.59302	-100.40925	Cerro de las campanas	29	20.60828	-100.49702	Frontera Gua-Qro	55	20.68945	-100.43845	Valle Juriquilla
4	20.57099	-100.39941	Deportivo Casa Blanca	30	20.56080	-100.24493	El Colorado	56	20.63057	-100.37715	Victoria Popular
5	20.56083	-100.42632	San mateo	31	20.54632	-100.27357	UPQ	57	20.69433	-100.48447	Cumbres Juriquilla
6	20.57887	-100.38755	Casa Noel	32	20.58125	-100.27588	Rincones del Marqués	58	20.65355	-100.51647	Tlacote Bajo
7	20.55092	-100.38278	Parque Universo 2000	33	20.56870	-100.32773	San Isidro	59	20.56745	-100.28748	FINSA
8	20.66582	-100.37348	Casa Alejandro	34	20.60983	-100.36498	Mirador del Marqués	60	20.56170	-100.26707	La Piedad
9	20.58032	-100.43183	Col. Santa Maria	35	20.59394	-100.39756	Casa Rivas	61	20.58392	-100.36322	Arquitos
10	20.64357	-100.43505	Cerro del tambor	36	20.61315	-100.32298	U.D. La Cañada	62	20.56135	-100.37622	Huimilpan
11	20.67039	-100.31597	Frente Zibatá	37	20.68737	-100.45618	Privada de los portones	63	20.60533	-100.48908	Viñedos
12	20.65537	-100.38060	SJA	38	20.71717	-100.45898	Villas del Mesón	64	20.66415	-100.34385	Tanque Zibatá
13	20.68583	-100.35548	Calero	39	20.74180	-100.44722	Santa Rosa Jáuregui	65	20.64465	-100.35862	El refugio
14	20.59195	-100.38170	Parque Indereq	40	20.66640	-100.45883	Loarcas	66	20.60212	-100.34970	La Cuesta
15	20.60006	-100.39748	Casa Gustavo	41	20.67063	-100.43808	Antea	67	20.52842	-100.46825	Amanecer Balvanera
16	20.61835	-100.39650	Parque Qro. 2000	42	20.66480	-100.48257	Quintas de la Hacienda	68	20.63912	-100.48557	Valle Santiago
17	20.58920	-100.42844	La Gloria (F)	43	20.55610	-100.44900	Santuarios del cerrito	69	20.70835	-100.47467	Cumbres del Lago
18	20.60766	-100.42450	Parque El Pantano	44	20.56462	-100.43338	Terranova	70	20.68062	-100.49482	Mompani
19	20.58810	-100.44426	Santa Fe (F)	45	20.64090	-100.41118	Almacén didáctico	71	20.64392	-100.39303	San Pedrito
20	20.70505	-100.45522	Juriquilla	46	20.57232	-100.36825	Congreso del estado	72	20.72505	-100.43828	Privada Juriquilla
21	20.61379	-100.44121	IAPIND	47	20.58835	-100.34198	Cuesta Bonita	73	20.73710	-100.46775	Juriquilla Campestre
22	20.66803	-100.51067	Santo Niño de praga	48	20.63077	-100.34732	La Purísima	74	20.68692	-100.33125	Zibatá
23	20.61322	-100.49318	Sonterra	49	20.52683	-100.41900	Colinas del bosque II	75	20.62402	-100.46207	San Pedro Martir
24	20.54607	-100.41045	Casa Iván	50	20.64033	-100.46472	Cerrito Colorado				
25	20.53440	-100.45108	Col. Piramides	51	20.56473	-100.46255	Rincón Campestre				

El sismógrafo de banda ancha utilizado tiene un amplio rango de “visualización” que permite tener confianza en el rango de interés sísmico (0.10-10 Hz). No obstante, existen aspectos que pueden ser atribuidos a un mal uso del equipo que genere confusión en la interpretación de resultados, irónicamente esto es debido a la misma sensibilidad que tiene para detectar los movimientos más tenues, por lo que la selección de un sitio con niveles de ruido cercanos al sensor genera amplitudes que no son producto del comportamiento del suelo, de lo cual se destaca que la mejor hora del día para registrar este tipo de señales fue durante la madrugada, lo que concuerda con lo establecido por Martínez (2015).

Por otro lado, respecto a los registros sísmicos utilizados, se analizaron un total de 14 sismos, ocurridos durante los últimos 6 años, que pudiesen afectar a la ciudad considerando su tipo de sismicidad, magnitud y distancia epicentral (falla inversa y normal, mayor a 5.5 Mw y para un radio de 500 km del centro de Querétaro respectivamente). Por lo tanto, considerando los registros con los que contaba tanto la estación de CGEO como la de CU-UAQ, se eligieron 5 eventos para excitar al terreno, mismos que se muestran en Tabla 6-2 y Figura 6.1.

Durante la descarga de las bases de datos de los registros sísmicos, afortunadamente se contaba con la mayoría de ellos por lo que en cuanto a información se tuvo una gran cantidad de muestras. No obstante, respecto a la estación CU-UAQ se tiene que cuenta con un único registro del 01 de mayo del 2012, desde entonces no ha sido registrada la actividad sísmica de la ciudad y no se le ha dado seguimiento a restablecer esta importante estación.

Por esta razón se propone la reanudación de la caseta CU-UAQ desarrollada por Clemente Chávez y Arroyo (2012) debido al interés en monitorear sismos costeros pero también sería interesante dar atención a los sismos corticales que se producen en la zona y poder contrastar toda la información con los registros de la estación en CGEO y otras más dentro del *MVB*. Esto permitirá salir de la carencia de información con la que cuenta en general el *MVB* y en particular la ciudad de Querétaro y su zona conurbada, permitiendo así determinar el comportamiento, sea por medio de sismos o microtremores, de la franja tan compleja de estudiar debido a la dispersión de los resultados (Clemente-Chávez *et al.*, 2012; González, 2014; Pérez, 2018).

Tabla 6-2 Información de escenarios utilizados para estimar los niveles de SA.

Evento	Fecha	Referencia	Distancia epicentral		Coordenadas		Profundidad (km)	Magnitud (Mw)
			Km***	Latitud (°)	Longitud (°)			
1**	11/04/2012	79 km al OESTE de LA MIRA, MICHOACÁN.	405	17.9217	-103.068	20.0	6.4	
2*	01/05/2012	46 km al SUROESTE de CD. ALTAMIRANO, GRO.	268	18.2507	-101.085	51.1	5.6	
3**	15/11/2012	24 km al SURESTE de CD. ALTAMIRANO, GRO.	269	18.1832	-100.529	45.4	6.1	
4**	21/08/2013	21 km al OESTE de SAN MARCOS, GRO.	433	16.7527	-99.5812	5.0	6.0	
5*	19/09/2017	9 km al NOROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE.	320	18.3353	-98.6763	38.5	7.1	

* = sismo intraplaca, ** = sismo subducción, ***= medidos entre la ciudad de Querétaro y el epicentro.

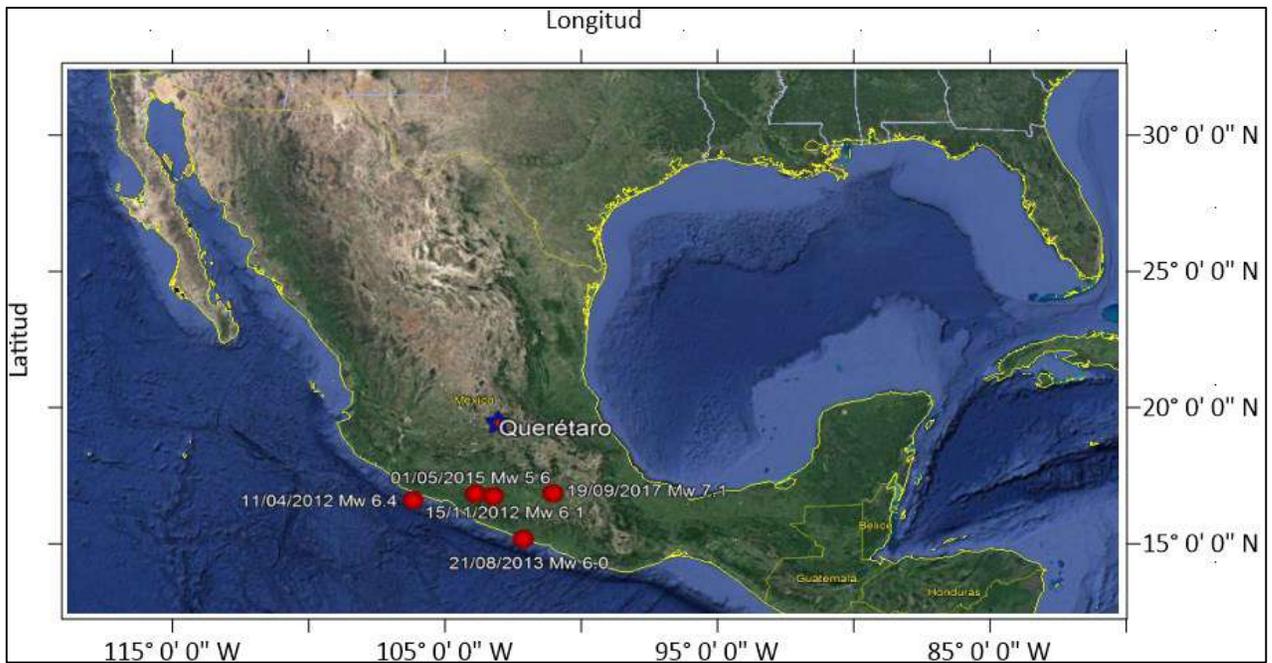


Figura 6.1 Epicentro de sismos utilizados para simular la excitación del terreno.

6.2 Del efecto de sitio en Querétaro

Conociendo el efecto de sitio mediante las FTE fue posible zonificar la ciudad en función de su forma espectral (frecuencia o periodo contra nivel de amplificación/cociente espectral *HVNR*). La Tabla 6-3 muestra el resumen de cada valor para cada punto registrado. Además para expresar el efecto de sitio de manera gráfica se muestra la Figura 6.2 con la zonificación sísmica de la ciudad producto de agrupar en familias espectrales las FTE de las distintas zonas del mapa.

Con esta metodología, el uso de microtemores permite estimar el comportamiento dinámico del suelo como si fuesen sismos los que estuvieran excitando el terreno, lo cual lo convierte en un método de fácil aplicación a un bajo costo con uso universal para al menos la república mexicana. Esto no resulta en una novedad del presente trabajo debido a que se ha estudiado esta metodología desde hace décadas por diferentes autores que han llegado a conclusiones similares respecto al uso de la técnica *HVNR* (Nogoshi y Igarashi, 1971; Nakamura, 1989; Lermo, 1992; Lermo y Chávez-García, 1994; Bard, 1999; Bustillos, 2005; Lermo y Limaymanta, 2007; Chávez-García y Tejeda-Jácome, 2010; Ismael-Hernández *et al.*, 2011; Sánchez-Sesma *et al.*, 2011; Arroyo *et al.*, 2012; González y Clemente-Chávez, 2013; Lermo *et al.*, 2013; González, 2014; Martínez, 2015; Zavala *et al.*, 2018).

Es así entonces como, con base en otros estudios, se tiene confiabilidad en los resultados obtenidos siempre y cuando se garantice una correcta colocación del sensor y la selección apropiada del sitio, la hora y el entorno que son fundamentales para tener certeza en las señales obtenidas.

Finalmente, se confirma de acuerdo a la literatura respecto al *MVB*, que la zona cuenta con estratigrafías complejas que generan que el suelo tenga comportamientos variados en el rango de interés sísmico de 0.10 a 10 Hz (Clemente-Chavez *et al.*, 2014).

Tabla 6-3 Resultados del efecto de sitio (frecuencia, periodo y amplificación fundamentales) para cada registro en la ciudad de Querétaro.

Punto	Sitio	f ₀ (Hz)	A ₀	f ₁ (Hz)	A ₁
0	UAQ	0.96	1.67	-	-
1	Col. Obrera	5.59	2.12	-	-
2	La capilla	0.96	1.67	-	-
3	Cerro de las campanas	0.96	1.67	-	-
4	Deportivo Casa Blanca	4.54	3.20	-	-
5	San mateo	1.73	2.59	-	-
6	Casa Noel	4.03	2.17	-	-
7	Parque Universo 2000	1.39	1.81	-	-
8	Casa Alejandro	0.72	5.80	-	-
9	Col. Santa Maria	0.90	5.59	-	-
10	Cerro del tambor	5.48	3.91	-	-
11	Frente Zibatá	0.41	8.40	-	-
12	SJA	0.47	5.66	-	-
13	Calero	0.35	3.38	-	-
14	Parque Indereq	0.98	1.26	-	-
15	Casa Gustavo	2.89	3.67	-	-
16	Parque Qro. 2000	4.45	7.53	-	-
17	La Gloria (F)	0.9	5.59	-	-
18	Parque El Pantano	0.90	3.24	3.87	3.01

Punto	Sitio	f ₀ (Hz)	A ₀	f ₁ (Hz)	A ₁
19	Santa Fe (F)	0.92	4.64	3.16	3.66
20	Juriquilla	1.01	6.60	4.2	3.74
21	IAPIND	1.62	3.19	-	-
22	Santo Niño de praga	0.83	3.50	-	-
23	Sonterra	0.70	1.79	-	-
24	Casa Iván	0.41	6.89	-	-
25	Col. Piramides	1.51	1.96	-	-
26	Esc. Sec. Tec. 33	0.46	1.28	-	-
27	Milpa Tlacote	0.92	4.64	3.16	3.66
28	Col. Lourdes	2.86	2.04	-	-
29	Frontera Gua-Qro	0.19	9.76	-	-
30	El Colorado	0.19	8.25	-	-
31	UPQ	0.89	9.02	4	4.23
32	Rincones del Marqués	9.55	1.95	-	-
33	San Isidro	0.20	10.50	-	-
34	Mirador del Marqués	0.77	3.64	-	-
35	Casa Rivas	4.94	7.11	-	-
36	U.D. La Cañada	0.19	3.56	-	-
37	Privada de los portones	7.22	1.65	-	-

Punto	Sitio	f ₀ (Hz)	A ₀	f ₁ (Hz)	A ₁
38	Villas del Mesón	3.59	8.70	-	-
39	Santa Rosa Jáuregui	2.35	3.20	0.9	3.01
40	Loarcas	0.73	10.71	-	-
41	Antea	1.84	2.22	-	-
42	Quintas de la Hacienda	0.48	6.02	-	-
43	Santuarios del cerrito	0.78	5.23	7.19	4.53
44	Terranova	1.73	2.59	-	-
45	Almacén didáctico	0.78	4.38	-	-
46	Congreso del estado	0.76	28.50	-	-
47	Cuesta Bonita	0.82	5.62	-	-
48	La Purísima	0.83	6.61	-	-
49	Colinas del bosque II	0.70	1.93	-	-
50	Cerrito Colorado	0.59	3.42	-	-
51	Rincón Campestre	1.81	5.51	-	-
52	Colegio Austriaco	0.64	4.91	-	-
53	Rancho San Pedro	1.11	3.27	-	-
54	El salitre	9.98	3.36	-	-
55	Valle Juriquilla	0.41	1.80	-	-
56	Victoria Popular	0.84	3.97	-	-

Punto	Sitio	f ₀ (Hz)	A ₀	f ₁ (Hz)	A ₁
57	Cumbres Juriquilla	0.62	2.95	-	-
58	Tlacote Bajo	0.87	5.10	-	-
59	FINSA	0.69	8.57	-	-
60	La Piedad	0.69	8.57	-	-
61	Arquitos	1.19	1.88	-	-
62	Huimilpan	1.08	1.21	-	-
63	Viñedos	1.10	4.06	-	-
64	Tanque Zibatá	4.73	2.27	-	-
65	El refugio	0.90	6.80	-	-
66	La Cuesta	9.24	2.53	-	-
67	Amanecer Balvanera	0.63	1.83	-	-
68	Valle Santiago	10.00	4.79	0.65	4.1
69	Cumbres del Lago	0.68	3.15	-	-
70	Mompani	0.63	3.01	-	-
71	San Pedrito	4.74	4.17	-	-
72	Privada Juriquilla	0.89	3.57	9.94	3.1
73	Juriquilla Campestre	0.90	2.88	-	-
74	Zibatá	0.74	7.22	-	-
75	San Pedro Martir	0.77	7.60	-	-

De la Figura 6.2 se determinó lo siguiente:

- a) Se formaron seis familias espectrales para la ciudad, **familia en roca** con un comportamiento estable del espectro *HVNR* con amplificaciones menores a 3 veces en la zona suroeste y centro sureste, **familia de altas frecuencias** (aproximadamente 5 Hz) con amplificación ligeramente superior a las 3 veces presente en la zona centro norte, **familia en 1 Hz** en las zonas este, oeste y centro sur caracterizada por amplificaciones entre 3 y 8 veces, **familia en bajas frecuencias (aproximadamente 0.50 Hz)** con amplificaciones no mayor a las 5 veces en las parte norte y noreste de la ciudad, **familia con dos picos fundamentales (1 y 5 Hz)** con amplificaciones ente 5 y 3 veces respectivamente, y finalmente **familia con pico en bajas (0.50 Hz) y altas (3 Hz) frecuencias** con amplificaciones mayores a 5 veces en la zona sureste.
- b) La variación de las FTE puede estar asociada a una composición compleja de estratos sobre los que yace la ciudad de Querétaro debido a que las bajas frecuencias están asociadas a estratos profundos mientras que altas frecuencias se relaciona con estratos superficiales.

Ahora, dada la importancia atribuida al equipo utilizado a lo largo de la investigación, en Tabla 6-4 se muestra la significancia representativa entre utilizar un equipo u otro (Bustillos, 2005; Arroyo *et al.*, 2012; González, 2014; Álvarez-Manilla *et al.*, 2017).

Tabla 6-4 Diferencia en valores de frecuencia y amplitud.

Punto	Fo (Bustillos, 2005)	Fo (González, 2014)	Fo (Álvarez-Manilla <i>et al.</i> , 2017)	Fo (Este estudio)	Ao (González, 2014)	Ao (Este estudio)
53	1.66 Hz.	1.24 Hz.	6.66 Hz.	1.11 Hz.	3.24	3.27
50	2.50 Hz.	0.57 Hz.	10.00 Hz.	0.59 Hz.	4.97	3.42
45	3.33 Hz.	0.40 Hz.	3.33 Hz.	0.78 Hz.	3.96	4.38
40	2.00 Hz.	0.52 Hz.	4.00 Hz.	0.73 Hz.	9.4	10.71
58	2.50 Hz.	0.62 Hz.	10.00 Hz.	0.87 Hz.	3.99	4.3
68	2.50 Hz.	6.34 Hz.	3.33 Hz.	10.00 Hz.	2.81	4.79
52	2.50 Hz.	0.37 Hz.	2.86 Hz.	0.64 Hz.	7.56	4.91

6.3 De los Acelerogramas Sintéticos (AS) generados

Gracias a la creación del algoritmo implementado fue posible generar un total de 380 AS que nos dan a conocer cuánto se aceleran diferentes puntos de la ciudad durante la excitación con diferentes sismos. Se postularon 5 eventos con 76 AS para cada uno. Los resultados completos se muestran en Apéndice 5, y a manera de resumen se muestran varios puntos en Tabla 6-5 con el nivel de aceleración máxima y mínima que presenta cada sitio según el sismo con el que se realizó la simulación.

De esta tabla se pueden señalar varios aspectos que delimitan un primer indicio del riesgo sísmico en que se encuentra inmersa la ciudad de Querétaro:

- a) Para el sismo del 01 de mayo del 2012: Considerando las seis familias espectrales, los valores con mayor valor absoluto resultaron presentarse en la familia de bajas frecuencias (0.20-0.50 Hz) con aceleraciones de hasta aproximadamente 2.5 gal.
- b) Para el sismo del 11 de abril del 2012: Se obtuvieron aceleraciones de hasta aproximadamente 8.5 gal para este sismo, presentes en la familia de bajas frecuencias dado los niveles de amplificación para estos espectros.
- c) Para el sismo del 15 de noviembre del 2012: Los valores de aceleración llegaron a ascender a no más de 3 gal, por lo que pese a tratarse de un sismo de magnitud considerable (Mw 6.1), no difiere mucho con lo obtenido con un sismo de Mw 5.6 con una distancia epicentral similar.
- d) Para el sismo del 21 de agosto del 2013: El valor de aceleración mayor osciló cercano a los 4 gal, muy similar a los sismos de los incisos a y c, sin embargo el epicentro de éste posee una mayor lejanía con la ciudad

por lo que resulta entendible este nivel de aceleración, a diferencia con el inciso b donde se esperaba un incremento en la aceleración.

- e) Para el sismo del 19 de septiembre del 2017: Este posee las mayores aceleraciones de los cinco eventos postulados, lo cual resulta esperado dada la gran magnitud (Mw 7.1) y la cercana distancia epicentral (320 km). Los valores de aceleración llegaron a alcanzar los 20 gal en la familia espectral de bajas frecuencia (0.20-0.50 Hz).

Resumiendo, se mostró una forma sencilla, económica y confiable para conocer los niveles de aceleración en cada uno de los sitios analizados en la ciudad. Esto permitió caracterizar al sitio de manera particular con valores reales sobre cómo viaja la señal a través de los estratos que componen esta zona. No obstante, sería interesante tener estaciones de registro en un par de puntos más dentro de la ciudad (inclusive en aquellos lugares que presenten efecto de sitio como el Centro Histórico, Zibatá, entre otros) con la intención de corroborar estos resultados, a pesar que se ha mostrado la validación de estos AS en apéndice 4, sería interesante tener un punto de validación ajeno al mostrado, debido que a la fecha de hoy, no se tienen estudios previos que hayan estimado AS o de registros reales de sismo en distintos puntos de la ciudad que permitan contrastar los resultados obtenidos con alguna fuente de estudio diferente.

Respecto a trabajos con otros autores, existen diversos estudios con diferentes metodologías para generar AS (Bonett y Pujades, 2002; Godínez *et al.*, 2013; Martínez, 2015; Flores-López y Ayes-Zamudio, 2018; Vázquez *et al.*, 2018), cada uno con sus ventajas y desventajas. Acorde a esto, solo queda resaltar el hecho que la intención de generar AS siempre será requerida para conocer tanto la aceleración del terreno como la respuesta estructural de un edificio, y por esto siempre es necesario hacer una particularización sobre lo que nos interesa analizar y con base en esto elegir uno u otro método.

Tabla 6-5 Aceleraciones durante la ocurrencia de distintos eventos sísmicos.

Punto	Sitio	A		B		C		D		E	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	UAQ	-4.16E-03	4.22E-03	-1.57E-02	1.27E-02	-6.47E-03	4.94E-03	-5.61E-03	6.18E-03	-2.80E-02	2.53E-02
1	Col. Obrera	-4.16E-03	4.22E-03	-5.61E-03	6.18E-03	-6.47E-03	4.94E-03	-1.57E-02	1.27E-02	-2.80E-02	2.53E-02
6	Casa Noel	-4.08E-03	4.70E-03	-1.28E-02	1.34E-02	-5.22E-03	4.55E-03	-4.46E-03	5.43E-03	-2.99E-02	2.57E-02
8	Casa Alejandro	-1.33E-02	1.67E-02	-4.93E-02	5.18E-02	-2.40E-02	1.80E-02	-1.99E-02	2.36E-02	-1.21E-01	1.08E-01
9	Col. Santa María	-3.04E-03	3.72E-03	-4.79E-03	5.43E-03	-4.51E-03	3.99E-03	-1.27E-02	1.20E-02	-3.13E-02	2.53E-02
11	Frente Zibatá	-2.19E-02	2.92E-02	-1.24E-01	1.18E-01	-3.59E-02	3.23E-02	-3.23E-02	3.69E-02	-3.83E-01	3.31E-01
13	Calero	-1.78E-02	2.11E-02	-2.75E-02	2.35E-02	-3.29E-02	2.62E-02	-2.62E-02	2.56E-02	-4.93E-01	4.13E-01
15	Casa Gustavo	-7.15E-03	6.85E-03	-2.28E-02	2.54E-02	-8.99E-03	8.61E-03	-6.56E-03	7.83E-03	-5.84E-02	4.37E-02
22	Santo Niño de praga	-7.74E-03	8.09E-03	-2.82E-02	2.55E-02	-1.31E-02	9.51E-03	-9.74E-03	6.17E-02	-6.80E-02	6.25E-02
23	Sonterra	-1.75E-02	1.79E-02	-1.82E-02	2.21E-02	-2.40E-02	2.13E-02	-5.19E-02	4.53E-02	-1.42E-01	1.25E-01
24	Casa Iván	-1.40E-02	1.77E-02	-5.14E-02	4.81E-02	-2.03E-02	1.55E-02	-2.20E-02	2.12E-02	-1.76E-01	1.57E-01
25	Col. Piramides	-7.53E-03	8.94E-03	-1.02E-02	1.27E-02	-1.27E-02	1.16E-02	-3.11E-02	2.65E-02	-7.31E-02	6.33E-02
27	Milpa Tlacote	-5.24E-03	6.42E-03	-6.88E-03	8.43E-03	-6.96E-03	5.61E-03	-1.68E-02	1.49E-02	-3.40E-02	3.39E-02
30	El Colorado	-1.24E-02	1.39E-02	-5.66E-02	5.60E-02	-1.72E-02	1.35E-02	-2.13E-02	2.54E-02	-1.85E-01	1.48E-01
33	San Isidro	-2.07E-02	2.71E-02	-8.61E-02	7.90E-02	-3.04E-02	2.31E-02	-3.57E-02	3.84E-02	-2.19E-01	1.89E-01
35	Casa Rivas	-5.71E-03	6.53E-03	-2.78E-02	2.92E-02	-7.75E-03	8.05E-03	-6.07E-03	6.17E-03	-5.42E-02	4.52E-02
36	U.D. La Cañada	-7.41E-03	9.69E-03	-5.07E-02	4.79E-02	-1.47E-02	9.91E-03	-1.16E-02	1.05E-02	-1.92E-01	1.44E-01
37	Privada de los portones	-1.33E-02	1.67E-02	-1.99E-02	2.36E-02	-2.40E-02	1.80E-02	-4.93E-02	5.18E-02	-1.21E-01	1.08E-01
39	Santa Rosa Jáuregui	-6.70E-03	8.23E-03	-1.84E-02	1.65E-02	-8.30E-03	7.01E-03	-6.40E-03	8.34E-03	-4.68E-02	4.09E-02
45	Almacén didáctico	-1.41E-02	1.50E-02	-5.09E-02	5.03E-02	-2.34E-02	1.64E-02	-2.07E-02	2.28E-02	-1.22E-01	1.07E-01
47	Cuesta Bonita	-1.31E-02	1.19E-02	-4.40E-02	3.75E-02	-1.91E-02	1.58E-02	-1.39E-02	1.80E-02	-7.64E-02	6.97E-02
48	La Purísima	-1.62E-02	1.71E-02	-5.50E-02	5.00E-02	-2.70E-02	2.06E-02	-2.23E-02	2.40E-02	-1.10E-01	1.00E-01
49	Colinas del bosque II	-4.08E-03	4.70E-03	-4.46E-03	5.43E-03	-5.22E-03	4.55E-03	-1.28E-02	1.34E-02	-2.99E-02	2.57E-02
50	Cerrito Colorado	-6.12E-03	8.56E-03	-2.64E-02	2.89E-02	-1.10E-02	9.19E-03	-9.67E-03	1.13E-02	-6.25E-02	5.39E-02
51	Rincón Campestre	-1.42E-02	1.53E-02	-3.11E-02	2.79E-02	-1.60E-02	1.33E-02	-1.35E-02	1.42E-02	-6.35E-02	5.90E-02
52	Colegio Austriaco	-1.12E-02	1.47E-02	-5.08E-02	4.85E-02	-1.91E-02	1.46E-02	-1.67E-02	2.12E-02	-1.26E-01	1.01E-01
53	Rancho San Pedro	-6.87E-03	9.09E-03	-2.77E-02	2.74E-02	-1.07E-02	7.74E-03	-8.89E-03	1.07E-02	-5.99E-02	5.39E-02
56	Victoria Popular	-9.89E-03	1.00E-02	-3.49E-02	3.41E-02	-1.66E-02	1.22E-02	-1.38E-02	1.57E-02	-8.31E-02	7.01E-02
57	Cumbres Juriquilla	-1.16E-02	1.11E-02	-1.11E-02	1.21E-02	-1.52E-02	1.37E-02	-2.79E-02	2.34E-02	-4.73E-02	4.96E-02
58	Tlacote Bajo	-1.15E-02	1.06E-02	-3.27E-02	2.77E-02	-1.66E-02	1.37E-02	-1.21E-02	1.46E-02	-6.97E-02	5.99E-02
61	Arquitos	-4.90E-03	5.81E-03	-1.24E-02	1.08E-02	-6.16E-03	4.71E-03	-4.72E-03	5.43E-03	-2.11E-02	2.51E-02
62	Huimilpan	-3.25E-03	3.96E-03	-2.78E-02	2.93E-02	-5.40E-03	4.65E-03	-5.79E-03	6.10E-03	-4.49E-02	4.39E-02
63	Viñedos	-7.58E-03	9.20E-03	-1.72E-02	1.67E-02	-9.30E-03	8.41E-03	-7.19E-03	7.64E-03	-3.28E-02	3.30E-02
64	Tanque Zibatá	-5.22E-03	6.52E-03	-2.19E-02	2.17E-02	-8.31E-03	6.62E-03	-8.45E-03	9.44E-03	-7.52E-02	5.85E-02
66	La Cuesta	-4.36E-03	5.59E-03	-2.90E-02	2.79E-02	-6.93E-03	7.36E-03	-6.32E-03	6.22E-03	-7.26E-02	5.99E-02
68	Valle Santiago	-9.57E-03	1.20E-02	-3.94E-02	3.69E-02	-1.67E-02	1.28E-02	-1.32E-02	1.75E-02	-9.37E-02	7.92E-02
70	Mompani	-1.39E-02	1.16E-02	-6.48E-02	5.55E-02	-2.47E-02	2.02E-02	-2.03E-02	2.79E-02	-9.73E-02	8.46E-02
71	San Pedrito	-6.62E-03	7.05E-03	-3.21E-02	3.50E-02	-1.01E-02	9.64E-03	-8.64E-03	9.16E-03	-6.78E-02	5.83E-02
72	Privada Juriquilla	-8.41E-03	8.86E-03	-3.66E-02	3.60E-02	-1.42E-02	9.53E-03	-1.17E-02	1.17E-02	-7.47E-02	7.05E-02
73	Juriquilla Campestre	-6.67E-03	7.50E-03	-2.15E-02	1.81E-02	-9.54E-03	7.83E-03	-8.77E-03	1.07E-02	-4.76E-02	4.59E-02

Evento sísmico: A=01/05/2012 B=21/08/2013 C= 15/11/2012 D=11/04/2012 E= 19/09/2017.

1, 3, 5, 7 y 9= Aceleración mínima (m/s²).

2, 4, 6, 8 y 10= Aceleración máxima (m/s²).

6.4 De los Espectros de Seudo Aceleración (ESA) estimados

Se calcularon ESA para cada punto conforme al sismo postulado como referencia, siendo estos agrupados por familia espectral como se muestra:

En Figura 6.3 se aprecia como el espectro de respuesta va decayendo conforme el periodo aumenta, esto es debido al contenido de altas frecuencias de los AS quienes tienden a excitar edificios de bajo número de niveles (de 2 a 5 niveles). Además el pico que se observa es muy marcado por lo que sería práctico diseñar los espectros por sismo considerando este caso en específico donde el ESA apenas excede los 10 gal para este periodo estructural de 0.5 segundos.

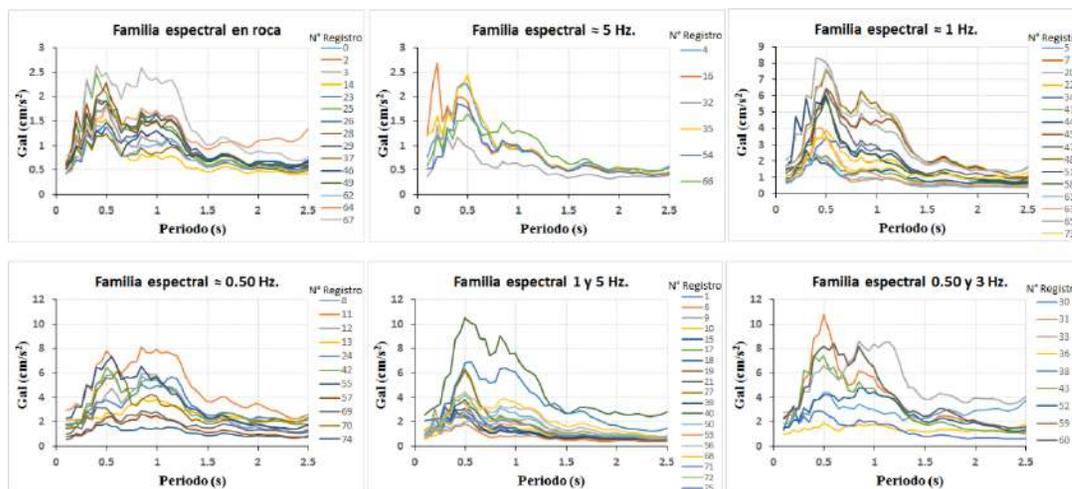


Figura 6.3 ESA para el sismo del 01 de mayo del 2012 Mw 5.6.

En Figura 6.4 podemos notar la presencia de dos picos en los periodos aproximadamente igual a 1 y 3 segundos. La explicación de este fenómeno está dada por el hecho que el sismo está cargado tanto de bajas como de altas frecuencias, lo cual resulta interesante puesto que la lejanía del epicentro llevaría a pensar que solo se tendría un pico asociado a bajas frecuencias. Por otro lado, debido a que se trata de un sismo de magnitud fuerte (Mw 6.4), los niveles de SA llegan a ascender hasta casi los 50 gal, lo cual representa un riesgo considerable para edificios altos con más de 20 niveles edificados.

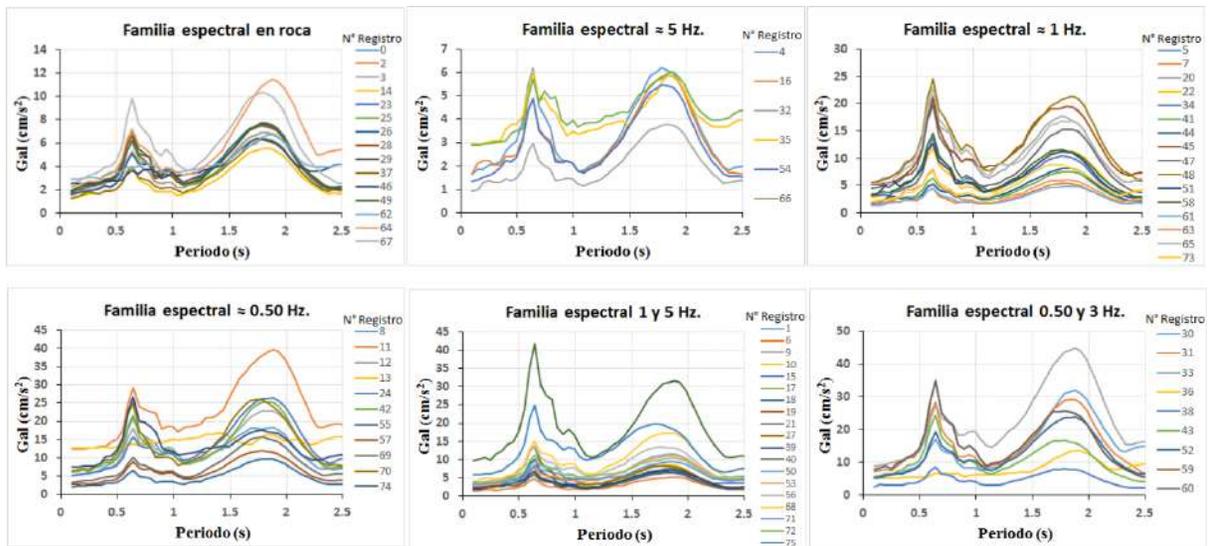


Figura 6.4 ESA para el sismo del 11 de abril del 2012 Mw 6.4.

En Figura 6.5 se vuelve a apreciar un pico muy marcado en bajas frecuencias (periodo de 1 a 2 segundos), pero debido a que se trata de un sismo de menor magnitud (Mw 6.1) que el mencionado en la figura anterior, los niveles de SA no exceden de 20 gal.

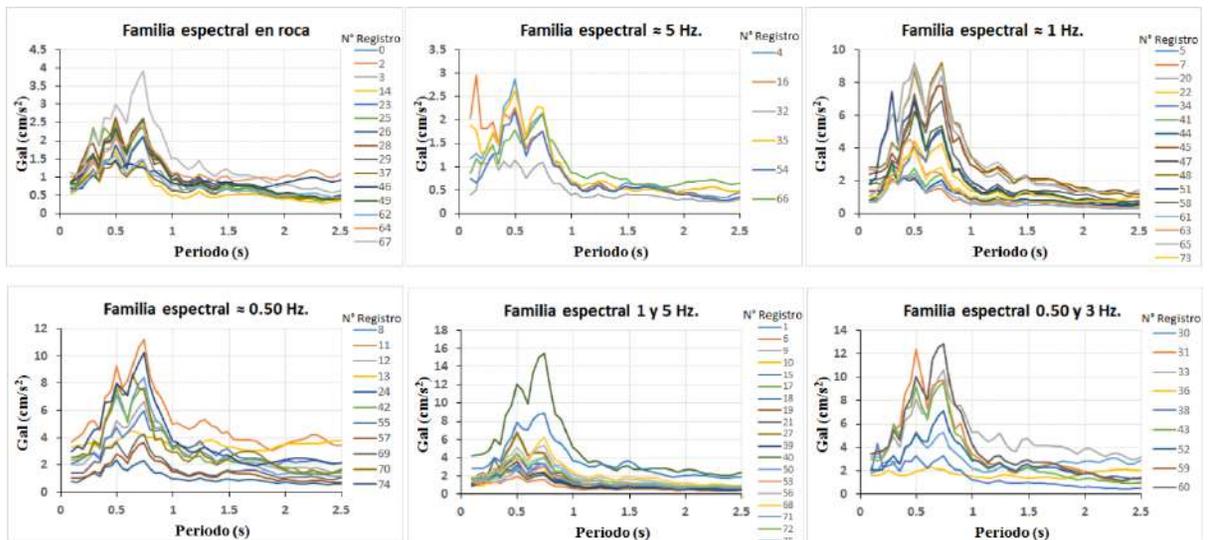


Figura 6.5 ESA para el sismo del 15 de noviembre del 2012 Mw 6.1.

En Figura 6.6 existe un caso curioso debido al pico tan ancho que abarca periodos desde 1 a 5 segundos con un nivel de SA de 4 a 15 gal dependiendo de la familia espectral que se esté revisando. Esto representa un problema por el simple hecho que este tipo de sismos afectaría a una gran cantidad de edificios y se deberá tener cuidado cuando este tipo de fenómenos se presente.

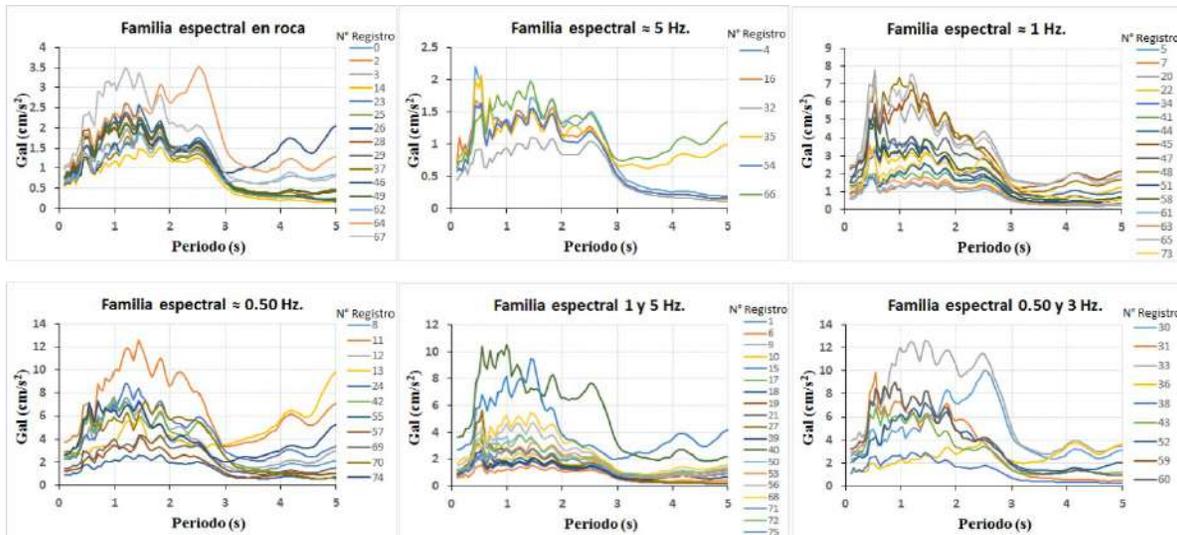


Figura 6.6 ESA para el sismo del 21 de agosto del 2013 Mw 6.0.

En Figura 6.7 se muestra el peor de los escenarios en cuanto a magnitud, distancia epicentral y fuente sismogénica, lo anterior debido al hecho que, como quedó constatado por los daños generados en la CDMX y sus alrededores, este tipo de sismos son los que más destrucción han causado en el centro del país. Se logra apreciar un ESA con 3 picos (0.75, 2 y 5 segundos de periodo estructural). Esto es a causa que el sismo, como se ha venido mencionando a lo largo del presente estudio, se caracteriza por su variado contenido de frecuencias que excitará a gran cantidad de edificios con distintas tipologías. Además, los niveles de SA son los más elevados de todos los escenarios analizados (SA alrededor de 80 gal). Por lo tanto los edificios deberán ser diseñados para soportar este tipo de eventos, considerando que en el país ocurre al menos un evento de este tipo al año.

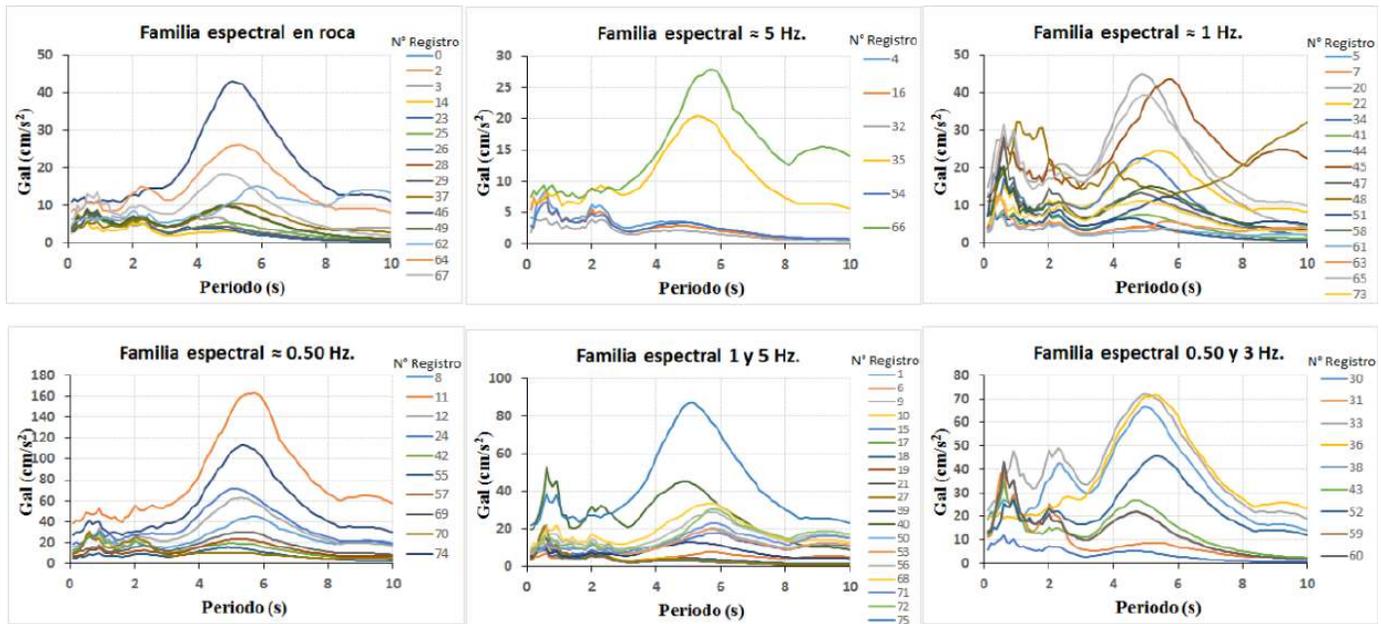


Figura 6.7 ESA para sismo del 19 de septiembre del 2017 Mw 7.1.

Existen muchos estudios a nivel nacional e internacional por determinar la respuesta estructural ante el efecto sísmico (Singh *et al.*, 1988; Ordaz, 1989; Ismael-Hernández *et al.*, 2011; Arroyo *et al.*, 2012; Godínez *et al.*, 2013; Martínez, 2015; Vázquez *et al.*, 2018), no obstante, se hace énfasis en realizar una comparativa con estudios referidos a la zona. Por esta razón se abordó el tema de espectros de respuesta, o de sitio, para el caso particular de la ciudad de Querétaro y sus anexos.

Basados en esta información, se volvió necesario hacer el contraste entre los espectros de sitios obtenidos por Arroyo *et al.* (2012) para el sismo de Mw 8.1 ocurrido en Michoacán el 19 de septiembre de 1985. Primero se debe aclarar que las condiciones para obtener éstos espectros estuvieron basadas en dos aspectos fundamentales: a) El espectro fue generado para un acelerograma filtrado según las estratigrafías con que se contaba en aquel entonces, es decir, se realizó una convolución de la señal del sismo original para ser modificada según el modelo unidimensional de Haskell (1962); b) Se desconoce el tipo de sitios donde se realizó el cálculo del espectro, pudiendo ser terreno rocoso o sedimentos.

Con estos matices señalados, se procedió a realizar una comparativa entre los espectros generados y los aquí obtenidos. Cabe aclarar que no se contó con el registro sísmico de Michoacán, por lo que se optó por utilizar un sismo con características similares, sobre todo en cuanto a distancia epicentral (aproximadamente 300 km). Al generar los espectros de ambos sitios se encontraron diferencias significativas, como se puede constatar en Figura 6.8, donde las ordenadas para el primer caso (izquierda de figura) tienen valores entre 0.1 y 0.5 gal, mientras que para el caso contrastante (derecha de figura) representa valores entre 10 y 60 gal para una escala similar de periodo estructural.

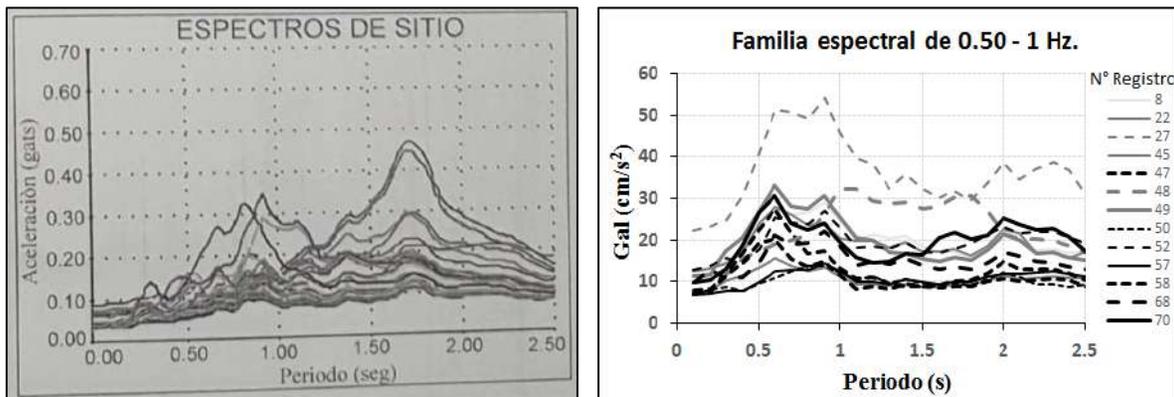


Figura 6.8 Comparativa entre espectros de sitio para sismos similares (a la izquierda para el sismo Mw 8.1 ocurrido el 19 de septiembre de 1985 registrado en UAQ y a la derecha para el sismo Mw 7.1 ocurrido el 19 de septiembre de 2017 registrado en CGEO).

Esta discrepancia entre resultados para los espectros de respuesta, puede ser atribuirle a diversos factores resultado tanto de aspectos positivos como negativos para uno y otro caso. Por ejemplo, se puede especular que el modelo estratigráfico utilizado para filtrar la señal del sismo no haya sido el correspondiente para el sitio que se intentaba estimar, o también que las profundidades del sondeo geotécnico que se tenía fueran menores a las que se supondría un sismo puede excitar. Además, si suponemos que la respuesta está en unidades de aceleración gravitatoria en lugar de gal, los resultados serían más congruentes entre sí dado que tendrían un valor de SA y una forma espectral similar. Por otro lado, el método para generar espectros en este estudio fue en términos de SA, donde quizás los valores pudieran elevarse si se escogen diferentes intervalos de periodo estructural, número de periodos y coeficiente de amortiguamiento. Por esta razón se debe tener cuidado en elegir apropiadamente los parámetros con los que se va a interactuar.

Finalmente, en Tabla 6-6 se muestra cómo la variación en el nivel de aceleración es significativo dada la gran diferencia entre un espectro y otro. Además respecto al primer estudio se muestran valores para periodos menores a 2.50 segundos (edificios de 22 a 27 niveles) los cuales existen en la ciudad y pudiesen verse afectados ante movimientos sísmicos que entren en resonancia con este tipo de estructuras.

Tabla 6-6 Variación del nivel de aceleración por periodo estructural.

Periodo Segundos	Gal (cm/s ²)	
	Arroyo et al. (2012)	Este estudio
0.10	0.500	10.687
0.50	0.110	21.044
1.00	0.190	20.925
1.50	0.210	15.889
2.00	0.200	19.541
2.50	0.120	15.383
3.00	-	11.902
3.50	-	13.640
4.00	-	18.319
4.50	-	22.598
5.00	-	26.221

6.5 De los mapas de riesgo sísmico

Una vez realizados los 5 mapas de riesgo mostrados en la sección anterior, se señala que el riesgo en el cual se encuentra inmersa la ciudad de Querétaro depende del tipo de sismo que esté excitando al terreno, en forma general se aprecia que el riesgo es de moderado a bajo, sin embargo, para sismos de magnitud mayor a 6.5 Mw, la ciudad tiende a presentar niveles de aceleración que pueden generar daños a las edificaciones existentes.

Estos mapas son de gran utilidad para acotar el riesgo y estar conscientes de la situación que presenta la ciudad en la cuestión sísmica, no obstante, desde luego existen inconvenientes a la hora de trazar estos mapas como por ejemplo el criterio que se toma para definir un riesgo u otro en función del nivel de SA, además se puede profundizar aún más en los métodos de interpolación mediante análisis estadísticos, o diferentes formas de determinar el periodo estructural de los edificios y no solo tomando en cuenta el número de niveles con que estos cuentan.

Esta información da inicio a realizar comparativas con lo establecido por las distintas guías para el diseño de estructuras (Manual de CFE, normas técnicas complementarias de la CDMX, reglamento de construcción municipal, entre otras). Lo anterior debido a que no se contaba con información que permitiera contrastar los espectros de diseño realizados de manera generalizada con aquellos que son representativos del sitio de interés.

Finalmente, pese a que los niveles de riesgo pueden ser de carácter bajo a moderado, se constata que si bien el riesgo sísmico está asociado a la posibilidad de pérdidas en función de las condiciones tanto del suelo como de las edificaciones sobre este, un mayor riesgo no significa que la estructura colapsará debido a que eso depende del diseño de la misma, la ejecución apropiada durante la construcción, la calidad de los materiales utilizados así como imponderables que pueden repercutir de manera directa o indirecta en la vida útil de la construcción.

Hasta este punto se ha mostrado la metodología empleada, los resultados y la discusión de los mismos, pero todo esto está referido a un campo de estudio particular. Entonces resulta cuestionable si los resultados obtenidos realmente son representativos de la zona o si es congruente que los resultados obtenidos hayan llevado a tal o cual conclusión.

Por esta razón, se vuelve fundamental el tener una perspectiva diferente que pueda validar los resultados aquí obtenidos. Para ello existen otros estudios que también pueden ser aplicados a la ingeniería sísmica, como por ejemplo algunos modelos matemáticos que nos permitan conocer la respuesta del suelo de manera teórica, o bien, también resulta válido el acudir a la opinión pública con base en consultas de reportes de zonas afectadas para hacer ciertas conjeturas de si los resultados se ven validados mediante la percepción ciudadana.

Primero enfoquémonos en el primer caso: la ciudad de Querétaro cuenta con varios estudios de exploración geofísica con fines de conocer los estratos, no obstante, también se puede hacer una correlación entre estos estratos y la respuesta del suelo mediante un modelo matemático (Haskell, 1962). Pese a que esto difiere un poco del campo de conocimiento que se ha venido trabajando, en apéndice 6 se muestra un ejemplo de cómo con estos modelos teóricos fue posible validar los resultados aquí obtenidos pero desde el punto de vista geológico.

Ahora, respecto al segundo caso, se elaboró un sondeo con ayuda de los reportes de protección civil donde con base en alertas por parte de la ciudadanía, se pudo constatar que las zonas aquí categorizadas como de mayor riesgo, coincidieron con los lugares donde hubo labores de evacuación a causa del sismo del 19 de septiembre de 2017 (Mw 7.1) que logró sentirse en diferentes puntos de la ciudad (Diario de Querétaro, 2017; El financiero, 2017), lo cual resultó en un punto positivo a favor de la investigación realizada, no sin antes resaltar que aún existen zonas que deben ser monitoreadas, especialmente en aquellas que se tienen reportes pero que no fueron categorizadas como de riesgo en el presente estudio.

7. CONCLUSIONES

Como parte culminante del proyecto de investigación, resulta necesario señalar los objetivos planteados al inicio de la investigación y su cumplimiento durante la ejecución de éste:

- a) Fueron realizadas pruebas de experimentación en campo implementando el uso de un sismógrafo de banda ancha para registros de vibración ambiental (microtremores) en 76 lugares distribuidos a lo largo y ancho de la ciudad de Querétaro donde el equipo utilizado posee un papel imprescindible en los trabajos de zonificación, dada su confiabilidad, autonomía y eficacia en el rango de interés de la ingeniería sísmica.
- b) Los registros de microtremores fueron procesados mediante la técnica *HVNR* y las recomendaciones establecidas por SESAME (2004) y Martínez (2015).
- c) Se determinó el efecto de sitio que presenta toda la ciudad de Querétaro y su zona conurbada con la ayuda de las FTE que caracterizan el comportamiento dinámico del suelo, visto desde un enfoque sísmico.
- d) Se complementó la carta de zonificación de la ciudad iniciada por Bustillos (2005), ratificada por Arroyo *et al.* (2012) y replanteada por González (2014), considerando aspectos que abarcan desde el uso de ciertos sensores, hasta criterios recientes para la agrupación de los espectros y las técnicas de procesamientos de señales.

- e) Se mostró el funcionamiento del algoritmo implementado que permitió generar 380 AS para estimar los niveles de aceleración en diferentes partes de la ciudad.

- f) Se elaboraron 30 mapas de intensidad sísmica con los niveles de pseudoaceleración considerando diferentes tipos de excitación producidas por sismos registrados en la estación de CGEO UNAM, campus juriquilla, Querétaro.

- g) Se mostró una alternativa para acotar el riesgo sísmico mediante 30 mapas de riesgo, o zonas sísmicamente seguras, que consideran tanto el comportamiento dinámico del suelo como la construcción que se encuentra edificada sobre éste y no de la manera tradicional donde solo se interesaba en conocer el nivel de pseudoaceleración para un periodo estructural determinado.

Por todo eso, se recomienda para esta línea de investigación validar este trabajo con estudios empíricos sobre la dinámica de las estructuras, posible solamente con el monitoreo de edificios para determinar su comportamiento y aplicarlo en el diseño por sismo. Además es importante cuestionar la forma en que se evalúa la respuesta estructural, es decir, se podría considerar una nueva medida de intensidad que describa la respuesta no lineal de edificios y no abordarlo de la manera tradicional con la medida de pseudoaceleración aplicada a sistemas elásticos. Por otro lado, un paso fundamental sería que el próximo reglamento para la ciudad de Querétaro contemple la incorporación de los parámetros aquí desarrollados. Finalmente, se pueden aplicar otros métodos para estimar el comportamiento dinámico del suelo que permita el modelado numérico de sismos. Sería interesante ver que los avances tecnológicos de campos multidisciplinarios permitan estimar información que antes parecía imposible de lograr.

REFERENCIAS

- Álvarez-Manilla, A., A., G. Martínez Peña, .E.I., S. Pérez, A. y P. Vázquez, J.C. 2002. Caracterización de suelos y control espacial por medio de los sistemas de información geográfica; caso Valle de Querétaro. IMT. Publicación técnica No. 203. Sanfandila, Qro.
- Álvarez-Manilla, A., D. Carreón, C. Mendoza, F. R. Zúñiga y D. Zhao. 2017. Contribución de las frecuencias características al periodo de vibración dominante en la ciudad de Querétaro, México. Revista de Ingeniería Sísmica No. 97, 84-101.
- Ambher. 2014. Resonancia en estructuras. <https://www.ambher.com/infraestructura/resonancia-en-estructuras>. (Último acceso en abril del 2019).
- Arroyo, M., J. A. Arzate y J. Pacheco. 2012. Micro-zonación sísmica. Primera ed. Cordinadores científicos. ISBN 9789685435840 pp. 211-222.
- Ayuntamiento del Municipio de Querétaro. 2008. Reglamento de construcción para el municipio de Querétaro. Gaceta Municipal No. 44 de fecha 30 de septiembre de 2008 y en el Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Querétaro "La Sombra de Arteaga" No. 57, de fecha 31 de octubre de 2008.
- Bard, P. Y. 1999. Microtremor measurements: a tool for site effect estimation. The effects of surface geology on seismic motion, Irikura K Judo K, Okada H, Sasatani T, editors. Vo. 3.(Recent progress and New Horizon on ESG study.)
- Bazán, E. y R. Meli. 2004. Diseño sísmico de edificios. Editorial Limusa. México D.F.
- Bohórquez, C., Martha Patricia. 2009. Estadística espacial. Departamento de Estadística. Universidad Nacional de Colombia.

- Bolt, B. A. 2003. *Terremotos*. Editorial Reverté, S.A. ISBN: 84-291-4602-4.
- Bonett, R. y L. Pujades. 2002. Generación de acelerogramas artificiales compatibles con un espectro de respuesta. Aplicación a eventos recientes en Colombia y España. *Rev. Int. Met. Num. Calc. Dis. Ing.* 18(2):297-308.
- Bürgmann, R., G. Hilley, A. Ferretti y F. Novali. 2006. Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay Area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis. *Geology* 34(3)doi: 10.1130/g22064.1.
- Bustillos, P., J.M. 2005. *Microzonificación sísmica del valle de Querétaro*. Tesis de maestría. Facultad de ingeniería. UAQ.
- Chávez-García, F. J. y J. Tejeda-Jácome. 2010. Site response in Tecoman, Colima, Mexico—I: Comparison of results from different instruments and analysis techniques. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30(8):711-716. doi: 10.1016/j.soildyn.2010.03.001
- Chopra, A. K. 2012. *Dynamics of structures. Theory and applications to earthquake engineering*. Cuarta ed. Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics. University of California at Berkeley.
- Clancey, G. 2012. Japanese Seismicity and the Limits of Prediction. *The Journal of Asian Studies* 71(02):333-344. doi: 10.1017/s0021911812000058.
- Clemente-Chávez, A., G. M. Arroyo, R. Zúñiga, Á. Figueroa-Soto, M. A. Pérez Lara y C. S. López. 2012. Relación de atenuación del movimiento del suelo para la aceleración máxima (PGA) sobre el cinturón volcánico mexicano (MVB); análisis por trayectoria: Guerrero-Querétaro. *Revista de ingeniería sísmica* No. 87: 67-93.
- Clemente-Chavez, A., A. Figueroa-Soto, F. R. Zúñiga, M. Arroyo, M. Montiel y O. Chavez. 2013. Seismicity at the northeast edge of the Mexican Volcanic Belt (MVB) and activation of an undocumented fault: the Peñamiller earthquake sequence of 2010-2011, Querétaro, Mexico. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 13.(10.):2521-2531. doi: 10.5194/nhess-13-2521-2013

- Clemente-Chavez, A., F. R. Zúñiga, J. Lermo, A. Figueroa-Soto, C. Valdés, M. Montiel, O. Chavez y M. Arroyo. 2014. On the behavior of site effects in central Mexico (the Mexican volcanic belt – MVB), based on records of shallow earthquakes that occurred in the zone between 1998 and 2011. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14(6):1391-1406. doi: 10.5194/nhess-14-1391-2014
- Clemente Chávez, A. y M. Arroyo. 2012. Primer estación sísmica de la Universidad Autónoma de Querétaro. Reporte técnico. FI UAQ. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). 2015. Manual de diseño de obras civiles. Capítulo 3: Diseño por sismo. Sección C: Estructuras.
- Crisafulli, F. y E. Villafañe. 2002. Espectros de respuesta y de diseño. Ingeniería sismorresistente. Facultad de Ingeniería. Universidad Cuyo.
- Diario de Querétaro. 2017. Sismos se sienten en Querétaro. <https://www.diariodequeretaro.com.mx/local/sismos-se-sienten-en-queretaro-451554.html>. (Último acceso en abril de 2019).
- Dobry, R., I. Owis y A. Urzua. 1976. Simplified procedure for estimating the fundamental period of a profile. *Bulletin of the Seismological Society of America* 66(4):1293-1321.
- El financiero. 2017. Se siente sismo en Querétaro; no se reportan afectaciones. <https://www.elfinanciero.com.mx/bajo/se-siente-sismo-en-queretaro-no-se-reportan-afectaciones>. (Último acceso en abril de 2019).
- Enescu, B., K. Shimojo, A. Opris y Y. Yagi. 2016. Remote triggering of seismicity at Japanese volcanoes following the 2016 M7.3 Kumamoto earthquake. *Earth, Planets and Space* 68(1):165. (journal article) doi: 10.1186/s40623-016-0539-5

- Figueroa-Soto, A., A. Clemente Chávez y R. Zúñiga. 2010. Deconvolución de sismogramas digitales y determinación del ruido sísmico para el sismógrafo Trillium 120 instalado en el campus Juriquilla de la UNAM. Órgano de Comunicación Electrónica del Centro de Geociencias de la UNAM. Vol. 6, No. 1.
- Flores-López, F. A. y J. C. Ayes-Zamudio. 2018. Generación de acelerogramas sintéticos mediante el uso de Wavelets, orientado a aplicaciones geotécnico-estructurales. Revista de ingeniería sísmica (12):1-24.
- García, J. D. 2006. Estimación de parámetros de movimiento fuerte del suelo para terremotos interplaca e intraslab en México Central. Memoria para el grado de Doctorado. Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Complutense de Madrid.
- Geller, R. J. 2011. Shake-up time for Japanese seismology. Nature 472:407. (Comment) doi: 10.1038/nature10105.
- Geofisicasismospgf. 2012. Periodo fundamental del suelo (Ts). <https://geofisicasismospgf.blogspot.com/p/periodo-fundamental-del-suelo-ts.html>. (Último acceso en abril del 2019).
- Godínez, E. A., L. E. Pérez y A. Tena. 2013. Metodología para la generación de acelerogramas sintéticos. Revista Pakbal. Vol. 12 pp. 21-29.
- González, M. 2014. Replanteamiento de los periodos fundamentales de Querétaro. Tesis de maestría. Facultad de ingeniería. UAQ.
- González, M. y A. Clemente-Chávez. 2013. Obtención de funciones de transferencia empírica (FTE) mediante el registro de vibración ambiental. 7° Coloquio de Posgrado: Avances de jóvenes investigadores DIPFI-UAQ. ISBN: 978-607-513-086-6.
- Haskell, N. A. 1962. Crustal reflection of plane P and SV waves. Journal of Geophysical Research:4151-4167.

Heraldo de México. 2017. Sismo: Colapsan varios edificios en la ciudad de México. <https://heraldodemexico.com.mx/cdmx/sismo-colapsan-varios-edificio-en-la-ciudad-de-mexico/>. (Último acceso en Mayo) 2018.

International Building Code (IBC). 2009. International building code. International Code Council. Whittier, S.A. ISBN: 978-1-58001-725-1.

Ismael-Hernández, E., J. Lermo, F. J. Sánchez-Sesma, J. Angulo, D. Vega, J. Martínez y Á. Zúñiga. 2011. Estimación de intensidades sísmicas en la ciudad de Apizaco, Tlaxcala, para temblores profundos de fallamiento normal. XVIII Congreso nacional de ingeniería sísmica.

Lermo, J. 1992. Observaciones de microtemblores en México y su aplicación en la ingeniería sísmica. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.

Lermo, J. y F. J. Chávez-García. 1994. Are microtremors useful in site response evaluation?. Bulletin of Seismological Society of America. 84(8):1350-1364.

Lermo, J. y F. M. Limaymanta. 2007. Uso de las funciones de transferencia empíricas (HVNR) obtenidas con microtemblores para construir mapas con la clasificación de los terrenos de cimentación para diseño sísmico. Memorias del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.

Lermo, J., J. A. Martínez, J. Angulo, Á. Zúñiga, R. Valle y L. Á. Espinoza. 2013. Mapa de isoperíodos y clasificación de terrenos con fines de diseño por sismo para el municipio de Puebla, Puebla. Instituto de ingeniería UNAM. . Puebla, Puebla.

Leyton, F., S. Ruiz y M. Astroza. 2012. Correlation between seismic intensity for the Maule 2010 earthquake (Mw 8.8) and microtremors' HVSR. 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisboa, Portugal.

Lombardi, A. M. y W. Marzocchi. 2011. The double branching model for earthquake forecast applied to the Japanese seismicity. Earth, Planets and Space 63(3):187-195. doi: 10.5047/eps.2011.02.001.

- Martínez, J. A. 2015. Validación del factor de amplificación de los cocientes espectrales a partir de microtremores, para fines de mapas sísmicos de intensidad. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Molnar, S., J. F. Cassidy, S. Castellaro, C. Cornou, H. Crow, J. A. Hunter, S. Matsushima, F. J. Sánchez-Sesma y A. Yong. 2018. Application of Microtremor Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (MHVSR) Analysis for Site Characterization: State of the Art. *Surveys in Geophysics* 39(4):613-631. doi: 10.1007/s10712-018-9464-4
- Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of RTRI*. 30.(1.):25-33.
- Nogoshi, M. y T. Igarashi. 1971. On the Amplitude Characteristics of Ambient noise (Part 2). *J. Seismol. Soc. Japan*. 24.:26-40.
- Noticieros Televisa. 2017. Osorio Chong pide salir de edificios por sismo, habrá revisiones.
<http://noticieros.televisa.com/http://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/nacional/2017-09-19/osorio-chong-pide-salir-edificios-sismo-habra-revisiones/>. (Último acceso en Octubre) 2018.
- Obregón, S. y C. Bueno. 2015. Dispersión urbana e integración funcional al núcleo central. Caso de estudio: Zona Metropolitana de Querétaro. *Gest. Polit. Pública* 24(2):491-531.
- Ordaz, M., J.M. Jara y S.K. Singh. . 1989. Riesgo sísmico y espectros de diseño en el estado de Guerrero. *Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. p. D40-D56. Acapulco, México. .
- Pacheco, M. J. 2007. Modelo de subsidencia del Valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales. Tesis de doctorado. Centro de Geociencias. UNAM.

- Pérez, M., L.F. 2018. Análisis Bayesiano de Leyes de Atenuación Sísmica para la Región de la Faja Volcánica Transmexicana. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Reglamento de construcción de la CDMX. 2017. Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo. Gaceta Oficial del Distrito Federal, Décima cuarta época, Tomo II, No. 103-BIS.
- Rivera, D., C. Arce y J. Zetina. 2013. Propuesta de microzonificación sísmica para el municipio de Naucalpan. Memoria de XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Boca del Río Veracruz.
- Rocha, E. 2011. Conformación de la base de datos sísmicos para los registros de la estación JUR1, Juriquilla, Querétaro. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Sánchez-Sesma, F. J., M. Rodríguez, U. Iturrarán-Viveros, F. Luzón, M. Campillo, L. Margerin, A. García-Jerez, M. Suarez, M. A. Santoyo y A. Rodríguez-Castellanos. 2011. A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium. *Geophysical Journal International* 186(1):221-225. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05064.x
- Sánchez, F., R. M. . 2015. Evaluación del peligro sísmico en el municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México. Tesis de maestría. Programa de maestría y doctorado en ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sarlis, N. V., E. S. Skordas, P. A. Varotsos, T. Nagao, M. Kamogawa y S. Uyeda. 2015. Spatiotemporal variations of seismicity before major earthquakes in the Japanese area and their relation with the epicentral locations. *Proc Natl Acad Sci U S A* 112(4):986-989. doi: 10.1073/pnas.1422893112.
- Seed, H., 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. 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. SESAME European Research Project WP12-Deliverable D23.12.
- Singh, S. K., E. Mena y R. Castro. 1988. Some aspects of the source characteristics of the 19 September 1985 Michoacan, Earthquake and ground motion amplification in and near Mexico City from strong motion data. *Bull. Seism. Soc. Am.* 78.(2.):451-477.
- Thomson, W. T. 1950. Transmission of Elastic Waves through a Stratified Solid Medium. *Journal of Applied Physics* 21(2):89-93. doi: 10.1063/1.1699629
- Vázquez, A. G., S. Giraldo y H. Juárez-García. 2018. Métodos para generar acelerogramas sintéticos y su influencia en la respuesta no lineal de estructuras. XXI Congreso de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Campeche, Campeche.
- Zavala, N., A. Clemente Chávez, A. Figueroa-Soto, M. González y M. A. Pérez Lara. 2017. Seismic intensity in the world. XIV Congreso Internacional de Ingeniería. Querétaro, Querétaro.
- Zavala, N., A. Clemente Chávez, A. Figueroa, M. González y M. A. Pérez Lara. 2018. Primera estimación de acelerogramas sintéticos para la ciudad de Querétaro; una alternativa para acotar el riesgo-peligro sísmico. *Revista "Perspectivas de la ciencia y la ingeniería"* (Aceptado para publicación).
- Zúñiga, F. R., J. F. Pacheco, M. Guzmán-Speziale, G. J. Aguirre-Díaz, V. H. Espíndola y E. Nava. 2003. The Sanfandila earthquake sequence of 1998, Queretaro, Mexico: activation of an undocumented fault in the northern edge of central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*. 361(3-4):229-238. doi: 10.1016/s0040-1951(02)00606-6.
- Zúñiga, F. R., G. Suárez, Á. Figueroa-Soto y A. Mendoza. 2017. A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. *Journal of Seismology* 21(6):1295-1322. doi: 10.1007/s10950-017-9666-0

APÉNDICE 1. Señales de registros sísmicos y su EAF.

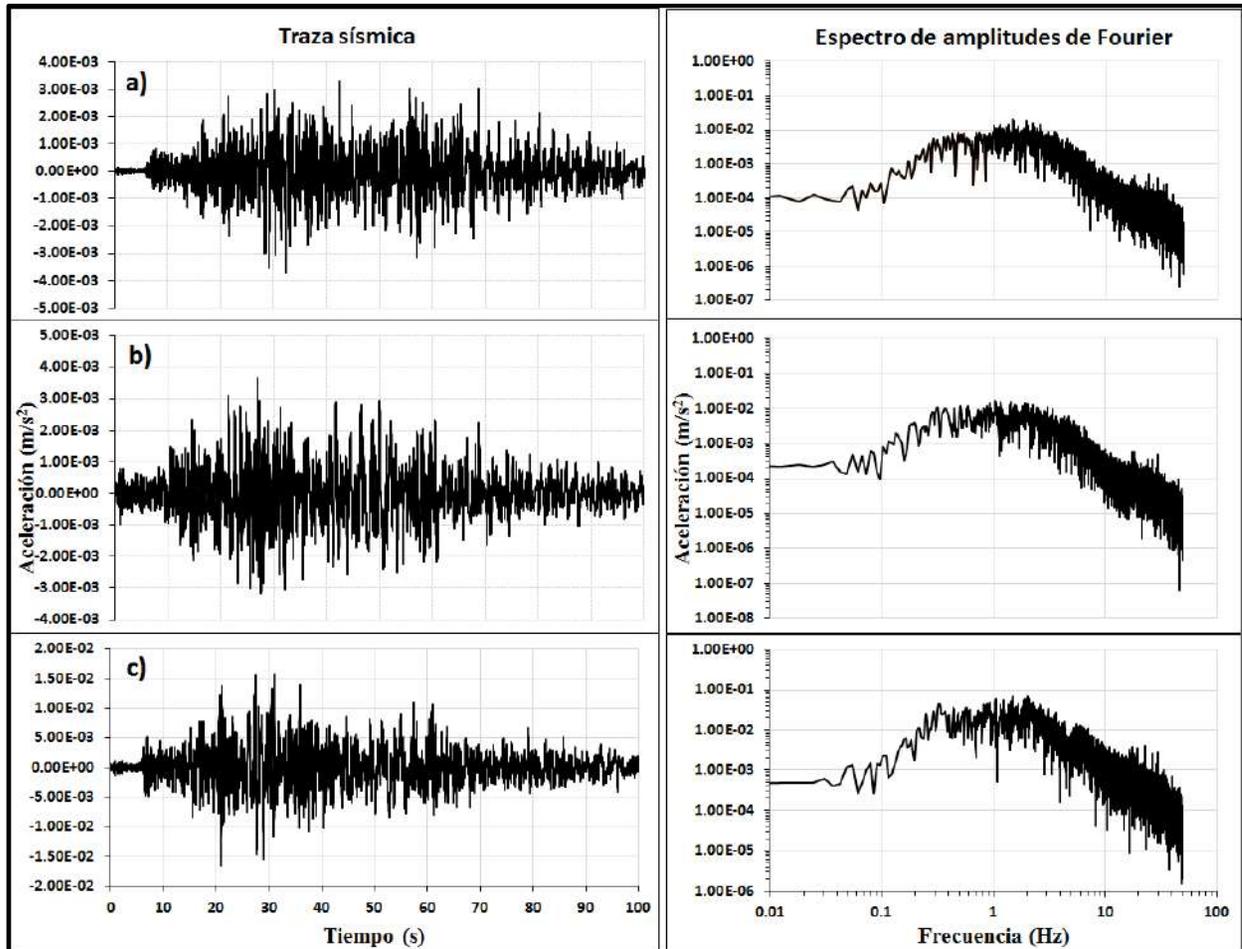


Figura A. 1 Trazas sísmicas del evento ocurrido el 01 de mayo del 2012 en su componente a) Este, b) norte y c) vertical con el EAF correspondiente en su parte derecha.

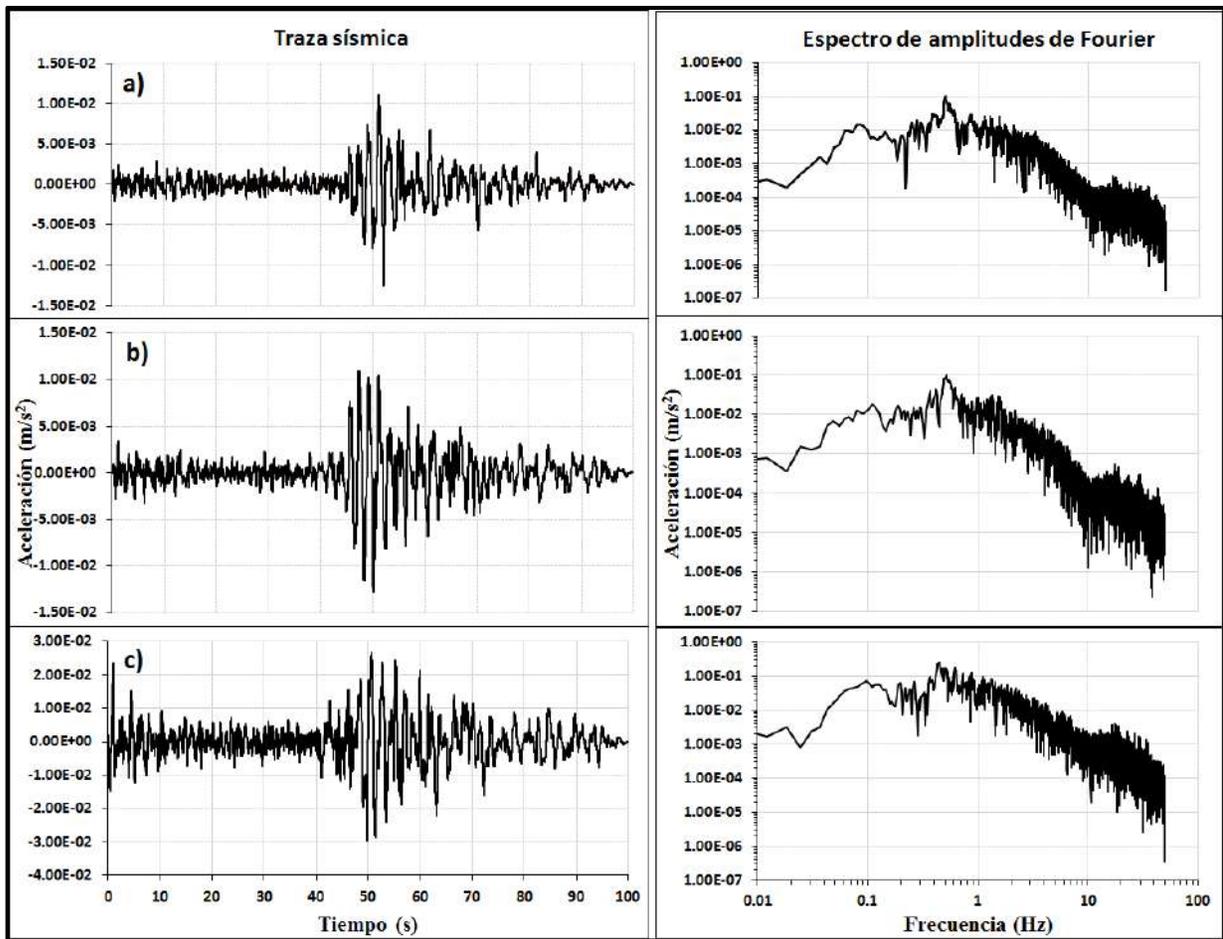


Figura A. 2 Trazas sísmicas del evento ocurrido el 11 de abril del 2012 en su componente a) Este, b) norte y c) vertical con el EAF correspondiente en su parte derecha.

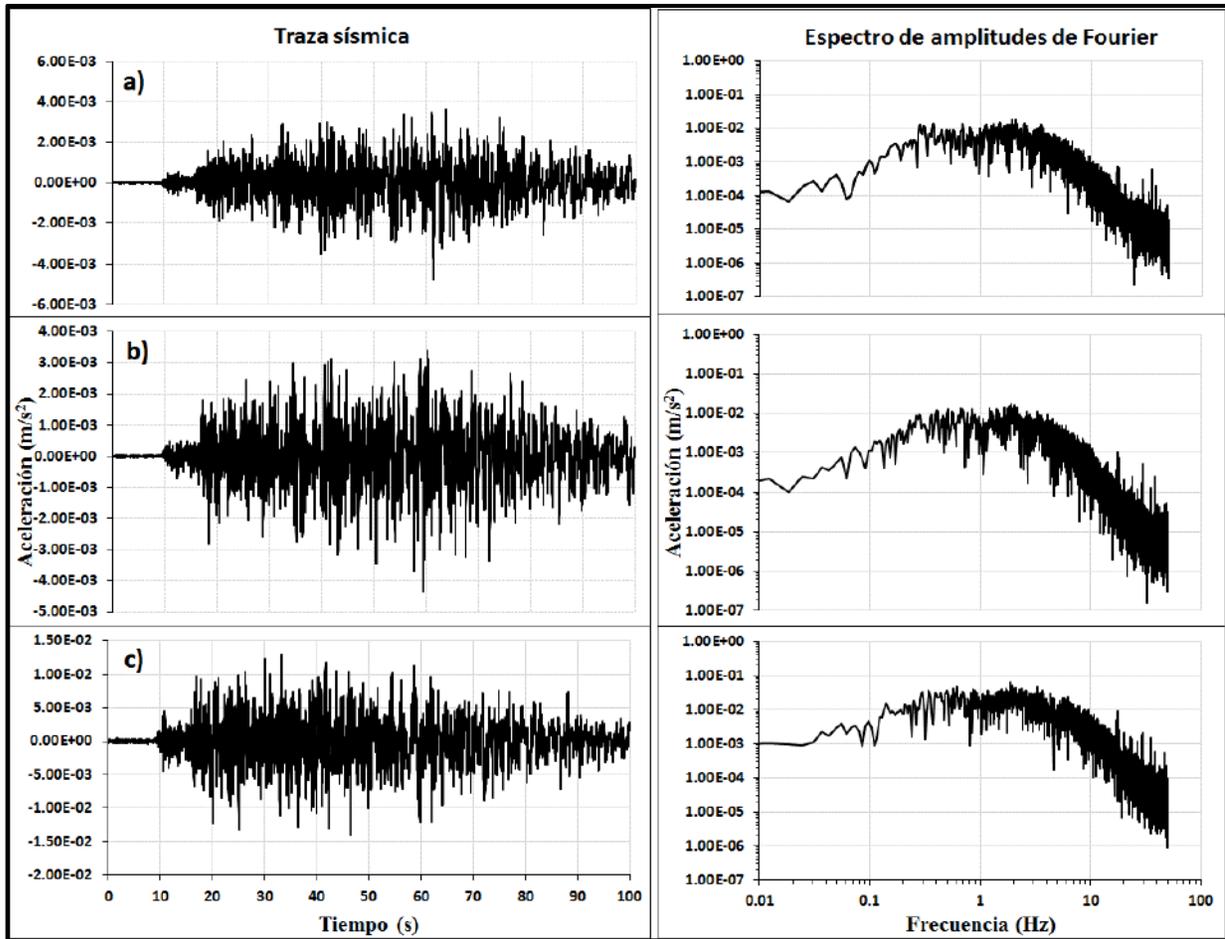


Figura A. 3 Trazas sísmicas del evento ocurrido el 15 de noviembre del 2012 en su componente a) Este, b) norte y c) vertical con el EAF correspondiente en su parte derecha.

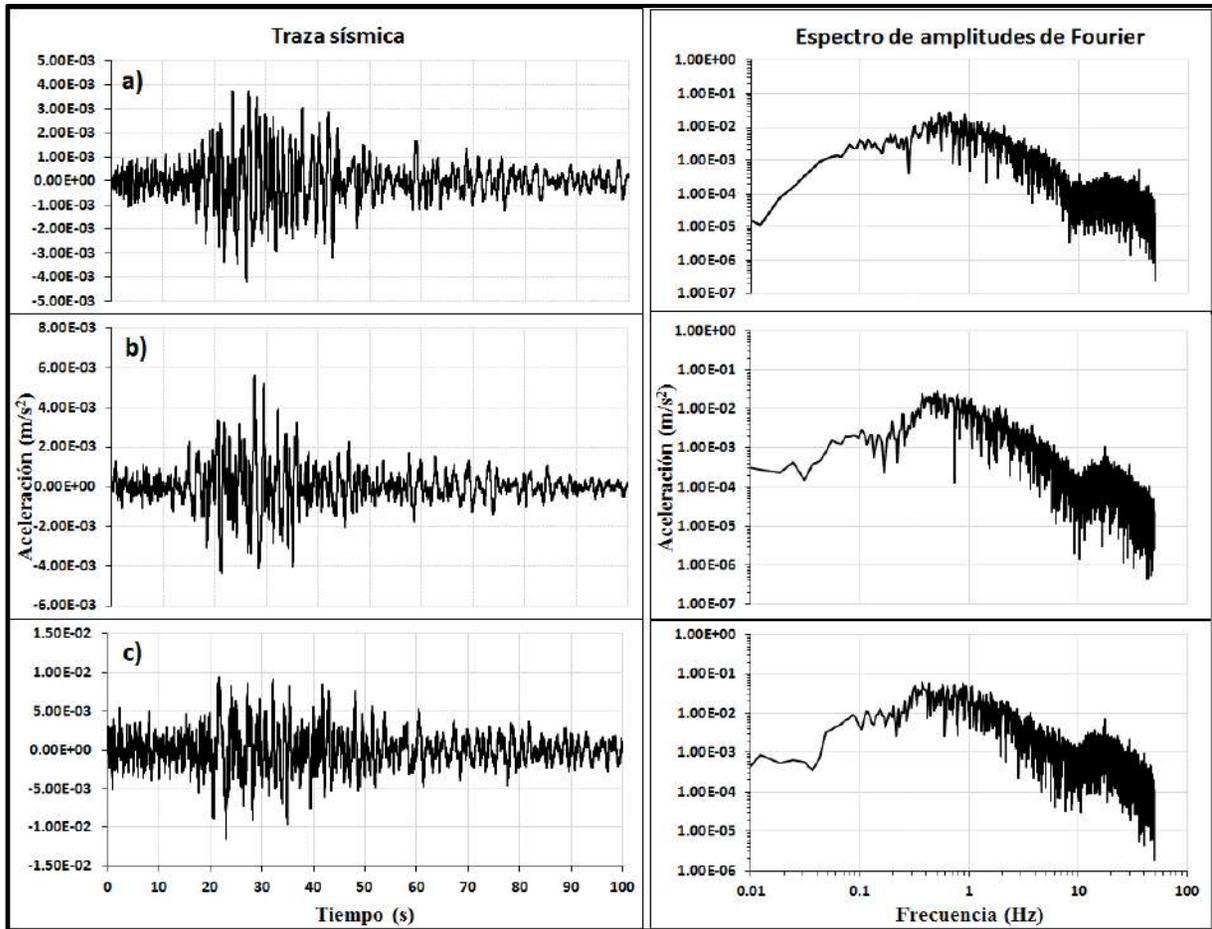


Figura A. 4 Trazas sísmicas del evento ocurrido el 21 de agosto del 2013 en su componente a) Este, b) norte y c) vertical con el EAF correspondiente en su parte derecha.

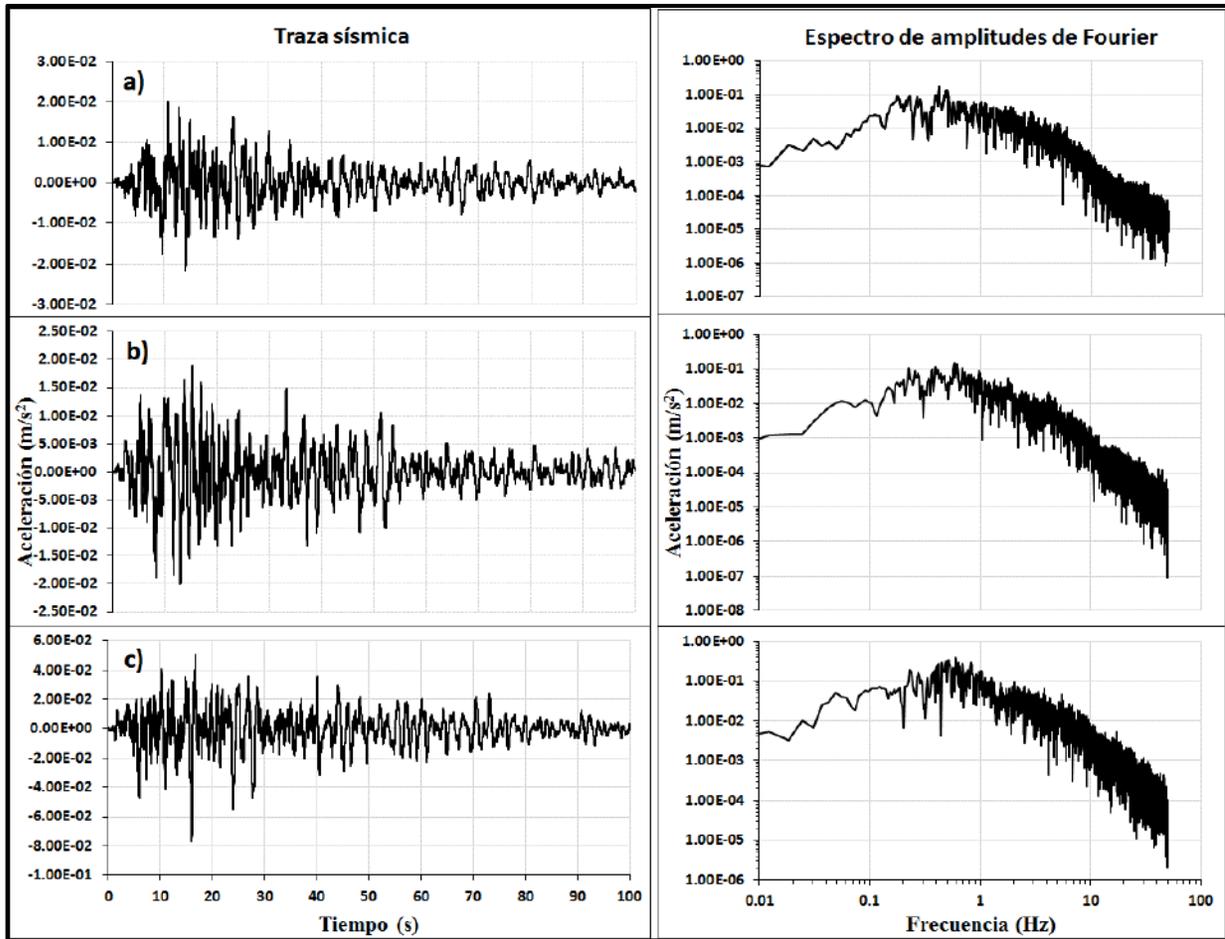
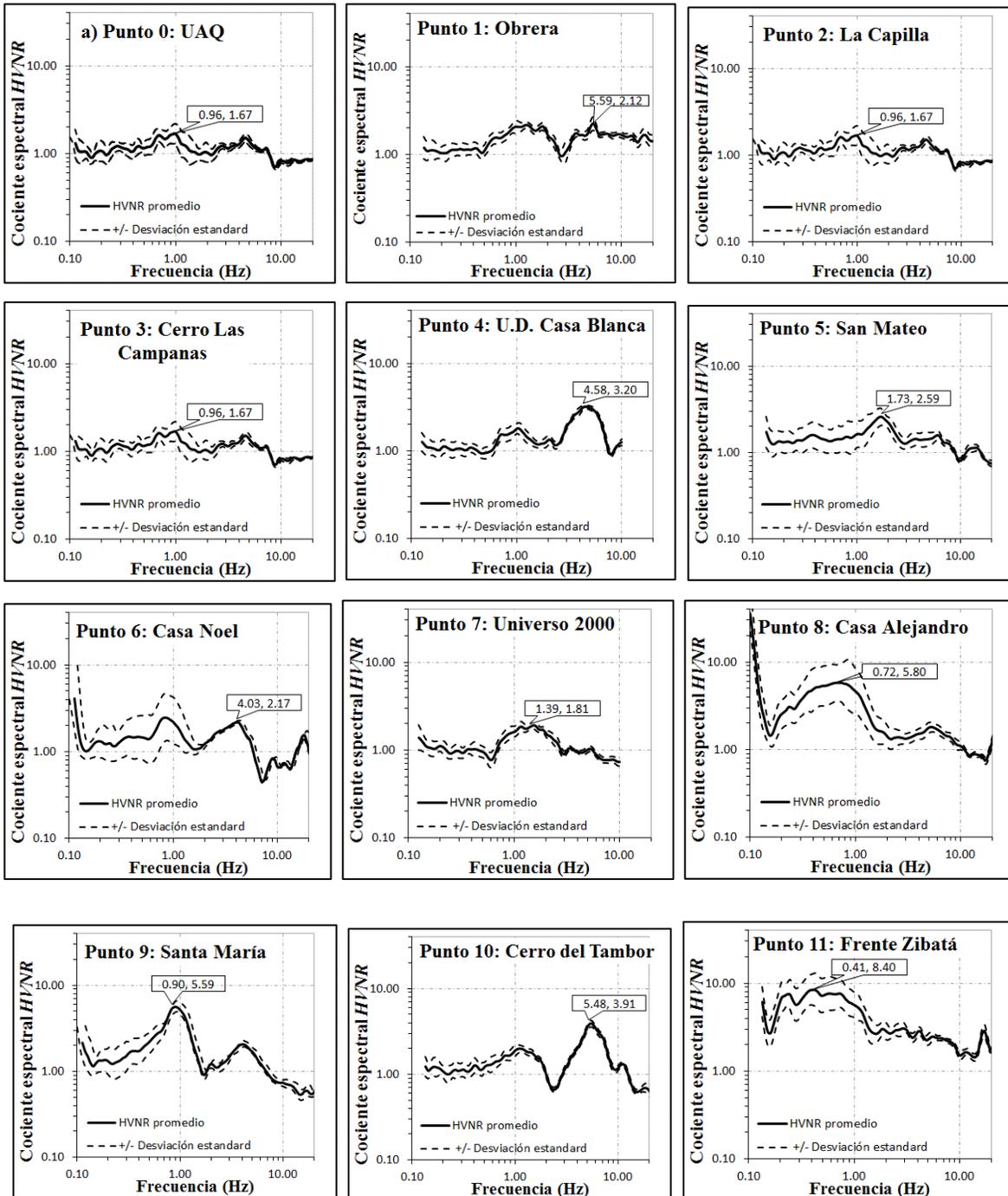
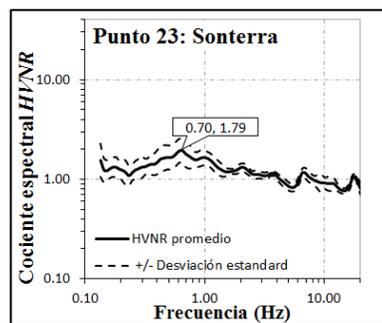
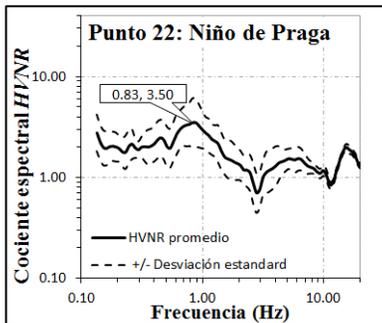
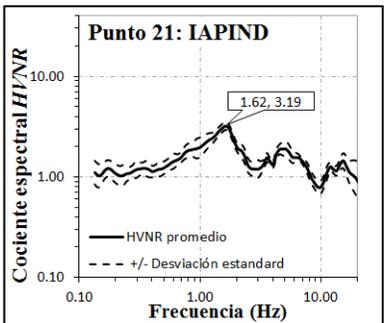
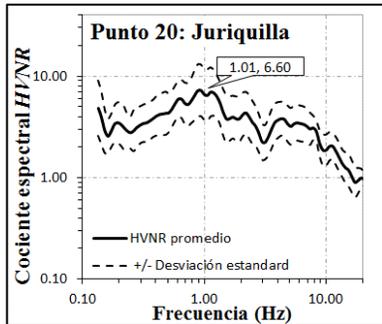
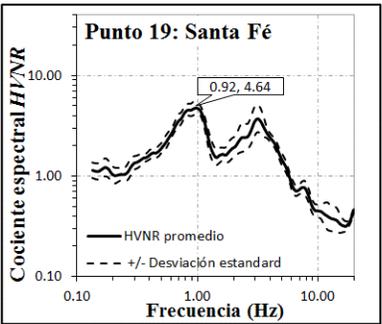
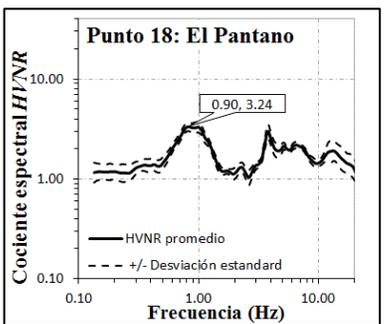
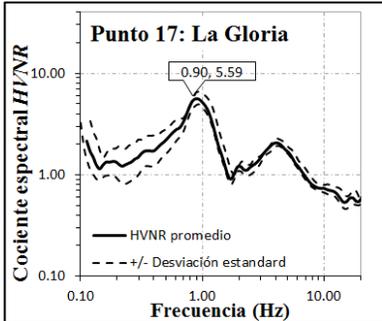
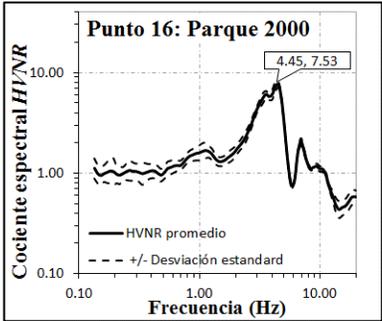
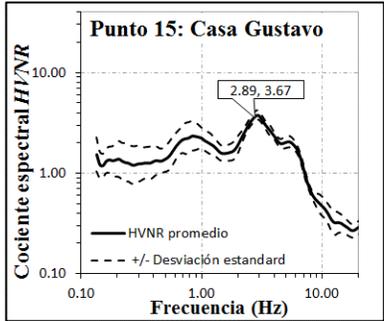
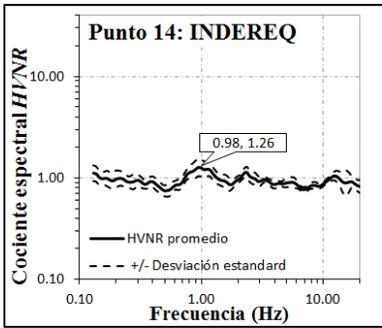
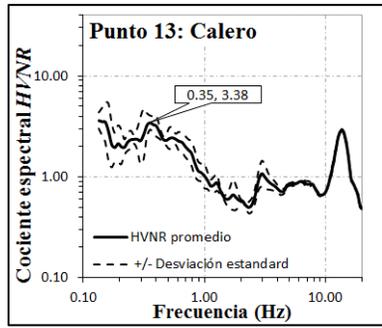
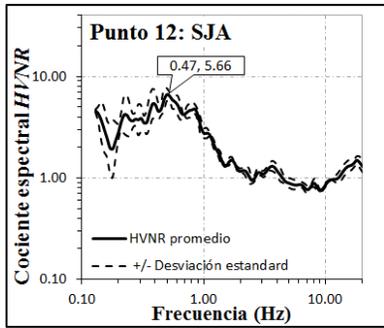
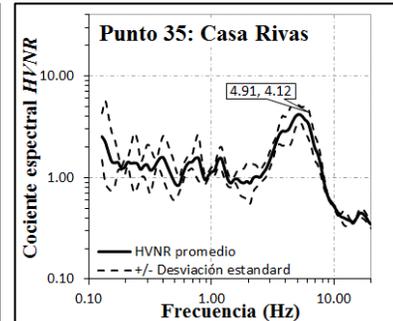
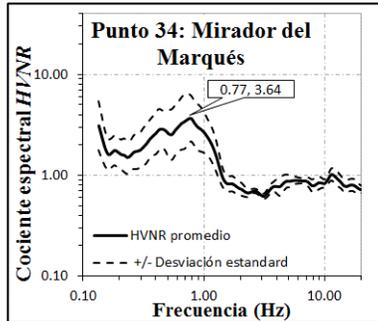
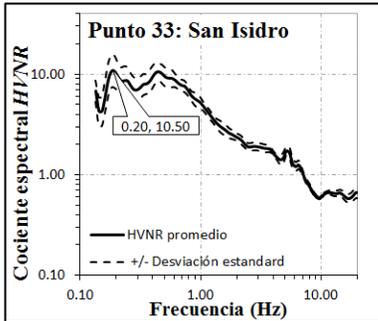
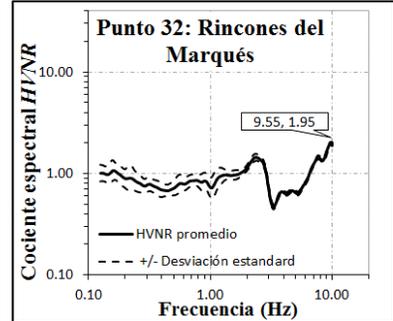
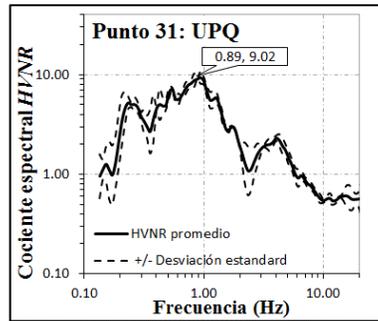
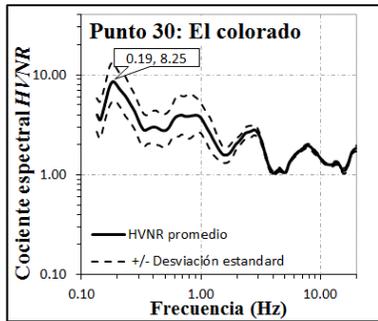
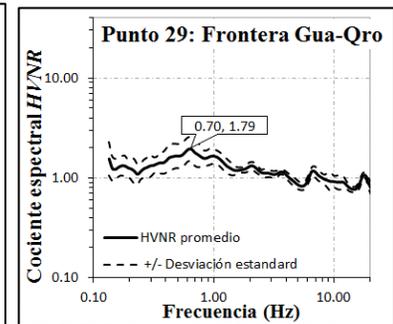
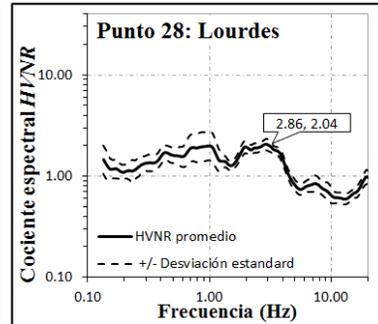
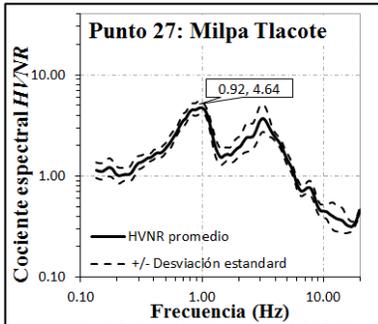
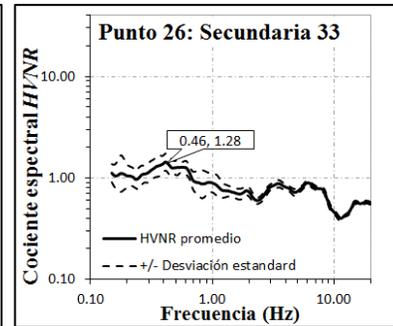
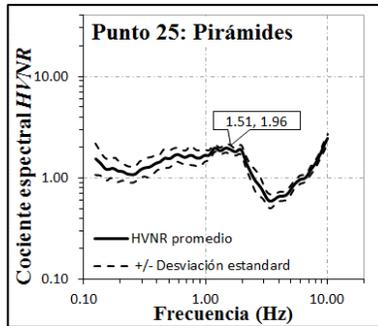
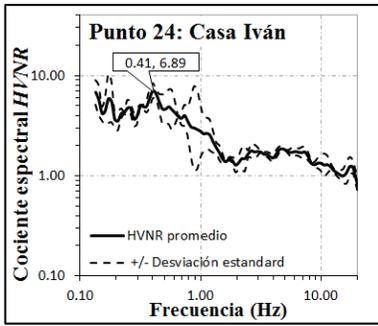


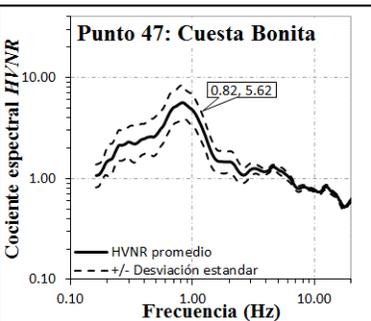
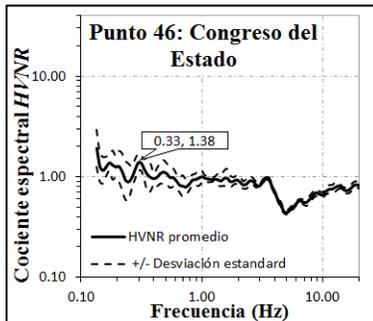
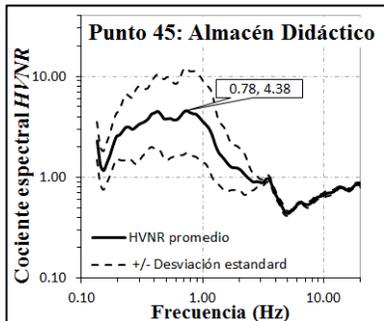
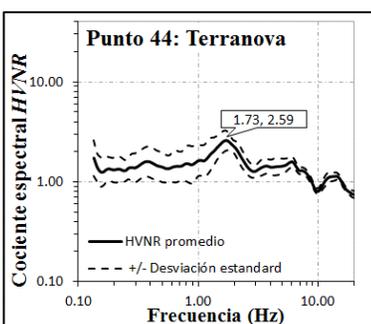
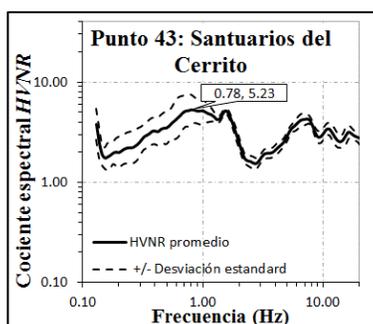
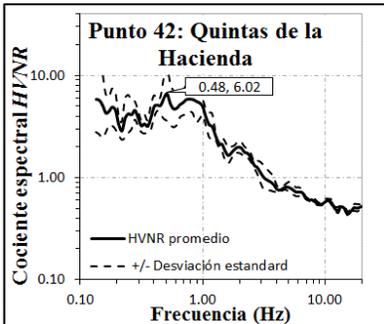
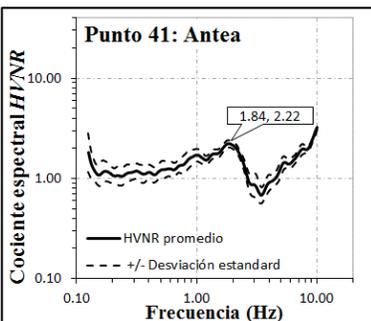
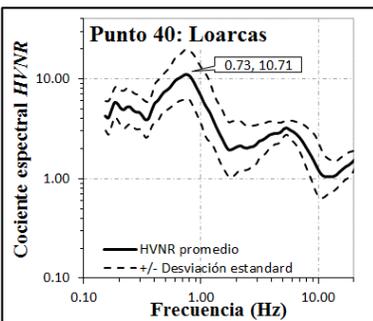
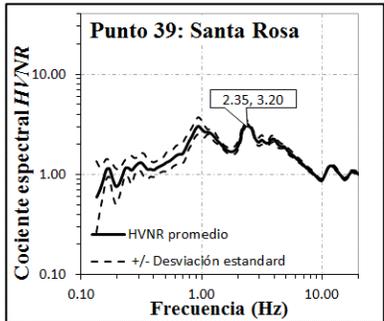
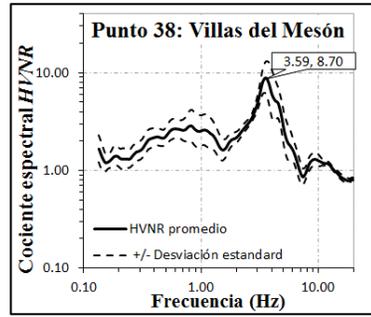
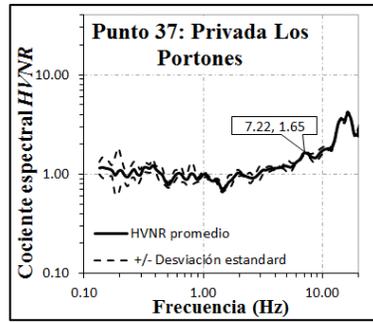
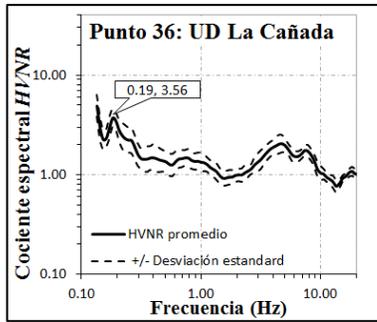
Figura A. 5 Trazas sísmicas del evento ocurrido el 19 de septiembre del 2017 en su componente a) Este, b) norte y c) vertical con el EAF correspondiente en su parte derecha.

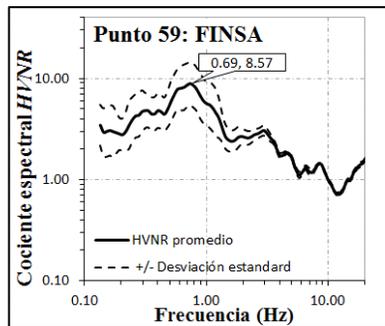
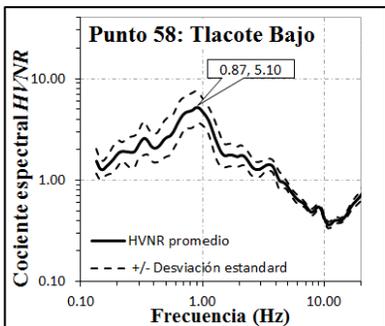
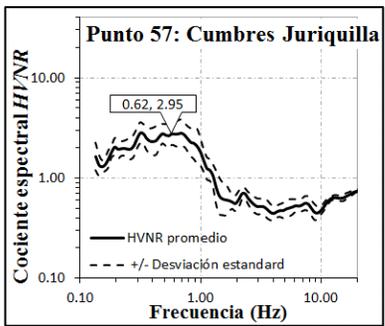
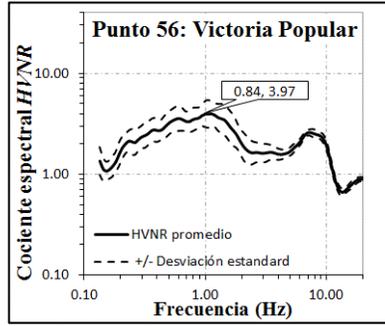
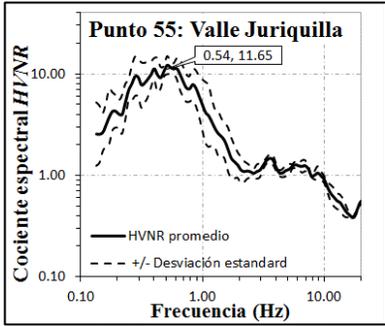
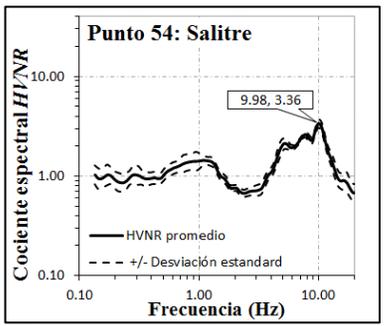
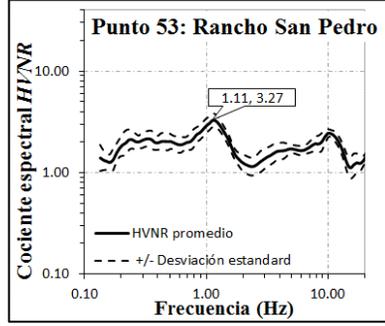
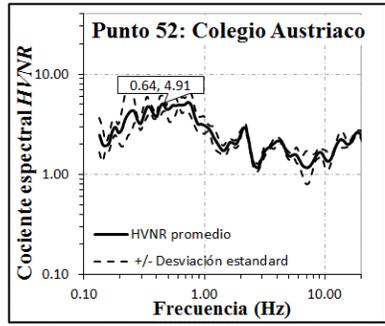
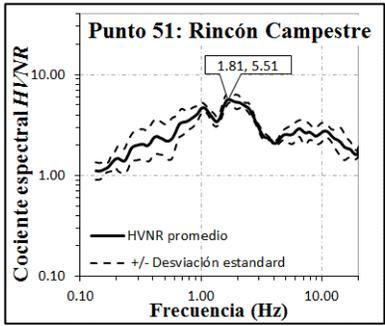
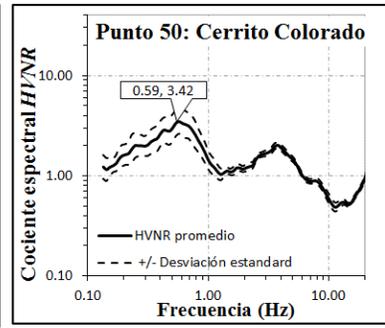
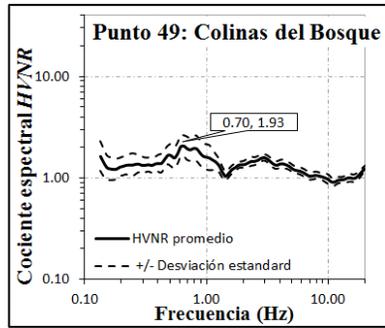
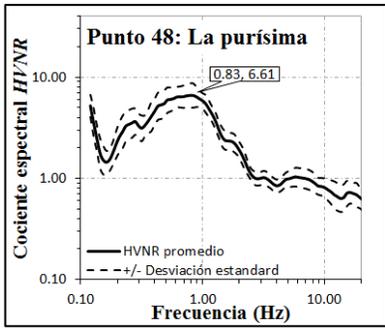
APÉNDICE 2. Funciones de transferencia empíricas (HVNR).

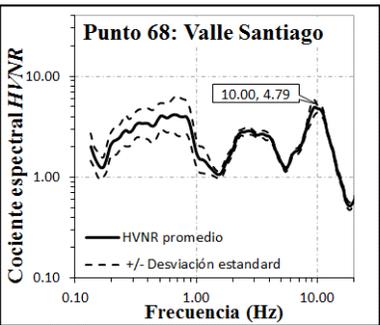
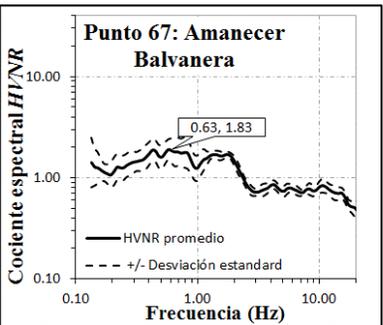
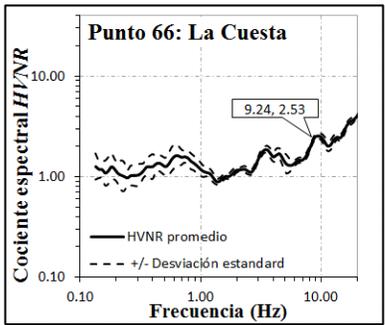
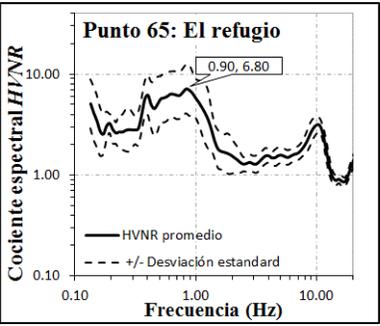
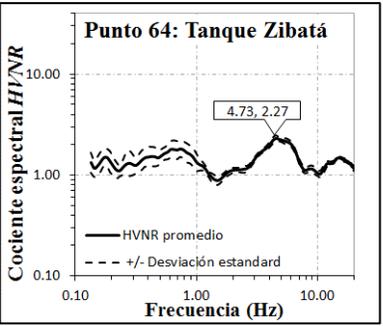
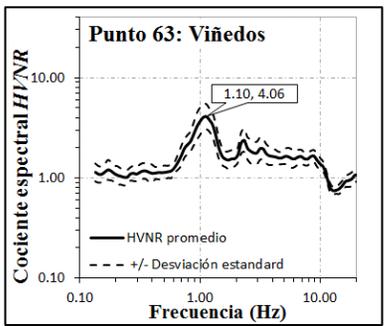
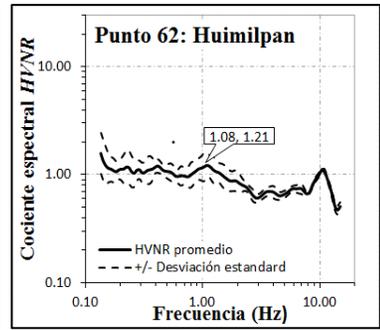
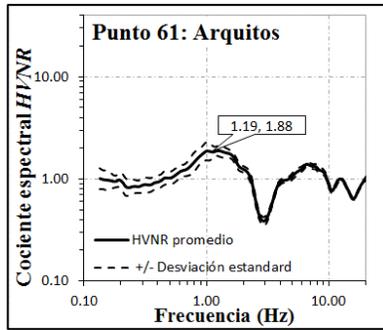
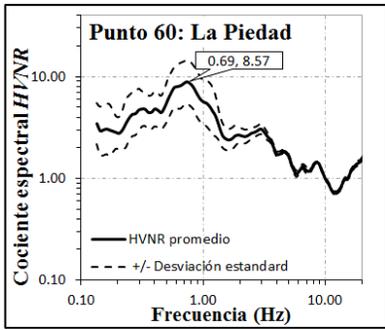












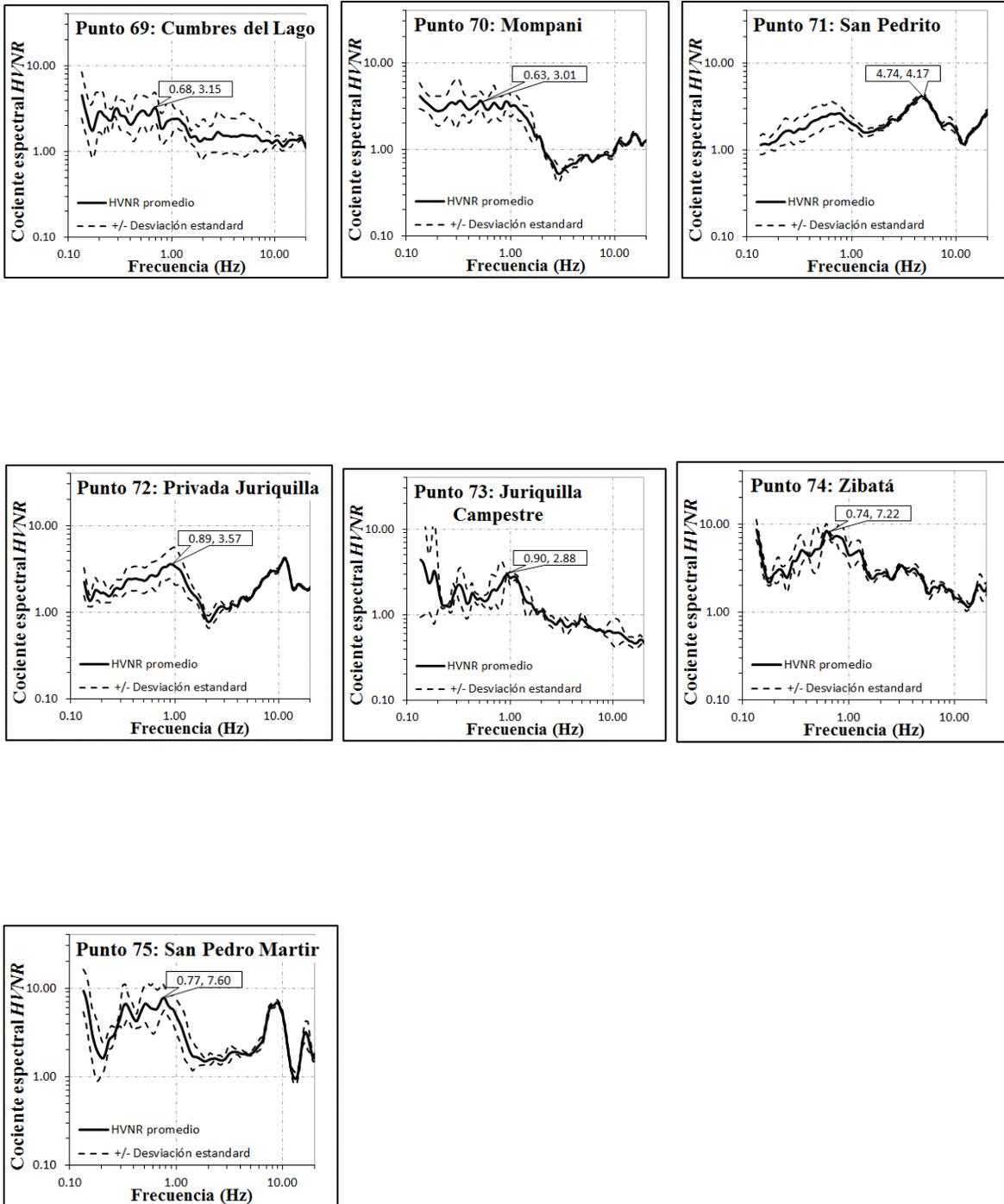


Figura A. 6 Funciones de Transferencia Empírica obtenidas aplicando la técnica HVNR en todos los sitios donde se realizaron registros de microtemores.

APÉNDICE 3. Algoritmo para generar acelerogramas sintéticos.

```
%Algoritmo para generar acelerogramas sintéticos
clear all;          %borra las variables
close all;         %cierra todas las ventanas
clc;               %limpia la ventana de comandos

%Datos de entrada para ruido EN ACELERACIÓN
V= load ('0_V.txt'); %Señal de microtremor en componente Vertical
V=V';

N= load ('0_N.txt'); %Señal de microtremor en componente Norte
N=N';

E= load ('0_E.txt'); %Señal de microtremor en componente Este
E=E';

Fs=100; %Frecuencia de muestreo por segundo

dt=1/Fs;

%Filtrado de la señal en rango sísmico de interés
Fca=[0.1 10]; %Rango de interés (0.10-10 Hz)

[b,a]= butter(5,2*Fca/Fs, 'bandpass'); %Filtro Butterworth utilizado

V=filter(b,a,V); %Señal filtrada componente Vertical

N=filter(b,a,N); %Señal filtrada componente Norte

E=filter(b,a,E); %Señal filtrada componente Este

%vectores de tiempo de las señales
te= 0:1/Fs:(length(E)-1)/Fs; %Vector de tiempo componente Este

tn= 0:1/Fs:(length(N)-1)/Fs; %Vector de tiempo componente Norte

tv= 0:1/Fs:(length(V)-1)/Fs; %Vector de tiempo componente Vertical

L=length(V); %Número de datos en todas las componente

t=0:dt:length(V)*dt-dt; %Vector de tiempo para todas las componentes
```

```

%División de la señal en ventanas
q = 1;           %Inicialización

dw = 9000;      %Longitud de ventana

w = (L-q)/dw;   %Número de ventanas

w=floor(w);     %Redondeo del valor w

%Selección de datos por ventana para cada componente
for i = 1:w
    V_V(i,:) = V(1,q:dw*i);
    N_N(i,:) = N(1,q:dw*i);
    E_E(i,:) = E(1,q:dw*i);
    q=q+dw;
end

%Tipo de ventana utilizada (Tukey)
win=tukeywin(dw,0.10);

%Señal en ventana
for i=1:w
    for j=1:dw
        V_V(i,j) = win(j) * V_V(i,j);
        N_N(i,j) = win(j) * N_N(i,j);
        E_E(i,j) = win(j) * E_E(i,j);
    end
end

%***** Técnica HVNR*****%

f=Fs/2*linspace(0,1,dw/2+1); %Vector de frecuencia

%Transformada rápida de Fourier para cada ventana para cada componente
for i=1:w
    VFFT(i,:) = fft(V_V(i,:))/dw;
    V_VFFT(i,:) = 2*abs(VFFT(i,1:dw/2+1));

    NFFT(i,:) = fft(N_N(i,:))/dw;
    N_NFFT(i,:) = 2*abs(NFFT(i,1:dw/2+1));

    EFFT(i,:) = fft(E_E(i,:))/dw;
    E_EFFT(i,:) = 2*abs(EFFT(i,1:dw/2+1));
end

%Promedio de FFT
VFFTP=mean(V_VFFT) .*Fs;
NFFTP=mean(N_NFFT) .*Fs;
EFFTP=mean(E_EFFT) .*Fs;

```

```

%Cálculo de H promedio con media cuadrática.
for i=1:(dw/2+1)
    HFFTP(i)=sqrt(((NFFTP(i)^2)+(EFTTP(i)^2))/2);
end

%Relación HVNR promedios.
for i=1:(dw/2+1)
    FTE(i)=HFFTP(i)/VFFTP(i);
end

%Valores del cociente espectral HVNR
FTE=FTE';

%Sismo de referencia
SY=load('sismo5.6_N.txt'); % Componente Horizontal de sismo

sy=length(SY); %Cantidad de datos en señal sísmica

ts= 0:1/Fs:(sy-1)/Fs; %Vector de tiempo sismo

figure,plot(ts,SY);

NFFTS=2^nextpow2(sy); %Potencia de 2 de la cantidad de datos del sismo

FFTS=fft(SY,NFFTS)/sy.*Fs; %Transformada rápida de Fourier del sismo

FFTS2=2*abs(FFTS(1:NFFTS/2+1)); %Parte real del espectro de Fourier

fs=Fs/2*linspace(0,1,NFFTS/2+1); %Vector de frecuencia para sismo

%Sismo sintético
FTE1=load('fte0.txt'); %FTE ampliada para poder multiplicar

ftel=Fs/2*linspace(0,1,(2^nextpow2(length(FTE1))))'; %Vector frecuencia

FFTR=FFTS.*FTE1; %Escalonamiento del EAF del sismo y la FTE para
obtener seudoespectro.

FFTR2=2*abs(FFTR(1:NFFTS/2+1)); %Parte real del seudoespectro

SR=ifft(FFTR,'symmetric').*Fs;%Transformada inversa de Fourier para
regresar seudoespectro al dominio del tiempo

sr=length(SR); %Cantidad de datos del acelerograma sintético.

tr= 0:1/Fs:(sr-1)/Fs; %Vector de tiempo para el acelerograma sintético.

```

```

%Plotea las señales de ruido y sismo en el dominio del tiempo
figure
subplot(4,1,1),plot(te,E);title('Este');
subplot(4,1,2),plot(tn,N);title('Norte'),ylabel('Aceleración ms-2');
subplot(4,1,3),plot(tv,V);title('Vertical');
subplot(4,1,4),plot(ts,SY);title('Sismo'),xlabel('Tiempo (s)');

%Plotea espectros de las señales de ruido en el dominio de la frecuencia
figure,loglog(f,NFFTP,'blue');hold on;loglog(f,EFFTP,'red');hold
on;loglog(f,VFFTP,'black');hold on;loglog(fs,FFTS2)
title('FFT'), xlabel('Frecuencia (Hz)'), ylabel('Amplitud'),grid on;
figure,loglog(f,FTE);title('FTE sitio'),
xlabel('Frecuencia(hz)'),ylabel('H/V');axis([0.1,10,0.1,20]);grid on;

%Resultados %Plotea EAF del sismo, FTE del sitio, SEAF del sitio y
Acelerograma sintético.
figure
subplot(2,2,1); loglog (fs,FFTS2); title('FFT sismo'),
xlabel('Frecuencia(hz)'), ylabel('Amplitud')
subplot(2,2,2); loglog (ftel,FTE1); title('FTE sitio modificada'),
xlabel('Frecuencia(hz)'),ylabel('H/V');axis([0.1,10,0.1,20]);grid on
subplot(2,2,3); loglog (fs,FFTR2); title('SEF Sintético'),
xlabel('Frecuencia(hz)'), ylabel('Amplitud')
subplot(2,2,4); plot (tr,SR); title('Acelerograma sintético'),
xlabel('Tiempo (s)'), ylabel('Aceleración (ms-2)')

%comparativas entre EAF del sismo y del AS
figure,loglog(fs,FFTS2,'g');hold
on;loglog(fs,FFTR2,'r'),title('Comparativa EFS'), xlabel('Frecuencia
(Hz)'), ylabel('Amplitud')
figure, plot (ts,SY,'b'); hold on; plot(tr,SR,'r'); title('Comparativa
Sismos'), xlabel('Tiempo (s)'), ylabel('Aceleración (ms-2)')

%Variación de amplitudes entre sismo y acelerograma sintético.
SC=SY./SR(1:10001,1);

figure,plot(ts,SC); title('Normalización Sismos'), xlabel('Tiempo (s)'),
ylabel('Aceleración (ms-2)')

% dlmwrite ('acel0.txt',SR)

%fin de la rutina

```

APÉNDICE 4. Validación de acelerogramas sintéticos.

Es fundamental validar la metodología presentada para generar acelerogramas sintéticos haciendo una comparativa entre registros de sismos reales y los AS creados. Una forma de demostrar esto es mediante la siguiente información: sabemos que en una zona donde el efecto de sitio es despreciable, las ondas sísmicas que viajan durante la ocurrencia de un sismo no se amplificarán significativamente. Por lo tanto al generar un AS para este tipo de sitios, la señal sintética obtenida debería ser similar a la señal del sismo de referencia. Por ejemplo, involucremos a la estación de registro CU UAQ y al punto en CGEO que están libres de efecto de sitio. Si utilizamos cualquier sismo que haya sido registrado en ambas estaciones (como el sismo de Mw 5.6 ocurrido el 01 de mayo del 2012 en Guerrero tratado en la sección 4.2.2) y aplicamos la metodología mostrada, el AS generado para CGEO debería de ser muy parecido al sismo de referencia registrado en CU UAQ y viceversa. Se ha llevado a cabo este ejemplo y en Figura A. 7 se muestran los resultados donde efectivamente el AS obtenido para el sitio de interés (CGEO) es muy similar a la señal del sismo de referencia registrado en CU UAQ, además también se muestra el acelerograma real registrado en ambas estaciones sísmicas (CU UAQ y CGEO) donde se puede apreciar la similitud entre ambos registros, no obstante, existen variaciones en el nivel de aceleración debido a que si bien se trata de sitios con características estratigráficas similares los niveles de amplificación pueden ser diferentes en un determinado rango de frecuencias. Con esto, basándose en el primer gráfico y lo establecido en el texto referente a éste, se valida la metodología mostrada para generar acelerogramas sintéticos.

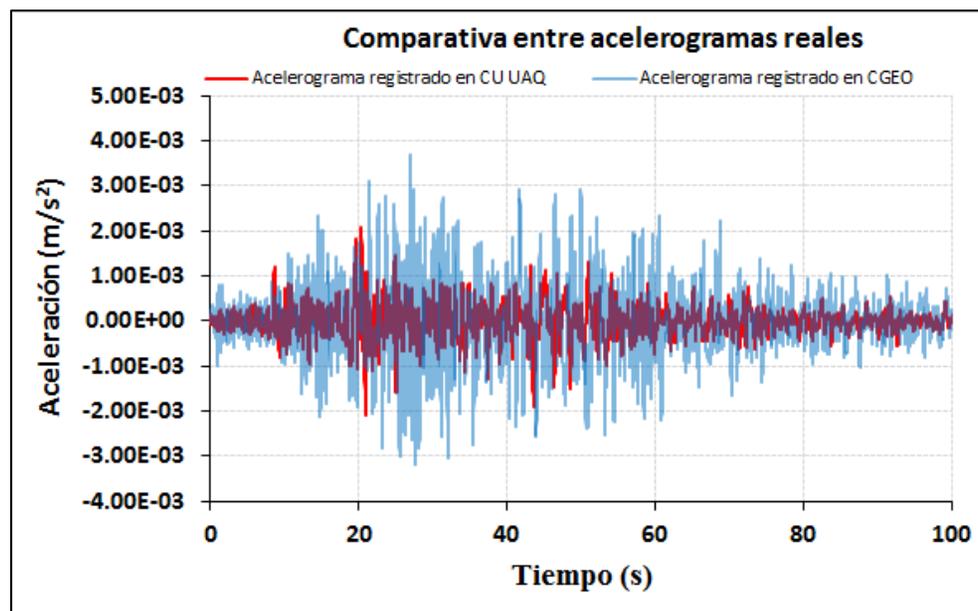
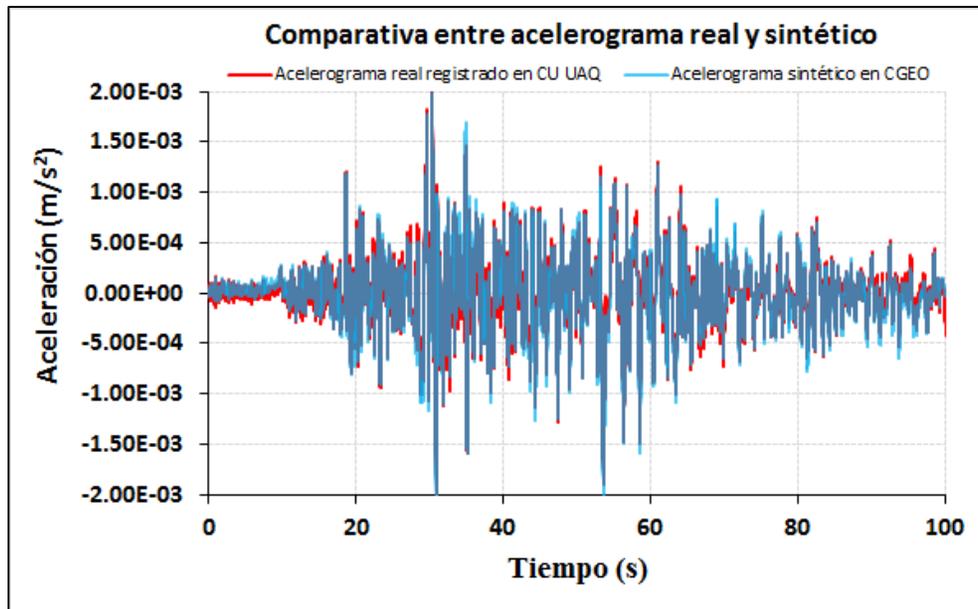
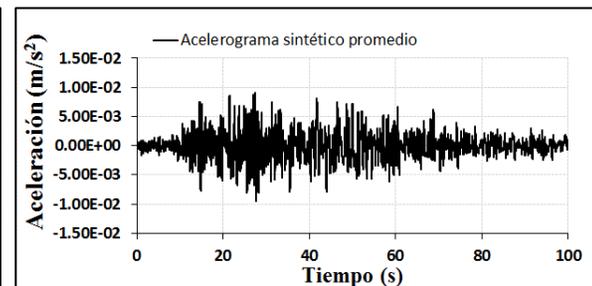
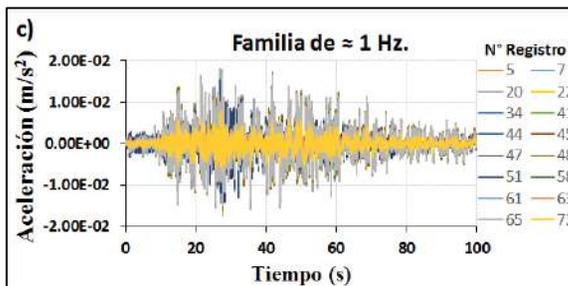
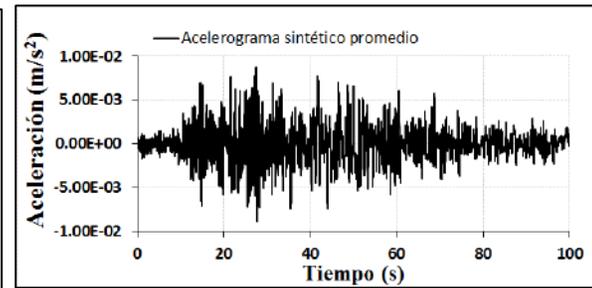
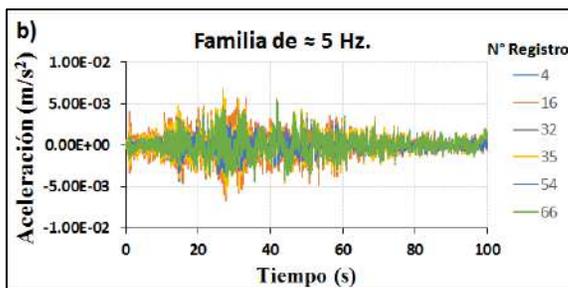
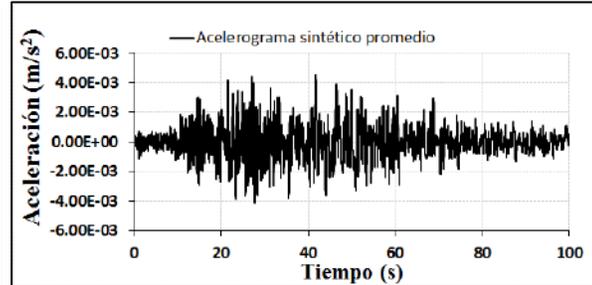
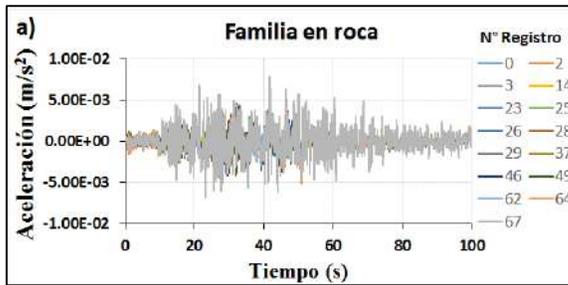


Figura A. 7 Validación de AS utilizando una sola estación de referencia (arriba) y comparando dos registros del mismo sismo en dos estaciones diferentes CU UAQ y CGEO (abajo)

APÉNDICE 5. Acelerogramas sintéticos.

a) Sismo del 01 de mayo del 2012.



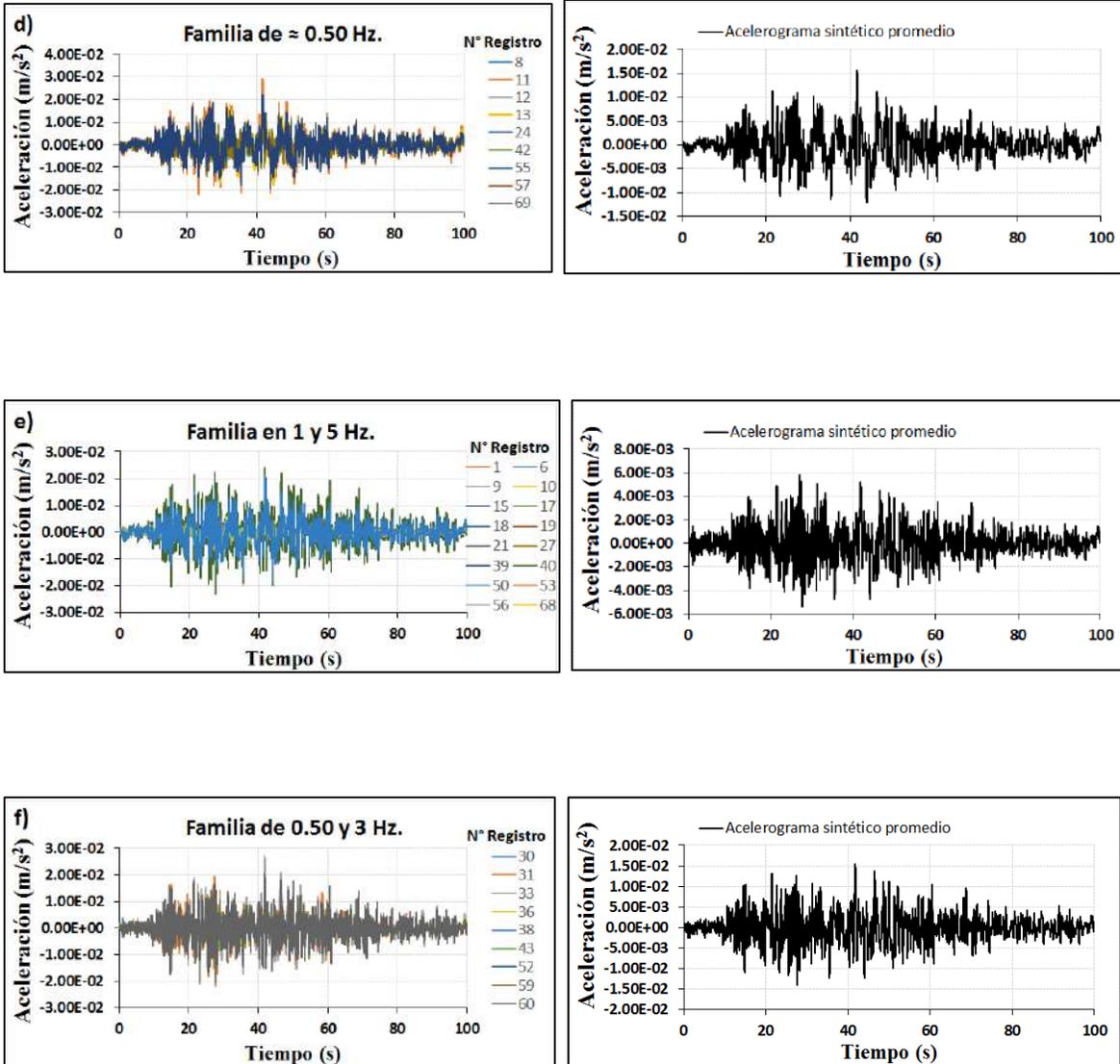
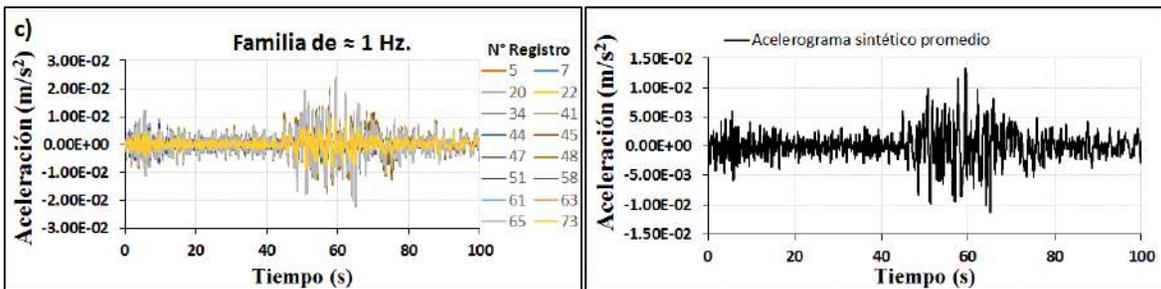
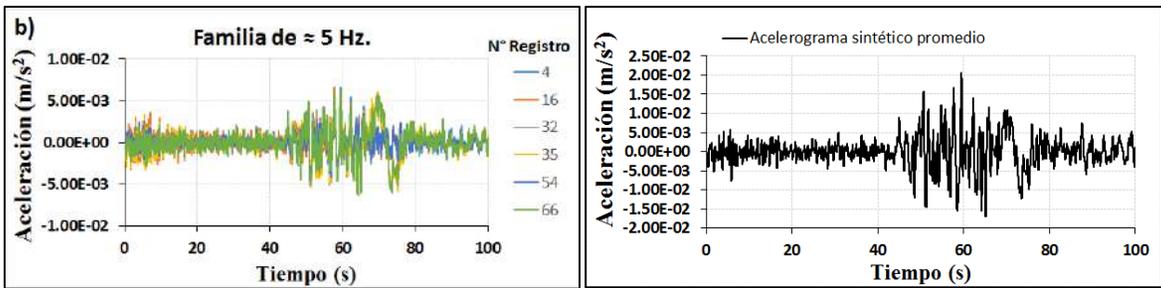
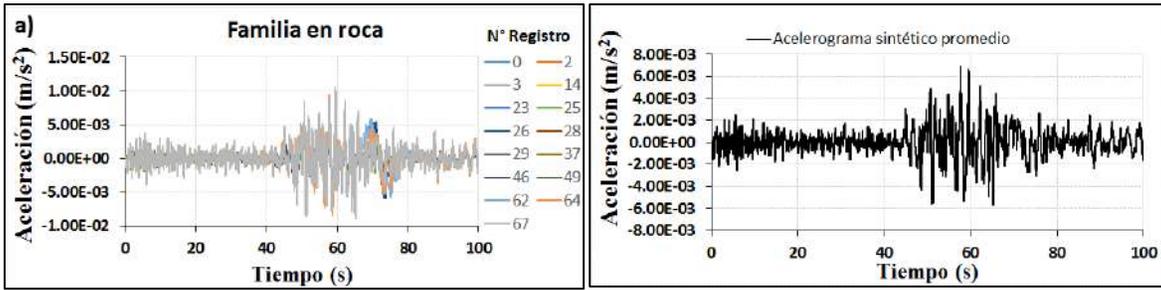


Figura A. 8 AS para el sismo del 01 de mayo del 2012 agrupados por familia espectral a) en roca, b) 5 Hz, c) 1 Hz, d) 0.50 Hz, e) 1 y 5 Hz, f) 0.50 y 3 Hz, (izquierda), así como el promedio de ellos que caracteriza a la zona (derecha).

b) Sismo del 11 de abril del 2012.



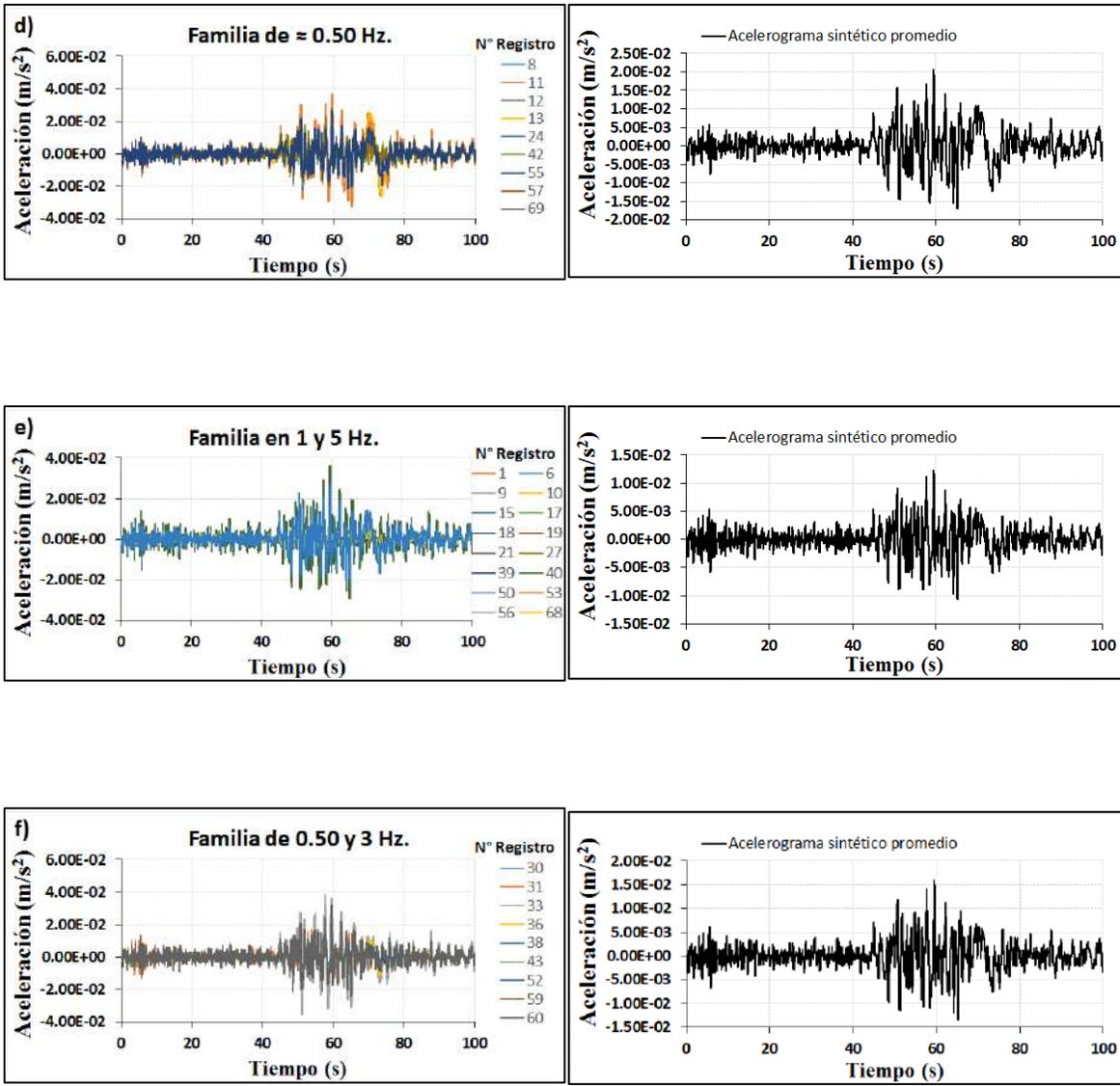
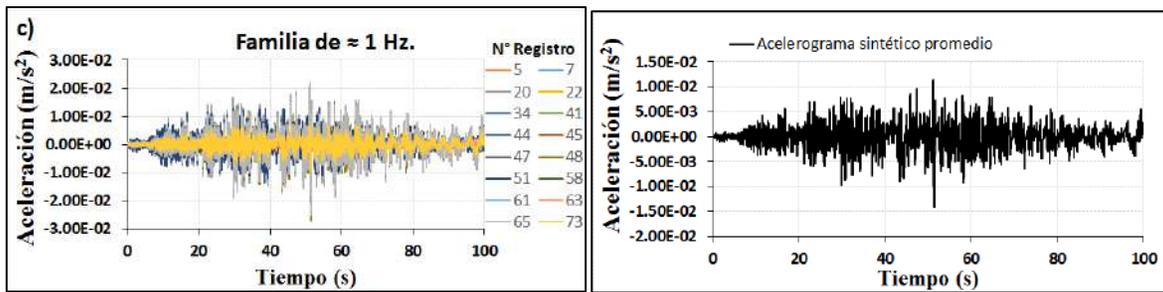
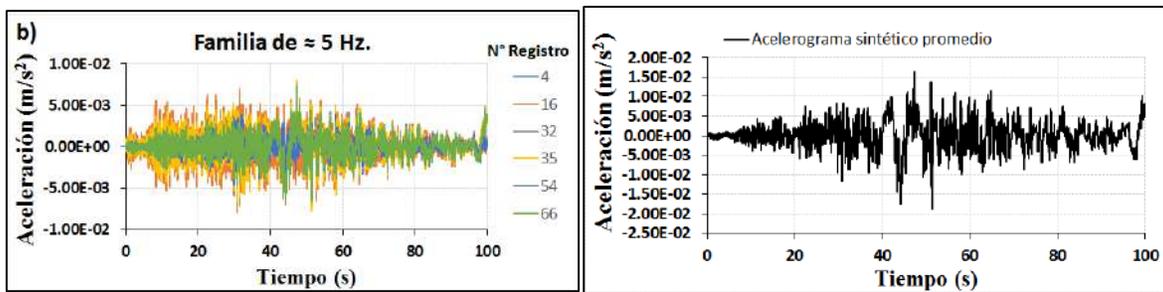
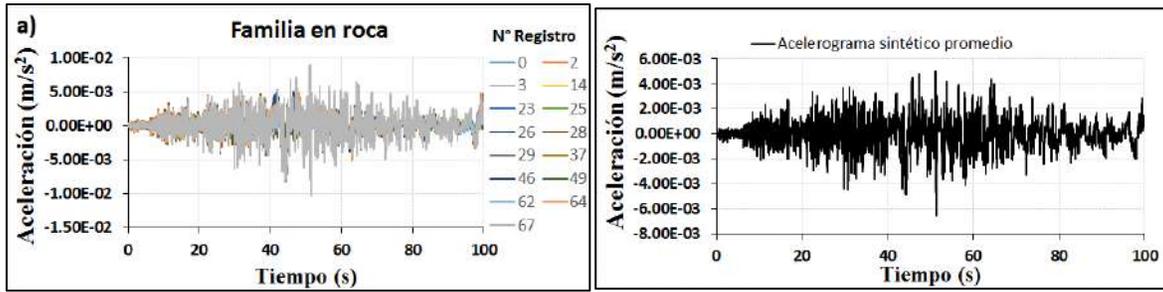


Figura A. 9 AS para el sismo del 11 de abril del 2012 agrupados por familia espectral a) en roca, b) 5 Hz, c) 1 Hz, d) 0.50 Hz, e) 1 y 5 Hz, f) 0.50 y 3 Hz, (izquierda), así como el promedio de ellos que caracteriza a la zona (derecha).

c) Sismo del 15 de noviembre del 2012.



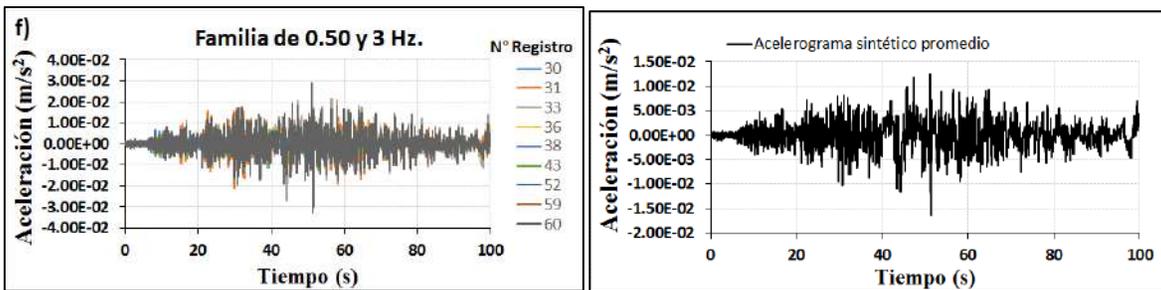
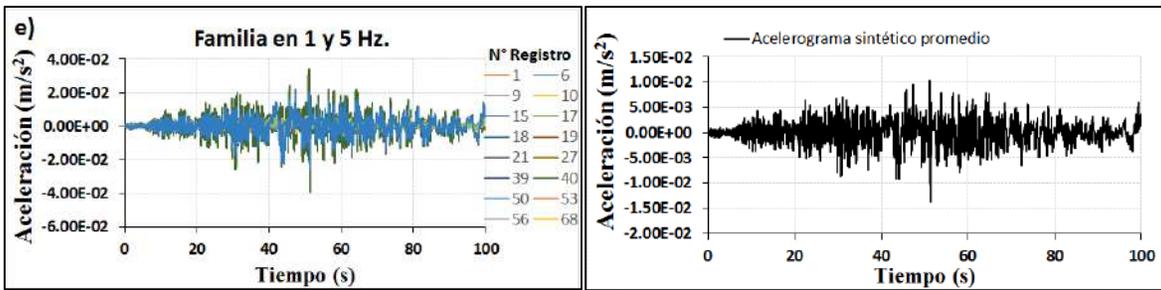
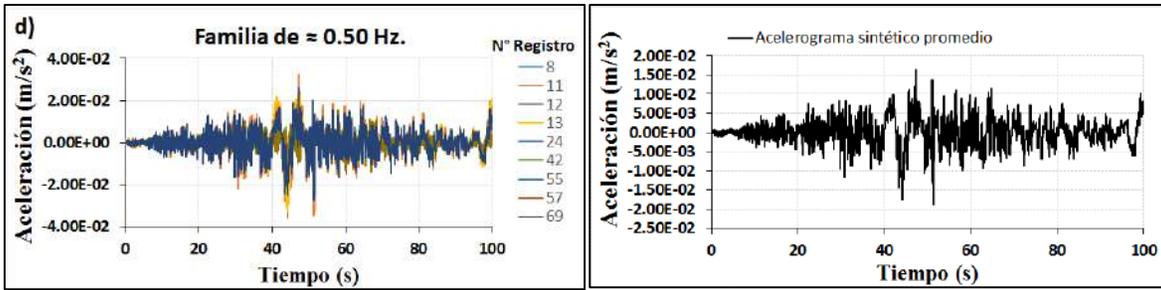
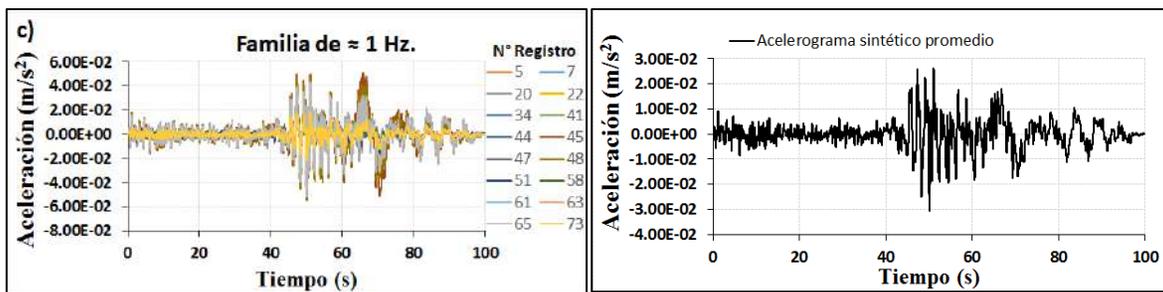
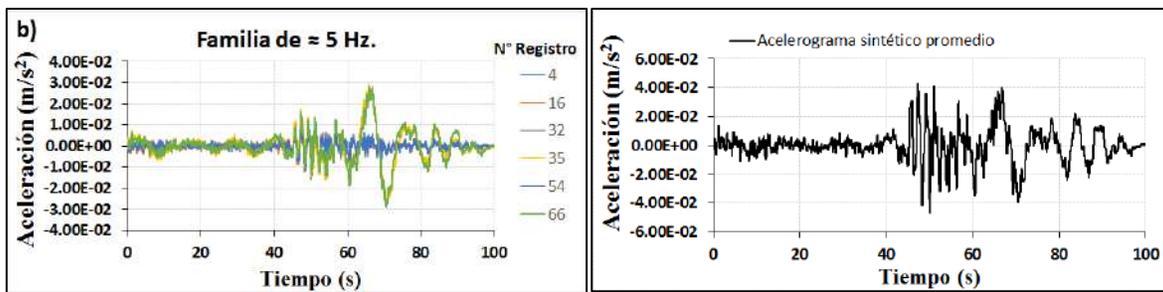
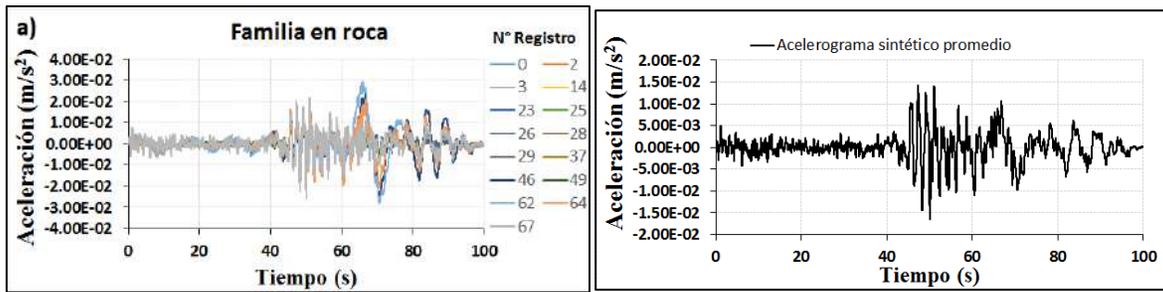


Figura A. 10 AS para el sismo del 15 de noviembre del 2012 agrupados por familia espectral a) en roca, b) 5 Hz, c) 1 Hz, d) 0.50 Hz, e) 1 y 5 Hz, f) 0.50 y 3 Hz, (izquierda), así como el promedio de ellos que caracteriza a la zona (derecha).

d) Sismo del 21 de agosto del 2013.



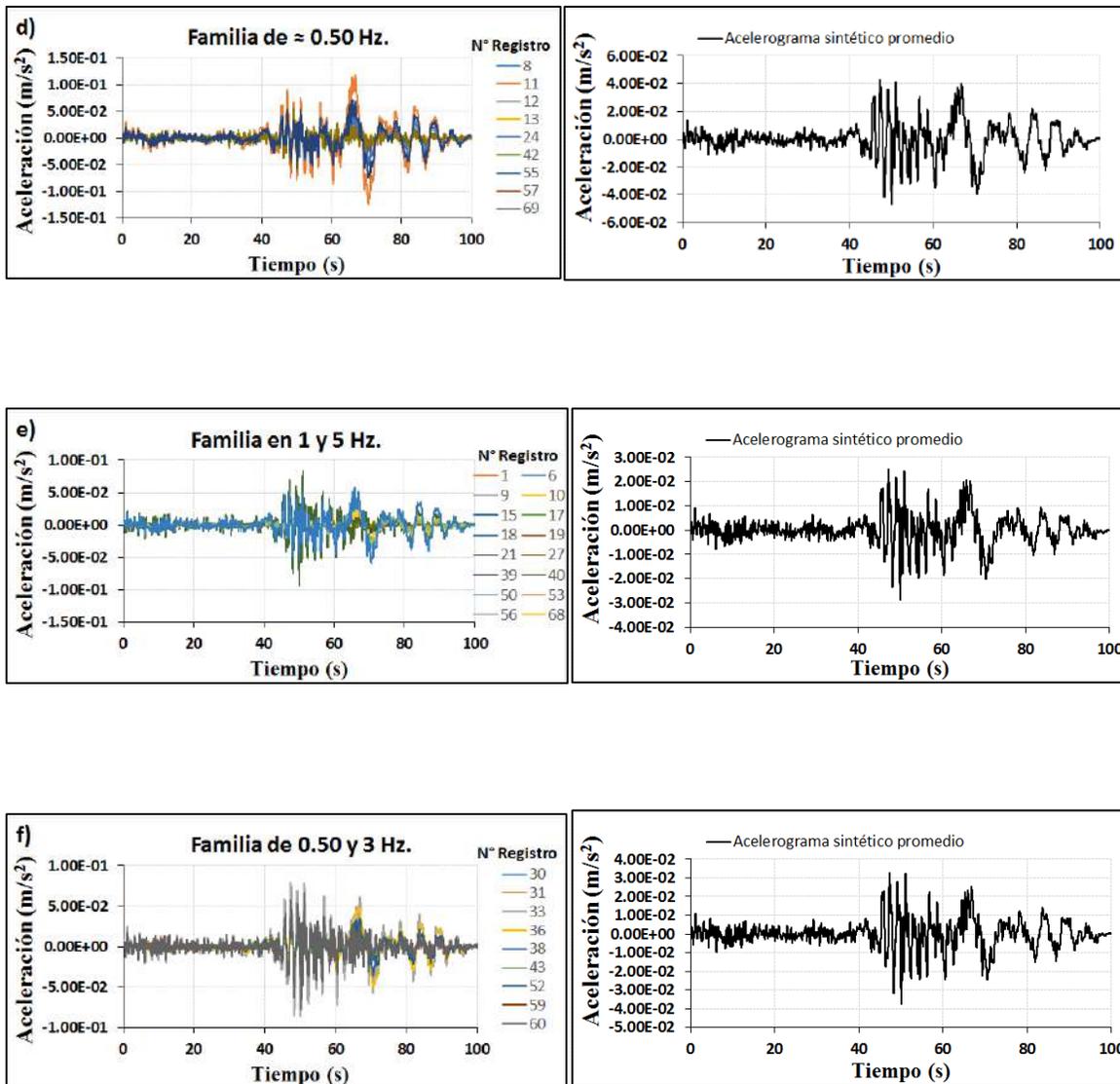
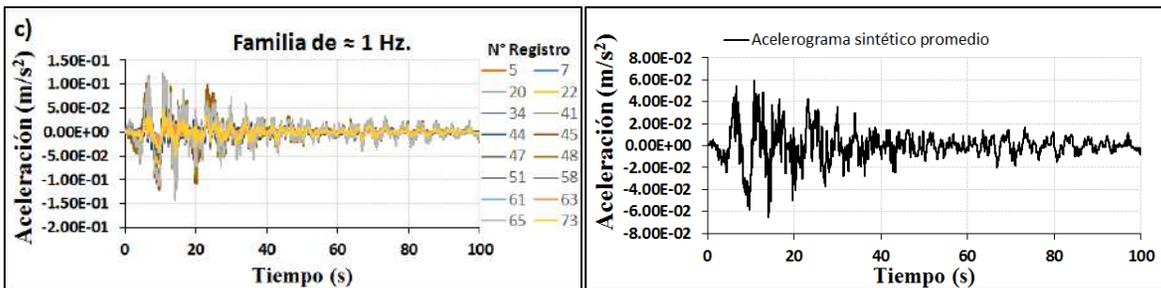
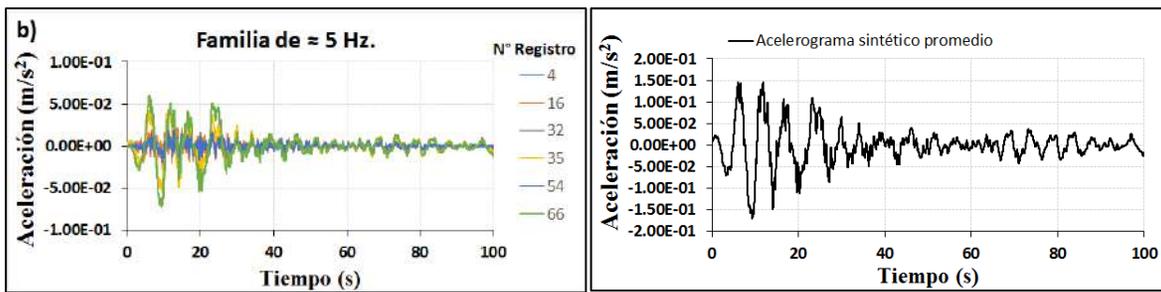
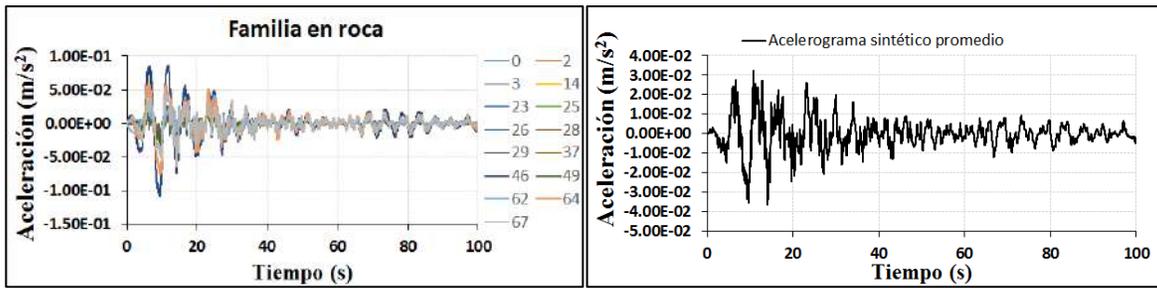


Figura A. 11 AS para el sismo del 21 de agosto del 2013 agrupados por familia espectral a) en roca, b) 5 Hz, c) 1 Hz, d) 0.50 Hz, e) 1 y 5 Hz, f) 0.50 y 3 Hz, (izquierda), así como el promedio de ellos que caracteriza a la zona (derecha).

e) Sismo del 19 de septiembre del 2017.



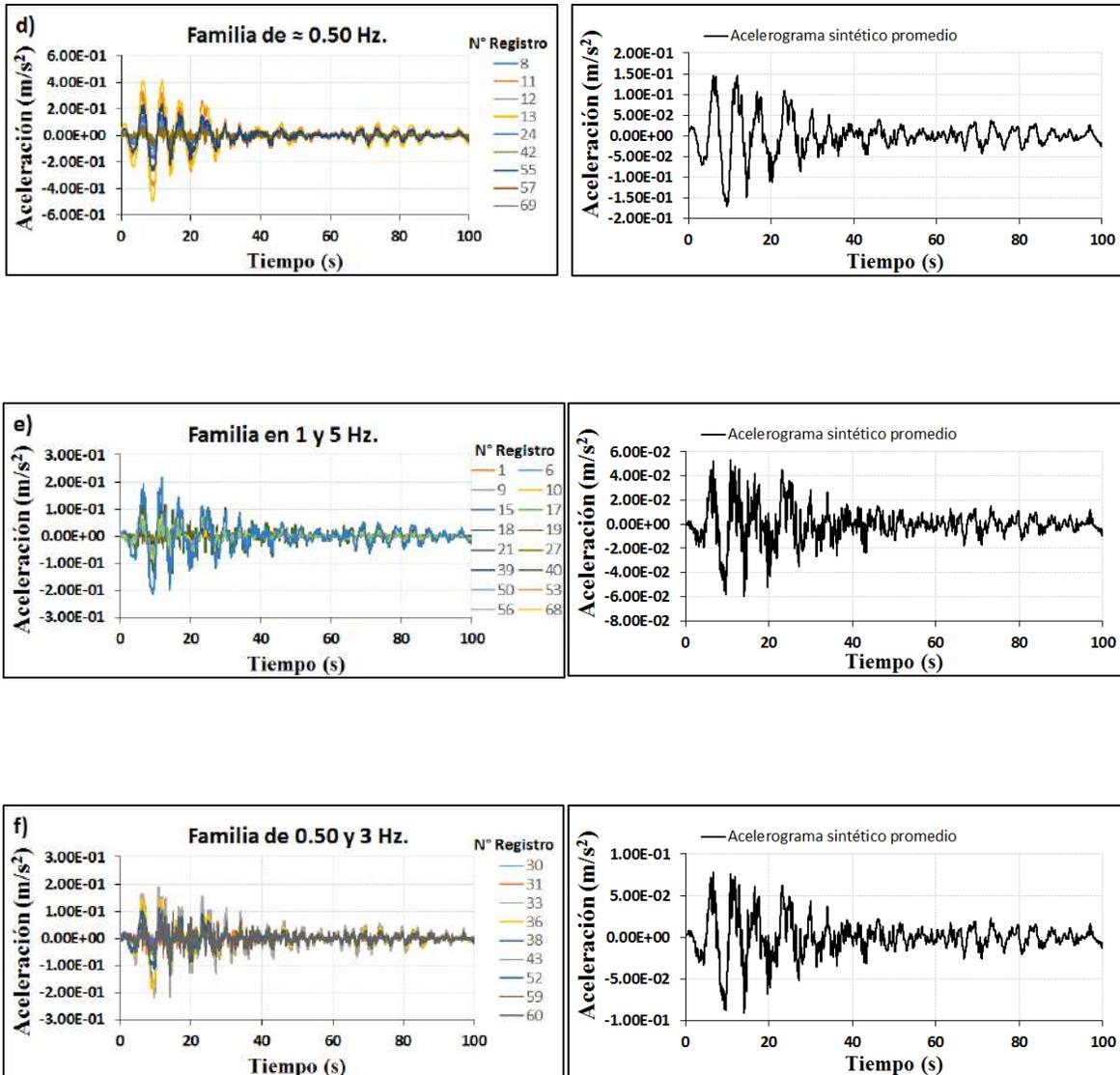


Figura A. 12 AS para el sismo del 19 de septiembre del 2017 agrupados por familia espectral a) en roca, b) 5 Hz, c) 1 Hz, d) 0.50 Hz, e) 1 y 5 Hz, f) 0.50 y 3 Hz, (izquierda), así como el promedio de ellos que caracteriza a la zona (derecha).

APÉNDICE 6. Análisis de Funciones de Transferencia Teóricas (FTT).

Con fin de validar la congruencia de los resultados obtenidos, se muestra un ejemplo teórico de cómo la respuesta del suelo, asociada a la influencia de los estratos que lo componen, puede ser obtenida mediante FTT de acuerdo con el modelo matemático de Haskell (1962) que considera la profundidad, densidad (ρ), velocidad de onda de cortante (β) y factor de amortiguamiento (ζ) del estrato correspondiente.

Primero fue necesario elegir un sitio para asociarlo a una estratigrafía determinada que haya sido reportada previamente con base en estudios de pozos litológicos como los reportados por Álvarez-Manilla *et al.* (2002) y Pacheco (2007).

Después se generó una FTT donde, con base en la influencia de tanto estratos profundos como superficiales, se logró apreciar un pico marcado en bajas y altas frecuencias respectivamente, consistente con lo reportado por Lermo *et al.* (2013) en cuanto a respuesta del suelo.

Finalmente, se calculó una FTT para cada familia espectral con base en los datos geológicos y se hace una comparativa con respecto a las Funciones de Transferencia Empíricas (FTE) donde se puede apreciar que el modelo matemático teórico se ajusta apropiadamente al modelo empírico en cuanto al pico fundamental (Figura A. 13). Además en Figura A. 14 se muestran los modelos estratigráficos utilizados para filtrar la señal y con ella obtener la FTT.

Con esta información se determinó que los resultados obtenidos de manera empírica son congruentes con los modelos teóricos lo cual representa una gran ventaja para las FTE debido a que se puede obtener una misma respuesta del suelo sin necesidad de hacer estudios geológicos o cuando se desea obtener de manera rápida una estimación del efecto de sitio. No obstante dependerá del tipo de estudio que se esté realizando para utilizar una técnica u otra.

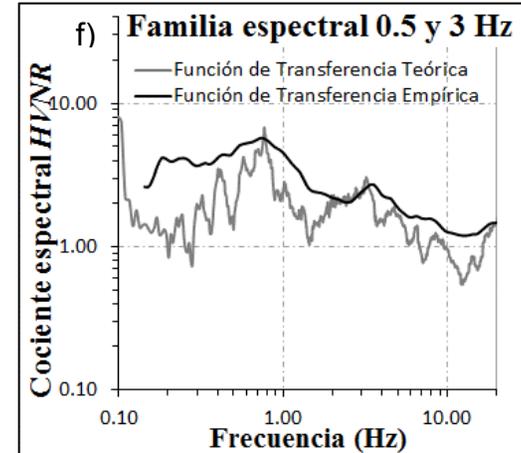
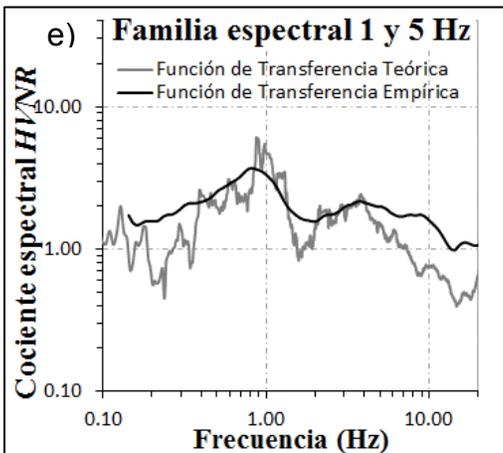
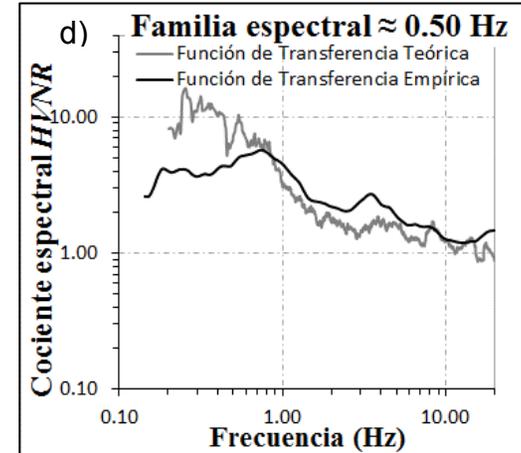
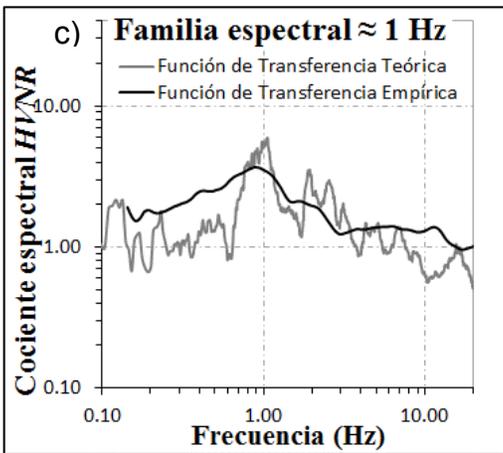
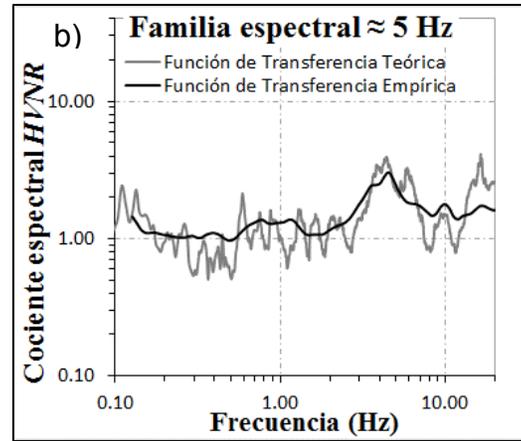
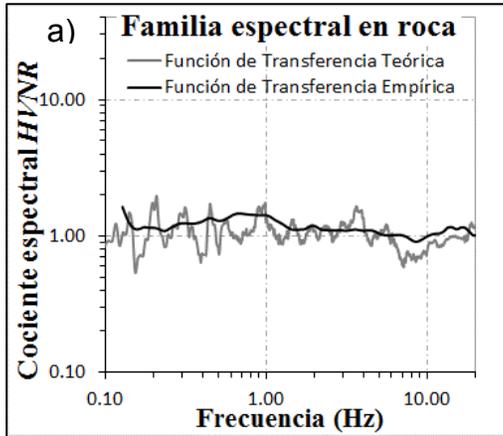


Figura A. 13 Funciones de transferencia teóricas y empíricas para familias espectrales a) en roca, b) 5 Hz, c) 1 Hz, d) 0.50 Hz, e) 1 y 5 Hz y f) 0.50 y 3 Hz utilizando la técnica de Haskell y $HVNR$.

Estrato	β (m/s)	ρ (gr/cm ³)	ζ (%)	Profundidad (m)	Tipo de suelo
a) Familia espectral en roca					
1	120	1.6	2.00	5.5	Arena
2	1500	2.7	1.00	500	Caliza
b) Familia espectral \approx 5 Hz.					
1	120	2.6	2.00	4	Basalto (vesicular)
2	440	2.8	2.00	180	Basalto (masivo)
3	3000	2.0	1.00	500	Toba
c) Familia espectral \approx 1 Hz.					
1	150	1.7	4.00	10	Arcilla arenosa
2	280	2.0	2.00	200	Arcilla compacta
3	1000	2.0	1.00	500	Toba
d) Familia espectral \approx 0.50 Hz.					
1	250	1.7	2.00	220	Arena con gravas
2	1000	2.0	1.00	500	Toba
e) Familia espectral en 1 y 5 Hz.					
1	105	2.0	3.00	2.7	Toba alterada
2	250	1.7	2.00	220	Arena con gravas
3	1000	2.0	1.00	500	Toba
f) Familia espectral en 0.50 y 3 Hz.					
1	105	2.0	3.00	2.7	Toba alterada
2	250	1.7	2.00	220	Arena con gravas
3	1000	2.0	1.00	500	Toba

Figura A. 14 Modelos estratigráficos unidimensionales utilizados para obtener FTT correspondiente a la familia espectral a) en roca, b) 5 Hz, c) 1 Hz, d) 0.50 Hz, e) 1 y 5 Hz y f) 0.50 y 3 Hz.