



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

***MAPAS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA PARA EL MUNICIPIO DE
CALPULALPAN, TLAXCALA.***

T E S I S

PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A:

María Candelaria Hernández Díaz

Directores de Tesis:

Dr. Eduardo Ismael Hernández

M. en C. Víctor Manuel Ramón Márquez

Marzo 2014

Dedicatoria

A mi mami

Este y muchos logros más, son por ti y para ti

A mis mugrosos

Gracias por iluminar mis días con sus sonrisas, abrazos, cariño...

AGRADECIMIENTOS

A la vida, por situarme en los lugares indicados y así conocer a personas maravillosas.

A mis padres, gracias por permitirme formar parte de su vida, por su educación, esfuerzo, paciencia y sobre todo por estar ahí cuando siempre necesite de un abrazo, una caricia, un aliento, un consuelo y el amor que solo ustedes me supieron dar. Sé que el camino no fue nada fácil, sin embargo... lo logramos.

A mis directores de tesis, el Dr. Eduardo Ismael Hernández, le agradezco la oportunidad que me brindo para trabajar con usted, por las enseñanzas, el apoyo y por la confianza que deposito en mí. Y al profesor Víctor Manuel Ramón Márquez, agradezco su dedicación, paciencia y preparación que me brindo durante estos meses de trabajo. Gracias por compartir esta experiencia conmigo, jamás encontrare palabras para agradecerles todo lo que han hecho por mí.

Al Ing. José Antonio Martínez González y al Dr. Javier S. Salgado Pareja, por tomarse el tiempo para compartir sus conocimientos y experiencias que ayudaron a fortalecer este trabajo.

Al M. en C. Javier Lermo Samaniego y al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por facilitar el préstamo del equipo adecuado para la elaboración de este proyecto.

A los habitantes del municipio de Calpulalpan, por su colaboración en la colocación de los sismógrafos en sus hogares y calles.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, la Facultad de Ingeniería, el Colegio de Geofísica y a todos los profesores y administrativos que ayudaron a mi formación académica.

A mis amigos de la BUAP, gracias por las experiencias vividas estos años, y a mis amigos de la UPAEP, por regalarme su tiempo y apoyo para realizar las mediciones y este trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN	XII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Justificación	3
1.4 Localización del área de estudio	4
1.5 Trabajos previos.....	5
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Naturaleza de las vibraciones ambientales	7
2.2 Microtremores.....	8
2.3 Microzonificación Sísmica	10
2.4 Efectos de sitio.....	11
2.4.1 Función de Transferencia	13
2.5 La Técnica de Nakamura (Cociente Espectral H/V).....	14
2.5.1 Ventajas del método	18
2.5.2 Limitaciones del método	19
2.6 Análisis Espectral	19
2.6.1 Espectros de Fourier.....	20
2.6.2 Espectro de respuesta	21

CAPÍTULO 3. SISMICIDAD Y MARCO GEÓLOGICO DEL MUNICIPIO DE CALPULALPAN	22
3.1 Faja Volcánica Transmexicana	22
3.2 Geología Regional	24
3.3 Geología Estructural	27
3.3.1 Graben de Acambay	28
3.3.2 Sistema Taxco-San Miguel Allende.....	29
3.3.3 Zona de Cizalla Tenochtitlan	31
3.3.4 Región Apan.....	32
3.4 Sismicidad Regional y Local	33
 CAPÍTULO 4. CAMPAÑA DE MONITOREO	 43
4.1 Adquisición de datos	43
4.2 Equipo de medición	44
4.2.1 Sensor	44
4.2.2 Software de Digitalización	46
4.2.3 Otros	47
4.3 Parámetros de adquisición	48
4.3.2 Tiempo de registro	48
4.3.3 Nomenclatura de archivos.....	49
4.3.4 Condiciones experimentales.....	50
4.3.4.1 Acoplamiento del sensor	50
4.3.4.2 Ambiente	50
4.3.4.3 Estructuras cercanas	51
4.4 Metodología de adquisición	51
4.5 Procesamiento de los registros sísmicos	52
4.6 Software GEOPSY	53
4.6.1 Filtrado de la Señal.....	54

4.6.2 Selección de Ventanas.....	55
4.7 Cálculo de la Cociente Espectral H/V	57
CAPÍTULO 5. ESTIMACIÓN DE LOS PERIODOS DE VIBRAR E INTENSIDADES SÍSMICAS.....	58
5.1 Análisis y obtención de los periodos dominantes del terreno.....	58
5.1.1 Existencia de amplitudes máximas para un valor plenamente identificado de la frecuencia	60
5.1.2 Existencia de amplitudes para más de un valor de la frecuencia	61
5.3 Mapa de la distribución de los periodos dominantes del terreno.....	64
5.4 Clasificación dinámica del terreno y Mapa de Microzonificación Sísmica	67
5.5 Escenarios Sísmicos para la estimación de Acelerogramas Sintéticos.....	70
5.5.1 Sismo ocurrido el día 15 de Junio de 1999 y localizado en Tehuacán, Puebla.....	70
5.5.2 Sismo ocurrido el 6 de Abril de 1959 y localizado en Tlaxcala	72
5.6 Estimación de Intensidades Sísmicas para la zona urbana del Municipio de Calpulalpan	74
5.6.1 Cálculo de acelerogramas sintéticos utilizando funciones de transferencia	74
5.6.2 Espectros de respuesta estimados con los acelerogramas sintéticos	75
5.7 Mapas de Intensidades Sísmicas	78
5.7.1 Intensidades sísmicas estimadas para el sismo del 15 de Junio de 1999 Tehuacán, Puebla.....	79
5.7.2 Intensidades sísmicas estimadas para el sismo 6 de Abril de 1959, Tlaxcala.....	86
CAPÍTULO 6. RESULTADOS, RECOMENDACIONES Y APLICACIONES	93
RECOMENDACIONES.....	94
APLICACIONES.....	95

APÉNDICE	96
Apéndice A. Bitácora de Campo	96
Apéndice B. Cocientes espectrales	102
Apéndice C. Conceptos.....	118
 REFERENCIAS	 119
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	125
RESUMEN EN CONFERENCIAS	126

Índice de Figuras

Figura 1. 1 Ubicación geográfica del municipio de Calpulalpan, los números representan los municipios limitantes 1. Nanacamilpa de Mariano Arista y 2. Lázaro Cárdenas. .4	4
Figura 1. 2 Mapa de microzonificación sísmica para el Estado de Tlaxcala en función de los sismos (círculos). Las flechas indican los mecanismos focales. (Bernal-Esquía, 2006).....6	6
Figura 2. 1 Esquema del origen de los microtemores.8	8
Figura 2. 2 Diagrama de la trayectoria de las ondas sísmicas en terrenos de diversas competencias.13	13
Figura 2. 3 Esquema representativo de dos espectros de Fourier y su función de transferencia.14	14
Figura 2. 4 Estructura geológica típica de una cuenca sedimentaria, (Nakamura, 2008).15	15
Figura 2. 5 Esquema de los espectros de Fourier para las componentes vertical y horizontal y con su respectivo cociente espectral. (Modificado por Ansal, 2004).....18	18
Figura 2. 6 Esquema ilustrativo para calcular los espectros de respuesta.21	21
Figura 3.1 Ubicación geográfica de la Faja Volcánica Transmexicana y sus sectores (gris). .23	23
Figura 3. 2 Mapa geológico de Calpulalpan.....24	24
Figura 3.3 a) Zonas planas; b) Zona semiplana del Municipio de Calpulalpan25	25

Figura 3.4 Barrancas de Calpulalpan.....	26
Figura 3.5 Ubicación geográfica de los sistemas de fallas próximos a Calpulalpan.....	27
Figura 3.6 Ubicación del Graben de Acambay (rojo) y fallas contiguas de la zona (verde)....	29
Figura 3.7 Ubicación del sistema de fallas Taxco-San Miguel Allende (rojo), y fallas adyacentes.	30
Figura 3.8 Bosquejo tectónico preliminar del tramo suroccidental de la zona de cizallamiento Tenochtitlan (De Cserna, Mota-Palomino, 1987).....	31
Figura 3.9 Ubicación del sistema de fallas Apan-Tlálloc (amarillo), en rojo el Municipio de Calpulalpan (Obtenido de García-Palomo <i>et al.</i> 2002).	33
Figura 3.10 Ubicación geográfica de los sismos presentados en la Tabla 3.1	39
Figura 3. 11 Distribución epicentral de la zona de Apan.	38
Figura 4.1 Ubicación de los puntos de medición de la vibración ambiental.	43
Figura 4.2 Diagrama a) Espectro sísmico; b) Instrumentos (Modificado de Roca, 1996).....	45
Figura 4. 3 Imagen del sensor Guralp Systems de tres componentes. Izquierda: vista lateral. Derecha: vista superior.	45
Figura 4.4 Visualización del registro de la señal en el software Scream 4.4.	46

Figura 4.5 Imagen de la lectura de una señal en tiempo real en el software Scream 4.4.....	47
Figura 4. 6 Nomenclatura de las señales en Pc.	49
Figura 4.7 Instalación de los sismógrafos Guralp.	52
Figura 4.8 Anotación de las observaciones en la bitácora de campo.	53
Figura 4. 9 Imagen del filtrado de un sismograma utilizando el filtro Butterworth y pasa baja, para mejorar la calidad de la imagen.....	55
Figura 4. 10 Imagen que representa la activación manual y automática de las ventanas en el programa GEOPSY.....	56
Figura 4. 11 Representación de las ventanas resultantes a partir de seleccionar su longitud...	57
Figura 4. 12 Gráfica del cociente espectral H/V para el punto de medición 27.....	58
Figura 5.1 Gráfica del cociente espectral H/V donde se representa el pico máximo (rojo), para el punto 24.	58
Figura 5. 2 Gráfica del cociente H/V, en rojo la frecuencia fundamental.....	59
Figura 5.3 Gráfica del “pico característico” del cociente espectral H/V, en círculo la frecuencia fundamental para el punto 24.....	61
Figura 5. 4 Gráficas donde los valores máximos de las amplitudes de los cocientes espectrales H/V no están bien definidos. Izquierda: Punto 7. Derecha: Punto 20.	62

Figura 5.5 Ejemplo de una gráfica en EXCEL donde se muestra el promedio final de los cocientes espectrales para el punto 24.	63
Figura 5.6 Familias espectrales de la zona urbana de Calpulalpan. Criterio que define las microzonas sísmicas a partir de su forma espectral y del rango de frecuencias del efecto de sitio.	65
Figura 5.7 Mapa de la distribución de los periodos dominantes para el Municipio de Calpulalpan, Tlaxcala.	66
Figura 5. 8 Mapa de Microzonificación Sísmica.	68
Figura 5.9 Mapa de Microzonificación Sísmica sobre una imagen del Municipio de Calpulalpan.	69
Figura 5.10 Mapa de isosistas en la escala Mercalli Modificada para el sismo del 15 de junio de 1999 ocurrido en Tehuacán, Puebla, que causo daños en el estado de Tlaxcala (Singh <i>et al.</i> 1999. Obtenido de Valle-Orozco).	71
Figura 5. 11 Acelerograma registrado durante el sismo del 15 de Junio de 1999.	72
Figura 5.12 Mapa de isosistas del terremoto del 6 de abril de 1959, con líneas azules se muestran las isosistas. Líneas amarillas, falla y fracturas. Con un círculo rojo la ubicación del sismo principal.	73
Figura 5.13 Registro de aceleraciones usado para simular los eventos sísmicos corticales del 6 de Abril de 1959.	73
Figura 5.14 Espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimado para el temblor del 15 de Junio de 1999, en los sitios de la zona urbana de Calpulalpan.	76

Figura 5.15 Acelerogramas sintéticos y espectros de respuesta; a) Sismo del 15 de Junio de 1999; b) Sismo del 6 de Abril de 1959, para el punto 24.....	77
Figura 5. 16 Espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimado para el temblor del 6 de Abril de en los sitios de la zona urbana de Calpulalpan.	78
Figura 5. 17 Acelerogramas sintéticos para el temblor del 15 de Junio de 1999 utilizando las funciones de transferencia.	81
Figura 5.18 Mapa de la distribución de las pseudoaceleraciones para periodo $T=0.1$ seg del sismo del 15 de Junio de 1999.	84
Figura 5.19 Mapa de la distribución de las pseudoaceleraciones para periodo $T=0.2$ seg del sismo del 15 de Junio de 1999.	85
Figura 5. 20 Acelerogramas sintéticos para el temblor del 6 de Abril de 1959.	88
Figura 5.21 Mapa de la distribución de las pseudoaceleraciones para periodo $T=0.1$ seg del sismo del 6 de Abril de 1959.....	91
Figura 5.22 Mapa de la distribución de las pseudoaceleraciones para periodo $T=0.2$ seg del sismo del 6 de Abril de 1959.....	92

Índice de Tablas

Tabla 2. 1 Clasificación de las fuentes de ondas sísmicas según su origen.	9
Tabla 3. 1 Catálogo de Sismicidad	35
Tabla 5. 1 Valores de frecuencia y periodo	60
Tabla 5. 2 Resultados de los valores de aceleración para los periodos estructurales de $T=0.1$ y $T=0.2$ seg obtenidos para el temblor del 15 Junio del 1999.	82
Tabla 5. 3 Valores de aceleración para el periodo $T=0.1$ y $T=0.2$ seg resultados obtenidos para el temblor del 6 de Abril de 1959	89

Índice de Ecuaciones

Ecuación 2.1 Función de transferencia.....	13
Ecuación 2.2 Función de transferencia para la componente horizontal (izquierda), componente vertical (derecha).....	15
Ecuación 2.3 Efecto de la fuente.....	16
Ecuación 2.4 Función de transferencia descrita por los cocientes Th y Tv	16
Ecuación 2.5 Sustitución de la función de transferencia Th^* por los valores Th , Tv y sus respectivos cocientes.....	16
Ecuación 2.6 Cociente H/V o QTS (quasi transfer spectrum).....	16
Ecuación 2.7 Espectro de Fourier.....	19
Ecuación 5.1 Ecuación de la frecuencia.....	59
Ecuación 5.2 Ecuación del periodo.....	59

RESUMEN

Calpulalpan, municipio del Estado de Tlaxcala, ubicado al poniente del estado, está catalogado según la Microzonificación Sísmica del Estado de Tlaxcala como una zona de moderada amenaza sísmica (Zona II). Es por ello, que se lleva a cabo el desarrollo de la microzonificación sísmica de Calpulalpan, el cual consiste en caracterizar el subsuelo en esta zona urbana a través de métodos geofísicos. El objetivo principal del presente estudio se enfoca en la obtención de los períodos fundamentales de vibración del suelo en dicho Municipio, a través del análisis de microtemores, empleando para tal fin el Método de Nakamura (cociente espectral H/V). También se estiman las intensidades para dos escenarios sísmicos propuestos.

El área de estudio abarca sólo 9.43 km² aproximadamente. Durante la etapa de adquisición se obtuvieron 31 puntos de mediciones de ruido ambiental distribuidas a lo largo de la ciudad, con un espaciamiento promedio de 250 metros entre cada estación.

Para el procesamiento e interpretación de los datos se emplearon programas de cómputo como GEOPSY, con el cual fueron estimados los períodos fundamentales en la zona de interés, Matlab y Degtra cuyo funcionamiento fue elaborar los sismogramas sintéticos y espectros de respuesta para cada escenario sísmico. A partir de lo anterior se realizaron los mapas que contienen los valores de los periodos fundamentales del suelo, la clasificación dinámica del terreno y los valores de la intensidad sísmica para los dos escenarios especifica.

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

El Municipio de Calpulalpan localizado en el Estado de Tlaxcala, se encuentra ubicada dentro de la Faja Volcánica Transmexicana y se ubica dentro del sistema de fallas Apan-Tezontepec, junto a otros sistemas que se encuentran cerca del área como el Graben de Acambay y el sistema Taxco-San Miguel Allende.

La investigación de las características locales que presenta el suelo es de especial interés y debe ser uno de los primeros aspectos a considerar en cualquier evaluación de amenaza sísmica. Con la finalidad de delimitar la respuesta local del subsuelo ante la ocurrencia de un evento sísmico, el presente trabajo contempla una evaluación geofísica empleando registros de ruido ambiental, que a través del Método de Nakamura (relación espectral H/V), permite la obtención de los períodos fundamentales de vibración del suelo en el área de estudio, generando como producto final un mapa de períodos predominantes del suelo en el Municipio.

1.1 Planteamiento del problema

La microzonificación sísmica de una zona urbana consiste en definir zonas cuyos suelos presentan un comportamiento dinámico similar, con la finalidad de poder establecer recomendaciones específicas para el diseño y construcción de edificaciones.

En el Estado de Tlaxcala se han dedicado esfuerzos para caracterizar la sismicidad local y regional de algunos municipios, entre estos se encuentran los trabajos realizados por Lermo-Samaniego y Bernal-Esquía (2006), cuyos resultados permitieron la caracterización local y evaluación de los efectos de sitio de la Ciudad de Tlaxcala. Por otra parte, Lermo *et al.* (2012) realizaron la microzonificación sísmica en otras cuatro de las ciudades más importantes del Estado con la finalidad de delimitar la respuesta local del subsuelo ante la ocurrencia de un sismo.

La propagación de las ondas sísmicas a través de un medio, experimenta variaciones en espacio, amplitud, contenido de frecuencias y duración. A este fenómeno se le conoce como

efecto de sitio. Debido a la estrecha relación que existe entre la naturaleza de los microtemores y el comportamiento dinámico de la capa superficial del suelo, esas pequeñas vibraciones son empleadas en el campo de la ingeniería sísmica, con la finalidad de caracterizar el comportamiento dinámico de los suelos y las estructuras.

La técnica de medición de microtemores y su análisis ha sido frecuentemente utilizada en estudios de microzonificación en varios lugares alrededor del mundo: México (Lermo y Chávez-García, 1994), Bogotá (INGEOMINAS, 1997), Barcelona (Alfaro, 1999), Japón (Mirzaoglu y Dýkmen, 2003), entre otros. Esta técnica tiene la ventaja de llevar a cabo de manera rápida y sencilla la descripción de los efectos de sitio, cuya importancia radica en la definición y el entendimiento de las propiedades dinámicas del suelo ante la acción de un sismo en un sitio dado.

De las diferentes técnicas que emplean microtemores para la microzonificación sísmica, la técnica desarrollada por Nakamura (1989) ha tenido gran aceptación debido a su bajo costo y fácil implementación tanto en el trabajo de campo como en el procesamiento de datos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general:

Elaborar el mapa de microzonificación sísmica a partir de los períodos fundamentales del suelo del Municipio de Calpulalpan Tlaxcala, mediante el uso de mediciones de ruido ambiental aplicando el Método de Nakamura (cociente espectral H/V), el cual servirá como base para establecer la norma para el diseño sísmico de construcciones.

1.2.2 Objetivos específicos:

- Elaborar el mapa con la distribución de los periodos dominantes del terreno en la zona urbana del Municipio.
- Obtener la clasificación dinámica de terreno de cimentación de la zona urbana.
- Realizar la estimación de las intensidades sísmicas para dos escenarios especificados.

1.3 Justificación

La investigación de las características locales que presenta el suelo es de especial interés y debe ser, parte de cualquier evaluación de amenaza sísmica. El empleo de métodos pasivos basados en el ruido ambiental o microtemores, representa una excelente opción por su sencillez, tanto en la parte experimental como en el procesamiento de la información.

Por otro lado, la actividad sísmica en México está regida por la interacción de las placas de Cocos, Norteamericana y la micro-placa de Rivera (sismos interplaca), por lo cual las Costa del Pacífico es una de las zonas donde se concentra el mayor porcentaje de sismos en nuestro País. Sin embargo, se han presentado sismos con menor frecuencia asociados a las deformaciones corticales dentro del continente (sismos intraplaca).

Por esta razón, mundialmente se ha reconocido la importancia de la mitigación del riesgo sísmico, elaborando estudios que estimen la intensidad sísmica que puede generarse en una región, para conjuntarla a reglamentos y códigos para el diseño de construcciones y obras importantes. Por ello, se han desarrollado los estudios de microzonificación sísmica ya que de estos se obtienen parámetros que puedan formar parte de esos códigos de construcción. Los códigos son una herramienta muy útil para diseñar edificaciones con estructuras más seguras sobre suelos inestables, así como aportar información para estudios de ingeniería sísmica y civil.

La ventaja de aplicar métodos empíricos es que no se necesita tener información detallada de los estratos del suelo, además de que genera bajo costo, aunque el inconveniente principal es contar con gran número de registros e instrumentación para realizar el estudio.

1.4 Localización del área de estudio

El Municipio de Calpulalpan se localiza al poniente del Estado de Tlaxcala a 65 km de la capital de la entidad, entre los paralelos $19^{\circ} 35'$ latitud norte y $98^{\circ} 34'$ longitud oeste (Fig. 1.1). Colinda al norte con el Estado de Hidalgo, al poniente con el Estado de México y con los Municipios de Nanacamilpa de Mariano de Arista y Lázaro Cárdenas, al sur y al oriente, respectivamente.

La información estadística proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), indica que el Municipio tiene una extensión territorial de 384 km² lo que representa el 6.38% del territorio estatal, sin embargo, sólo 9.43 km² representan la zona urbana. De acuerdo al Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI, la población total es de 44,807 habitantes.

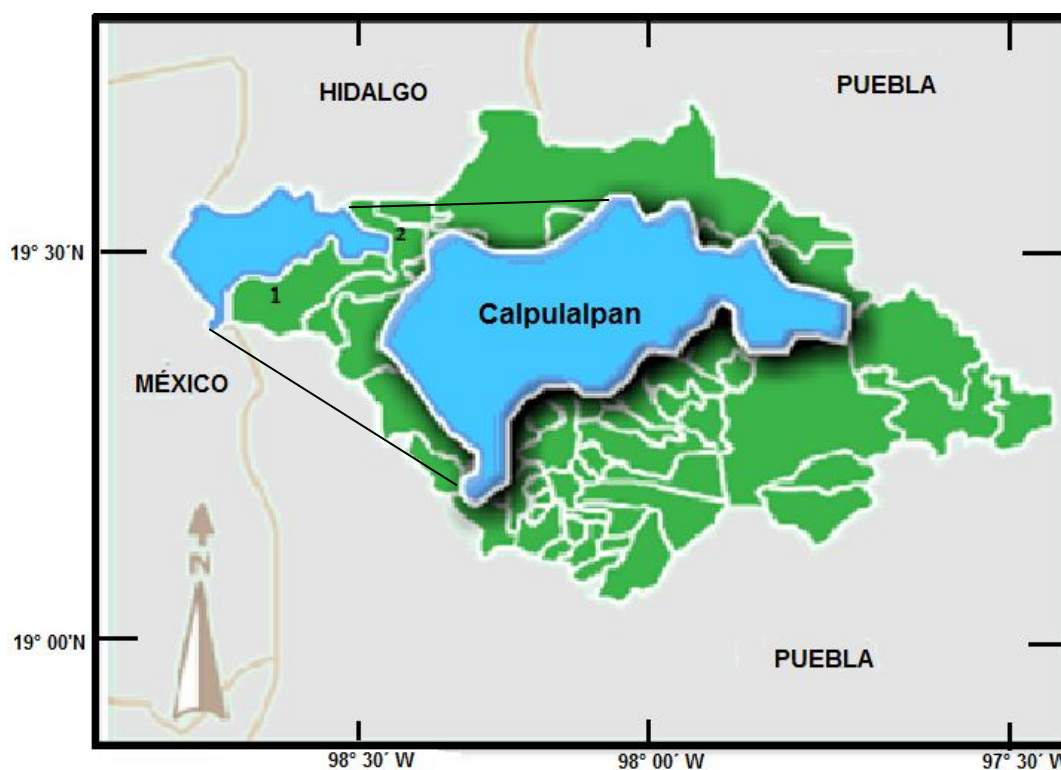


Figura 1.1 Ubicación geográfica del municipio de Calpulalpan; los números representan los municipios limítrofes 1. Nanacamilpa de Mariano Arista y 2. Lázaro Cárdenas.

1.5 Trabajos previos

Los estudios basados en ruido ambiental han sido empleados desde mediados del siglo XX, otorgando valiosa información, especialmente en el análisis espectral de señales.

A partir de las investigaciones de Nakamura (1989), se le ha conferido mayor importancia al uso de microtremores en el área de ingeniería a partir del estudio de sus componentes horizontales y verticales. Dicha técnica ha sido empleada en proyectos de microzonificación en diversos lugares de la República Mexicana, así como en otros países; Tlaxcala (Berna-Esquia y Lermo-Samaniego, 2006), México (Lermo y Chávez-García, 1994), Veracruz (Lermo *et al.* 2003). Igualmente, se desarrollaron proyectos como SESAME (Site EffectS aSessment using AMbient Excitations, 2001) que ha evaluado la técnica de Nakamura mediante un análisis temporal sobre una red de estaciones permanentes de acelerógrafos y sismógrafos (Bard *et al.* 2004).

Nakamura (1989) realizó mediciones continuas de microtremores por más de 30 horas en subestaciones férreas en Japón; propuso que los microtremores podían evaluar los efectos de sitio, sólo tomando en consideración el cociente entre el espectro de Fourier de la componente horizontal y la componente vertical del movimiento registrado en el mismo sitio.

En el Estado de Tlaxcala se han realizado estudios de microzonificación sísmica en ciudades como Apizaco, Santa Ana Chiautempan, Huamantla, Zacatelco (Lermo-Samaniego *et al.* 2012), y la ciudad capital del Estado (Lermo y Bernal-Esquia, 2006). Los estudios basados en la sismicidad local determinaron que el Estado puede ser dividido en zonas de alta, media y baja sismicidad (Fig. 1.2). La Zona I, de alta sismicidad, abarca la región centro y sur del Estado, la Zona II, de sismicidad media, se localiza al N-O del Estado y abarca un área pequeña, mientras que la Zona III, de baja sismicidad, considera las áreas en las cuales no se habrían producido sismos. De la figura 1.2 se observa que el Municipio de Calpulalpan se localiza en la Zona II de sismicidad media.

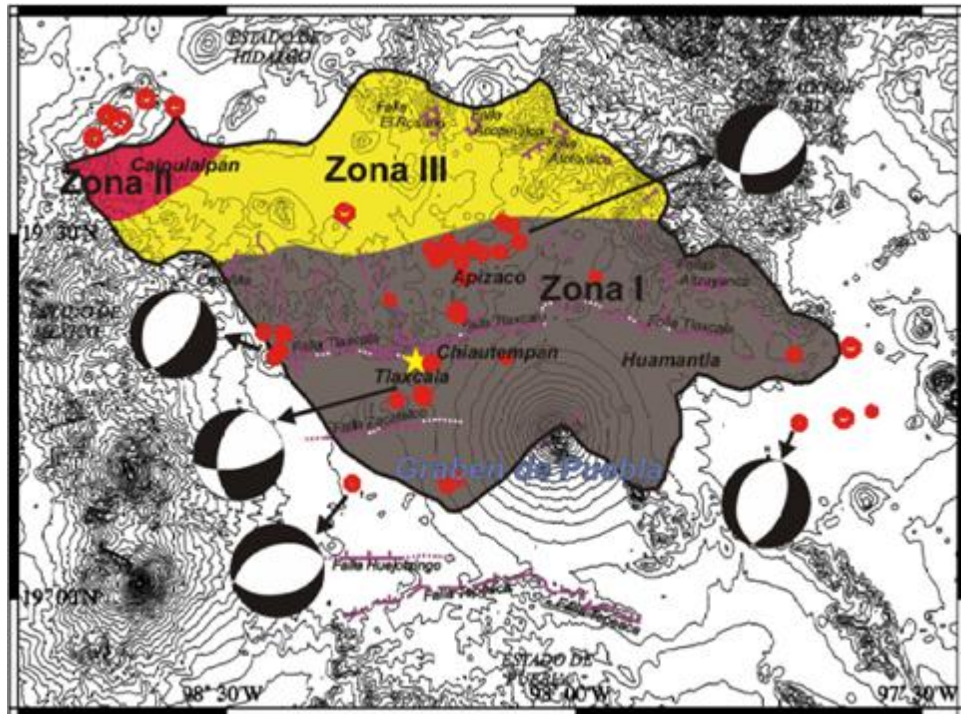


Figura 1.2 Mapa de microzonificación sísmica para el Estado de Tlaxcala en función de los sismos (círculos). Las flechas indican los mecanismos focales. (Bernal-Esquía, 2006).

CAPÍTULO 2.

MARCO TEÓRICO

2.1 Naturaleza de las vibraciones ambientales

Los efectos de los sismos sobre las construcciones existentes en un lugar son el resultado directo de las características geológicas locales. Los daños causados por los sismos dependen de la magnitud (para fines de ingeniería la variable más apropiada es la intensidad, medida en términos del movimiento del terreno), el contenido de frecuencias y la duración de los mismos. Estos parámetros están fuertemente influenciados por las propiedades del suelo en la zona, los cuales a su vez dependen de las características topográficas y geotécnicas existentes.

Las mediciones de vibración ambiental o ruido ambiental tienen el potencial de contribuir significativamente a la mitigación de amenaza sísmica, en particular en zonas urbanas (microzonificación), debido a que a partir de dichas mediciones se puede establecer, como ya se ha mencionado, algunas de las propiedades dinámicas de los suelos que controlan su respuesta sísmica.

Tanto las capas de sedimento como las rocas están sometidas a vibraciones permanentes, las cuales pueden ser clasificadas en dos principales categorías: naturales, que son producto de las olas de mar, viento y variaciones en la presión del aire, primordialmente; y artificiales, producto de maquinarias, industrias, tráfico vehicular, interacción de árboles y estructuras con el viento, etc.

Ambas vibraciones son conocidas como microtemblores, microtemores, microvibraciones, vibración ambiental y ruido cultural (Espinoza, 1999). En este estudio se emplea la palabra microtemores para hacer referencia a las vibraciones ambientales (Fig. 2.1).

La energía se propaga y viaja a través de las ondas superficiales, las cuales pueden interactuar con las estructuras presentes en un lugar. Sus grandes longitudes de onda penetran a grandes profundidades, trayendo como resultado la presencia de campos de ondas más complejos, representados por heterogeneidades en el subsuelo. Las ondas de frecuencia mayor

generalmente corresponden a fuentes mucho más cercanas, principalmente localizadas cerca de la superficie (Bard, 2004).

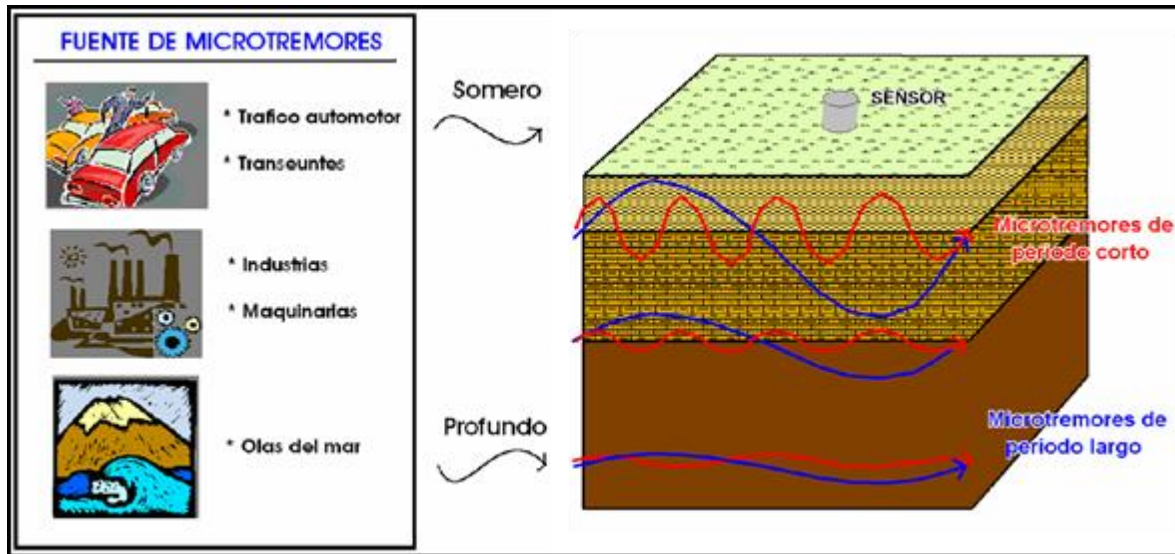


Figura 2.1 Esquema del origen de los microtremores.

2.2 Microtremores

Los microtremores han sido estudiados desde el siglo XIX, aunque fue hasta mediados del siglo XX cuando se comenzaron a utilizar para caracterizar al suelo y las estructuras. Sin embargo, los japoneses fueron los líderes de estas técnicas en los años 50's, discutiendo su origen así como su utilización para el estudio de las propiedades dinámicas del suelo (Yauri, 2006).

Muchas observaciones y experiencias sobre registros de microtremores demuestran que éstos consisten de ondas de cuerpo y de superficie, pero no hay una teoría que establezca cuál es el tipo de onda que compone el registro de microtremores (Nakamura, 2000). Sin embargo, se ha determinado que los microtremores son vibraciones débiles inducidas en la Tierra ya sea por fuentes naturales o artificiales (Tabla 2.1), que consiguientemente proveen cierta información sobre la fuente, la estructura del suelo, la estructura interna de la Tierra, entre otros (Cuadra, 2007).

Tabla 2. 1 Clasificación de las fuentes de ondas sísmicas según su origen.

<u>INTERNAS</u>	<u>EXTERNAS</u>	<u>MIXTAS</u>
Fallas Sísmicas.	Vientos, Presión Atmosférica.	Erupciones Volcánicas.
Explosiones Internas.	Oleaje y Mareas.	Deslizamientos.
Flujo Hidrológico.	Ruido Cultural (Tráfico y Trenes).	Avalanchas.
Movimientos del Agua.	Impacto de Meteoritos.	
Explotación Minera Subterránea.	Exploración Minera Superficial.	
	Lanzamiento de Cohetes.	
	Aterrizaje y Decolaje de Aviones.	

Generalmente, los microtemores presentan diversas frecuencias, esto indica que dependiendo del tipo de fuente que lo origine será el tamaño de la frecuencia; detalladamente se puede mencionar (Cuadra, 2007):

- Las frecuencias por debajo de 0.3 hasta 0.5 Hz son causadas por las olas oceánicas que ocurren a grandes distancias, esta correlación es posible encontrarla en condiciones meteorológicas de gran escala en el océano.
- A frecuencias intermedias entre 0.3-0.5 y 1 Hz, los microtemores son generados por el oleaje que rompe en las costas.
- Para frecuencias mayores a 1Hz, los microtemores están ligados a la actividad humana y se manifiesta por cambios en la amplitud de éstos.

El estudio de estas vibraciones ha permitido integrarlos en estudios geotécnicos y de microzonificación ya que permite la estimación del efecto de sitio y el periodo dominante.

2.3 Microzonificación Sísmica

La liberación de energía generada por la interacción de las placas tectónicas se transmite por la corteza terrestre mediante ondas sísmicas, que a su vez se transforman desde la roca base hasta llegar a la superficie. Estas ondas emitidas desde la fuente dependen fundamentalmente de las propiedades de los medios (permeabilidad, compresibilidad, contenido de agua, etc.) en los que se propagan las ondas sísmicas y de las irregularidades que encuentra en su trayecto. La importancia de estas alteraciones ha sido considerada cada vez más en años recientes, y esto ha llevado a la necesidad de realizar diversos estudios de microzonificación en áreas de asentamientos humanos para detectar zonas que presentan problemas de sismicidad.

En un principio, estos estudios eran desarrollados principalmente en áreas que presentaban tasas relativamente altas de sismicidad y con una disponibilidad de un sitio de referencia adecuado, sin embargo, la realización de varios estudios experimentales exitosos han comprobado que también es adecuado para aquellas zonas que manifiestan una moderada y baja sismicidad, obteniendo resultados satisfactorios (Alfaro, s.f.)

Los estudios de microzonificación sísmica abarcan pocos kilómetros y se pueden llegar a delimitar por la zona urbana y su posible expansión. Estos estudios consisten en la determinación del comportamiento de los suelos frente a movimientos sísmicos, tomando en cuenta los efectos de las condiciones locales del sitio (geología, topografía, hidrología, morfología, etc.).

Estos estudios se consideran una herramienta útil para comprender las condiciones del terreno, ya que, a través de la observación directa del movimiento del suelo por medio de mediciones de microtemores, y llevando a cabo el método de Nakamura, se logra conocer la respuesta del suelo y determinar la respuesta dinámica. Por lo tanto, se logra estimar el riesgo sísmico ante el cual está expuesta la zona de interés (Ritta *et al.* 2012).

Como parte importante de la microzonificación se contempla la elaboración de mapas donde mediante curvas que unen valores iguales, se exprese la distribución de periodos dominantes del terreno. Estos mapas son llamados mapas de isoperiodos, los cuales se integran mediante la recopilación de información de señales de vibración ambiental por medio

de un sismógrafo portátil en tantos sitios como sea posible y calculando sus espectros de amplitud de Fourier para obtener los periodos dominantes (Gutiérrez, 2009).

2.4 Efectos de sitio

El concepto de efecto de sitio juega un papel muy importante al describir las condiciones locales de un lugar, ya que los daños que se producen ante la ocurrencia de un sismo sobre las estructuras está fuertemente correlacionado con la respuesta del terreno y a esto se le conoce como *efecto de sitio*, que se define como la modificación de la respuesta sísmica debido a la influencia de las condiciones geológicas y topográficas de los estratos más superficiales de la corteza. Esta modificación consiste en la amplificación de la respuesta sísmica del terreno, así como una mayor duración de la misma y la modificación de su contenido de frecuencias (Angulo, 2007).

Cuando ocurre un evento sísmico de magnitud importante la energía, en términos de las ondas sísmicas, se atenúa con respecto a la distancia y al tiempo, sin embargo, dichas ondas siguen propagándose por diferentes medios geológicos. Si el cambio en las propiedades de estos medios es grande o el tamaño de las irregularidades es mayor o igual que las longitudes de las ondas (ondas S, ondas P, reflexiones y refracciones de las ondas de cuerpo y las ondas superficiales) se ocasionarán cambios significativos en el movimiento del terreno (Alfaro, s.f.). Uno de los ejemplos más explícitos de los daños que pueden causar los efectos de sitio, se encuentra en las consecuencias que dejó el terremoto de 1985 ocurrido en la Ciudad de México, donde los depósitos de arcilla lacustre indujeron el fenómeno de amplificación que provocaron pérdidas humanas y económicas.

Con lo anterior, se puede explicar que la presencia de suelos considerados geotécnicamente como poco rígidos o blandos (aluviales, depósitos sedimentarios o volcánicos no cementados), producen daños considerables, ya que amplifican las ondas sísmicas en un intervalo amplio de periodos de vibración; este fenómeno de amplificación para ciertos periodos de vibrar del suelo puede coincidir con el periodo de vibrar de las estructuras, dando como resultado el fenómeno de amplificación dinámica de la respuesta estructural (resonancia), dañando las infraestructuras situadas sobre ellos (Cuadra, 2007). Este fenómeno puede evitarse construyendo estructuras con períodos que no coincidan con el del

suelo. Caso contrario ocurre con los suelos rígidos (rocas), donde las ondas sísmicas se atenúan con la distancia y con el tiempo, debido a la pérdida de energía por la absorción de los materiales por los que han atravesado las ondas y puede variar de acuerdo con diversos factores, como su profundidad y las condiciones del medio por las que han viajado. En la figura 2.2 se esquematiza un ejemplo del paso de las ondas sísmicas en terrenos de distintas competencias (Alfaro *et al.* s.f.).

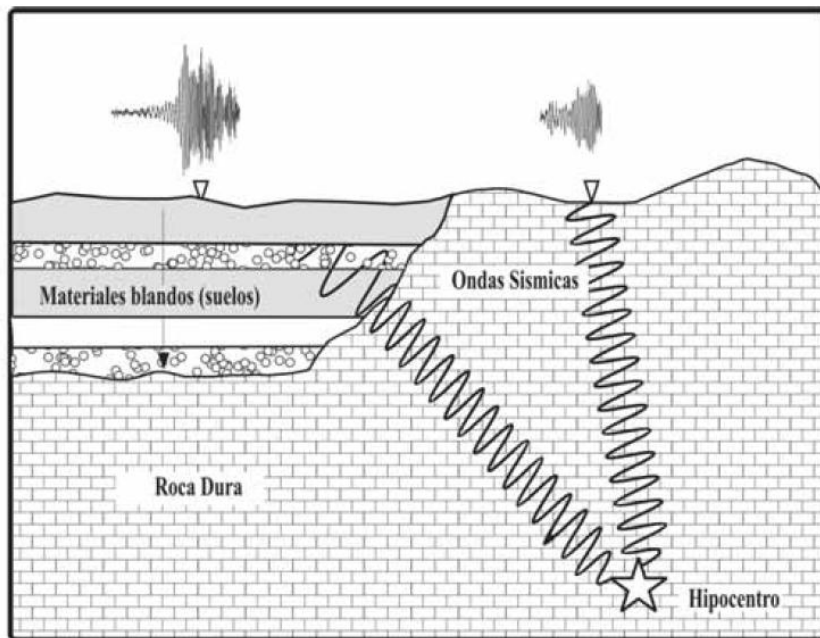


Figura 2.2 Diagrama de la trayectoria de las ondas sísmicas en terrenos de diversas competencias.

Gracias a los avances en los estudios para tratar de establecer las interacciones que ocurren entre las ondas sísmicas y las condiciones geológicas y topográficas en puntos determinados, se han podido realizar mapas de zonación que permiten delimitar distintas zonas en función de su capacidad para amplificar la respuesta sísmica del terreno. Por lo tanto, conocer las características dinámicas de depósitos de suelos en regiones de moderada y alta sismicidad es muy importante para determinar las posibles amplificaciones de los movimientos sísmicos e identificar probables condiciones de resonancia en las edificaciones.

Los mapas de microzonificación sísmica pueden tener varias aplicaciones, en primer lugar, pueden servir como base para el establecimiento de las Normas Técnicas

Complementarias para el Diseño Sísmico de Construcciones; en segundo lugar, pueden ser útiles para el establecimiento de Atlas de Riesgo, que a su vez sirven como instrumento para implementar planes de Desarrollo Urbano y establecer las zonas aptas para ser habitadas en el futuro. En resumen los mapas de microzonificación sísmica son una herramienta para la mitigación de riesgo sísmico.

2.4.1 Función de Transferencia

La función de transferencia define el comportamiento de un sistema mediante una función o modelo matemático, que relaciona la señal de salida con la señal de entrada. En este caso las señales de entrada corresponden a la propagación de las ondas sísmicas sobre el basamento rocoso y la superficie, tomando en cuenta los aspectos geológicos. Mientras que la señal de salida corresponde a la estimación de las características del suelo en función de las propiedades dinámicas de los materiales por los que se compone en suelo (Angulo, 2013).

En sismología, el movimiento de las vibraciones del terreno en un sitio $u(t)$ puede ser expresado como la función de generación de las ondas $s(t)$ afectada por la función transferencia $g(t)$, la función $u(t)$ es dependiente de los aspectos geológicos y modelos matemáticos que la describen.

En la práctica la observación de las vibraciones se realiza a través de instrumentos especializados, se puede caracterizar su función de transferencia mediante su modelo matemático entrada/salida, la señal de entrada representa el movimiento real del terreno $u(t)$ y la señal de salida la lectura del movimiento. Así, la señal de salida $o(t)$ se expresa como resultado de la función de generación $s(t)$ en combinación con la función de transferencia de la geología $g(t)$ y con la función de transferencia del instrumento $i(t)$, como (Rosales, 2004):

$$o(t) = s(t) * g(t) * i(t) \quad (2.1)$$

Las funciones de transferencia en ingeniería sísmica han sido utilizadas para evaluar los efectos de sitio, pues con ello se establece una relación entre dos sitios mediante los

espectros de Amplitudes de Fourier que se desean comparar ($E1$, $E2$). Ya que con el cociente espectral se obtiene como resultado una Función de Transferencia (Fig. 2.3). Con el uso de estas funciones es posible estimar como variará el movimiento sísmico de un lugar a otro, lo que podrá determinar factores de amplificación o atenuación de la respuesta sísmica del terreno.

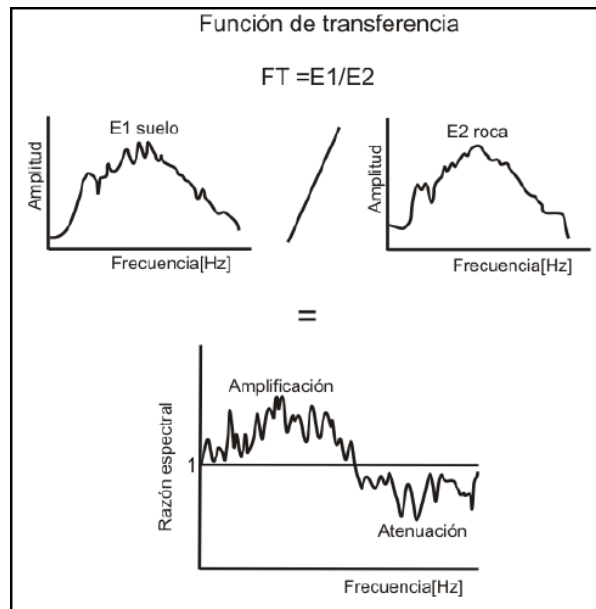


Figura 2. 3 Esquema representativo de dos espectros de Fourier y su función de transferencia.

2.5 La Técnica de Nakamura (Cociente Espectral H/V)

Esta técnica desarrollada por Yutaka Nakamura en 1989 y conocida también como cociente espectral H/V, parte de los estudios previos realizados por Nogoshi e Igarashi (1971), donde se compara la relación H/V de las ondas Rayleigh con microtemores, y concluyen que los microtemores se encuentran compuestos por ondas Rayleigh. Por otro lado, Nakamura señala que las ondas que causan las vibraciones ambientales registradas en la superficie del suelo son de dos tipos: ondas superficiales (específicamente Rayleigh) y ondas de cuerpo (P y S, debido a las reflexiones que ocurren en la interfaz suelo-roca, parte de las ondas P y S se mueven desde el basamento hacia la superficie libre donde pueden ser registradas por un sensor), por lo tanto Nakamura afirma que los microtemores están compuestos de varios tipos de ondas.

Bajo esta afirmación Bard *et al.* (1998) explican las siguientes afirmaciones: en primer lugar, la relación H/V está básicamente relacionada a la elipticidad de las ondas Rayleigh debido a la predominancia de estas ondas en la componente vertical. Y en segundo lugar, esta elipticidad es dependiente de la frecuencia y exhibe una forma de pico alrededor de la frecuencia fundamental. Esta aproximación proviene de la similitud de la relación H/V de los microtemores y la relación H/V del modo fundamental de las ondas Rayleigh.

Con estas aseveraciones, y trabajando en el dominio de la frecuencia, la técnica H/V propone estimar la frecuencia fundamental del suelo a partir de realizar el cociente del espectro de Fourier de las componentes horizontales entre el espectro de Fourier de la componente vertical (H/V) mediante las mediciones de vibraciones ambientales en superficie.

Son cuatro los espectros que se involucran en el problema: H_f y V_f , son los espectros de Fourier de las componentes vertical y horizontal del movimiento en la superficie, respectivamente. Mientras que H_b y V_b , son los espectros de Fourier de las componentes vertical y horizontal del movimiento en el basamento rocoso, respectivamente (Fig. 2.4).

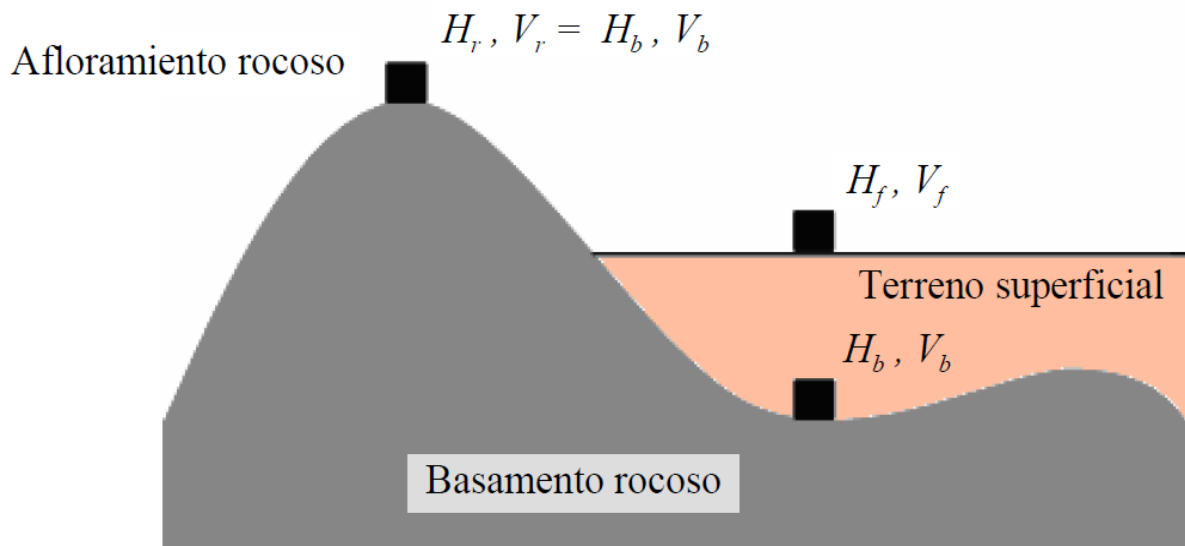


Figura 2. 4 Estructura geológica típica de una cuenca sedimentaria, (Nakamura, 2008).

Si se dispusiera de los espectros en el basamento rocoso, es decir de H_b y V_b se podría realizar los cocientes:

$$T_h = \frac{H_f}{H_b} \quad T_v = \frac{V_f}{V_b} \quad (2.2)$$

obteniendo así las funciones de transferencia entre el movimiento en la superficie y en la roca basal, tanto para la componente horizontal T_h como para la componente vertical T_v , logrando eliminar el llamado *efecto de la fuente*, que de acuerdo con Nakamura se representa por la siguiente expresión:

$$A_s = \frac{V_s}{V_b} \quad (2.3)$$

Con estos cocientes se obtienen las frecuencias naturales del depósito, pero el problema es que no se dispone de ellos para los estudios. Nakamura (2000) considera que H_b y V_b son iguales a los espectros en un afloramiento rocoso a los que llama H_r , V_r (ver figura 2.4), esta afirmación se puede considerar como una aproximación pero rigurosamente no es verdad, debido a que los picos de los espectros sí coinciden pero las magnitudes de H_r , V_r son menores que las de H_b , V_b .

Debido a la dificultad para obtener los espectros en el basamento rocoso, Nakamura (1989) propone usar una función de transferencia T_h^* que se define como el cociente entre las funciones de transferencia T_h , T_v

$$T_h^* = \frac{T_h}{T_v} \quad (2.4)$$

Se hace conveniente que la función de transferencia T_h^* se divida por T_v para compensar el efecto de la fuente (Lermo y Chávez-García, 1993), y así reemplazando T_h y T_v de la ecuación 2.2 en la ecuación 2.4 se obtiene:

$$T_h^* = \frac{T_h}{T_v} = \frac{H_f/H_b}{V_f/V_b} = \frac{H_f}{V_f} \cdot \frac{V_b}{H_b} = \frac{H_f}{V_f} \cdot \frac{1}{H_b/V_b} \quad (2.5)$$

Usando los resultados de sus propias mediciones experimentales Nakamura (1989), determinó que el cociente entre H_b , V_b es aproximadamente igual a 1, este resultado ha sido posteriormente comprobado por otros investigadores (p.ej., Huang y Chiu, 1998, Chávez-García, 1994), por ello el cociente T_h/T_v resulta:

$$T_h^* = \frac{T_h}{T_v} = \frac{H_f}{V_f} \quad (2.6)$$

A este cociente H_f / V_f Nakamura lo llama QTS por sus siglas en inglés de Quasi Transfer Spectrum (cuasi-espectro de transferencia), sin embargo en la comunidad ingenieril se conoce como cociente H/V. Puede ser demostrado tanto teórica como empíricamente, de acuerdo con el tipo de onda y de su importancia en los registros de los movimientos superficiales la relación entre H_f , V_f , presenta un pico en concordancia con la frecuencia fundamental del depósito de suelo asociado a las vibraciones horizontales. En la figura 2.5 se presenta un esquema que describe la técnica de relación espectral entre las componentes horizontal y vertical del movimiento registrado en la superficie de una capa sedimentaria (relación espectral H/V).

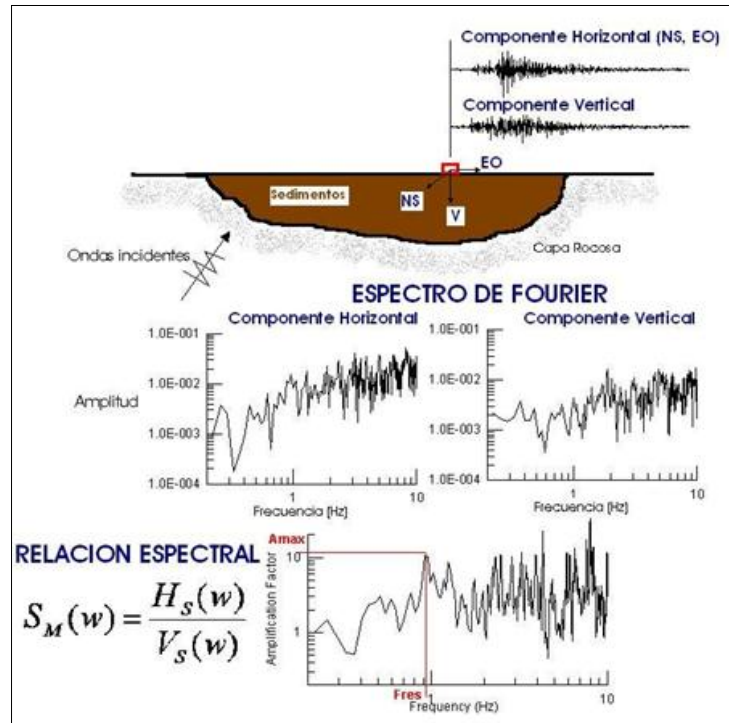


Figura 2. 5 Esquema de los espectros de Fourier para las componentes vertical y horizontal y con su respectivo cociente espectral. (Modificado por Ansal, 2004).

2.5.1 Ventajas del método

Algunos investigadores han determinado ciertos aspectos en los cuales la técnica de Nakamura resulta ser favorecedora en los estudios a realizar, no obstante también se han encontrado algunas contradicciones que demuestran ciertas fallas en el método. Entre algunas ventajas tenemos:

- La facilidad de la realización de las mediciones y el procesamiento de las mismas, lo cual se traduce en bajos costos.
- Las mediciones se pueden realizar indistintamente con acelerómetro, velocímetro o sismógrafos (Alfaro, 1994) siempre y cuando los niveles de ruido ambiental sean de cierta consideración, como en las grandes ciudades.

- Las mediciones y resultados son independientes de la hora del día en que se realicen, es decir, del nivel de ruido ambiental existente.
- No es necesario descartar del análisis aquellos intervalos de registro en los que hay fuentes puntuales identificadas, como en el caso del paso de un coche o de un peatón en las cercanías del instrumento.

2.5.2 Limitaciones del método

Algunos investigadores (Lachet y Bard, 1994) han realizado investigaciones teóricas y trabajos experimentales y han demostrado que el método únicamente permite la determinación del periodo predominante y no las amplificaciones asociadas como menciona Nakamura.

Tal vez la mayor limitación es la que presentan Konno y Ohmachi (1998) donde mencionan que en ciertos caso el método funcione y en otros no. Para solucionar estos problemas Konno y Ohmachi han formulado la técnica de razón espectral H/V en términos de ondas superficiales y propone analizar los picos de la relación H/V.

2.6 Análisis Espectral

Cuando se habla de análisis se hace referencia a la acción de descomponer o separar algo en partes más simples para conocer mejor sus características, es por ello que al referirse a un análisis espectral se habla de cuantificar las diversas intensidades de cada frecuencia.

El análisis espectral está relacionado matemáticamente con la Transformada de Fourier o análisis de Fourier, esta herramienta es muy útil para el análisis de señales pues permite realizar una descomposición espectral de los componentes de una señal y demuestra que cualquier señal está constituida por componentes senoidales de distintas frecuencias y para cada señal existe: una función en el dominio del tiempo $r(t)$ que determina la amplitud de la señal en cada instante de tiempo y una función en el dominio de la frecuencia $R(f)$ que especifica las frecuencias constituidas de la señal.

Además de reordenar los datos originales tomando en cuenta la frecuencia en lugar del tiempo, en especial con la transformada de Fourier que es utilizada para demostrar que una señal se puede descomponer o separar en una serie de senoides de diferentes frecuencias las cuales corresponden a la suma original, con esto es posible determinar la relación existente entre los dominios del tiempo y la frecuencia.

El concepto de los espectros comenzó a desarrollarse gracias a la idea de Kyoji Suyehiro quien en 1920 ideó un instrumento de medición con péndulos con el objeto de registrar la respuesta de los mismos ante la ocurrencia de un terremoto.

De manera general, el espectro puede definirse como un gráfico de la distribución de amplitudes en cada frecuencia. Por ejemplo, las ondas de radio se componen de diversas frecuencias con distintas amplitudes, el conjunto de éstas es el espectro de frecuencias de esa señal.

2.6.1 Espectros de Fourier

Los espectros de Fourier son parámetros que nos proporcionan un amplio conocimiento acerca del contenido frecuencial del acelerograma, de modo que para cada periodo de oscilación del acelerograma se representa la amplitud máxima que corresponde.

Matemáticamente, el espectro de Fourier se calcula, como el valor absoluto de la raíz de la suma de los cuadrados de las partes real e imaginaria de la señal en el dominio de la frecuencia, mediante la siguiente expresión:

$$FS = \sqrt{\left[\int_0^t a(t) \cos(wt) dt \right]^2 + \left[\int_0^t a(t) \sin(wt) dt \right]^2} \quad (2.7)$$

De la interpretación del espectro de Fourier se puede determinar cuáles son los periodos más significativos del sismo, es decir, aquellos lugares donde se observan los picos de mayor amplitud, además de ver cuál es la frecuencia o periodo dominante del registro.

2.6.2 Espectro de respuesta

Para fines de ingeniería los espectros de respuesta fueron inicialmente propuestos por Biot en 1932 y desarrollados por investigadores como Housner y Newmark entre otros, este concepto es una herramienta importante de la dinámica estructural y de gran utilidad en el área del diseño sismorresistente.

De manera general, el espectro de respuesta se define como un gráfico de la respuesta máxima expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración o cualquier otro parámetro de interés, que produce una acción dinámica determinada en una estructura u oscilador de un grado de libertad (Crisafulli y Villafañe, 2002).

Para explicar el proceso para el cálculo de los espectros de respuesta se debe considerar un conjunto de sistemas de un grado de libertad u osciladores simples con diferentes periodos de vibración T y con igual factor de amortiguamiento k (Fig. 2.6).

Si estos sistemas se someten a la acción de un mismo sismo, cada uno de ellos presentará una respuesta diferente, y una vez que se haya calculado su respuesta, es posible determinar el valor máximo de cada uno de estos y visualizarlos en un gráfico en función del periodo de vibración para así obtener un espectro de respuesta, es decir, que la respuesta máxima de cada oscilador con un cierto periodo representa un punto del espectro.

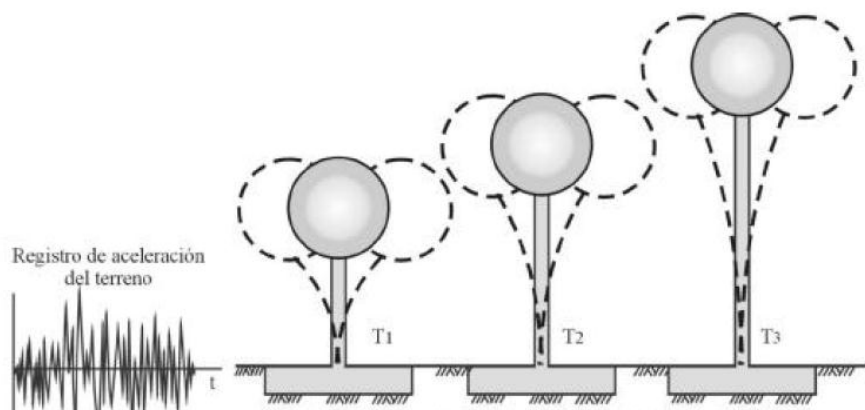


Figura 2. 6 Esquema ilustrativo para calcular los espectros de respuesta.

CAPÍTULO 3.

SISMICIDAD Y MARCO GEOLÓGICO DEL MUNICIPIO DE CALPULALPAN

3.1 Faja Volcánica Transmexicana

El Municipio de Calpulalpan se localiza en la provincia geológica denominada Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), que atraviesa el centro de México desde las Costas del Pacífico hasta las Costas del Golfo de México, abarcando una extensión territorial de 160 000 km² entre las latitudes 18° 30' N y 21° 30' N.

La FVTM tiene aproximadamente 1000 km de longitud y una amplitud variada de 80 a 230 km, se distribuye con una dirección E-W en su parte central y oriental, mientras que en la zona occidental es de WNW-ESE. Se ubica en la parte sur de la placa Norteamericana, la cual es subducida por la placa de Cocos y la micro-placa de Rivera, originando una zona constituida por aproximadamente 800 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos; formando uno de los arcos más complejos y variados de la región circum-pacífica gracias a la variabilidad del estilo volcánico de tipo intraplaca que generó la formación de grandes mesetas y estratovolcanes con altitudes hasta de 2600 metros (Ferrari *et al.* 2012).

A nivel regional la FVTM se divide en 3 sectores: occidental, central y oriental como se muestra en la figura 3.1, cuyas diferencias volcánicas, geológicas y estructurales son significativas.

El Sector Occidental comprende los *rifts* de Zacoalco, Chapala y Colima emplazados por estratovolcanes como Tequila, Sangagüey y San Juan; la porción Central de la FVTM se forma por el sistema de Fallas Taxco-San Miguel Allende que atraviesa el territorio de Querétaro, Acambay y Toluca; y por último, en la parte Oriental se concentran campos volcánicos de la Sierra Chichinautzin (con orientación E-W) y Apan-Tezontepec (con orientación NE-SW), mientras que al oriente del Valle de México se desarrolla la cadena volcánica constituida por los volcanes de Nevado de Toluca, Iztaccihualt, Popocatepetl, Malinche y el Pico de Orizaba-Cofre de Perote, todos con una orientación W-E (Alaniz-

Álvarez *et al.* 2002a). El municipio de Calpulalpan forma parte del sector oriental al ubicarse hacia la parte NW.

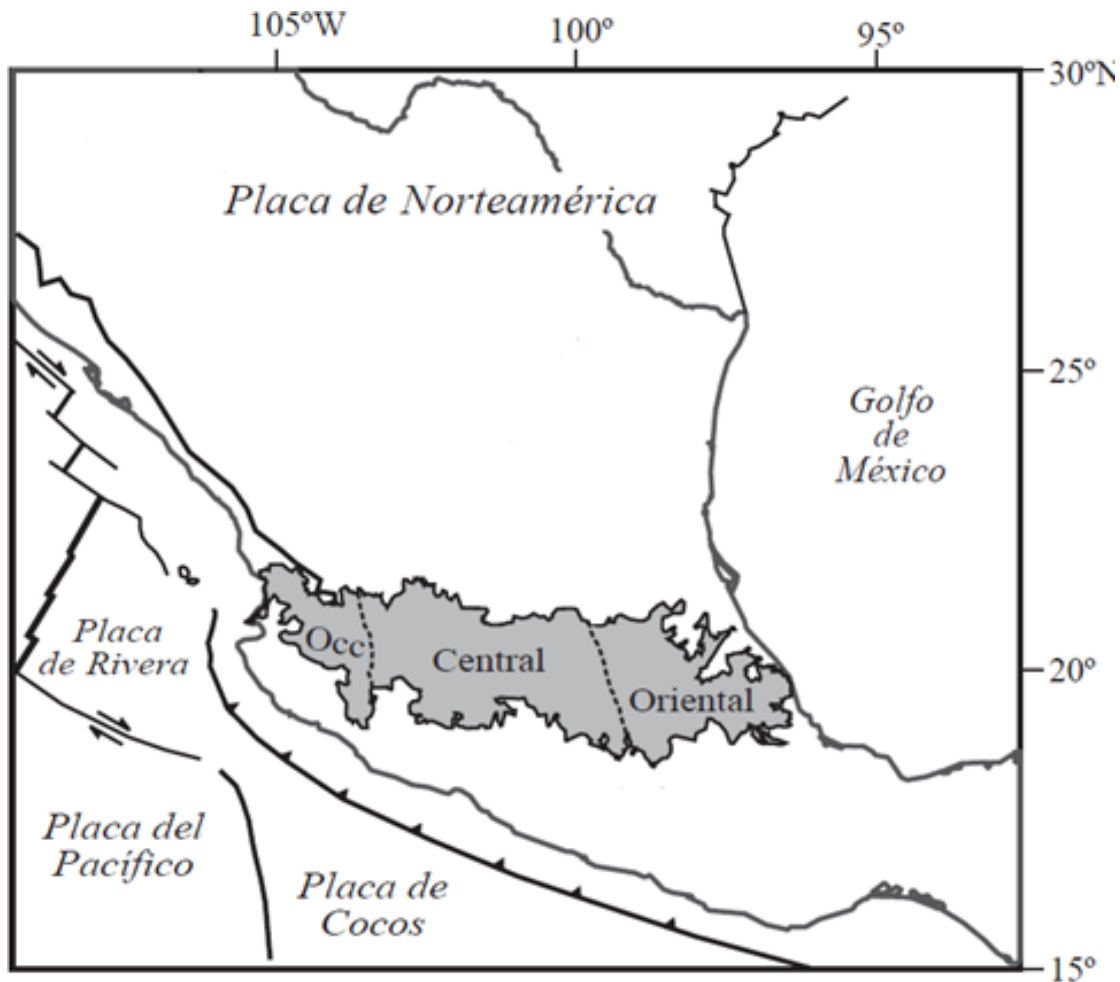


Figura 3.1 Ubicación geográfica de la Faja Volcánica Transmexicana y sus sectores (gris).

A nivel regional el Estado de Tlaxcala presenta diversas deformaciones asociadas directamente con la presencia de la FVTM, de igual forma coexisten diversos sistemas de fallas y la presencia de *grabens* y calderas que se manifiestan con la ocurrencia de sismos de magnitud moderada y pequeña (Bernal, 2006).

3.2 Geología Regional

El Municipio de Calpulalpan presenta tres formas características de relieve; las zonas planas, las zonas accidentadas donde se encuentran algunas elevaciones como monte Mal País, cañada Coecillos, San Ignacio y el Jaral, y las zonas semiplanas, acompañadas de barrancas que rodean al Municipio (Fig. 3.3 y 3.4). Estas estructuras geológicas resultado de esfuerzos tectónicos, dieron como resultado una secuencia litológica en su gran mayoría de origen volcánico y sedimentos de origen lacustre por la presencia de ríos y arroyos (Fig. 3.2).

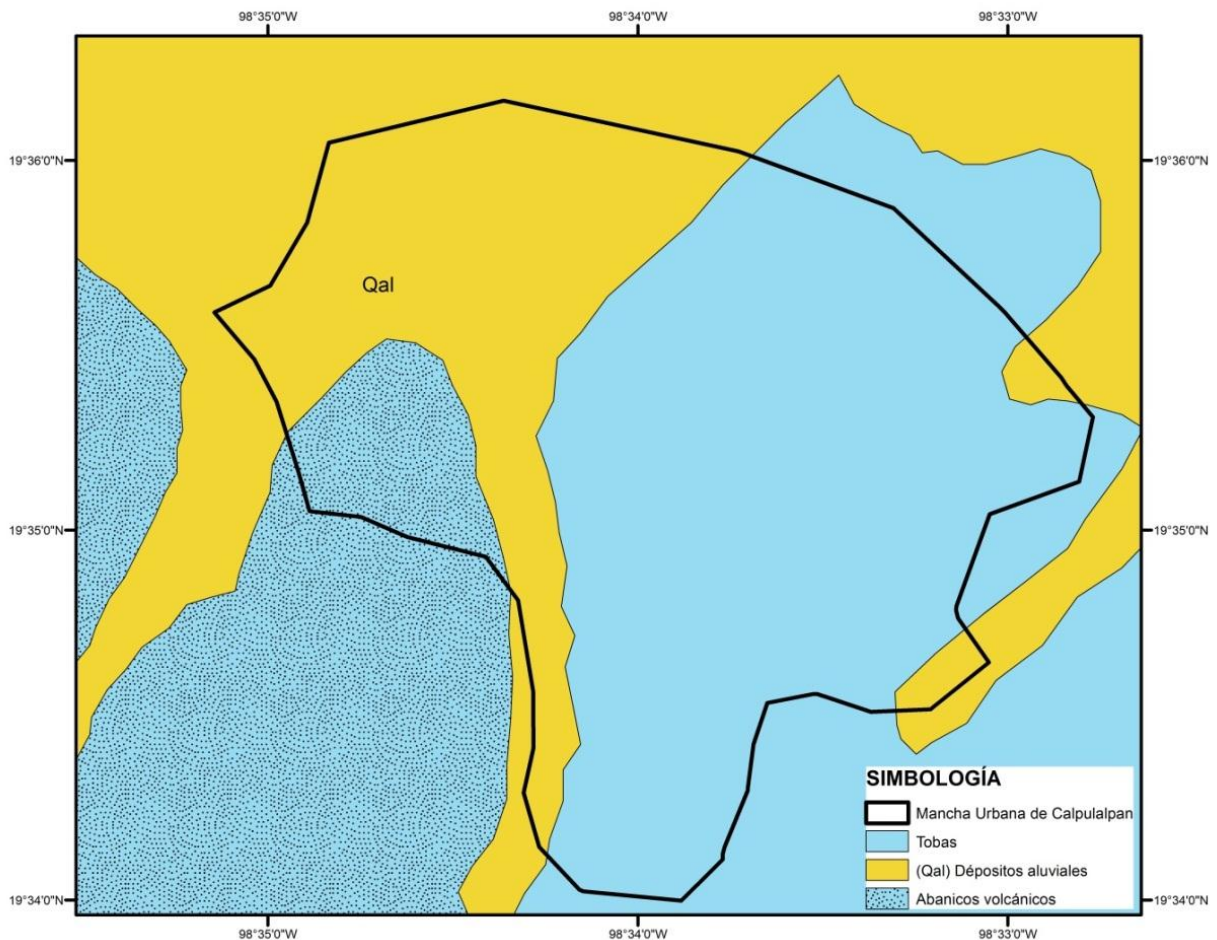


Figura 3. 2 Mapa geológico de Calpulalpan.

La litología de Calpulalpan consiste en una secuencia de tobas, aglomerados, grava volcánica de origen fluvial con capas delgadas de pómez y diatomita, con edades del Pleistoceno Tardío y Holoceno que varía de 4600 a 1420 años relacionados a la evolución de la Malinche (Gómez-Tuena *et al.* 2005). En la figura 3.3 y 3.4 muestran parte de la geología expuesta de la zona urbana de Calpulalpan.



a) Zona plana



b)

Figura 3.3 a) Zonas planas; b) Zona semiplana del Municipio de Calpulalpan



Barranca localizada en el punto 9



Barranca ubicada en el punto 15 vista superior



Barranca del punto 15 vista desde la carretera

Figura 3.4 Barrancas de Calpulalpan

3.3 Geología Estructural

El Municipio de Calpulalpan al formar parte de la FVTM está siendo afectado por diversos sistemas de fallas que se encuentran ubicadas en la margen septentrional de la parte central de esta provincia. Las estructuras geológicas más próximas son el sistema de fallas Taxco-San Miguel Allende, el sistema Apan-Tlalóc (Apan-Tochac) y el Graben de Acambay (Fig. 3.5).

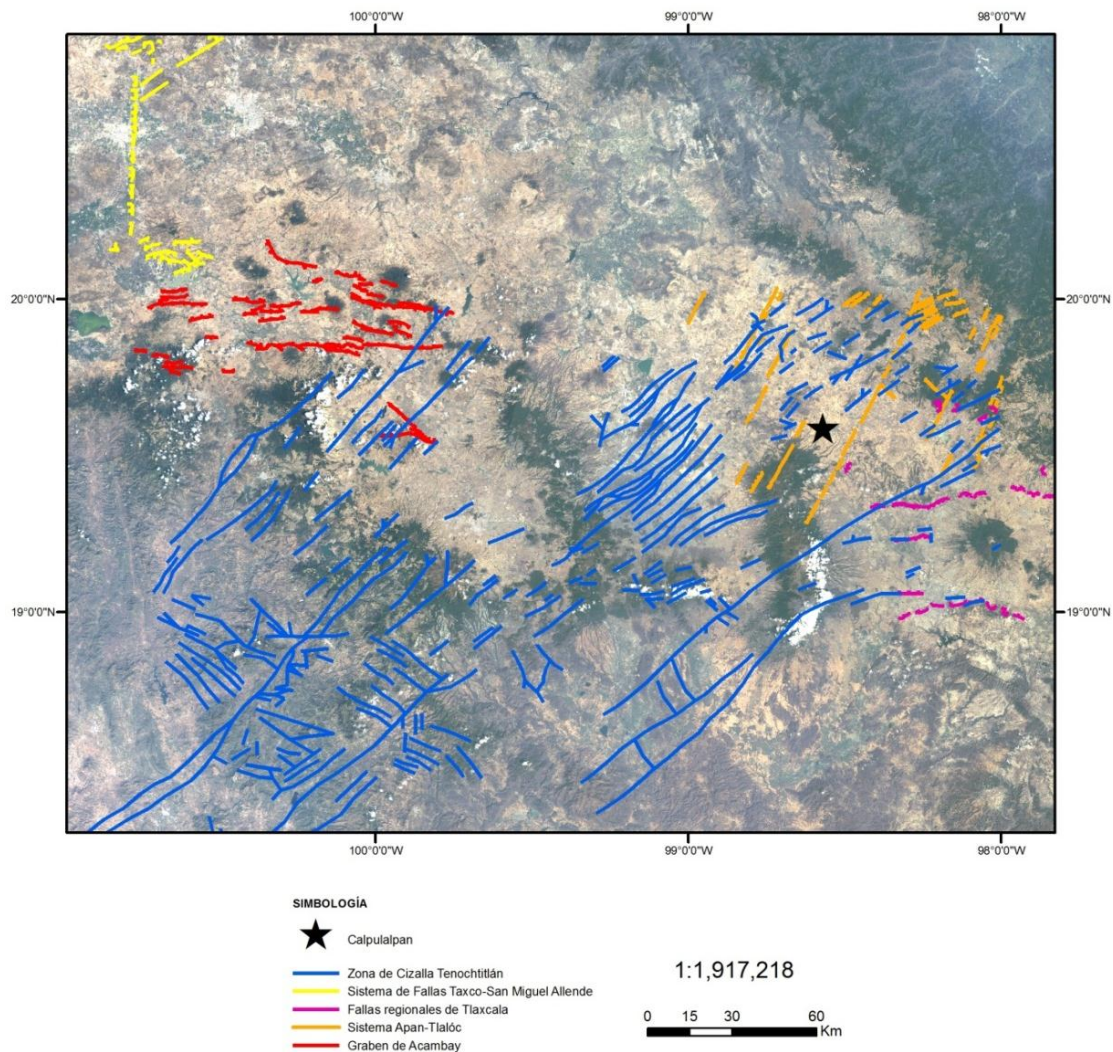


Figura 3. 5 Ubicación geográfica de los sistemas de fallas próximos a Calpulalpan.

Estos sistemas tienen un desarrollo sismotectónico significativo que afecta al municipio y a poblaciones circundantes. Aunque es posible capturar todos los aspectos para determinar de manera concreta el comportamiento tectónico de estos sistemas de fallas, en este

apartado solo se mencionan algunas características que permiten establecer cierta información que indiquen de qué manera está siendo afectada la zona del Municipio de Calpulalpan

3.3.1 Graben de Acambay

El Graben de Acambay se localiza en una zona sísmica que procede desde el sistema de fallas Acambay-Morelia, a unos 80 km al noroeste de la Ciudad de México (Fig. 3.6). Mide 40 km de largo y entre 15 y 30 km de ancho (Suter *et al.* 1995); sobre esta estructura se registró un sismo que ocasiono una falla aproximadamente de 52 km de largo y desplazamientos verticales de 50 cm (Urbina y Camacho, 1913). La ubicación del área de estudio y la región formada por este graben coincide con la parte oriental de la FVTM, por ello es importante conocer el comportamiento sísmico dentro de esta región, ya que los eventos telúricos generados dentro de esta zona pudieran afectar al Municipio de Calpulalpan.

La pared norte de este graben está formada por la falla normal que la limita, llamada Acambay-Tixmadejé (FAT), mientras que la pared meridional está definida por la falla normal Pastores (FP), ambas con relieves topográficos que varían en alturas, mientras que el límite entre el sector oriental y el central está delimitado por un área entre las fallas normales Pastores y Venta de Bravo (FVB).

Estas dos últimas fallas forman el sistema conocido como Venta de Bravo-Pastores, sin embargo tienen características propias; la primera marca el límite sur del Graben de Acambay con una longitud de 50 km, con base en los sismos que ocurrieron dentro de este *graben* se ha estimado que la ruptura de esta falla pudo ocasionar sismos de magnitudes entre 6 y 7 (Lermo *et al.* 2002).

La falla Pastores es una estructura geológica con una longitud de más de 100 km que se expande desde la región de Maravatío (Mich.) al poniente, hasta la zona de Santa María Ilucan (Hdo.) al nororiente, tiene una orientación E-W en su parte occidental y NE-SW en su porción oriental. Por otra parte, la FAT se forma por un conjunto de fallas localizadas en la región de las poblaciones Acambay y Tixmadejé, que se extienden a lo largo de 40 km con orientación ESE-WNW, conectándose al sistemas de fallas Taxco-San Miguel Allende al W y al S con la

falla Epitacio Huerta. Esta falla fue activada por el sismo de 1912 y tuvo un desplazamiento de 50 cm a orillas del poblado Tixmadeje.

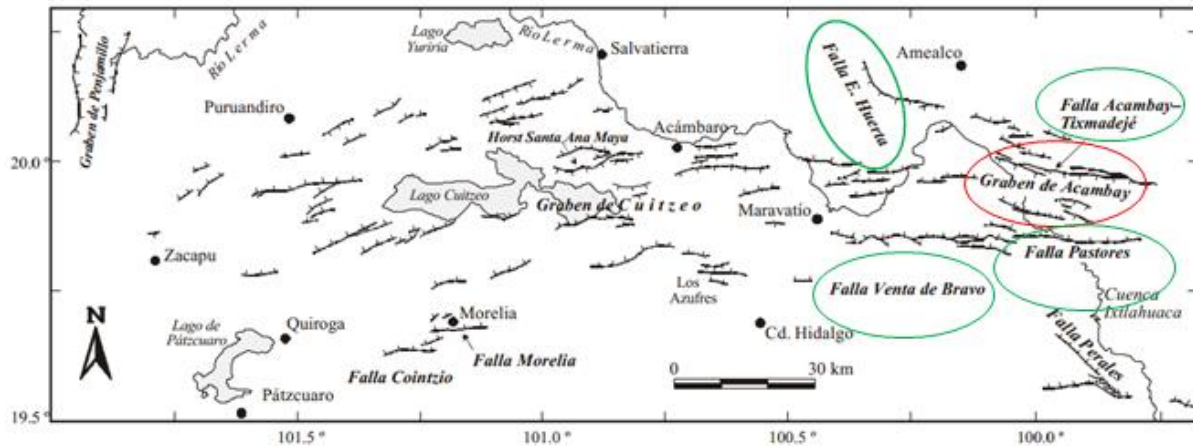


Figura 3.6 Ubicación del Graben de Acambay (rojo) y fallas contiguas de la zona (verde).

3.3.2 Sistema Taxco-San Miguel Allende

El sistema de fallas Taxco-San Miguel Allende, nombrado también como SFTSMA (por sus iniciales), se encuentra en el límite de tres provincias geológicas: la Provincia Volcánica de la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre Oriental y la Faja Volcánica Transmexicana, con una longitud mayor a 450 km abarcando el norte de la Sierra Catorce en San Luis Potosí y alcanzando más de 30 km de ancho en la región de Querétaro para terminar en el estado de Guerrero.

Dentro de la FVTM este sistema se une a diversos sistemas de fallas que atraviesan el centro de México. Las fallas normales del SFTSMA poseen longitudes entre 15 y 50 km y son transversales al sistema principal de fallas Chapala-Tula en las regiones de Querétaro, Acambay y Toluca, generando fallas sismogénicas (Fallas Ixtla y Joya, Falla Sanfandila, Epitafio Huerta, etc.) que forman parte de *grabens* y *semigrabens* cercanos a estas zonas como el *semigraben* de Aljibes, Valle de Mezquital y el Graben de Acambay (Fig.3.7)

Este sistema de fallas se considera potencialmente activo ya que se han registrados sismos con mecanismos focales de falla tipo normal con una orientación NNW que no aflora en la superficie; por ejemplo, en 1887 en Pinal de Amoles, Qro., ocurrió un temblor de $M_s = 5.3$ (Suter *et al.* 1996) y en 1998 se registró sismicidad entre los meses de Enero y Febrero con magnitudes hasta de 3.0 (Aguirre-Díaz *et al.* en prep.), los epicentros se ubicaron cerca de las comunidades de Sanfandila y Pedro Escobedo, ambas ubicadas en Querétaro. Estas reacciones podrían interpretarse como una reactivación de las fallas de la provincia de *Basin and Ranges*.

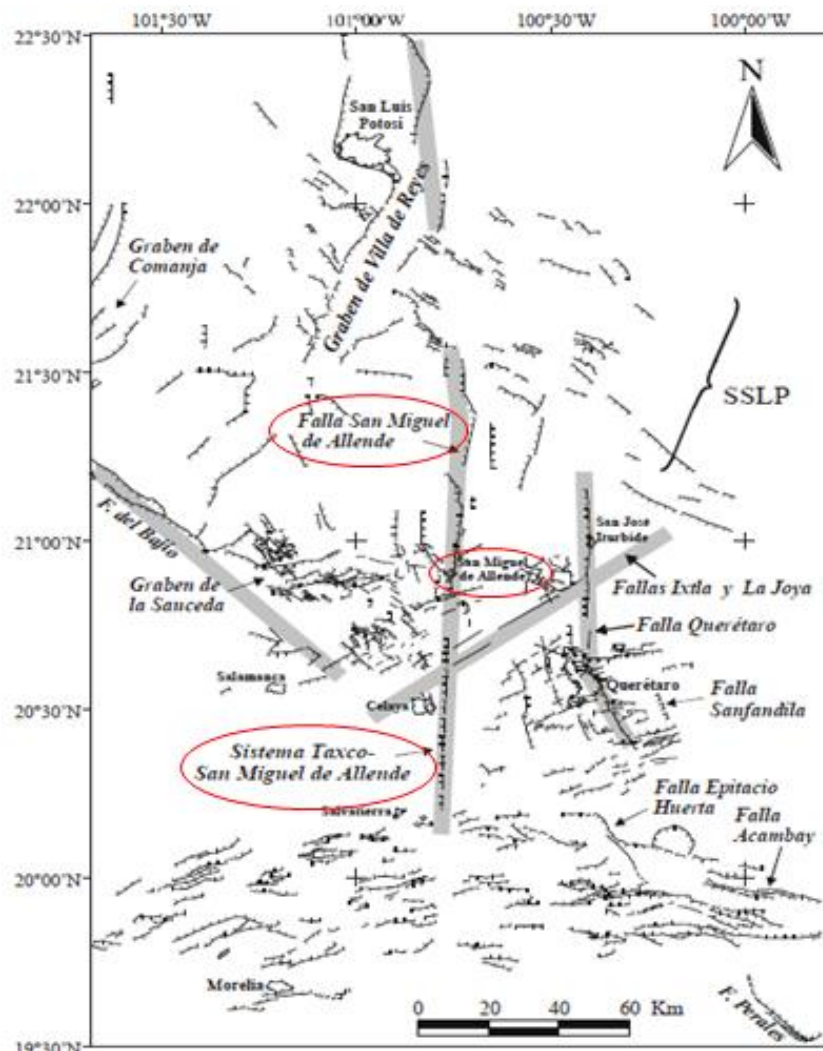


Figura 3. 7 Ubicación del sistema de fallas Taxco-San Miguel Allende (rojo), y fallas adyacentes.

3.3.3 Zona de Cizalla Tenochtitlan

La zona de cizalla Tenochtitlan es un rasgo mega-tectónico que se extiende desde la región de Zihuatanejo-Petatlán hasta la Cuenca de México y podría continuar hacia el Golfo de México (Fig. 3.8). El origen de esta zona de numerosas fallas que se encuentra al sur-poniente de la Cuenca de México (CM) con una orientación NE-SW, fue expuesto por la correlación de la orientación de los esfuerzos tectónicos a partir de la distribución de los conos volcánicos ubicados dentro de la FVTM además de evidencias gravimétricas que permitieron considerar con una mejor aproximación a la naturaleza de estas fallas y si son activas, potencialmente activas o inactivas (Guerrero-García, 2011).

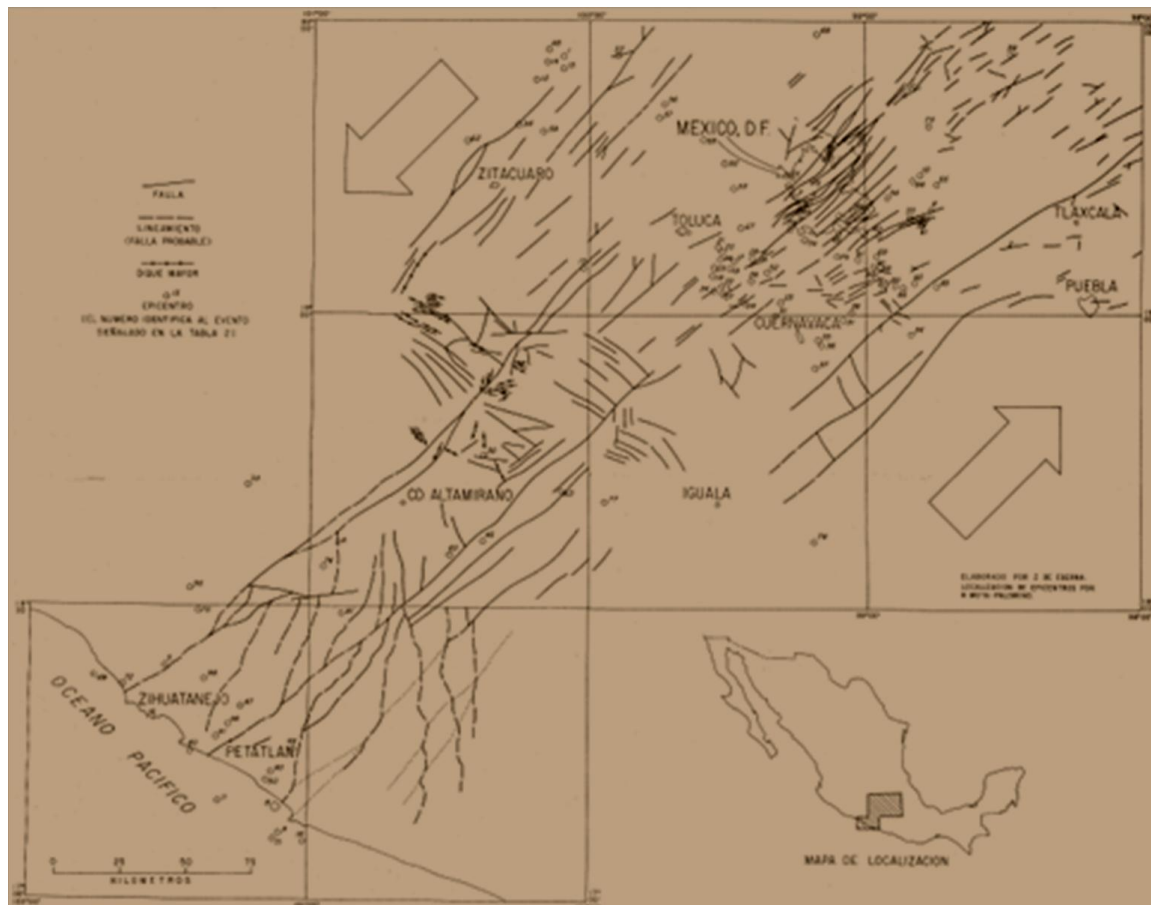


Figura 3. 8 Bosquejo tectónico preliminar del tramo suroccidental de la zona de cizallamiento Tenochtitlan (De Cserna, Mota-Palomino, 1987).

Los rasgos volcánicos más importantes de la CM resultaron estar a lo largo de fracturas extensionales de cizalleo orientadas al NE-SW. De esta forma, se puede decir que estas fallas son aquellas que facilitaron el ascenso de material magmático para la formación de conos y fallas, considerándola como una zona de cizallamiento de continuación suroccidental (Guerrero-García, 2011).

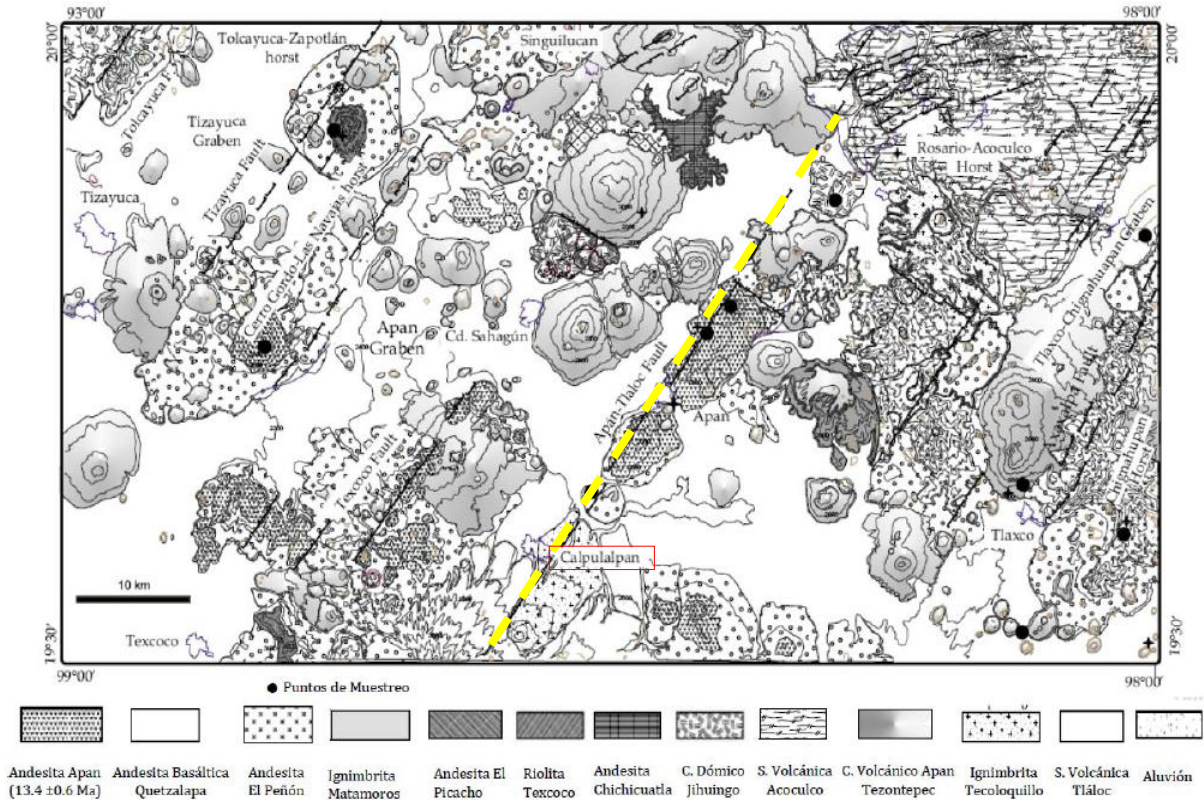
3.3.4 Región Apan

Apan se encuentra dentro de la parte NE de la llamada Zona de Cizalla Tenochtitlan, entre las coordenadas geográficas 20° 00' - 19° 30'N, y 99° 00' - 98° 00'W, con una extensión de 1200 km que abarca los estados de México, Hidalgo y Tlaxcala. Se extiende detrás de la Cordillera Sierra Nevada y está compuesta por varios volcanes activos como el Telapón y Tlálloc, como consecuencia de la actividad magmática que se desarrolló dentro de la FVTM.

Estudios geológicos y estratigráficos han demostrado que la distribución de los centros volcánicos en la región de Apan está controlada en gran medida por un sistema de fallas normales NE-SW y estructuras de fosas y pilares asociadas como resultado de un campo de esfuerzos, con el esfuerzo mínimo principal (σ_3) orientado hacia el NW (García-Palomo *et al.* 2002). Originando diversas estructuras geológicas notorias y, en conjunto con las fallas normales principales como Tizayuca, Texcoco, Tolcayuca, Apan-Tlálloc y la falla Axaxalpa entre otras fallas menores circundantes (Huizar-Álvarez *et al.* 1997), forman una geometría característica de *graben* y *horst*.

Dentro de los *horsts* se encuentra Chignahuapan, Rosario-Acocolco, Cerro-Gordo y Tolcayuca-Zapotlán, mientras que los *grabens* son Tlaxco-Chignahuapan, Apan y Tizayuca (Fig.3.9), formados por secuencia de rocas volcánicas y constituidos por flujos de lava de composición andesítica que recorren toda la zona hasta Chignahuapan (García-Palomo *et al.* 2002).

La presencia de estas estructuras se manifiesta por la ocurrencia de sismos dentro de la zona de Apan, registrando sismos de magnitud moderada, por ejemplo en 2014, el Servicio Sismológico Nacional (SSN) registró 5 eventos de magnitudes entre 3.2 y 2.7 en los poblados de Actopan y Tizayuca (eventos #121-125) ambas ubicadas en Hidalgo.



3.4 Sismicidad Regional y Local

La República Mexicana se encuentra sujeta a diversas zonas sísmicas, ocasionados por el contacto entre las placas tectónicas de Cocos, Rivera y Norteamérica, dado que se trata de un límite convergente o zona de subducción que provocó la formación de la FVTM y que genera la mayor parte de los sismos con mayor intensidad registrados tanto en la Ciudad de México como en sus alrededores (p. ej. Suárez y Jiménez, 1987). Por otra parte, sismos de menor magnitud y número de ocurrencia se sitúan dentro del continente, los cuales pueden ocasionar severos daños.

En general, la sismicidad del Municipio de Calpulalpan puede estar sometida a 2 fuentes sísmicas, la primera considera a los sismos producidos por el proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la Norteamericana (Bernal-Esquia, 2006). La segunda fuente

conocida como local, abarca los sismos provocados por los diversos sistemas de fallas que se ubican dentro de la FVTM (Chavacán Ávila, 2007), aunque estos sismos son de menor magnitud no se descarta la posibilidad de que puedan ocurrir con una mayor magnitud, y por lo tanto provocar severos daños en lugares cercanos al epicentro.

Investigaciones realizadas por González Pomposo *et al.* (1995) mencionan que los sismos en la región central que abarcan las latitudes 18.5° y 20° N son de profundidades someras y están relacionados a esfuerzos tectónicos de la corteza. En las fronteras de los estados de Tlaxcala, México e Hidalgo se registraron 18 eventos el 11 de mayo de 1986 que fueron relacionados directamente con el sistema de fallas Tláloc-Actompan (González Pomposo *et al.* 1995).

No obstante, este evento sísmico no es el único ligado a un sistema de fallas ya que también se han registrado sismos en el Graben de Acambay, el cual está conformado por un sistema de fallas de gran tamaño y donde se produjo un evento de magnitud $M_s = 6.9$ el 19 de Noviembre de 1912, relacionado a este sistema el 22 de Febrero de 1979 en Maravatío (Mich), se cuantificó un sismo con una magnitud de 4.9, (Suter *et al.* 1995). Estos eventos telúricos localizados cerca de la zona de estudio comprueban la existencia de dichas estructuras geológicas activas, que hacen necesaria la existencia de ciertos parámetros para reducir el riesgo al que está expuesto el Municipio.

Trabajos geofísicos y estudios magnetotelúricos han podido demostrar la presencia de flujos liberados por la placa en subducción y de la fusión parcial en el manto superior y en la corteza por debajo de la FVTM (Luca *et al.* 2012), lo que indica que las fallas que se encuentran en esa zona son sísmicamente activas. Gracias a las investigaciones realizadas por Bernal Esquí (2006) y Chavacán Ávila (2007) junto con datos obtenidos del Servicio Sismológico Nacional, se elaboró un catálogo sísmico donde se localizan los principales eventos que se encuentran cercanos a la zona de estudio, así como también aquellos que por su gran magnitud llegan a propagarse hasta el área de interés (Tabla 3.1).

Tabla 3. 1 Catálogo de Sismicidad

Eventos	Latitud	Longitud	Magnitud	Profundidad	Años
1	19.634	-98.581	2.9	10.25	1982
2	19.405	-98.021	1.9	12.2	1984
3	19.44	-97.973	1.8	17.6	1984
4	19.475	-98.108	2.5	6	1984
5	19.48	-98.149	2.3	6.7	1984
6	19.512	-98.091	2.4	4.9	1984
7	19.478	-98.185	2.6	7.3	1984
8	19.468	-98.193	2.6	7.7	1984
9	19.489	-98.081	2.7	4.8	1984
10	19.153	-98.189	1.9	26.6	1984
11	19.438	-98.159	2.4	6.9	1984
12	19.325	-98.1	1.6	13.7	1984
13	19.464	-98.2	2.8	7.7	1984
14	19.476	-98.171	2.8	7	1984
15	19.479	-98.208	2.1	0.7	1984
16	19.46	-98.165	2.1	7	1984
17	19.473	-98.133	2.1	6.8	1984
18	19.517	-98.105	2.6	5.4	1984
19	19.488	-98.183	2.2	7.4	1984
20	19.408	-98.266	2	5.7	1984
21	19.741	-98.577	3.8	5	1986
22	19.623	-98.352	3.2	0.9	1986
23	19.597	-98.36	2.5	0.9	1986
24	19.818	-98.365	3	0.9	1986
25	19.598	-98.374	2.7	0.9	1986
26	19.558	-98.411	2.8	0.9	1986
27	19.589	-98.362	3.4	0.9	1986
28	19.637	-98.351	2.4	0.5	1986
29	19.627	-98.367	3	0.9	1986
30	19.693	-98.378	2.6	0.4	1986
31	19.703	-98.358	2.5	0.9	1986
32	19.615	-98.345	3	0.9	1986
33	19.638	-98.368	2.5	0.9	1986
34	19.677	-98.415	3.1	0.9	1986
35	19.723	-98.359	2.4	0.9	1986
36	19.677	-98.376	2.5	0.7	1986
37	19.91	-98.294	2.6	0.9	1986
38	19.632	-98.371	2.6	0.9	1986
39	19.667	-98.362	3.1	0.9	1986
40	19.769	-98.316	3.1	0.9	1986
41	19.735	-98.335	2.6	0.9	1986

Tabla 3.1 Continuación					
42	19.34	-97.61	3.4	20	1986
43	19.668	-98.667	4	30	1986
44	19.657	-98.65	4.1	29	1986
45	19.68	-98.571	4	37	1986
46	19.691	-98.613	3.4	37	1986
47	19.636	-98.687	3.4	37	1986
48	19.853	-98.323	2.9	0.9	1987
49	19.907	-98.295	2.5	0.9	1987
50	19.24	-97.62	3.1	24	1987
51	19.53	-98.33	3.1	37	1987
52	19.39	-98.17	3.1	32	1987
53	19.62	-98.519	2.2	0.9	1988
54	19.547	-98.478	2.2	0.9	1988
55	19.25	-97.58	2	28	1988
56	19.386	-98.167	2.7	24	1988
57	19.32	-98.204	2.1	3.1	1988
58	19.266	-98.256	3	4.7	1988
59	19.318	-98.208	2.3	3	1988
60	19.33	-97.69	3	32	1989
61	19.269	-98.216	3	8.5	1989
62	19.784	-98.355	4.4	0.9	1990
63	19.707	-98.305	3.4	0.9	1990
64	19.56	-98.41	3.1	0.9	1990
65	19.519	-98.498	4.1	0.9	1990
66	19.701	98.513	3.1	6	1992
67	19.656	-98.529	3.2	8	1992
68	19.652	-98.436	2.7	15.4	1992
69	19.684	-98.499	1.5	7.4	1992
70	19.692	-98.466	1.5	13	1992
71	19.687	-98.43	0.8	15	1992
72	19.718	-98.506	1.5	6.3	1992
73	19.689	-98.514	1.1	8.9	1992
74	19.692	-98.513	1.8	8.4	1992
75	19.663	-98.506	1.8	11	1992
76	19.658	-98.494	1.6	11.5	1992
77	19.607	-98.516	1.4	12.8	1992
78	19.685	-98.522	1.8	10	1992
79	19.655	-98.512	1.5	9.6	1992
80	19.703	-98.67	3.1	9.6	1994
81	19.81	-98.432	2.7	6.4	1994
82	19.66	-98.746	2.9	3.1	1994
83	19.359	-98.416	2.2	4.4	1994
84	19.362	-98.445	2.1	8.6	1995
85	19.36	-98.418	2.2	10	1995

Tabla 3.1 Continuación					
86	19.148	-98.319	3	6.6	1996
87	19.74	-99.594	2.5	13.5	1997
88	19.155	-98.17	2.4	4.2	1997
89	19.146	-98.184	2.7	3.1	1997
90	19.327	-98.429	2.3	4.4	1997
91	19.336	-98.422	2.4	5.8	1997
92	19.451	-98.834	3.8	7	1998
93	19.432	-98.858	3.7	4	1998
94	19.273	-98.219	3.5	1	2002
95	19.232	-97.681	2.9	5.2	2002
96	19.563	-98.822	2.3	31.4	2004
97	20.3	-99.2	3.7	5	2006
98	19.48	-98.55	3.8	20	2006
99	20.11	-98.69	3.6	20	2008
100	19.68	-98.68	3.2	2	2008
101	20.36	-99.16	3.6	16	2008
102	19.6	-97.91	3.8	20	2008
103	20.39	-99.06	3.5	10	2009
104	20.34	-99.11	3.5	10	2009
105	20.91	-99.34	3.6	13	2009
106	19.7	-98.62	2.9	4	2010
107	20.49	-99.11	3.1	5	2010
108	20.46	-99.04	3.4	5	2010
109	19.26	-97.42	3.8	80	2011
110	20.38	-98.96	2.5	5	2011
111	20.91	-99.4	3.5	5	2011
112	21.2	-99.5	3.8	30	2011
113	19.493	-98.231	7.4	20	2012
114	19.23	-98.93	3.4	5	2012
115	20.38	-98.96	3.1	20	2012
116	20.29	-99.12	3.8	1	2013
117	20.27	-99.16	3.7	1	2013
118	20.38	-99.96	3	20	2013
119	19.3	-97.54	3.8	20	2013
120	19.08	-98.63	3.3	3	2014
121	20.46	-99.01	3	3	2014
122	19.919	-98.893	3.6	5	2014
123	20.36	-98.93	2.8	5	2014
124	20.37	-98.95	2.7	20	2014
125	20.37	-98.95	2.7	20	2014

El área de estudio se encuentra cerca de una de las zonas sismogénicas interiores a la Cuenca de México, designada como zona VI, que corresponde a la Subcuenca de Apan (Fig. 3.11), cuya sismicidad fue registrada por la Red Sismotelemétrica del Valle de México (SISMEX) en 1976 (Lermo, 2006), esta zona se caracteriza por presentar sismos de ocurrencia temporal, es decir, que pueden acontecer cada determinado tiempo.

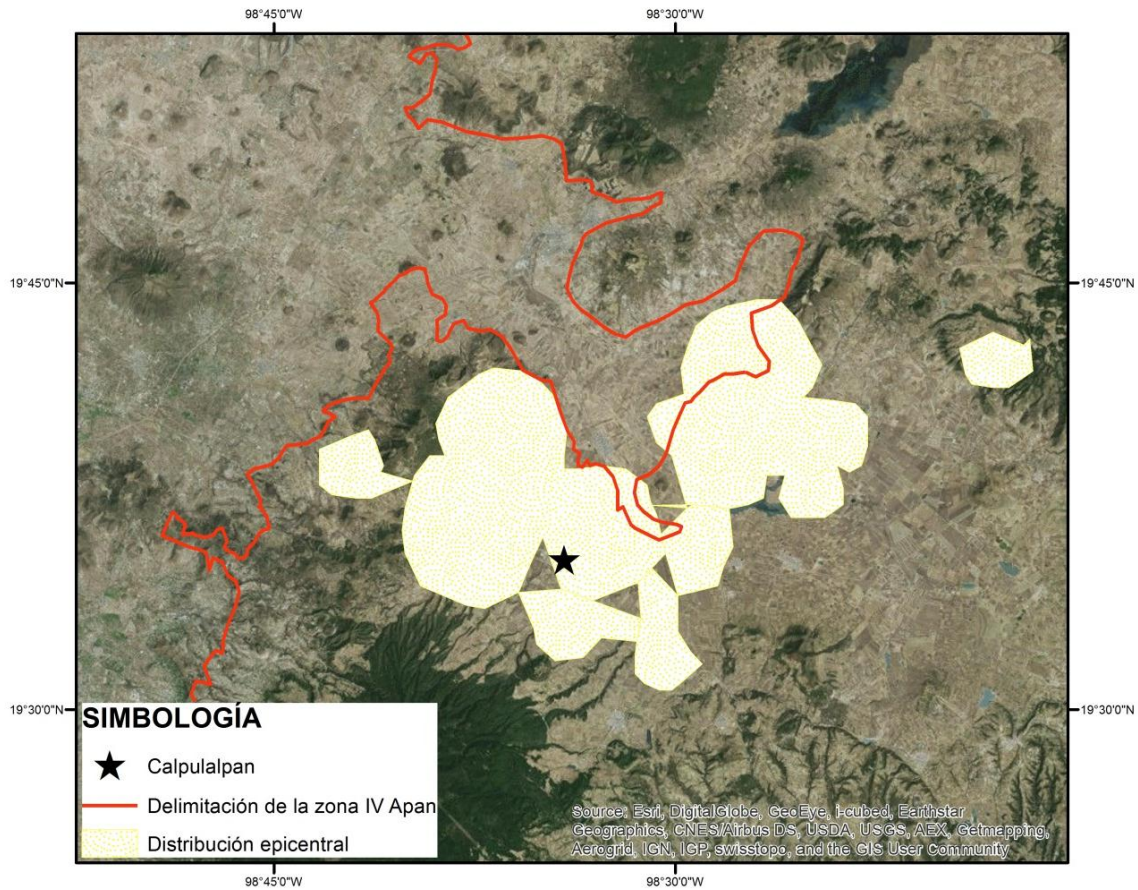


Figura 3. 10 Distribución epicentral de la zona de Apan

Los sismos originados en la zona de Apan son generalmente de magnitudes entre 2 a 4 (eventos #22-41, 62-81) y con profundidades no mayores a 30 km (sismos corticales), originando una distribución epicentral como se muestra en la figura 3.10, donde se puede observar que el área de estudio se encuentra dentro de las zonas que son afectadas por la presencia de sismos pertenecientes a esta región.

Con la imagen anterior se demuestra que el Municipio de Calpulalpan es afectado constantemente por sismos de magnitud relativamente pequeña; sin embargo, la actividad de las fallas mencionadas puede generar sismos mayores y provocar daños irreversibles, con pérdidas tanto económicas como humanas.

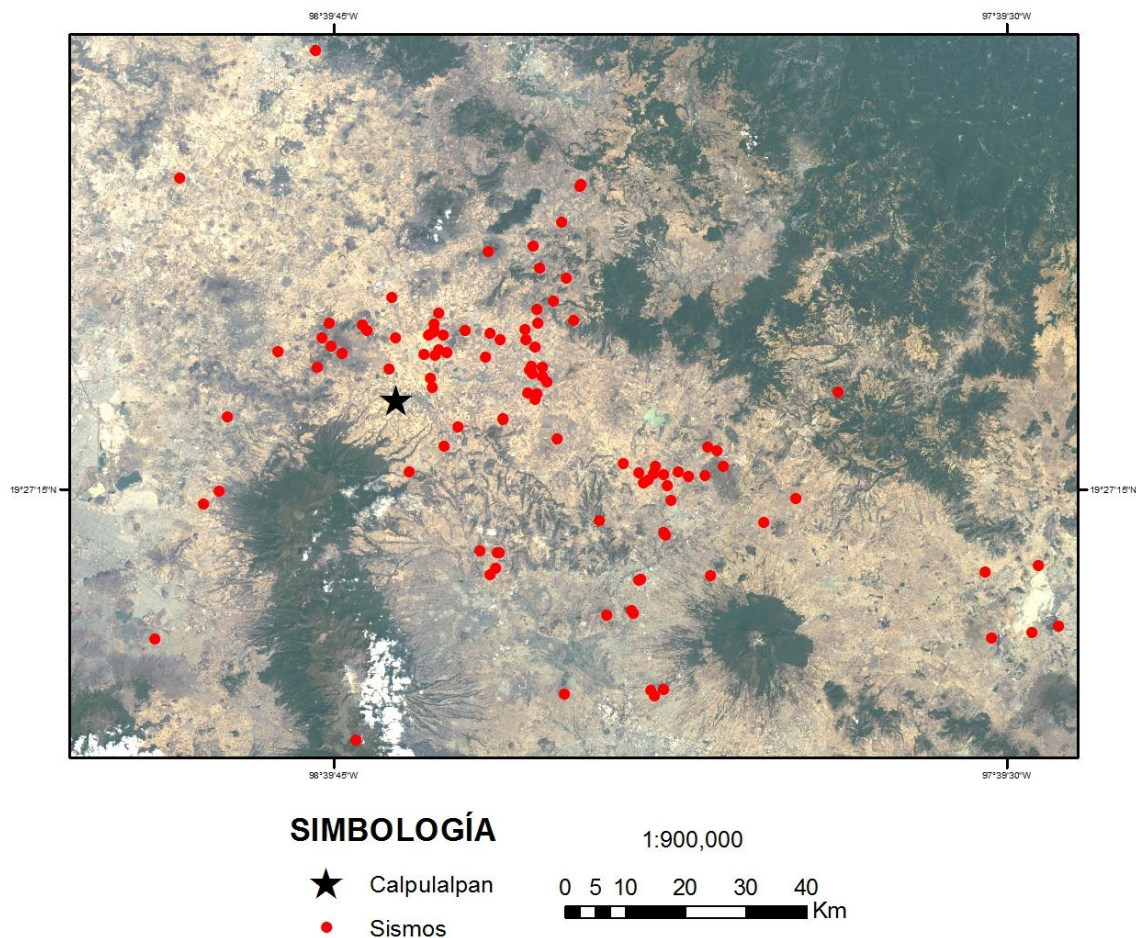


Figura 3.11 Ubicación geográfica de los sismos presentados en la Tabla 3.1

CAPÍTULO 4.

CAMPAÑA DE MONITOREO

4.1 Adquisición de datos

La campaña de monitoreo y adquisición de datos, en el Municipio de Calpulalpan, Estado de Tlaxcala, se llevó a cabo los días 13 y 14 de abril de 2014.

Los puntos de monitoreo fueron distribuidos de tal manera que se formara una rejilla que abarcara principalmente los cambios bruscos de topografía que se encuentran en toda la zona urbana. Se obtuvieron en total 31 mediciones de vibración ambiental, en el Apéndice A se muestran las coordenadas y ubicación de cada punto. La separación entre los puntos de medición no fue mayor a 500 m (Fig. 4.1).

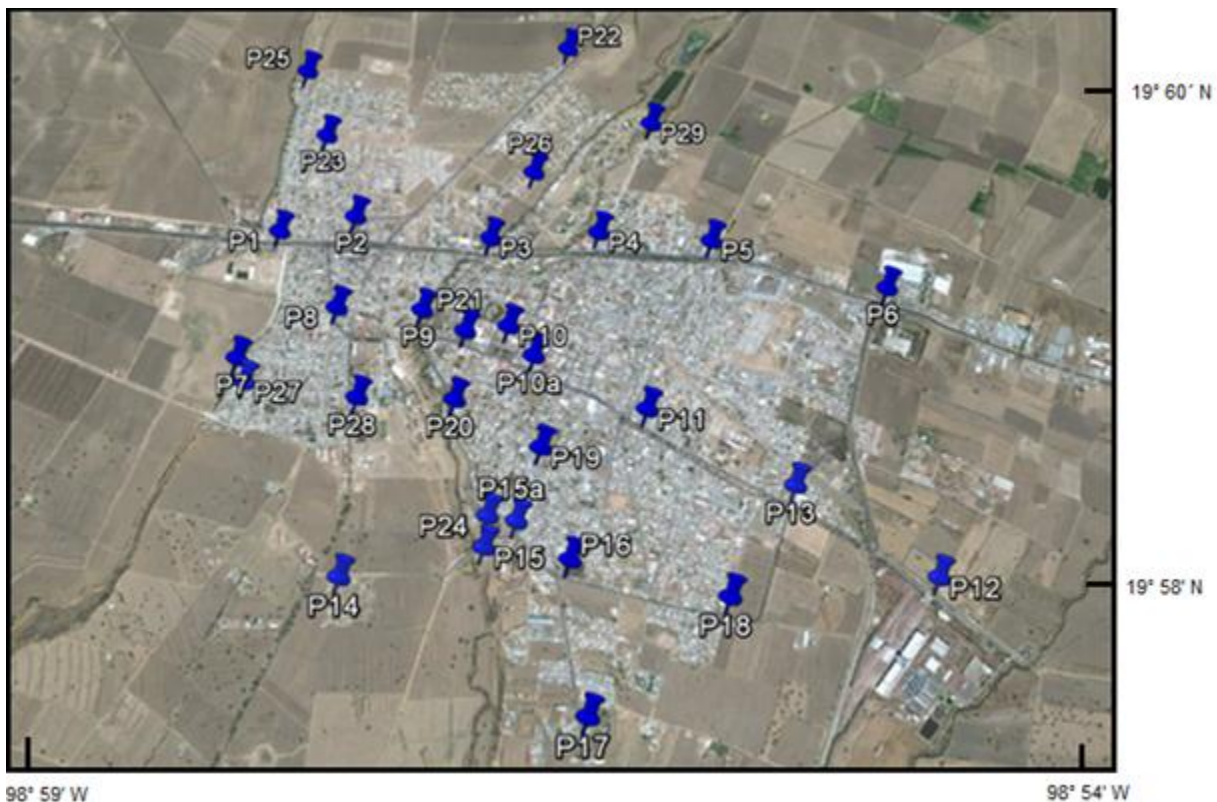


Figura 4.1 Ubicación de los puntos de medición de la vibración ambiental.

A continuación se describen los equipos empleados para realizar las mediciones y los parámetros considerados al efectuar la adquisición en cada punto, los cuales incluyen espaciamiento entre estaciones, tiempo de registro y condiciones experimentales.

4.2 Equipo de medición

Para la adquisición de datos de vibración ambiental, se requiere de un sensor capaz de registrar las tres componentes ortogonales del movimiento: Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical. Por ello, se recomienda el uso de sensores con un período natural de vibración que permita registrar ondas en un rango de frecuencias comprendido entre 0.1 Hz y 10 Hz, aproximadamente.

En la figura 4.2 se muestra de forma esquemática el espectro sísmico en función del período y la frecuencia, señalando tanto las fuentes como los instrumentos de medición recomendados para cada intervalo. La vibración ambiental se sitúa aproximadamente en el rango comprendido entre 0.1 Hz y 10 Hz (Roca, 1996).

4.2.1 Sensor

El equipo utilizado en el presente trabajo es el Sismógrafo triaxial digital CMG-6TD (Guralp Systems), cuyas componentes están orientadas ortogonalmente, es compacto e ideal para una instalación rápida (Fig. 4.3). Este instrumento se ha empleado en lugares con ruido moderado, monitoreo volcánico, estudios de ruido, réplicas y microzonificación sísmica. Algunas especificaciones del equipo son:

- Respuesta en frecuencia de 1seg a 100 Hz (banda ancha).
- Sensibilidad de 2400 V/m/s.
- 100 muestras por segundo.
- Digitalizador interno de 3 canales (24bits).
- Memoria interna de 4GB.

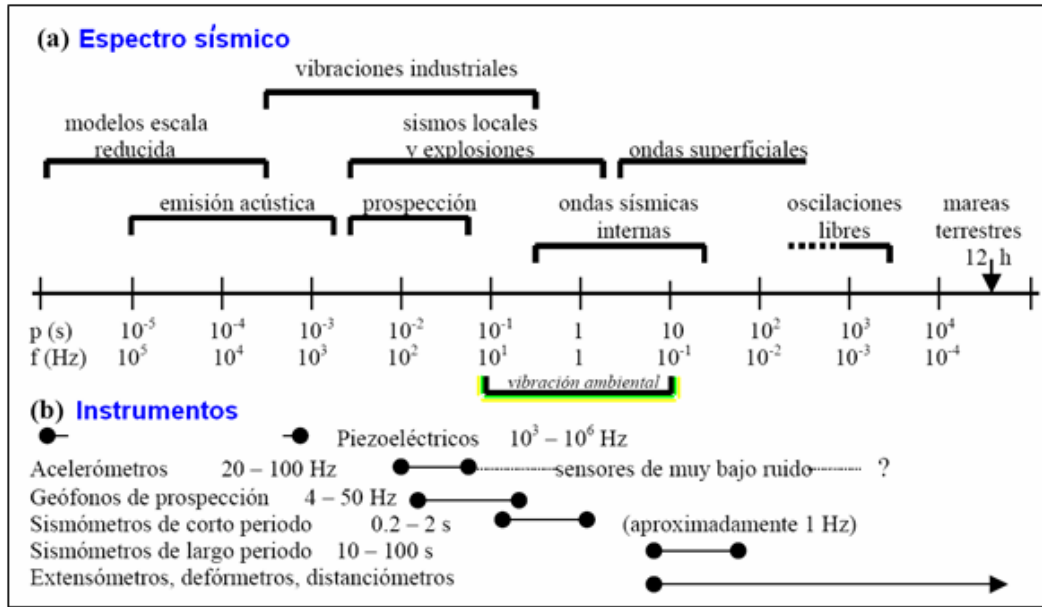


Figura 4.2 Diagrama a) Espectro sísmico; b) Instrumentos (Modificado de Roca, 1996).



Figura 4. 3 Imagen del sensor Guralp Systems de tres componentes. Izquierda: vista lateral. Derecha: vista superior.

Algunos autores han estudiado las diferencias en los resultados obtenidos al utilizar diferentes tipos de instrumentos, compararon los registros obtenidos de dos sismómetros diferentes (Gürlap y Mark) instalados uno a continuación del otro.

La comparación realizada en términos de densidad de potencia espectral (PSD, Power Spectral Density) mostró una excelente correspondencia entre los registros obtenidos por los sismómetros de período corto y los de banda ancha en el rango de frecuencias 0.2-20 Hz. Por lo tanto, este resultado permite concluir que utilizando un sensor de período corto correctamente calibrado se pueden obtener los mismos resultados que se obtendrían usando un sismómetro de banda ancha en el rango de interés para ingeniería.

4.2.2 Software de Digitalización

El software Scream 4.4 de Guralp Systems, es utilizado para operar los sismógrafos que se emplearon en el trabajo de campo. Este programa de cómputo proporciona las herramientas para un óptimo funcionamiento del equipo, ya sea a tiempo real o en forma autónoma. El equipo se operó desde una Pc laptop, misma que se utilizó para guardar los registros. En la figura 4.4 se muestra la lectura de la señal.

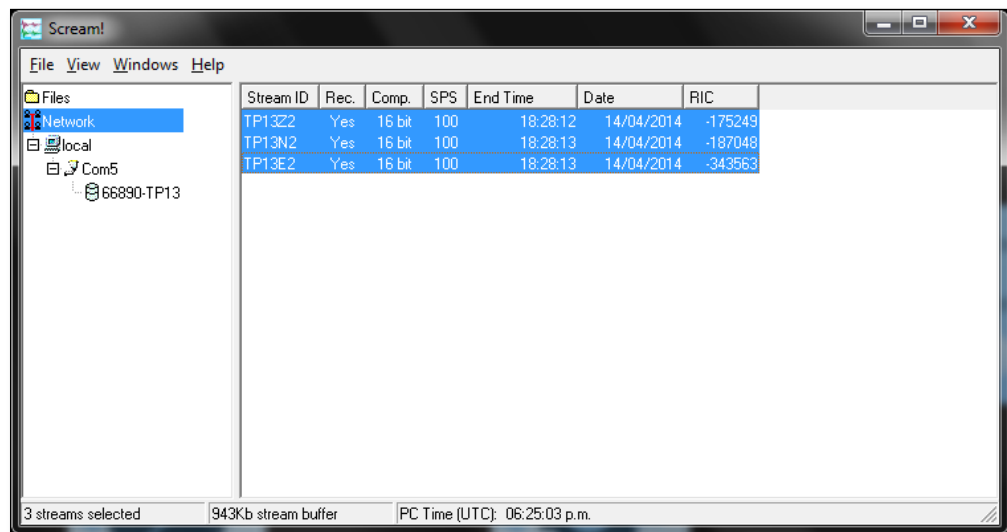


Figura 4.4 Visualización del registro de la señal en el software Scream 4.4.

Para observar los datos en tiempo real y confirmar que las tres componentes se registren adecuadamente, se conecta la Pc al equipo mediante un cable Ethernet y con ayuda de este software permite observar el registro (Fig. 4.5), la interfaz del programa muestra tres líneas de colores que indican las tres componentes, el color azul señala la componente E-O, el rojo la componente N-S y la verde la componente vertical Z.

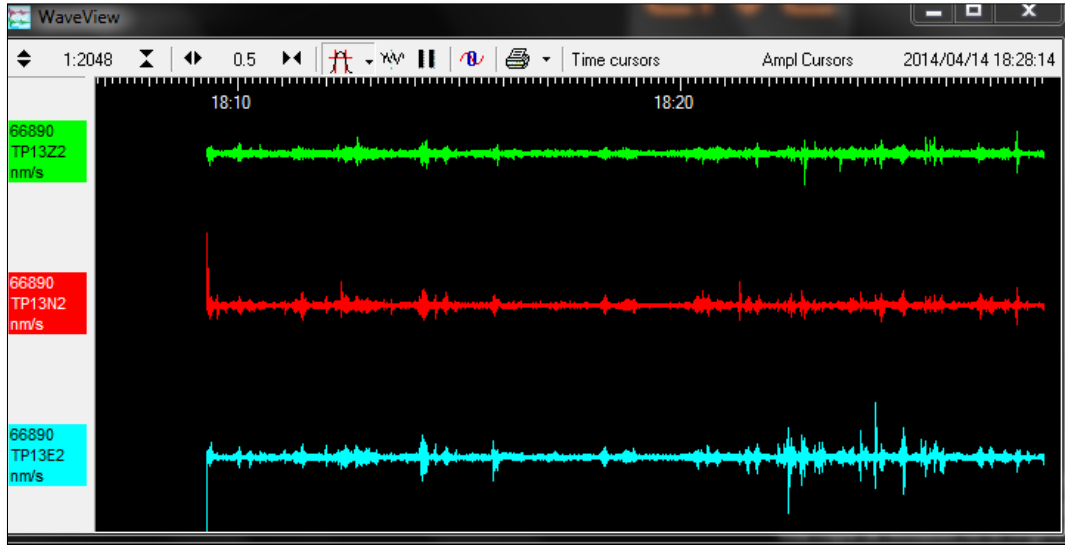


Figura 4.5 Imagen de la lectura de una señal en tiempo real en el software Scream 4.4.

4.2.3 Otros

Adicionalmente se emplearon:

- Brújulas Rossbach azimutal tipo Bronton (para orientar el sensor hacia el Norte).
- GPS Garmin ETrex Vistas HCx.
- PC Laptop Toshiba Satellite (para verificar el buen funcionamiento de los sismógrafos).

- Accesorios del sismógrafo: antena GPS con cable (20m), cable de alimentación (5m), cable de datos serial (3m) y cable Ethernet (5m).
- Batería de 12 volts.
- Vehículos.

4.3 Parámetros de adquisición

A continuación se presentan algunos parámetros de registro tomados en consideración antes y durante el proceso de adquisición de datos de vibración ambiental (Bard, 2004), los cuales son de gran utilidad para mejorar la eficiencia del equipo.

4.3.1 Espaciamiento en las mediciones

Para los estudio de microzonificación es recomendable un espaciamiento inicial no mayor a 500 metros, en función de la extensión del área de estudio. Tomando en cuenta que la zona urbana del Municipio de Calpulalpan no ocupa un área muy extensa (11.041 km² aproximadamente), un espaciamiento inicial de 500 m representa una distancia relativamente ideal. Sin embargo, si se observa una variación significativa entre los resultados de cada estación, se densifica el espaciamiento a 250 m aproximadamente entre puntos de medición.

4.3.2 Tiempo de registro

Con el propósito de obtener una ventana de datos adecuada en el proceso y análisis de los registros, en este estudio se llevaron a cabo mediciones con una duración de 20 a 25 min aproximadamente, con una tasa de muestreo de 100 muestras por segundo.

El criterio para establecer el tiempo mínimo ideal del registro de los microtemores es un tema que aún falta por estudiar, a pesar de esto, algunos investigadores como Sánchez-Sesma *et al.* (2011) han analizado diversos registros de microtemores con el fin de determinar el tiempo necesario de registro para obtener una buena aproximación de la frecuencia fundamental como de la amplitud de ésta. Los resultados observados en dicho estudio

demonstraron que no existe una variación importante en los factores de amplificación en registro de una hora, tres y seis horas, por lo tanto el tiempo no representa dificultad alguna durante el proceso de grabación.

4.3.3 Nomenclatura de archivos

Los registros están compuestos por las tres componentes N-S, E-O y Vertical, estas señales deben pertenecer a la misma grabación y con un nombre en común, en la figura 4.6 se muestra la nomenclatura de las señales, de izquierda a derecha los primeros dígitos indican el año, el mes y el día, seguido de la hora de inicio del registro, estos están referidos al tiempo central UTC por lo que hay que restar 5 horas en horario de verano y restar 6 en horario de otoño a la hora indicada por el programa.

El *tp13* indica la etiqueta del instrumento utilizado y las letras *e*, *n* y *z* las tres direcciones o componentes del movimiento. Este ejemplo señala que el registro se llevó a cabo el día 13 de abril de 2014 a las 12 horas. El formato de las señales puede presentarse como GCF, ASCII o SAC, extensiones compatibles con el software.

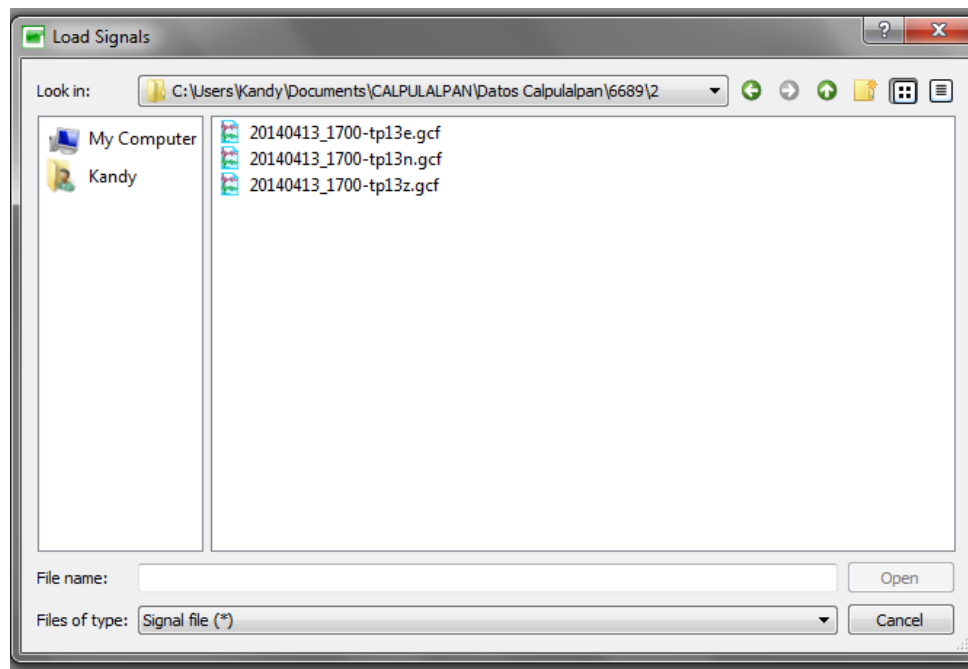


Figura 4. 6 Nomenclatura de las señales en Pc.

4.3.4 Condiciones experimentales

Es importante comprender que los parámetros de adquisición influyen en la calidad y fiabilidad de los datos. Sin embargo, no son los únicos aspectos a tomar en cuenta ya que las mediciones de vibración ambiental en cualquier lugar deben ser guiadas tomando en cuenta las siguientes especificaciones:

4.3.4.1 Acoplamiento del sensor

La mayoría de las mediciones se efectuaron colocando el sensor directamente sobre concreto, asfalto y pavimento, los cuales aportan buenos resultados, ya que permiten una buena nivelación del sensor obteniendo mejores resultados.

Se debe evitar fijar el sensor en suelos blandos como barro, tierra labrada, hierba alta, suelos saturados después de la lluvia y en placas de materiales blandos como la espuma de caucho y cartón, también se debe evadir las pendientes pronunciadas ya que no permiten la estabilidad correcta del sensor.

4.3.4.2 Ambiente

Factores como el viento y la lluvia pueden afectar el resultado de las mediciones realizadas; bajo condiciones climáticas de lluvia ligera y vientos menores a 5 m/s los resultados no tienen ninguna influencia notable, se puede cubrir el sensor para evitar algún daño del equipo. Ahora bien, si los vientos exceden los 5 m/s estos pueden influir fuertemente en los resultados de la relación espectral H/V, introduciendo algunas bajas frecuencias en las curvas, esto se puede evitar protegiendo el sensor del viento. Si se cuenta con perturbaciones meteorológicas se debe indicar en las hojas de campo. La brisa es probablemente la influencia más frecuente en registros de ruido ambiental, introduciendo alteraciones en rangos de frecuencia baja (< 1 Hz) que no están relacionadas con los efectos de sitio.

Cuando se trabaja bajo condiciones climáticas extremas como nieve o hielo es recomendable instalar el sensor en una pila de arena o en un recipiente lleno de arena de esta manera se evitara la inclinación del sensor debido a la fusión local.

4.3.4.3 Estructuras cercanas

Otro aspecto a evitar es la grabación cerca de máquinas de construcción, máquinas industriales, bombas, generadores, árboles, etc. El movimiento de las estructuras debido a la acción del viento puede repercutir en los datos adquiridos, introduciendo un alto contenido de bajas frecuencias en las curvas H/V, en especial, aquellas que pudieran interactuar con el viento. No es posible cuantificar con exactitud la distancia mínima que debe existir entre estas estructuras y el sensor para que el efecto sea el menor posible, ya que depende de diversos factores externos tales como el tipo de estructura, velocidad del viento y el tipo de suelo.

Igualmente, se debe evitar mediciones sobre estructuras ubicadas en el subsuelo como por ejemplo tuberías, aparcamientos, tubos, tapas de alcantarillado, ya que las mismas alteran considerablemente la amplitud del movimiento vertical.

4.4 Metodología de adquisición

Una vez considerados los aspectos mencionados anteriormente se prosigue a montar el equipo, lo primero que se realiza es la ubicación del punto a medir en el mapa del área de estudio, para después realizar la instalación correcta de los equipos de medición (Figura 4.7).

Posteriormente, se realiza la orientación del sismógrafo hacia el Norte y se procede a nivelar la base del sensor para que las tres componentes se estabilicen, se comprueba la estabilidad del sensor y se verifica el correcto funcionamiento del sismógrafo. Para ello se observa en el software Scream 4.4, por medio de la Pc, el funcionamiento de los tres canales de grabación y antes de comenzar la medición se espera alrededor de 5 min hasta que los canales se estabilicen.

Una vez hecha la instalación, se procede a efectuar la programación del equipo que consiste en configurar la opción de grabación. En el caso de este estudio, la opción de grabación fue de tipo programado, de manera que comienza a registrar la señal a la hora indicada y se detiene culminado el tiempo establecido (20 min).

Para llevar un control de los puntos monitoreados se hace necesario el uso de una bitácora de campo. En ella se puede registrar la información correspondiente a la fecha de

adquisición, lugar, coordenadas geográficas, identificación de los equipos empleados, número de punto, condiciones climáticas, hora inicial y final del registro y algún otro tipo de información pertinente (Fig. 4.8, ver planilla en el apéndice A).

Finalizados los 20 min, se procede a desconectar el instrumental empleado y se realiza el traslado al siguiente punto de medición, hasta completar el total de puntos.

4.5 Procesamiento de los registros sísmicos

La etapa de procesamiento se inicia con la descarga de los datos originales ubicados en el disco duro del sismógrafo a una computadora personal. Una vez descargada la información, se procede a la lectura de las señales mediante el programa GEOPSY. Los datos grabados en los sismógrafos se encuentran listos para ser trabajados en computadoras personales, mientras tengan el formato ASCII o alguno de los mencionados anteriormente. Finalmente, se realiza la selección de ventanas en dicho programa para la generación del cociente espectral H/V, a través de la cual se determina el valor del período fundamental en cada punto de medición.



Figura 4.7 Instalación de los sismógrafos Guralp.



Figura 4.8 Anotación de las observaciones en la bitácora de campo.

4.6 Software GEOPSY

El proyecto europeo denominado SESAME (Site EffectS aSessment using AMbient Excitations por sus siglas en inglés) ha demostrado la importancia que tienen los procedimientos de análisis y técnicas en la evaluación de la amenaza sísmica y en las estrategias de mitigación de riesgo sísmico, mediante el estudio de los efectos de sitio asociados con las condiciones geológicas locales que constituyen una parte importante de cualquier evaluación de la peligrosidad sísmica debido a las consecuencias catastróficas de los sismos.

Con este desarrollo se creó en un principio el software J-SESAME, una aplicación de JAVA que proporciona una interfaz gráfica fácil de usar para el desarrollo de la técnica del cociente espectral H/V, misma que se utiliza en estudios de efectos de sitio locales. El software utiliza las funciones de selección de ventana automática y el cociente espectral H/V mediante la ejecución de comandos externos. La ventana de selección automática y proceso de H/V son aplicaciones independientes desarrolladas en Fortran, C++, Linux y Mac OSX. El

software J-SESAME es una herramienta para organizar los datos de entrada, la ejecución de selección, el procesamiento de la ventana y la visualización de los resultados del procesamiento. El software funciona en Unix, Linux, Macintosh y entornos Windows.

Con los años se desarrolló un nuevo software denominado Geopsy, programa que proporciona las mismas herramientas para el procesamiento de las vibraciones ambientales, no obstante se empezaron a incluir técnicas más convencionales como MASW o refracción para ofrecer una alta calidad e integrar la plataforma libre para la interpretación de experimentos geofísicos (Wathelet, 2005).

Este software es una herramienta eficaz y rápida, tiene entre sus funciones el cálculo del método H/V, que como se mencionó anteriormente consiste en estimar la relación entre los espectros de amplitud de Fourier de la componente horizontal (H) y la componente vertical (V) de las vibraciones ambientales registradas (Igarashi y Nohoshi, 1971; Nakamura, 1989).

4.6.1 Filtrado de la Señal

En ocasiones las señales de interés están mezcladas con otras señales, resultando imposible el distinguirlas o separarlas. La separación de señales atendiendo a su distribución frecuencial es una técnica muy común en el procesado de señales, la técnica consiste en cancelar o atenuar zonas frecuenciales determinadas donde la señal deseada no existe y dejar pasar aquellas frecuencias de interés (Moreno, 2009). Esta técnica puede aplicarse a señales de todo tipo como sonidos, radio, TV, vibraciones sísmicas, etc., mejorando la calidad de las señales y disminuyendo el ruido que este fuera de la banda de interés.

En este trabajo el tratamiento de las señales, para estimar el cociente espectral H/V, se basó en filtrar la señal de 0.1 Hz a 10 Hz con ayuda del filtro pasa banda y del filtro Butterworth de orden 4. La función de los filtros pasa banda (BP) es permitir el paso de las frecuencias que están situadas en una determinada banda de frecuencias, es decir, entre dos frecuencias determinadas. Mientras que el filtro Butterworth tiene la propiedad de producir la máxima uniformidad en la banda pasante, en otras palabras, la respuesta es muy plana en la banda de paso (Fig. 4.9).

El número de muestras que se utilizan en un filtro para generar una muestra de salida corresponde al orden del filtro, es decir, un filtro de primer orden utiliza una sola muestra precedente, mientras que un filtro de orden 4 utiliza cuatro muestras anteriores de entrada y cuatro muestras anteriores de la salida. Mientras mayor sea el orden de un filtro (cuantas más retardos se utilicen en el circuito), el corte del filtro será más abrupto.

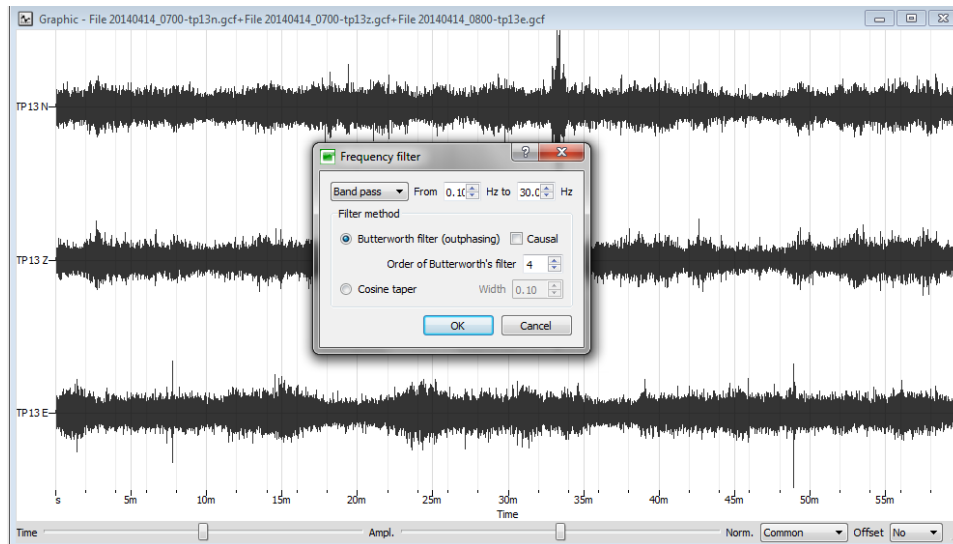


Figura 4. 9 Imagen del filtrado de un sismograma utilizando el filtro Butterwhort y pasa baja, para mejorar la calidad de la imagen.

4.6.2 Selección de Ventanas

La selección de ventanas representa el primer paso en la etapa de obtención de la relación espectral H/V. El objetivo es tomar en consideración las partes más estacionarias de los registros de ruido ambiental, evitando las perturbaciones producto de fuentes específicas tales como tráfico vehicular, peatones, etc.

Las ventanas pueden ser escogidas automáticamente o de forma manual (Fig. 4.10). El proceso manual permite la selección de ventanas bajo un criterio definido por el usuario, sin embargo la selección automática permite el ahorro significativo de tiempo a la hora de procesar grandes cantidades de datos.

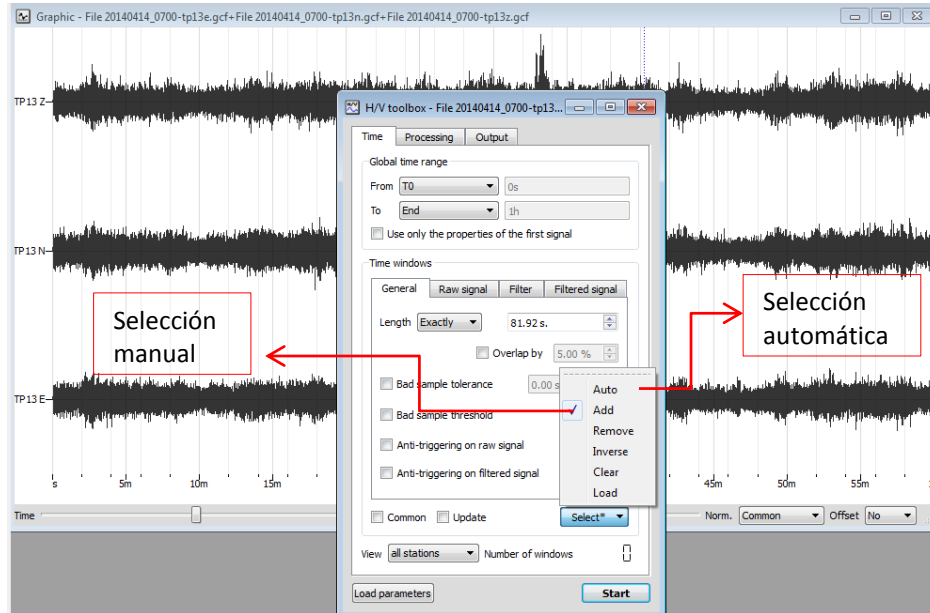


Figura 4. 10 Imagen que representa la activación manual y automática de las ventanas en el programa GEOPSY.

Una vez determinado el tipo de selección de las ventanas, se estableció el tamaño de las mismas. En este trabajo se generaron ventanas con una longitud de 20.48 segundos a lo largo de toda la señal, (pequeños rectángulos de colores, fig. 4.11) y se optó por una selección manual, ya que varios de los registros presentaban ruido en exceso.

Para cada una de las ventanas seleccionadas, el programa calcula la relación H/V para luego generar un resultado que incluye el promedio de cada una de ellas, lo que permite controlar de manera más precisa el valor de período obtenido.

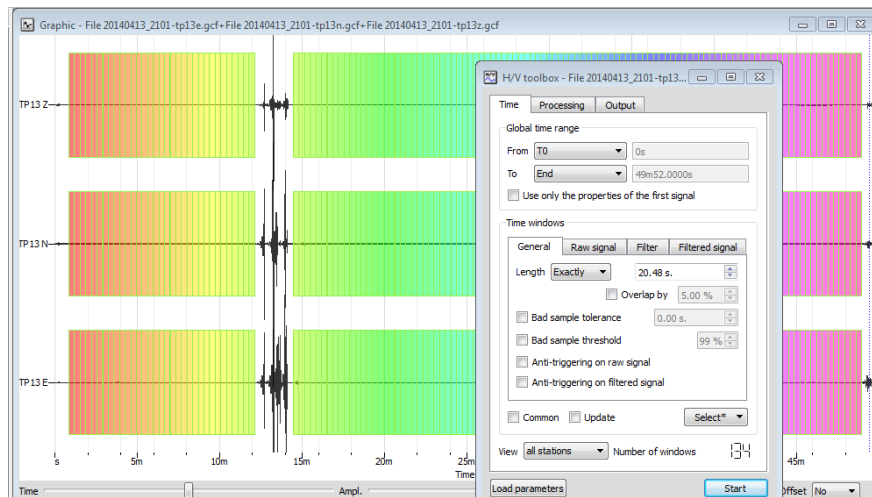


Figura 4. 11 Representación de las ventanas resultantes a partir de seleccionar su longitud.

4.7 Cálculo de la Cociente Espectral H/V

El programa GEOPSY permite la obtención de la relación espectral H/V a través de funciones tales como: el cálculo de la transformada de Fourier (FFT), el suavizado del espectro (siendo del más utilizado el suavizado Konno & Ohmachi), combinación de las componentes y la estimación de la desviación estándar.

Un ejemplo de los gráficos resultantes a partir de la aplicación de estas funciones se presenta a continuación. La figura 4.12 muestra el promedio entre las componentes horizontales del cociente espectral H/V para el punto de medición número 27.}

En general, las curvas de colores representan el cociente de cada una de las ventanas obtenidas, la línea negra continua indica el promedio geométrico H/V de todos los cocientes H/V individuales, mismos que se muestran con líneas de colores. Las dos líneas punteadas representan la desviación estándar de los cocientes H/ V, mientras que el área gris muestra el promedio de la frecuencia máxima y su desviación estándar.

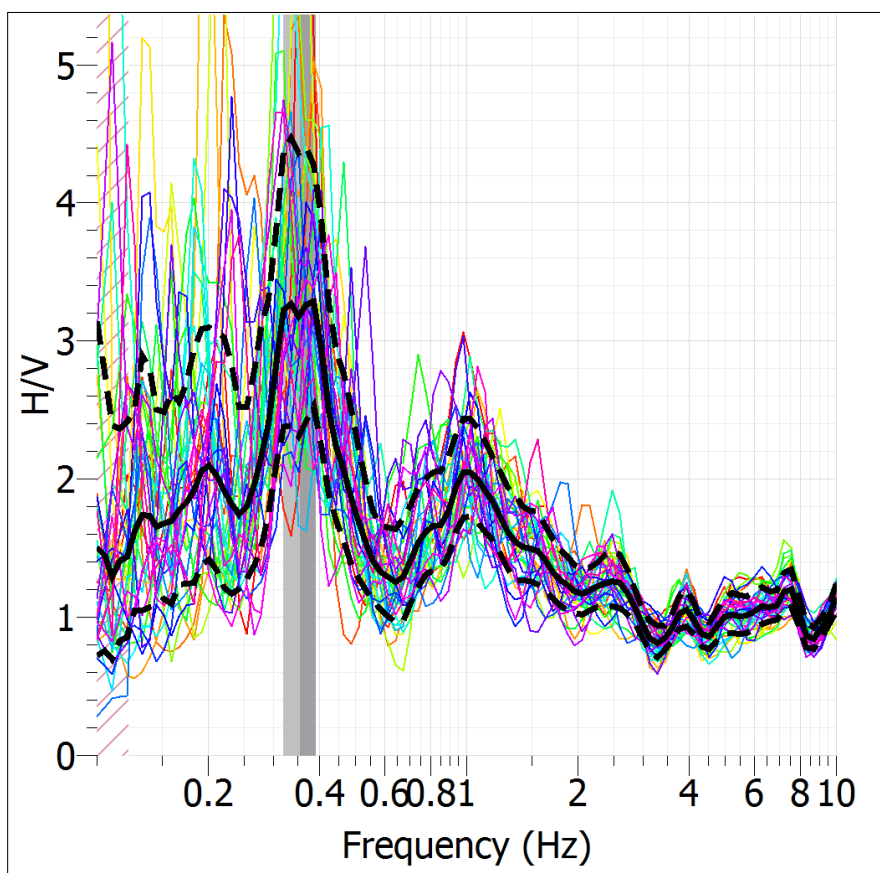


Figura 4. 12 Gráfica del cociente espectral H/V para el punto de medición 27.

CAPÍTULO 5.

ESTIMACIÓN DE LOS PERIODOS DE VIBRAR E INTENSIDADES SÍSMICAS

5.1 Análisis y obtención de los periodos dominantes del terreno

Uno de los datos más importantes que emana de la aplicación del método de cocientes espectrales H/V, corresponde a la frecuencia natural del suelo, determinada a través del pico máximo observado en dicha curva. Es por ello, que se deben tomar en cuenta sólo los registros en los cuales los tres canales de grabación correspondientes a las componentes de movimiento no presenten distorsión o desplazamiento. Estos efectos pueden ser generados por problemas con el sensor al efectuarse la operación de registro de datos.

Una vez desplegada la gráfica de la relación espectral H/V para cada punto de medición, el siguiente paso consiste en identificar la frecuencia fundamental representada por el pico máximo de la curva H/V como se muestra en la figura 5.1.



Figura 5.1 Gráfica del cociente espectral H/V donde se representa el pico máximo (rojo), para el punto 24.

De esta manera, la frecuencia predominante es la asociada con el valor correspondiente a dicha amplitud máxima (Fig. 5.2). Cabe mencionar que no existen criterios establecidos para definir en qué nivel de amplificación se encuentra el valor de la frecuencia dominante, sin embargo hay evidencias de que con un valor mayor a 2 es suficiente.

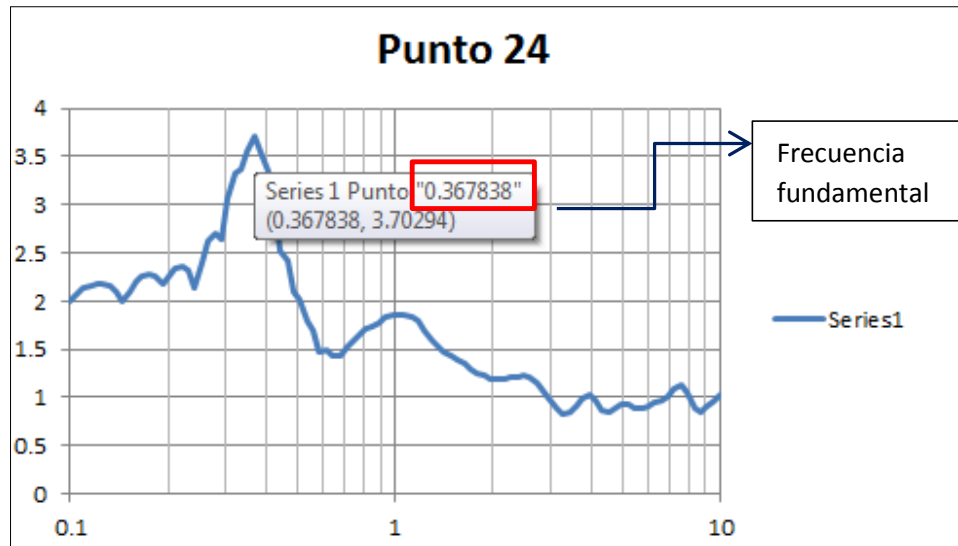


Figura 5. 2 Gráfica del cociente H/V, en rojo la frecuencia fundamental.

Una vez obtenidas las frecuencias en cada punto, se procede a realizar las operaciones correspondientes para el cálculo de los periodos (inverso de la frecuencia, ver Tabla 5.1).

$$f = \frac{1}{T} \quad (5.1)$$

Dónde:

f = frecuencia (Hz)

T = periodo (s)

Despejando de la ecuación 5.1 T , obtenemos:

$$T = \frac{1}{f} \quad (5.2)$$

Tabla 5. 1 Valores de frecuencia y periodo

PUNTO	FRECUENCIA	PERIODO	PUNTO	FRECUENCIA	PERIODO
<i>Punto 1</i>	0.305386	3.2745	<i>Punto 15a</i>	0.385353	2.5950
<i>Punto 2</i>	0.265609	3.7649	<i>Punto 16</i>	0.305386	3.2745
<i>Punto 3</i>	0.21049	4.7508	<i>Punto 17</i>	0.159228	6.2803
<i>Punto 4</i>	0.2535	3.9447	<i>Punto 18</i>	0.367838	2.7185
<i>Punto 5</i>	0.161877	6.1775	<i>Punto 19</i>	0.367838	2.7185
<i>Punto 6</i>	0.307679	3.2501	<i>Punto 20</i>	0.159228	6.2803
<i>Punto 7</i>	0.305386	3.2745	<i>Punto 21</i>	0.367838	2.7185
<i>Punto 8</i>	0.21049	4.7508	<i>Punto 22</i>	0.21049	4.7508
<i>Punto 9</i>	0.253536	3.9442	<i>Punto 23</i>	0.21049	4.7508
<i>Punto 10</i>	0.262041	3.8161	<i>Punto 24</i>	0.367838	2.7185
<i>Punto10a</i>	0.319927	3.1257	<i>Punto 25</i>	0.305386	3.2745
<i>Punto 11</i>	0.319927	3.1257	<i>Punto 26</i>	0.253536	3.9442
<i>Punto 12</i>	0.305386	3.2745	<i>Punto 27</i>	0.975287	1.0253
<i>Punto 13</i>	0.403702	2.4770	<i>Punto 28</i>	0.200923	4.9770
<i>Punto 14</i>	0.422924	2.3644	<i>Punto 29</i>	0.35442	2.8215
<i>Punto 15</i>	0.27282	3.6654			

De la tendencia observada para las curvas, con sus respectivas amplitudes máximas, se puede distinguir lo que se describe a continuación:

5.1.1 Existencia de amplitudes máximas para un valor plenamente identificado de la frecuencia

Representa los casos donde la identificación de los valores máximos de la amplitud está determinada para un valor de la frecuencia claramente identificado (pico característico). En este sentido, el significado de claridad se relaciona con el hecho de que no existe más de un

pico en la curva H/V. En la figura 5.3 se observa la curva H/V para el registro del punto 24 el cual representa un ejemplo de lo descrito en este párrafo.

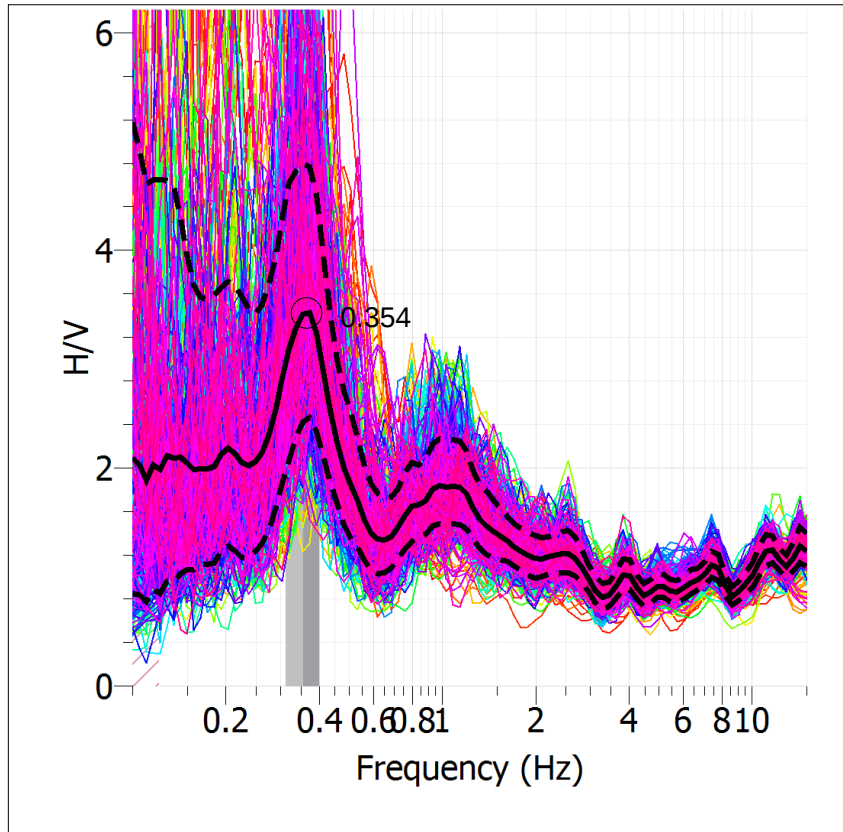


Figura 5. 3 Gráfica del “pico característico” del cociente espectral H/V, en círculo la frecuencia fundamental para el punto 24.

5.1.2 Existencia de amplitudes para más de un valor de la frecuencia

En algunos puntos se obtiene un patrón del cociente H/V mucho más complejo que el descrito en el caso anterior. En el cociente espectral pueden no aparecer picos prominentes, o por el contrario, manifestarse gran cantidad de ellos, ocasionando dificultades para identificar la frecuencia predominante.

En la figura 5.4 se presentan ejemplos de dos puntos de medición cuyos cocientes espectrales no muestra un valor definido de la amplitud máxima, por lo que dificulta la

identificación de la frecuencia fundamental. En el primer caso se muestra la relación H/V para el punto 7, que presenta picos múltiples. En la segunda grafica se muestra el cociente para el punto 20, donde el espectro es relativamente plano. En ambos casos se realizaron varios filtrados, sin embargo se consideraron aquellos picos máximos que sobresalieran de los demás.

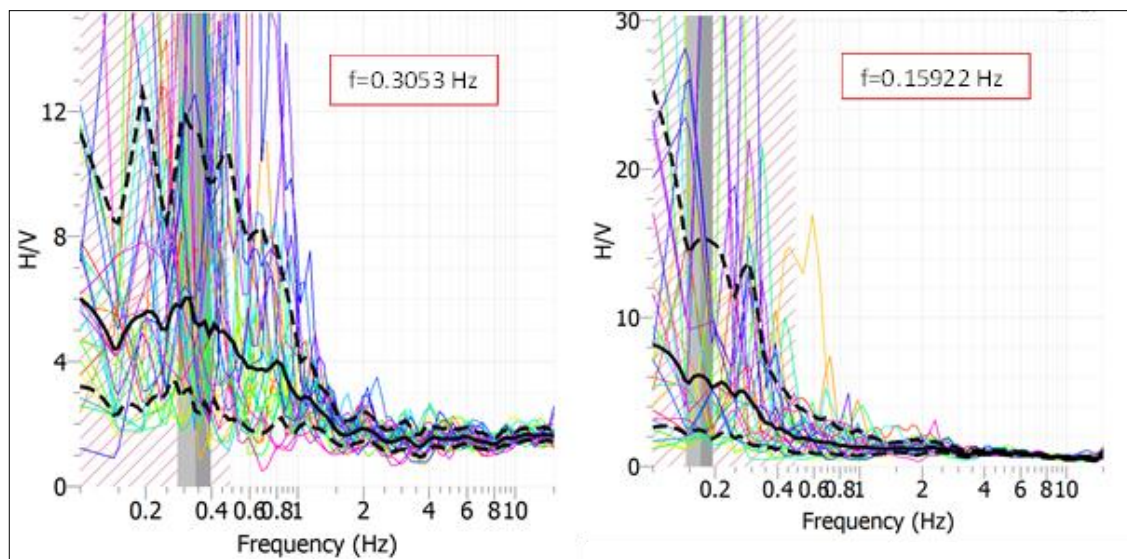


Figura 5. 4 Gráficas donde los valores máximos de las amplitudes de los cocientes espectrales H/V no están bien definidos. Izquierda: Punto 7. Derecha: Punto 20.

Algunos de los datos procesados en diferentes puntos presentaron dificultades en el momento de efectuar la identificación de la amplitud máxima y su correspondiente frecuencia predominante, lo anterior pudo ser causado por algunos factores tales como:

- El tiempo necesario de registro para lograr la estabilización de las masas de los instrumentos.
- Interacción de la lluvia que puede introducir alteraciones en rangos de baja frecuencia (< 1 Hz).

Finalmente, para poder generar cada una de las gráficas de los cocientes espectrales H/V , en términos de la frecuencia, se utilizaron dos programas de cómputo: EXCEL Y Matlab. En la figura 5.5 se presenta el ejemplo de una gráfica en EXCEL, que muestra sólo el promedio final de los cocientes espectrales, en este caso correspondiente al punto 24. En la figura mencionada, la primera columna representa la frecuencia y la segunda el promedio del cociente H/V .

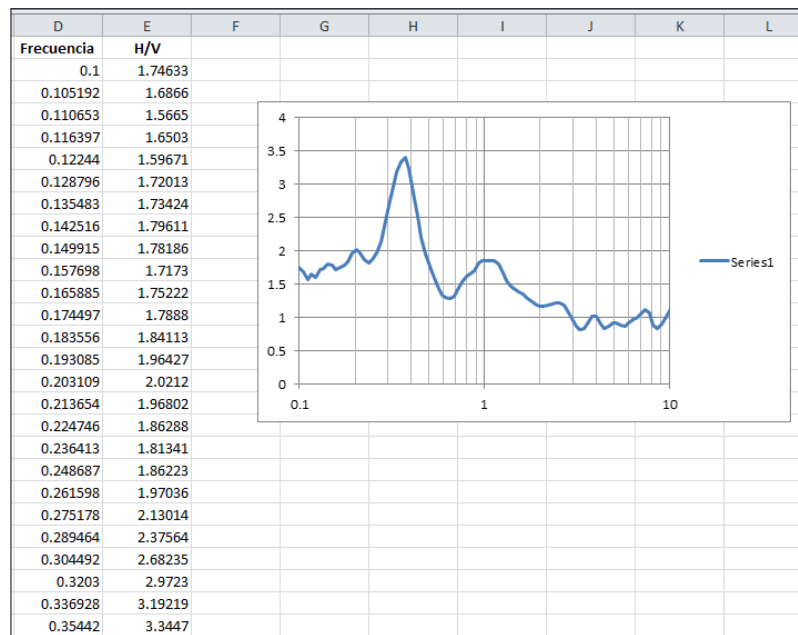


Figura 5. 5 Ejemplo de una gráfica en EXCEL donde se muestra el promedio final de los cocientes espectrales para el punto 24.

5.2 Familias Espectrales

De las relaciones espectrales obtenidas se realizó una clasificación de ellas con base en su forma espectral, es decir, solo se consideraron los aspectos predominantes de las formas espectrales con el objetivo de definir las microzonas correspondientes.

La forma espectral de las familias obtenidas describe el comportamiento dinámico según el tipo de terreno al que corresponde, en términos de los periodos de vibración. Este

formato presenta una importante ventaja, puesto que uno de los parámetros del diseño sísmico de las construcciones es precisamente el periodo fundamental de la construcción (Angulo, 2013).

Con base en esto se encontraron 2 familias:

Familia I: se agruparon las curvas que presentan como característica común un máximo espectral alrededor de la frecuencia 0.33 a 0.36 Hz (Fig. 5.6).

Familia II: se consideraron frecuencias predominantes entre el ancho de banda de 0.22 Hz, estos espectros no muestran ningún máximo espectral notorio, sino en algunos casos, un decaimiento de la energía hacia altas frecuencias. Parte baja de la figura 5.6.

5.3 Mapa de la distribución de los periodos dominantes del terreno

Una vez definidos los periodos encontrados en los diversos puntos, se procedió a distribuirlos en un mapa para observar en que partes de la zona urbana del Municipio de Calpulalpan se encontraban los periodos que corresponden a la zona baja y a la zona alta. Gracias a esta distribución se puede conocer la clasificación que se dará a las diversas zonas encontradas. El mapa que se obtuvo, se realizó con ayuda de dos programas de cómputo: Global Mapper y ArcGis. El resultado se presenta en la figura 5.7.

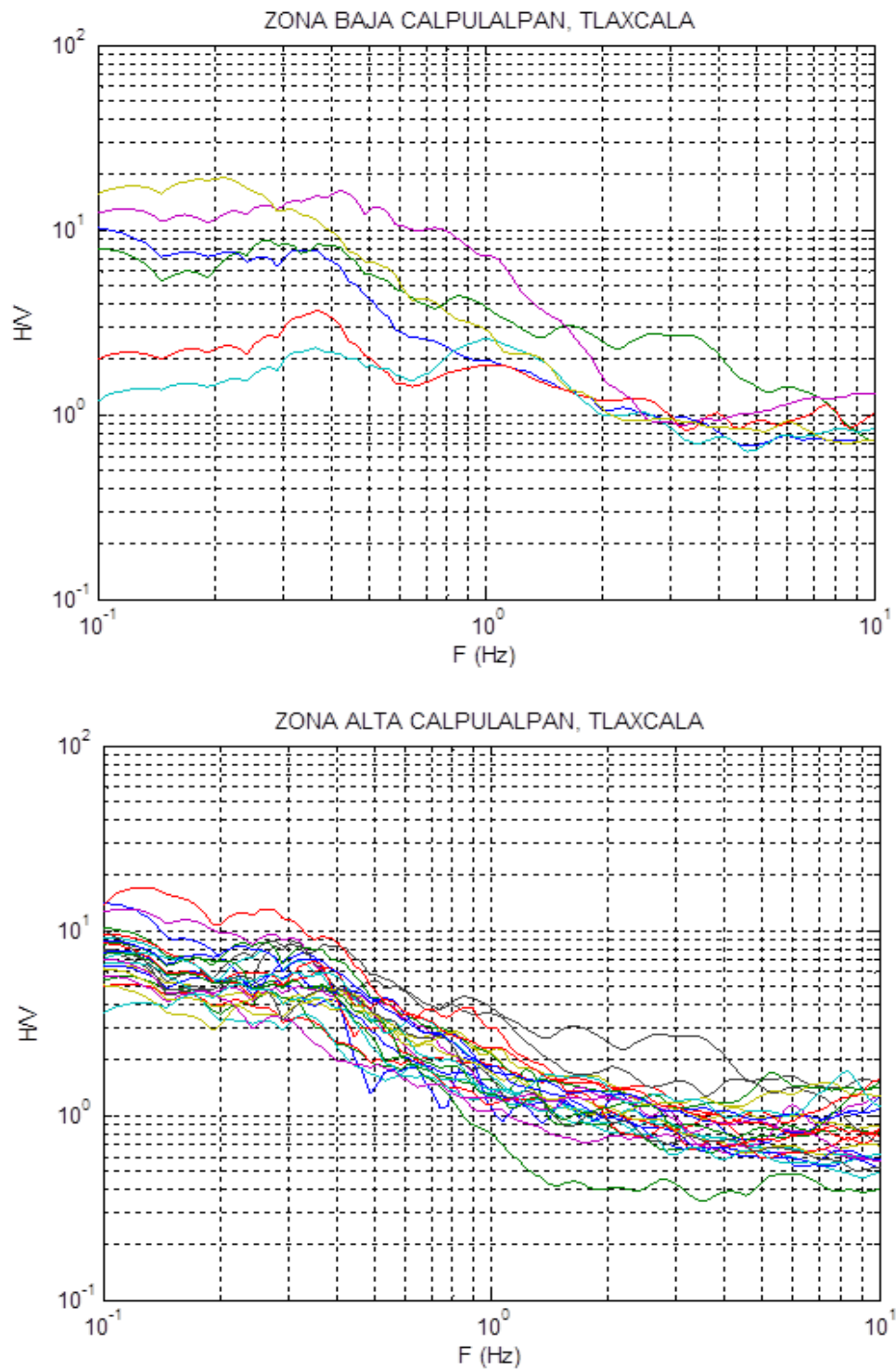


Figura 5. 6 Familias espectrales de la zona urbana de Calpulalpan. Criterio que define las microzonas sísmicas a partir de su forma espectral y del rango de frecuencias del efecto de sitio.

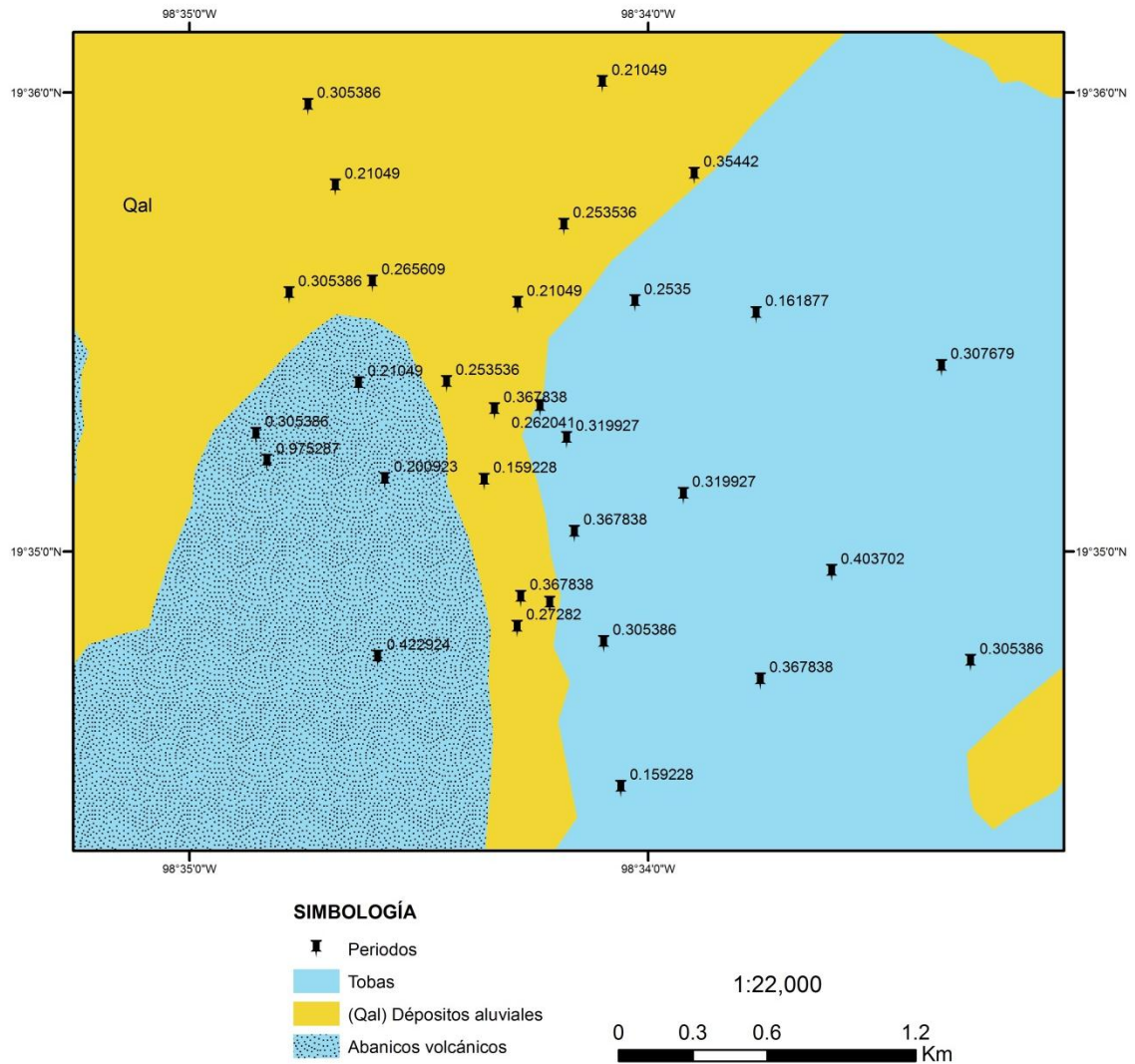


Figura 5. 7 Mapa de la distribución de los periodos dominantes para el Municipio de Calpulalpan, Tlaxcala.

5.4 Clasificación dinámica del terreno y Mapa de Microzonificación Sísmica

Una vez definidas las familias espectrales, se puede delimitar las diferentes zonas encontradas, en la mayoría de las veces se encuentran 2 zonas que se denominan como zona alta y zona baja.

Estas zonas son denominadas como tipos de terrenos para diseño sísmico y si delimitamos estas zonas a partir de la topografía, la geología y los periodos de vibrar se desarrollarán los mapas de microzonificación sísmica para fines de diseño sísmico.

De acuerdo con estos principios en el municipio de Calpulalpan se determinaron 2 tipos de terreno:

Zona Baja: resalta en el mapa 5.8 con un color rojo, donde se observó una frecuencia predominante de 0.33 Hz. En esta área la división se realizó conforme a la geomorfología y a la topografía siguiendo a los depósitos de origen aluvial que se encuentran asociados a la zona de las barrancas y partes colindantes.

Zona Alta: las frecuencias asociadas a esta área son de 0.22 Hz, por lo que se considera que se presenta un efecto regional debido a los depósitos de origen volcánico. Esta misma respuesta se ha encontrado en la ciudad de Puebla así como en otras ciudades de Tlaxcala, y estaría asociada a depósitos de toba producto de la actividad del volcán la Malinche.

Finalmente, la figura 5.8 muestra la microzonificación sísmica para el Municipio de Calpulalpan, donde el área de color rojo corresponde a la zona baja asociada a depósitos aluviales y de color rosado se indica la zona alta. En la figura 5.9 se muestra el mapa de microzonificación sísmica y la zona urbana de Calpulalpan donde se puede observar en que partes del Municipio se localiza cada área.

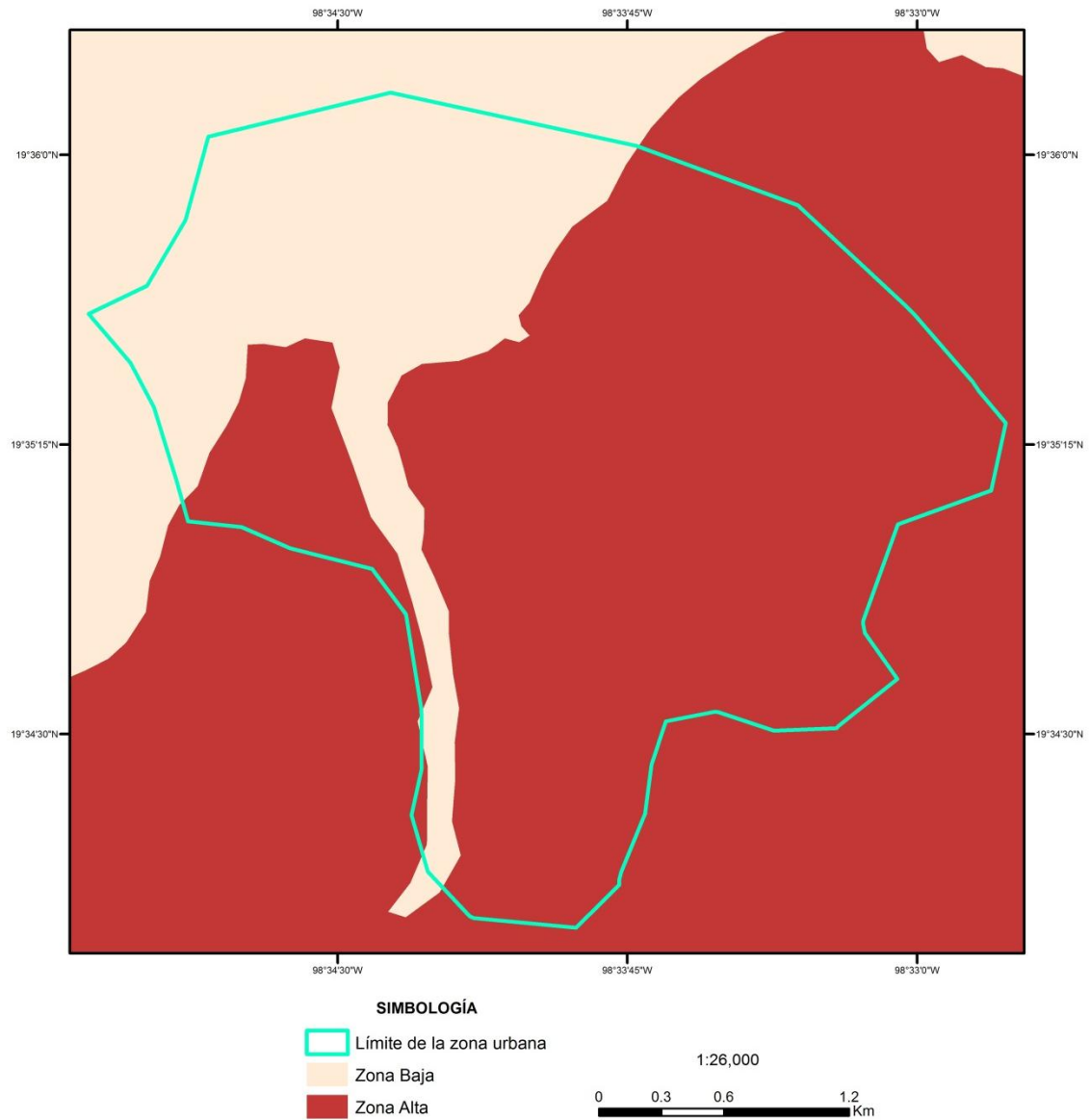


Figura 5. 8 Mapa de Microzonificación Sísmica.

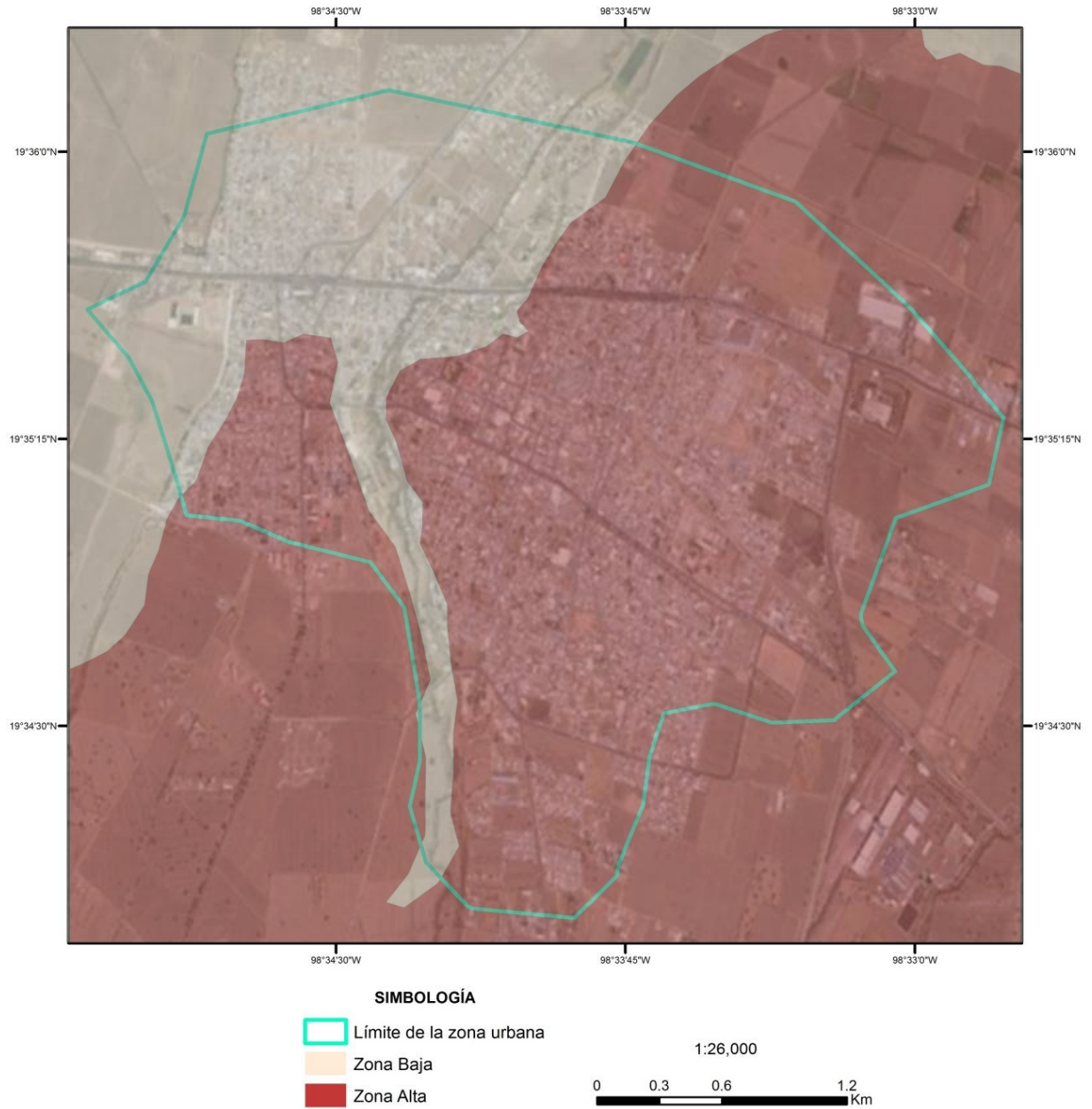


Figura 5. 9 Mapa de Microzonificación Sísmica sobre una imagen del Municipio de Calpulalpan.

5.5 Escenarios Sísmicos para la estimación de Acelerogramas Sintéticos

Para la estimación de los acelerogramas sintéticos se requiere de registros llamados sismos semilla o sismos de entrada, los cuales a través de parámetros como magnitud, epicentro, aceleraciones y las funciones de transferencia permiten la obtención de dichos acelerogramas.

La elección de los sismos semillas se hizo a partir de datos existentes de sismos cercanos a la zona de estudio y registrados en estaciones ubicadas en roca. Para este trabajo se consideraron dos tipos de sismos de dos fuentes sismogénicas diferentes que aportan gran potencial sísmico al estado de Tlaxcala y particularmente al Municipio de Calpulalpan.

5.5.1 Sismo ocurrido el día 15 de Junio de 1999 y localizado en Tehuacán, Puebla

El 15 de junio de 1999, a las 15:41:06 horas (hora local), ocurrió un sismo de magnitud M_w 7.0 con epicentro localizado a 35 km al SW de la ciudad de Tehuacán, Puebla. El registro de este sismo fue obtenido de la estación Chiautla de Flores localizada a una distancia focal de 73 kilómetros, esta estación fue instalada cerca del poblado de Acatlán en un lecho rocoso por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Valle-Orozco, 2013).

Los daños más relevantes se concentraron en hospitales, viviendas, escuelas y monumentos históricos. Aunque los mayores daños se produjeron en el estado de Puebla, también resultaron afectadas algunas partes de los estados de Guerrero, Oaxaca, Veracruz, Tlaxcala y Morelos. El sismo causó intensidades de hasta VIII (Escala Mercalli Modificada) en una amplia zona entre las ciudades de Huajuapán y Puebla, tal como se muestra en el mapa de isosistas de la figura 5.10 (Gutiérrez, 1999).

Se ha seleccionado el sismo del 15 de junio de 1999 (M_w 7.0), ya que es el sismo que ha generado intensidades importantes y que ha ocurrido a menos de 100 kilómetros del estado de Tlaxcala, provocando intensidades de Mercalli entre VI y VIII grados, como ya se ha mencionado. Por otro lado, este registro se tomará como sismo semilla para generar los acelerogramas sintéticos, a partir de las funciones de transferencia obtenidas para Municipio de Calpulalpan.

La figura 5.11 presenta el registro sísmico para el sismo de Tehuacán, las aceleraciones máximas que se presentaron fueron de 104 cm/seg² para la componente E-W, 110 cm/seg² para la componente N-S y 72 cm/seg² para la componente vertical.

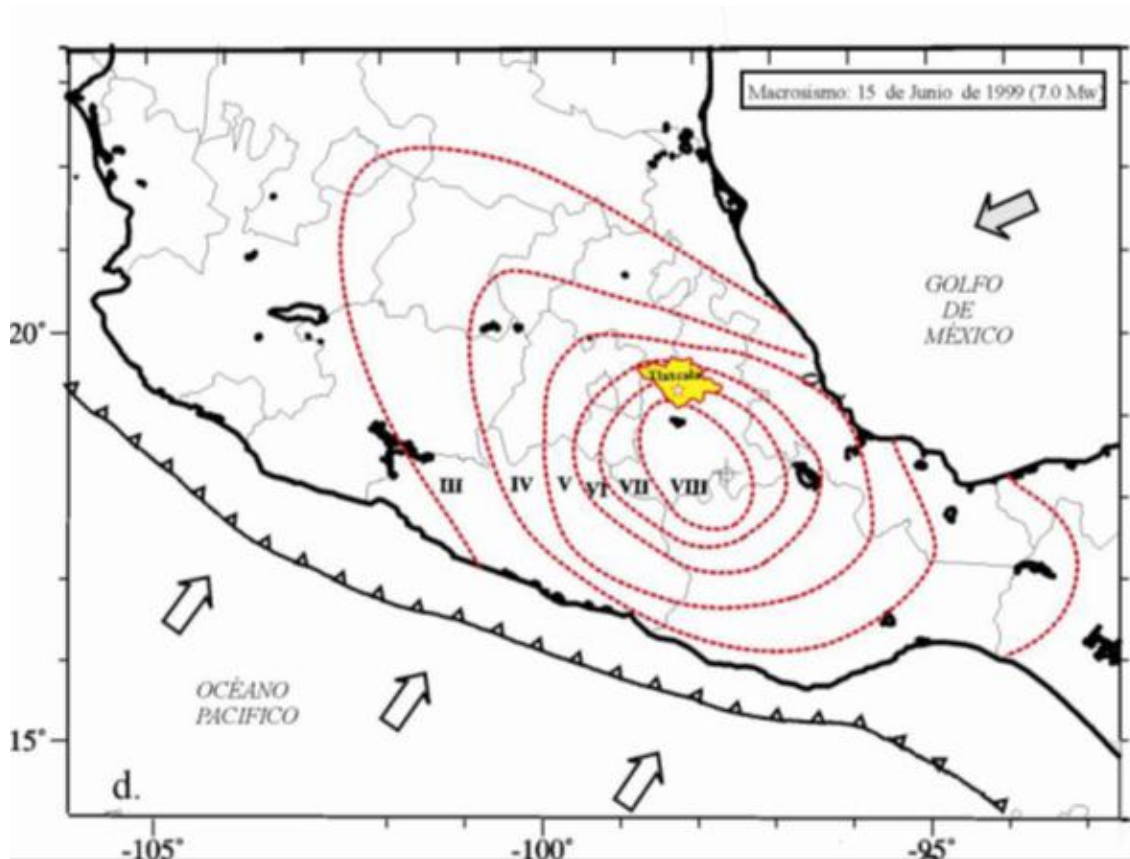


Figura 5. 10 Mapa de isosistas en la escala Mercalli Modificada para el sismo del 15 de junio de 1999 ocurrido en Tehuacán, Puebla, que causo daños en el estado de Tlaxcala (Singh *et al.* 1999. Obtenido de Valle-Orozco).

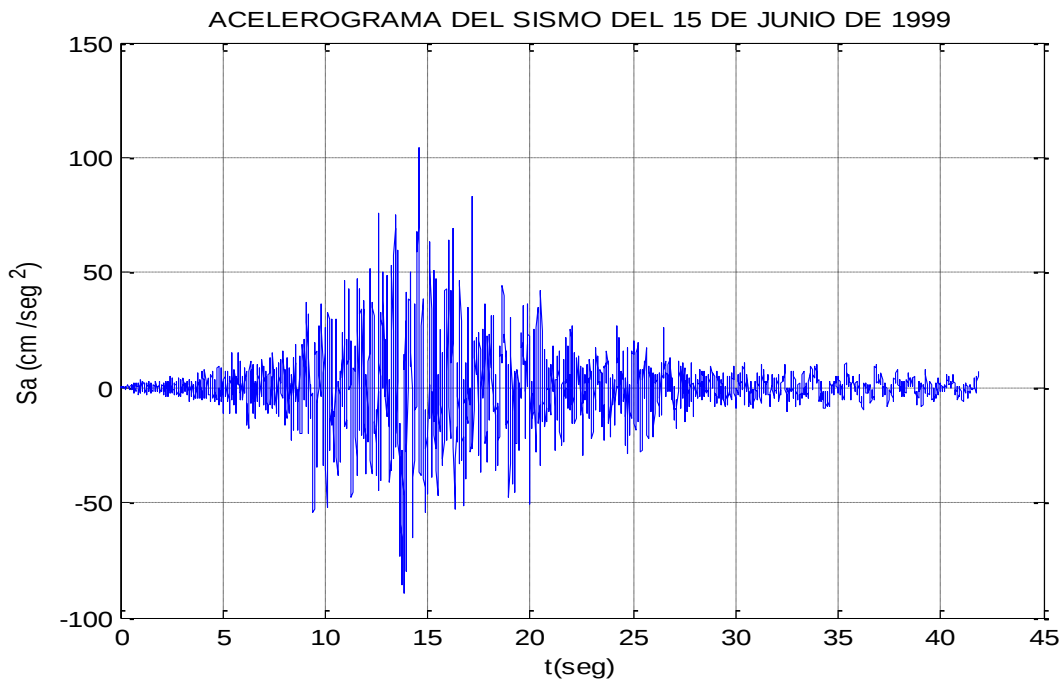


Figura 5. 11 Acelerograma registrado durante el sismo del 15 de Junio de 1999.

5.5.2 Sismo ocurrido el 6 de Abril de 1959 y localizado en Tlaxcala

El 6 de abril de 1959 el Servicio Sismológico Nacional reportó un sismo local ubicado al oriente del Estado de Tlaxcala, cuya magnitud fue de $M_w = 4.7$, (Fig. 5.12). El sismo generó daños importantes en las poblaciones cercanas al epicentro, como las localizadas en las cercanías de los municipios de Cuapiaxtla, Tlaxcala y el de Lara Grajales, Puebla, (Chavacán-Ávila, 2007).

En la figura 5.13 se muestra el registro del sismo de 1959, utilizando este sismo como una semilla se logró generar un acelerograma sintético de magnitud 4.7.



Figura 5. 12 Mapa de isosistas del sismo del 6 de abril de 1959, con líneas azules se muestran las isosistas. Líneas amarillas, falla y fracturas. Con un círculo rojo la ubicación del sismo principal.

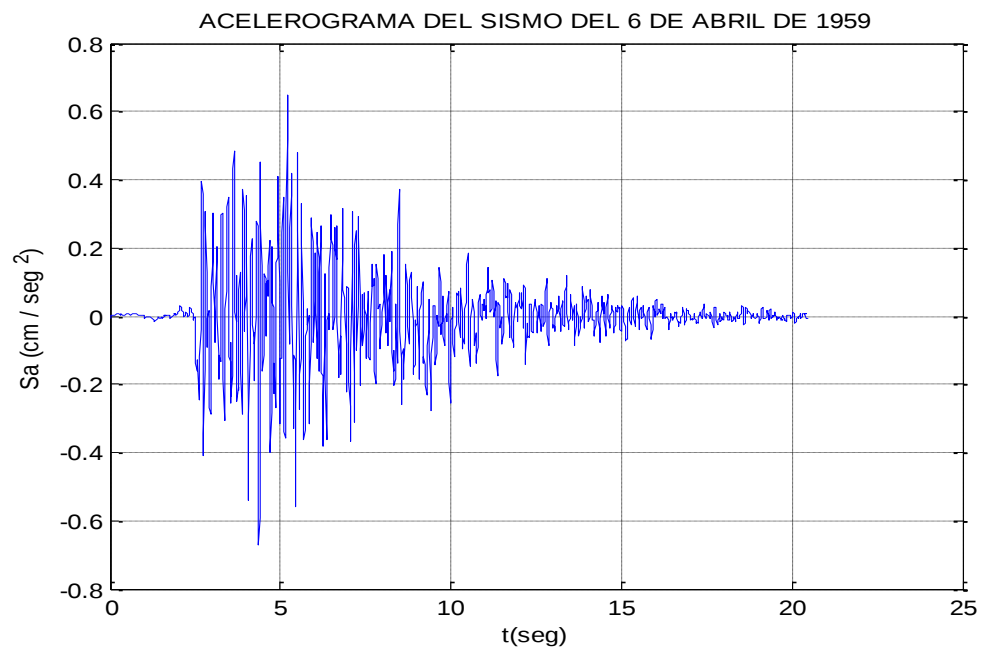


Figura 5. 13 Registro de aceleraciones usado para simular los eventos sísmicos corticales del 6 de Abril de 1959.

5.6 Estimación de Intensidades Sísmicas para la zona urbana del Municipio de Calpulalpan

En la práctica del análisis de estructuras sometidas a acciones sísmicas se utiliza como entrada registros de sismos cercanos al lugar de interés, no obstante, esta información que no siempre está disponible, induce una alta incertidumbre en la respuesta estructural, debido a que tales registros no cubren todos los máximos en la banda de frecuencias de interés. Asimismo, las aceleraciones registradas no suelen cumplir los rangos de amplitudes y frecuencias establecidas en los códigos de diseño.

Es por ello, que en los estudios de peligro sísmico del Estado de Tlaxcala y por supuesto, el Municipio de Calpulalpan, se incluye una descripción de las fuentes sísmogénicas para generar acelerogramas sintéticos del movimiento del terreno, con amplitudes y contenido de frecuencias adecuados según la fuente sísmogénica, la trayectoria de las ondas sísmicas y las propiedades dinámicas del terreno, que permiten obtener señales que cubren un rango amplio de frecuencias y se ajustan a las amplitudes espectrales (Lermo-Samaniego *et al.* 2012).

Como resultado de lo anterior, surge la necesidad de implementar un algoritmo que permita calcular el acelerograma en superficie, mediante un acelerograma registrado instrumentalmente en una estación base, (ubicada en roca y cercana a la fuente) y la función de transferencia de cada lugar donde existió un registro sísmico. Estos acelerogramas deben reproducir tan bien como sea posible el movimiento esperado en el sitio. Este movimiento debe tener en cuenta la influencia de parámetros tales como la magnitud, la distancia, el mecanismo de falla y los efectos del sitio.

5.6.1 Cálculo de acelerogramas sintéticos utilizando funciones de transferencia

El valor de la intensidad sísmica dentro de la microzonificación del Municipio de Calpulalpan, se obtiene al realizar el cálculo de las aceleraciones en la superficie, generando acelerogramas

sintéticos, en donde se tenga la función de transferencia correspondiente y posteriormente determinar los espectros de respuesta.

El cálculo se realizó aplicando un algoritmo en un entorno MATLAB, desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Angulo, 2014). El algoritmo consiste en un escalamiento entre la función de transferencia que se obtuvo de cada punto de registro sísmico y el sismo seleccionado que presenta la mayor aceleración o mayor energía.

Dicho algoritmo requiere de las funciones de transferencia que se obtuvieron previamente, además de una serie de pasos que se mencionan a continuación:

- 1) Filtrar el acelerograma obtenido en roca, para frecuencias de 0.1 Hz a 10 Hz y calcular la transformada de Fourier.
- 2) Realizar la interpolación lineal para el cociente espectral que se obtuvo a partir de los sismos reales.
- 3) Realizar la convolución.
- 4) Obtener el acelerograma sintético.
- 5) Filtrar el acelerograma sintético.
- 6) Graficar el acelerograma sintético y compararlo con el acelerograma del sismo real.

En la figura 5.15 se muestra como ejemplo el espectro de respuesta y el acelerograma sintético del sismo ocurrido el 15 de Junio de 1999 y 6 de abril de 1959 para la función de transferencia del punto 24.

5.6.2 Espectros de respuesta estimados con los acelerogramas sintéticos

A partir de los acelerogramas sintéticos generados en cada punto de registro de microtemores, se obtiene el espectro de respuesta. Una vez que se tienen los espectros de respuesta, se determinan las ordenadas espectrales correspondientes a dos valores del periodo estructural. Estos periodos corresponden a construcciones típicas de uno y dos niveles. En la teoría de la dinámica estructural se establece una estimación gruesa del periodo de una construcción como

el 10% del número de niveles, es decir, para las construcciones de uno y dos niveles se tendrían periodos de 0.1 segundos y 0.2 segundos, respectivamente (Ismael-Hernández, 2014).

Lo anterior indica que las construcciones que presentarían mayores niveles de vulnerabilidad, son precisamente aquellas de uno y dos niveles, ya que las ordenadas observadas en los espectros sintéticos presentan máximos en los periodos de 0.1 y 0.2 segundos. La elaboración de mapas que muestran las intensidades para cada punto, son el resultado del análisis de los periodos estructurales críticos, es decir, los periodos más representativos para valores máximos de pseudoaceleración para un amortiguamiento del 5% de su valor crítico. En la figura 5.14 se muestran los espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% obtenidos con los acelerogramas sintéticos estimados para el temblor del 15 de Junio de 1999 (Mw7.0), en los sitios de la zona urbana Calpulalpan. De igual manera en la figura 5.16 se muestran los espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimado para el temblor del 6 de abril de 1959, en los sitios de la zona urbana de Calpulalpan.

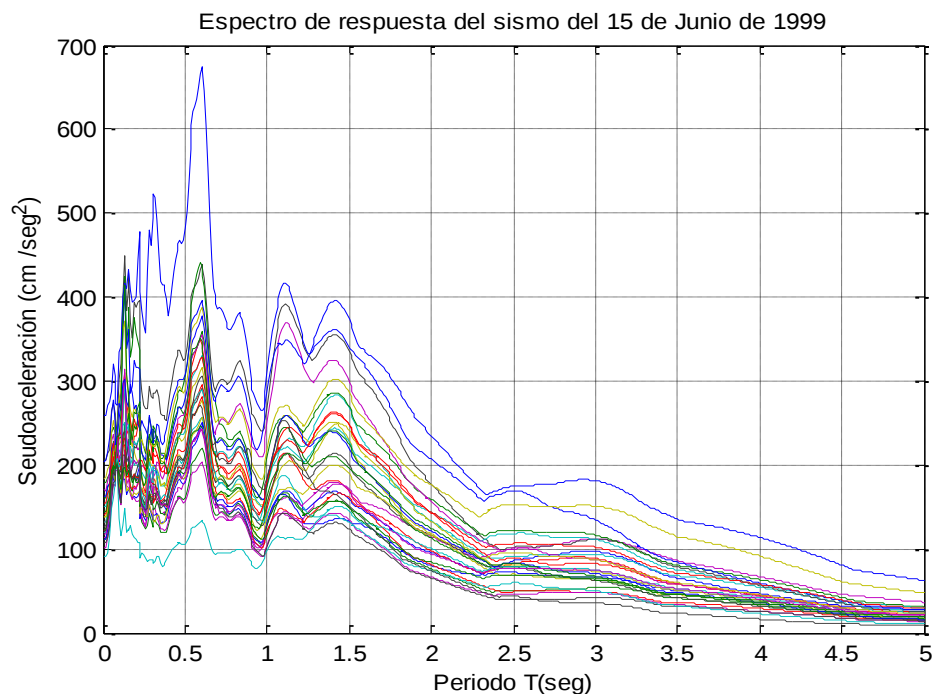


Figura 5. 14 Espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimado para el temblor del 15 de Junio de 1999, en los sitios de la zona urbana de Calpulalpan.

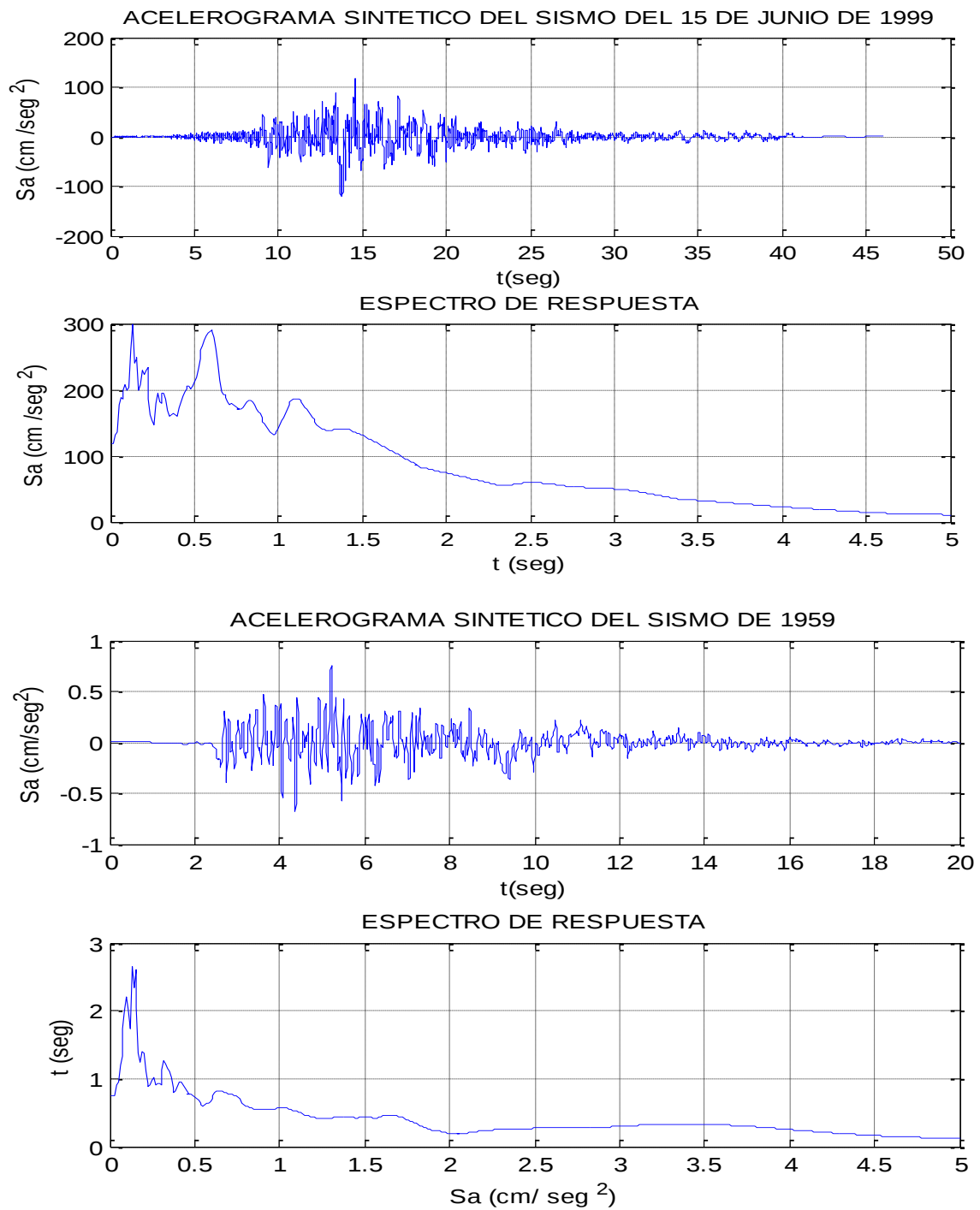


Figura 5. 15 Acelerogramas sintéticos y espectros de respuesta; a) Sismo del 15 de Junio de 1999; b) Sismo del 6 de Abril de 1959, para el punto 24.

5.7 Mapas de Intensidades Sísmicas

De los espectros de respuesta se obtienen valores para dos escenarios sísmicos propuestos, de los cuales se generan 4 mapas con periodos de 0.1 y 0.2 seg; el primero corresponde a la aceleración máxima que se experimenta en construcciones de un nivel, el segundo es para aceleraciones que se sentirán en construcciones convencionales de 2 pisos, asimismo se pueden considerar otras ordenadas espectrales de interés de acuerdo a los periodos de vibración del suelo o con los valores máximos de aceleración obtenidos.

La elaboración de los mapas, son el resultado del análisis de los periodos estructurales críticos, es decir, los periodos más representativos para valores máximos de pseudoaceleración. Cada periodo estructural se representa en un mapa de distribución de las aceleraciones mencionadas anteriormente, como se muestra en la tabla 5.2.

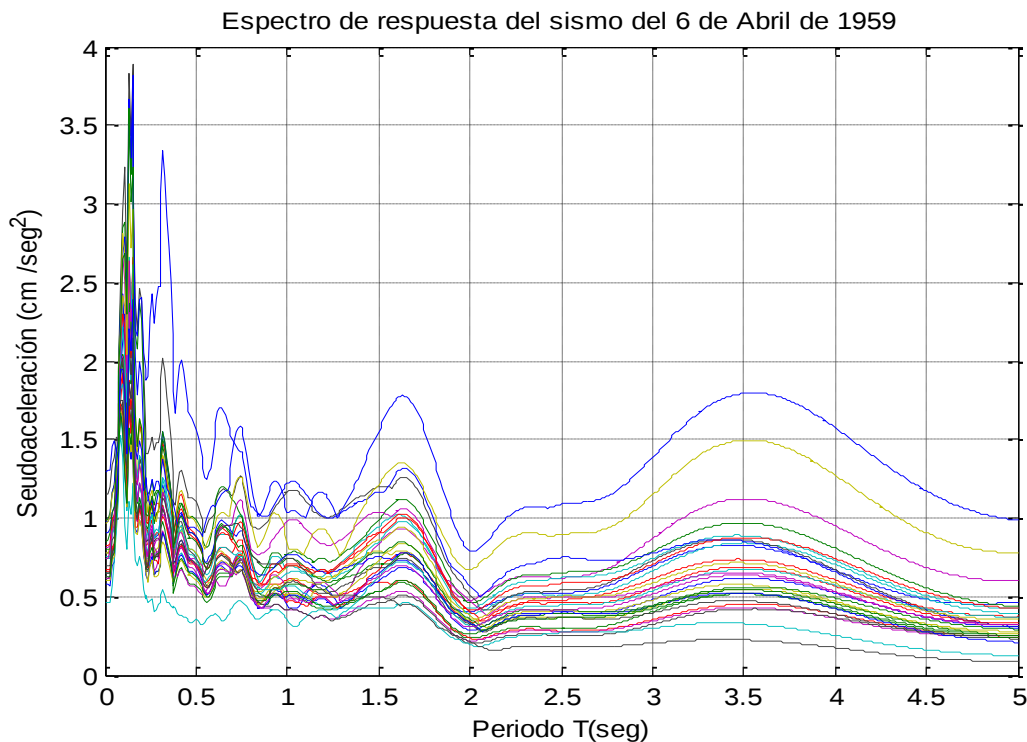
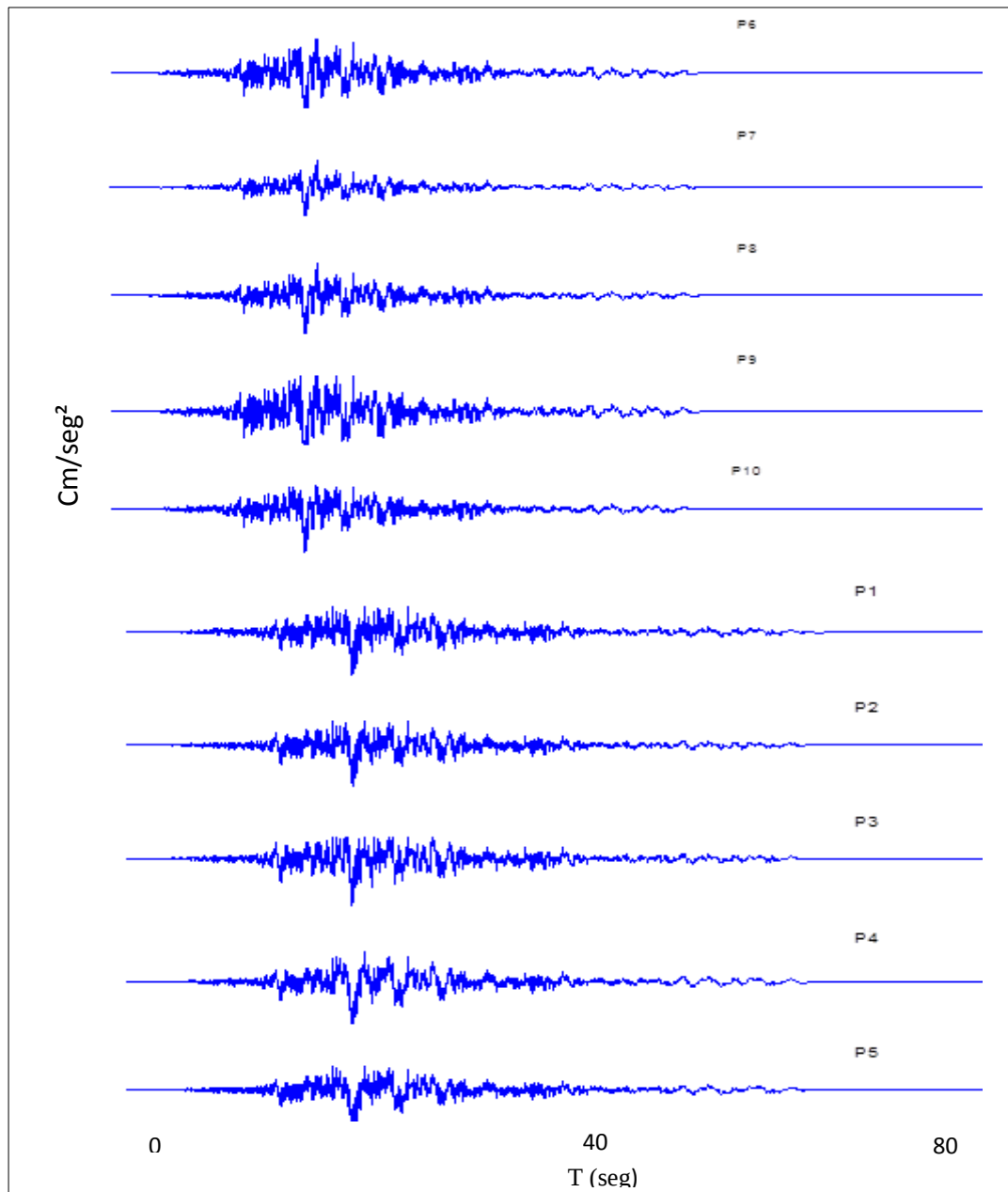
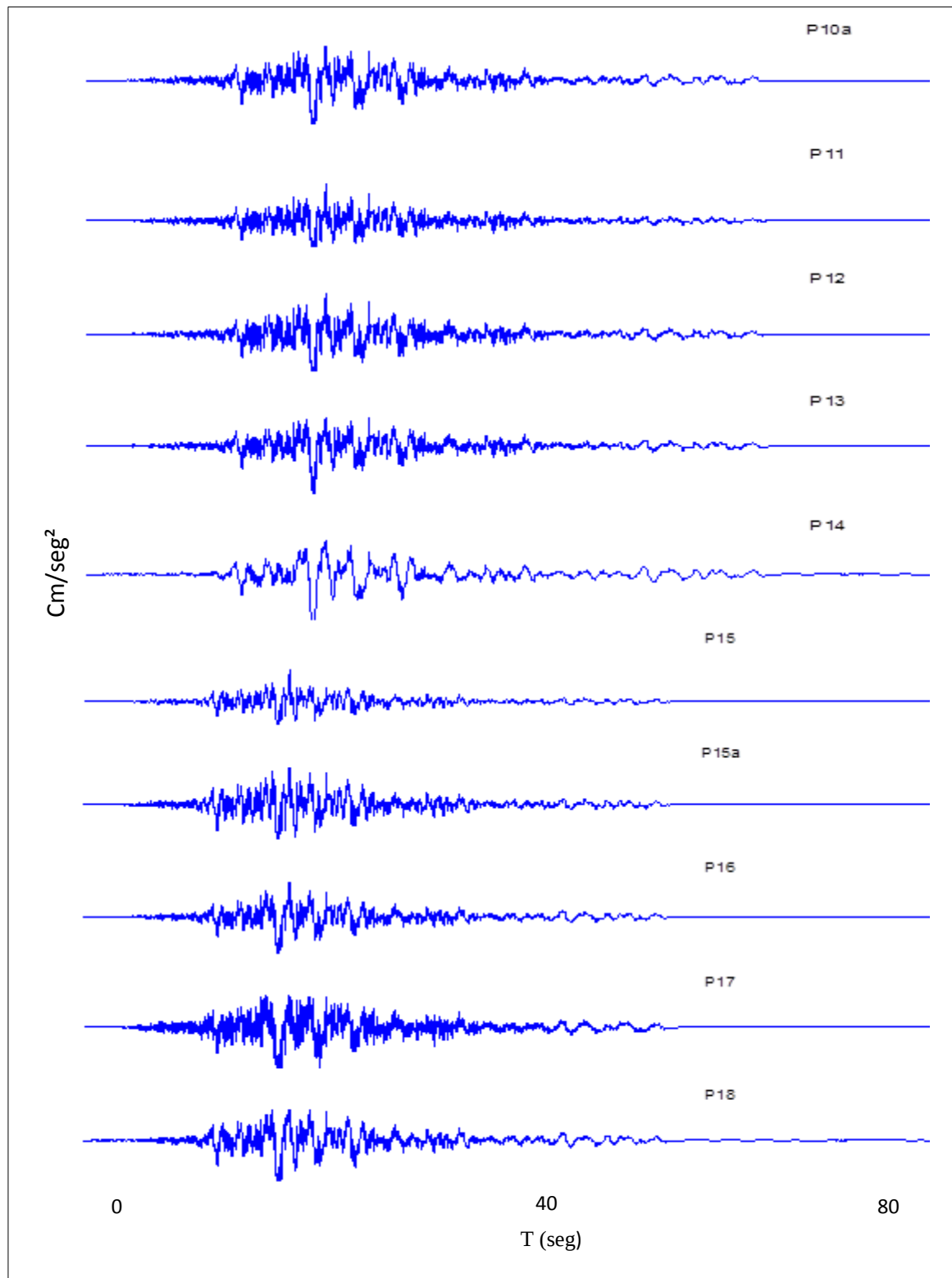


Figura 5. 16 Espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimado para el temblor del 6 de Abril de en los sitios de la zona urbana de Calpulalpan.

5.7.1 Intensidades sísmicas estimadas para el sismo del 15 de Junio de 1999 Tehuacán, Puebla

En la figura 5.17 se presentan los acelerogramas obtenidos para el sismo ocurrido el 15 de junio de 1999 de magnitud Mw 7.0 con epicentro localizado a 35 km al SW de la ciudad de Tehuacán, Puebla.





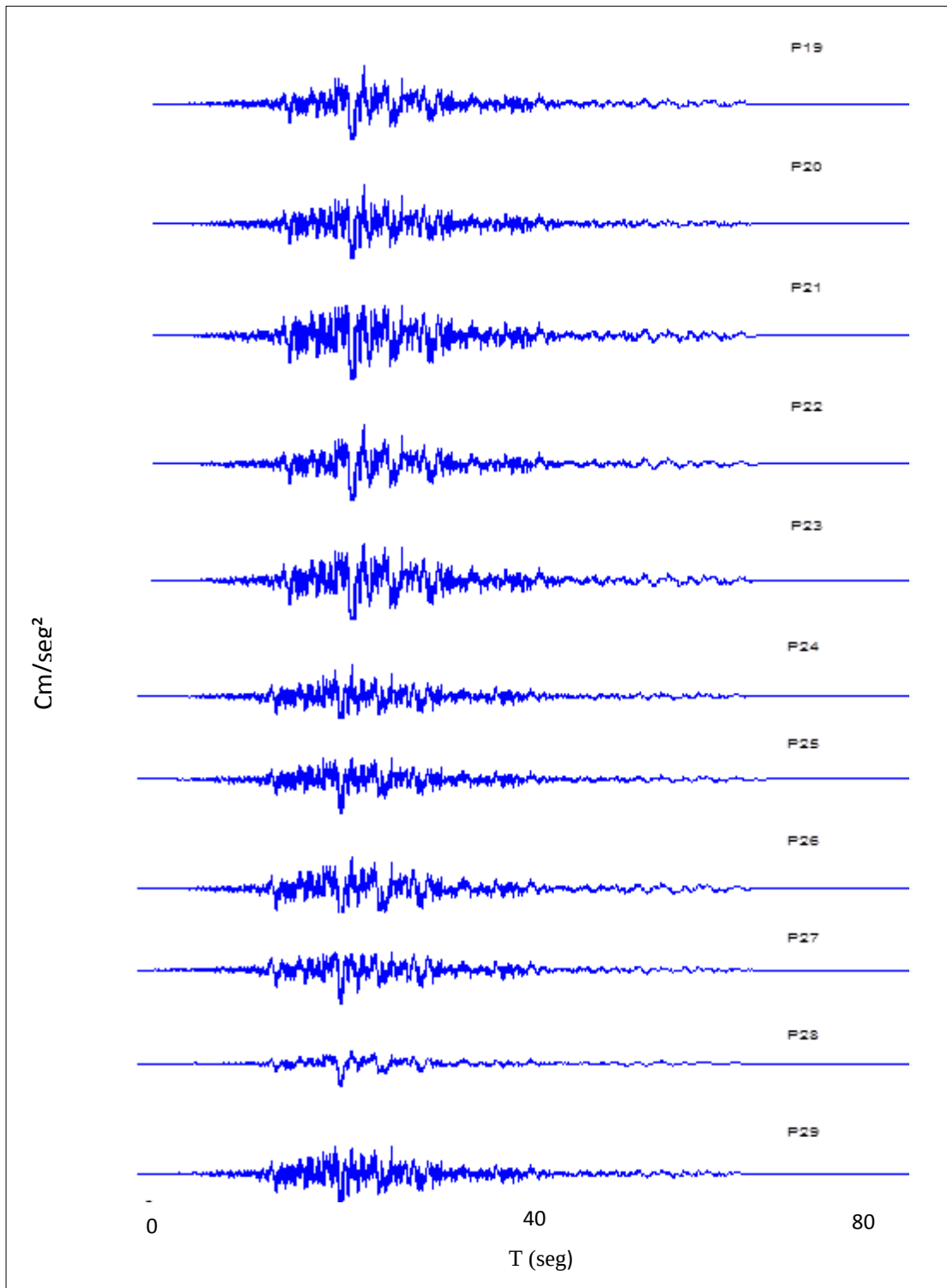


Figura 5. 17 Acelerogramas sintéticos para el temblor del 15 de Junio de 1999 utilizando las funciones de transferencia.

A continuación en la tabla 5.2 se muestran los resultados de las aceleraciones para $T=0.1$ seg y $T=0.2$ seg de los puntos de registro de microtemores en la zona urbana de Calpulalpan.

Tabla 5.2 Resultados de los valores de aceleración para los periodos estructurales de $T=0.1$ y $T=0.2$ seg obtenidos para el temblor del 15 Junio del 1999.

Punto	T (seg)	Seudoaceleraciones Sa (cm/seg²)	T (seg)	Seudoaceleraciones Sa (cm/seg²)
<i>P1</i>	0.1	204	0.2	182
<i>P2</i>	0.1	175	0.2	186
<i>P3</i>	0.1	201	0.2	234
<i>P4</i>	0.1	190	0.2	182
<i>P5</i>	0.1	173	0.2	156
<i>P6</i>	0.1	209	0.2	244
<i>P7</i>	0.1	302	0.2	387
<i>P8</i>	0.1	171	0.2	160
<i>P9</i>	0.1	272	0.2	358
<i>P10</i>	0.1	191	0.2	172
<i>P11</i>	0.1	218	0.2	204
<i>P12</i>	0.1	165	0.2	171
<i>P13</i>	0.1	225	0.2	208
<i>P14</i>	0.1	192	0.2	180
<i>P15</i>	0.1	472	0.2	490
<i>P16</i>	0.1	336	0.2	399
<i>P17</i>	0.1	232	0.2	242
<i>P18</i>	0.1	202	0.2	185
<i>P19</i>	0.1	137	0.2	112
<i>P20</i>	0.1	238	0.2	224
<i>P21</i>	0.1	179	0.2	165
<i>P22</i>	0.1	167	0.2	219
<i>P23</i>	0.1	255	0.2	316

Tabla 5.2 Continuación				
<i>P24</i>	0.1	184	0.2	179
<i>P25</i>	0.1	236	0.2	247
<i>P26</i>	0.1	198	0.2	224
<i>P27</i>	0.1	207	0.2	202
<i>P28</i>	0.1	277	0.2	262
<i>P29</i>	0.1	194	0.2	192
<i>P30</i>	0.1	273	0.2	271
<i>P31</i>	0.1	235	0.2	262

También se generaron los mapas de las distribuciones de las aceleraciones para el periodo de $T=0.1$ seg (construcciones de un nivel). Así como el mapa de la distribución de las aceleraciones para periodo de $T=0.2$ seg (construcciones de 2 niveles), estimado para el sismo del 15 de junio de 1999 (Figura 5.18 y 5.19, respectivamente).

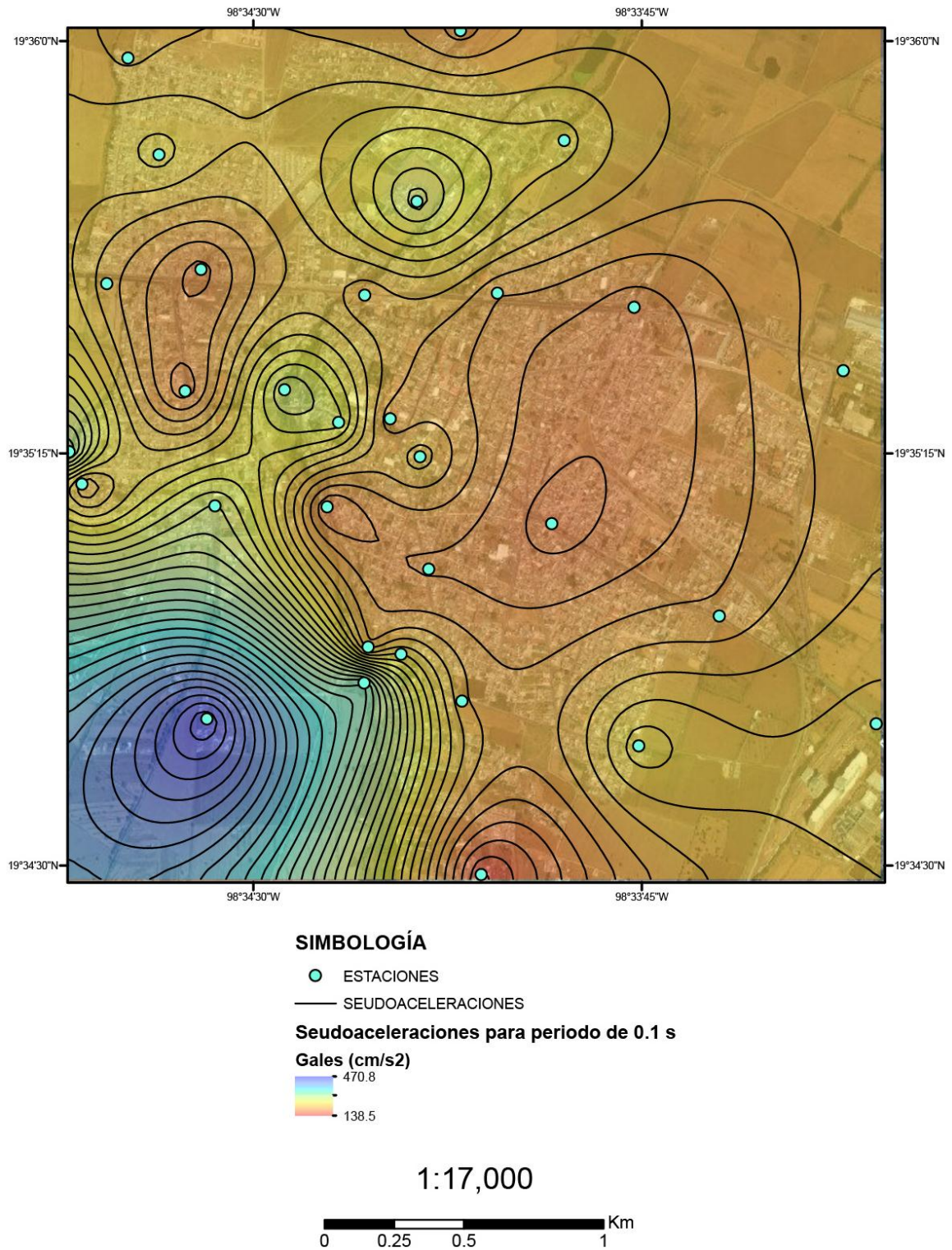


Figura 5. 18 Mapa de la distribución de las pseudoaceleraciones para periodo $T=0.1$ seg del sismo del 15 de Junio de 1999.

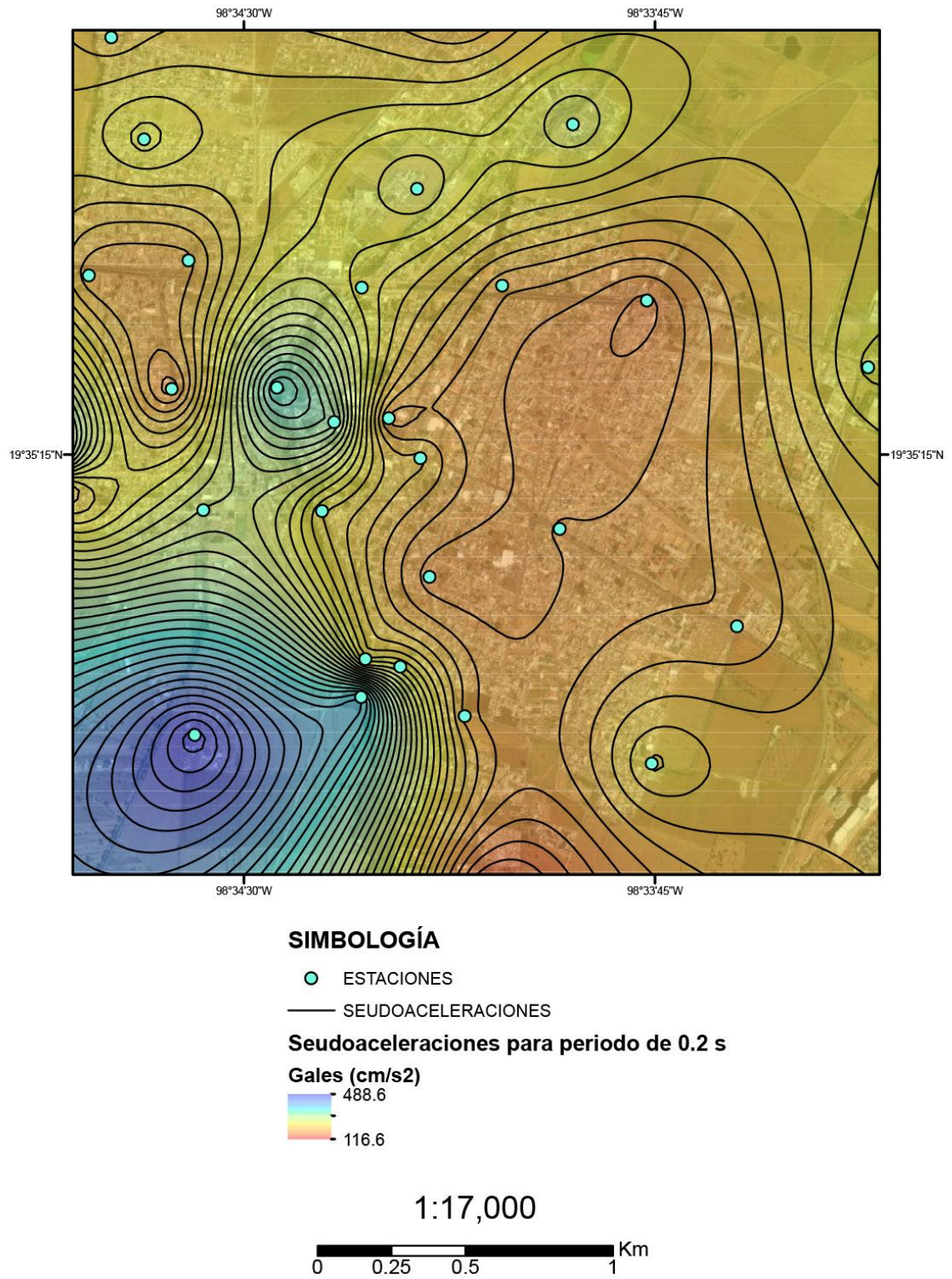
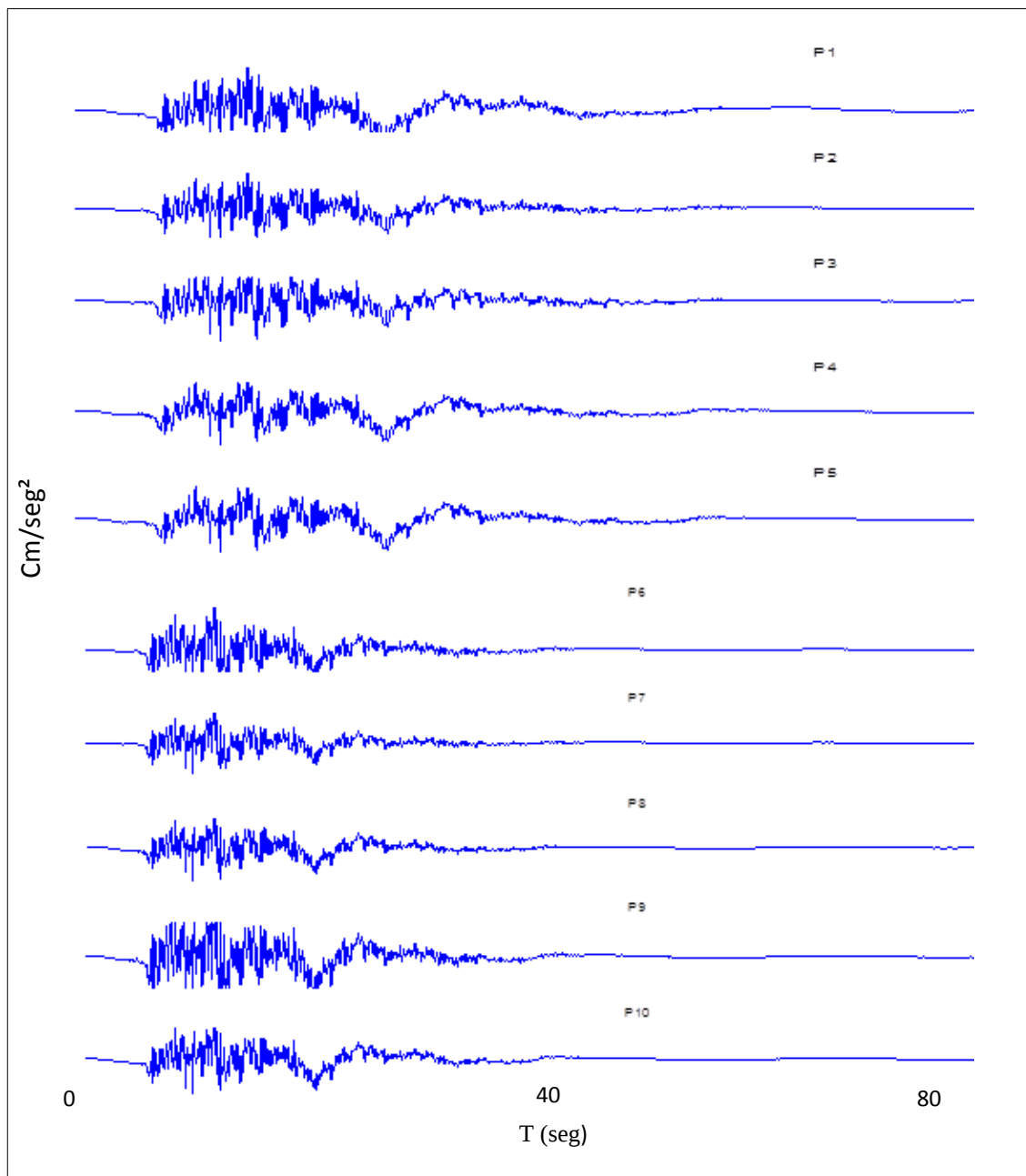
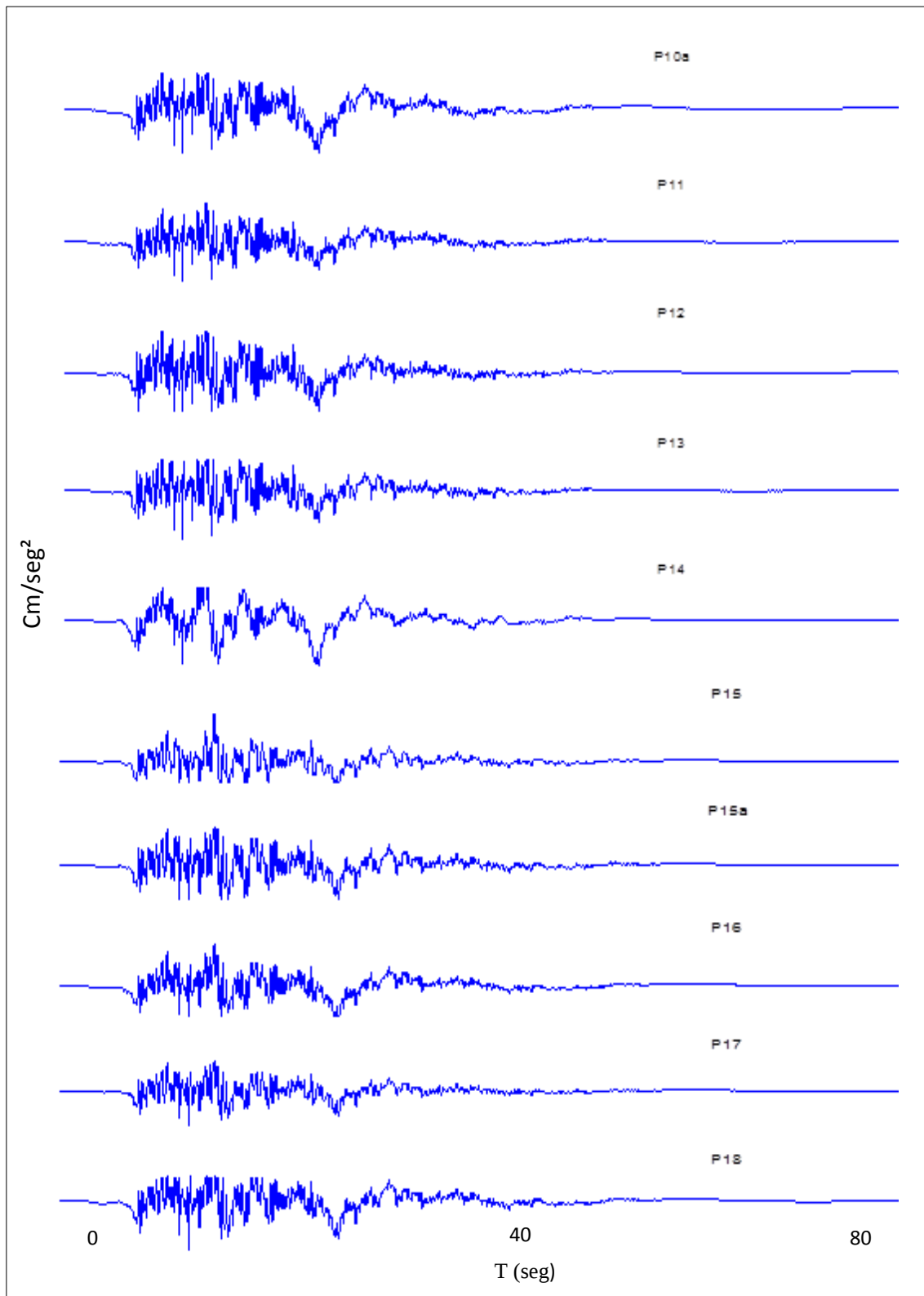


Figura 5. 19 Mapa de la distribución de las pseudoaceleraciones para periodo $T=0.2$ seg del sismo del 15 de Junio de 1999.

5.7.2 Intensidades sísmicas estimadas para el sismo 6 de Abril de 1959, Tlaxcala

La figura 5.20 se presentan los acelerogramas obtenidos para este sismo ocurrido el 6 de abril de 1959 al oriente del Estado de Tlaxcala en las cercanías de los municipios de Cuapixtla, Tlaxcala y el de Lara Grajales, Puebla.





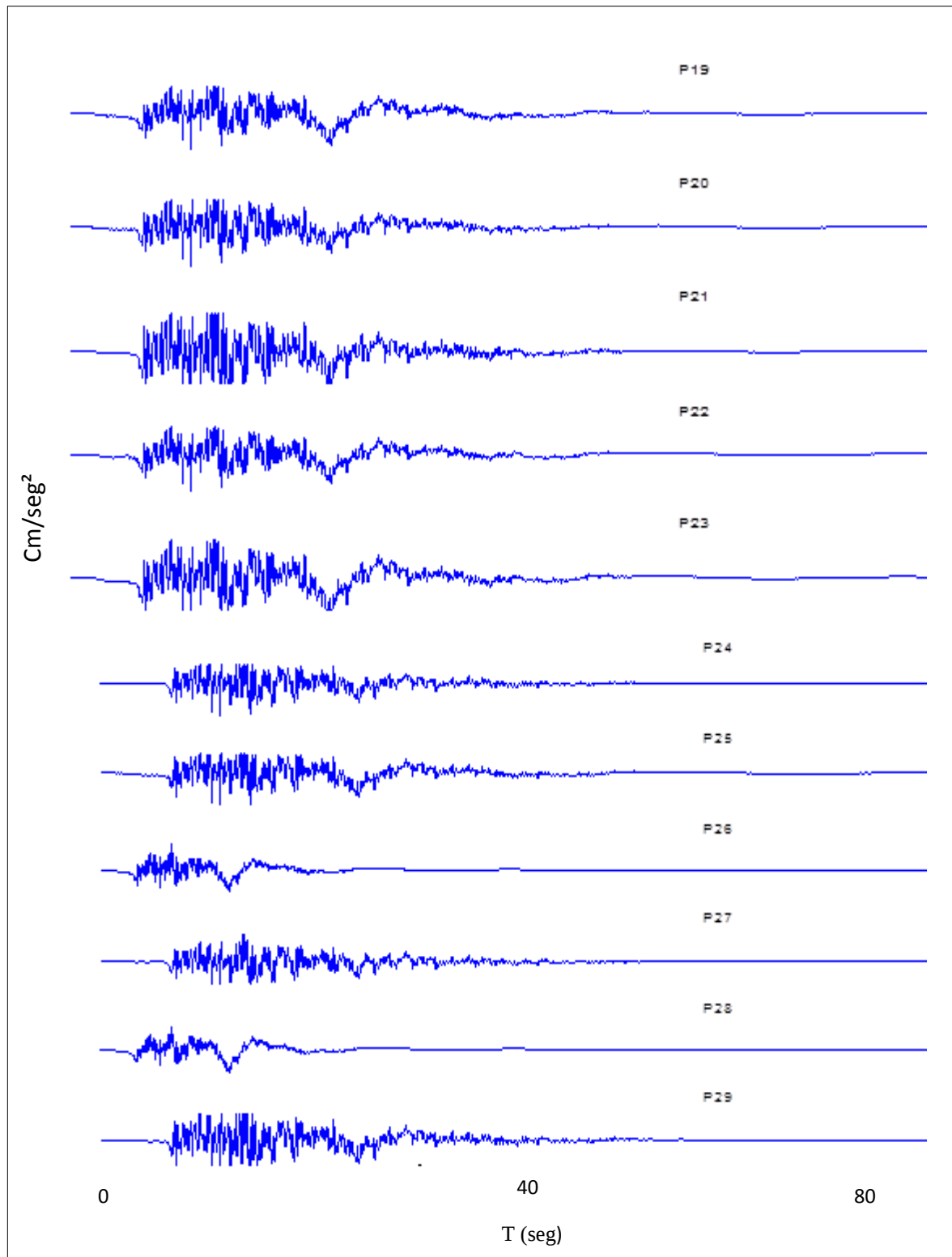


Figura 5. 20 Acelerogramas sintéticos para el temblor del 6 de Abril de 1959.

Asimismo, se generó la ubicación de las intensidades sísmicas en $T=0.1$ y $T=0.2$ seg; en este periodo estructural se tienen los valores de pseudoaceleración que se sentirían en construcciones de 2 niveles (Tabla 5.3). A continuación se muestra la tabla de resultados y sus correspondientes mapas de aceleraciones del suelo para un periodo de $T=0.2$ seg estimado para el sismo del 6 de Abril de 1959 y el mapa de aceleraciones del suelo para un periodo de $T=0.1$ seg estimado para el mismo sismo (Figuras 5.21 y 5.22).

Tabla 5. 3 Valores de aceleración para el periodo $T=0.1$ y $T=0.2$ seg resultados obtenidos para el temblor del 6 de Abril de 1959

Punto	T (seg)	Seudoaceleraciones Sa (cm/seg²)	T (seg)	Seudoaceleraciones Sa (cm/seg²))
<i>P1</i>	0.1	2.43	0.2	1.16
<i>P2</i>	0.1	2.00	0.2	1.15
<i>P3</i>	0.1	1.92	0.2	1.35
<i>P4</i>	0.1	1.53	0.2	1.08
<i>P5</i>	0.1	1.72	0.2	1.03
<i>P6</i>	0.1	2.04	0.2	1.52
<i>P7</i>	0.1	2.95	0.2	2.38
<i>P8</i>	0.1	1.60	0.2	0.94
<i>P9</i>	0.1	2.85	0.2	2.27
<i>P10</i>	0.1	1.91	0.2	1.03
<i>P11</i>	0.1	1.85	0.2	1.16
<i>P12</i>	0.1	1.68	0.2	1.03
<i>P13</i>	0.1	2.41	0.2	1.25
<i>P14</i>	0.1	1.75	0.2	1.03
<i>P15</i>	0.1	3.05	0.2	1.79
<i>P16</i>	0.1	2.13	0.2	2.40
<i>P17</i>	0.1	2.04	0.2	1.34
<i>P18</i>	0.1	1.66	0.2	1.01

Tabla 5.3 Continuación				
<i>P19</i>	0.1	1.39	0.2	0.70
<i>P20</i>	0.1	2.03	0.2	1.16
<i>P21</i>	0.1	1.65	0.2	0.95
<i>P22</i>	0.1	1.73	0.2	1.33
<i>P23</i>	0.1	2.67	0.2	1.90
<i>P24</i>	0.1	1.56	0.2	1.07
<i>P25</i>	0.1	2.30	0.2	1.53
<i>P26</i>	0.1	2.21	0.2	1.38
<i>P27</i>	0.1	2.67	0.2	1.28
<i>P28</i>	0.1	2.81	0.2	1.58
<i>P29</i>	0.1	2.01	0.2	1.06
<i>P30</i>	0.1	1.95	0.2	1.43
<i>P31</i>	0.1	2.65	0.2	1.58

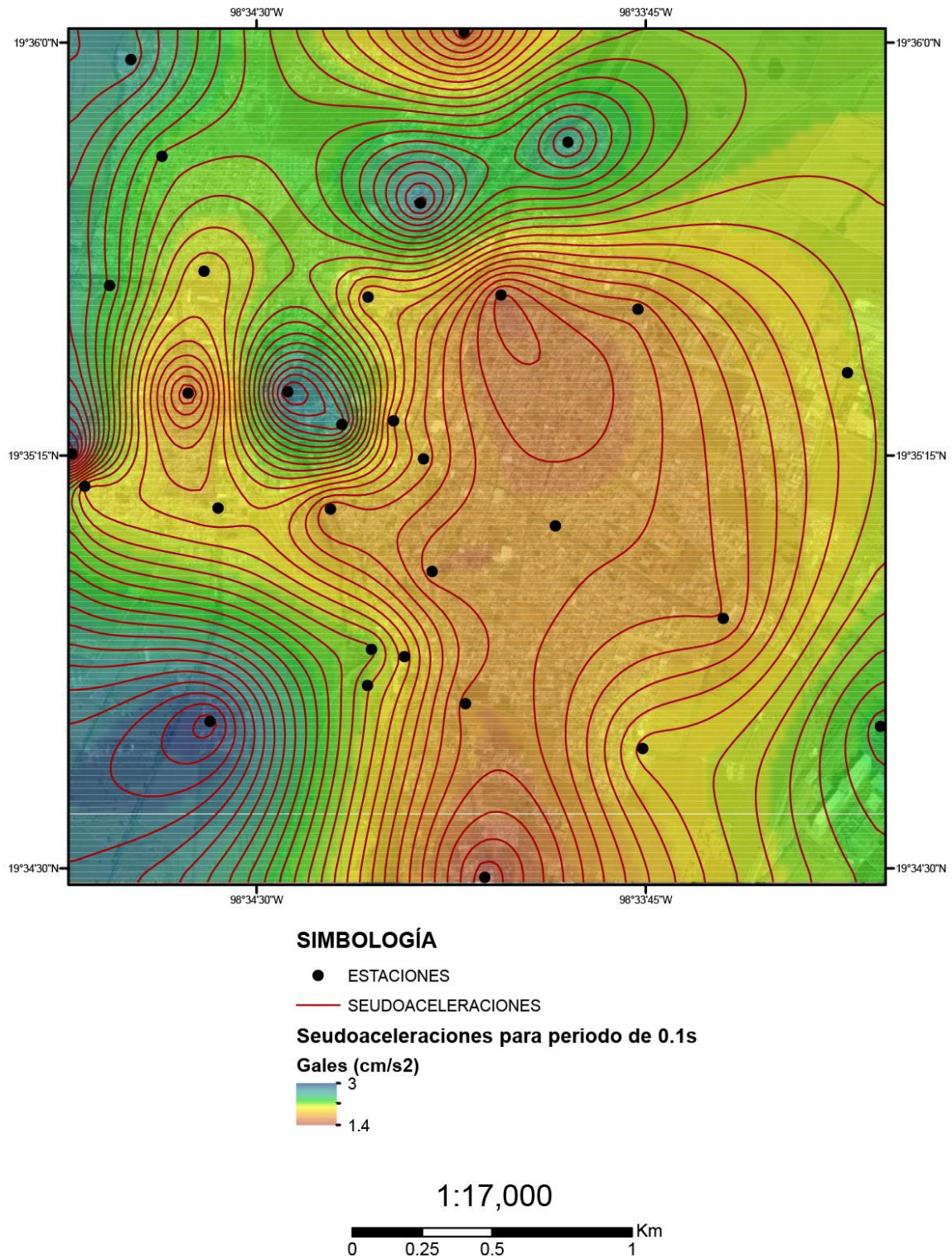


Figura 5. 21 Mapa de la distribución de las pseudoaceleraciones para periodo $T=0.1$ seg del sismo del 6 de Abril de 1959.

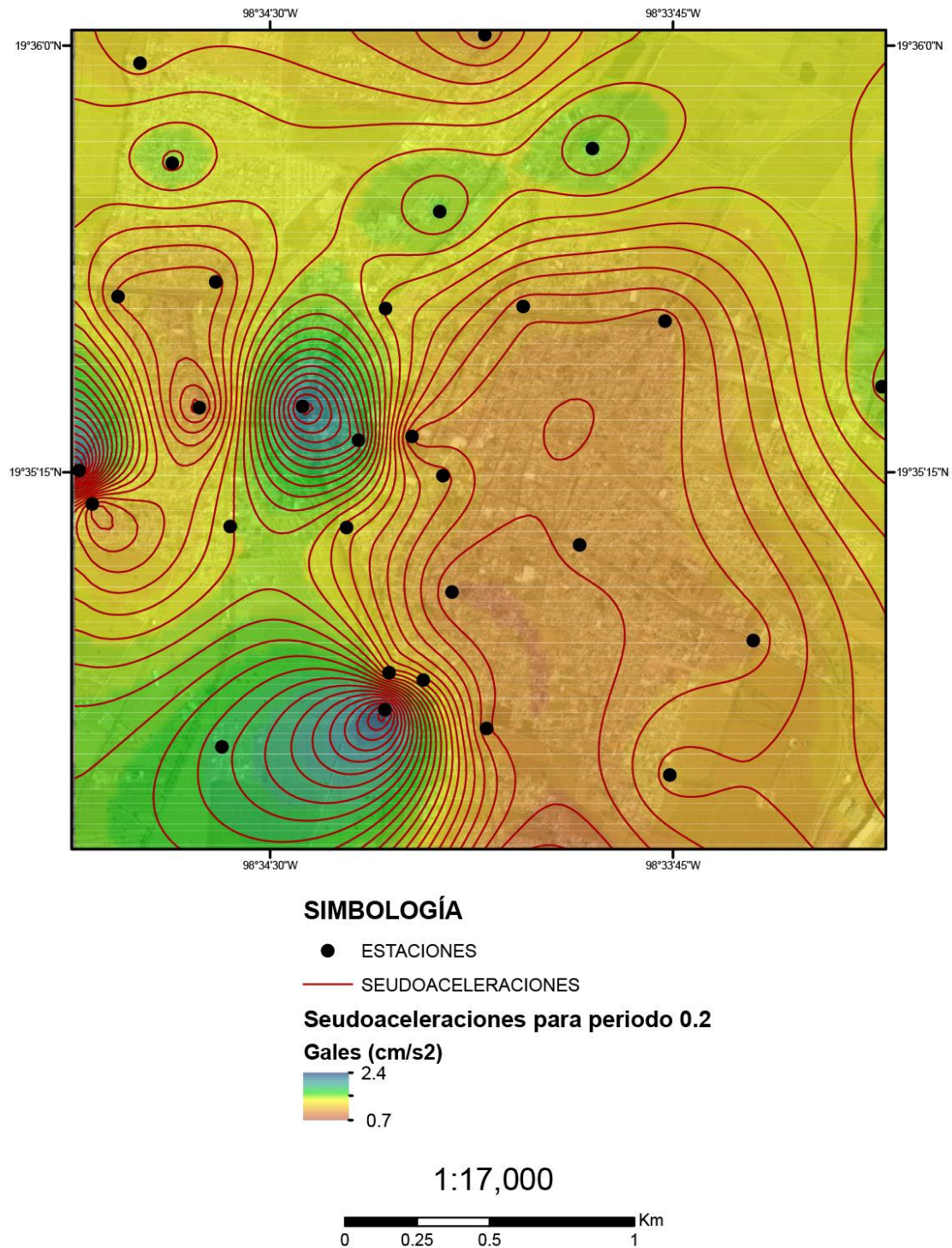


Figura 5. 22 Mapa de la distribución de las pseudoaceleraciones para periodo $T=0.2$ seg del sismo del 6 de Abril de 1959.

CAPÍTULO 6.

RESULTADOS, RECOMENDACIONES Y APLICACIONES

RESULTADOS

Se presenta la primera propuesta de microzonificación para el Municipio de Calpulalpan, en la cual se desarrolló una metodología para la evaluación del peligro sísmico del municipio, con base en el empleo de cocientes espectrales para el análisis de microtemores, a partir de periodos dominantes, los cuales fueron necesarios para desarrollar los diversos escenarios sísmicos que representan un potencial sísmico en Calpulalpan.

Asociado a la microzonificación se presenta un mapa de la variación de los periodos del municipio, cuyos valores fueron el criterio principal para la clasificación de las funciones de transferencia en familias espectrales, agrupándolas según su forma espectral.

Conforme a esto, se determinaron 2 microzonas en función del periodo dominante y la clasificación de las funciones de transferencia, el mapa obtenido se conforma de 2 tipos de terreno, zona baja de depósitos aluviales y zona alta de tobas (roca firme). De igual forma se identifican las intensidades sísmicas que se presentarán con mayor probabilidad ante la ocurrencia de diversos sismos, 2 de tipo cortical o intraplaca con profundidades focales diversas.

Haciendo una comparación entre los dos tipos de escenarios sísmicos, se puede concluir que el de mayor peligrosidad, en particular para nuestra zona de estudio, es el sismo de 1999 ocurrido en Tehuacán, Puebla, dado que en sus espectros de respuesta se tiene aceleraciones con un promedio de 216 Gales y 226 Gales (cm/seg^2), en los periodos de $T=0.1$ y $T=0.2$ segundos.

Por otro lado para el sismo en Grajales, Puebla, las aceleraciones no rebasan los 4 Gales, sin embargo, es de suma importancia que se evalúen diferentes tipos de fuentes, ya que cada sismo, dependiendo de la zona sismogénica en la que se encuentre y del tipo fuente,

presentará intensidades diferentes y los daños causados variaran dependiendo del tipo de terreno.

Otra aportación importante de este trabajo son las funciones de transferencia, las cuales ya están agrupadas en familias y listas para generar nuevos mapas de intensidades, con lo cual podrán evaluarse sismos futuros, y con ello saber que zonas serán las más afectadas.

RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos en el presente estudio y en las conclusiones establecidas, se recomienda:

- Realizar mediciones de ruido ambiental con un espaciamiento entre puntos de medición de 500 m aproximadamente y con un tiempo de duración de al menos 2 horas para lograr la correcta estabilización del equipo, con la finalidad de abarcar las posibles zonas de expansión y complementar el mapa de isoperiodos.
- Incluir estudios de carácter geotécnico, geológico o gravimétrico con el objeto de describir a detalle las características del comportamiento dinámico de los suelos en la zona y delimitar las áreas dentro de Calpulalpan donde se encuentren las fallas del sistema Apan-Tlálloc.
- Incorporar los resultados finales del trabajo en las normas municipales y/o estatales, con el fin de diseñar construcciones sismoresistentes, ya que las características locales que presenta el suelo debe ser la primera parte de cualquier evaluación de amenaza sísmica.
- Informar a las autoridades correspondientes sobre el alcance del proyecto y la aplicación de sus resultados, ya que es necesario contar con la participación y colaboración de instituciones y entidades.

APLICACIONES

- Los estudios de microzonificación sísmica pueden proveer a los Municipio de elementos técnicos para una adecuada planeación urbana; con ello, se puede lograr que el crecimiento y la expansión urbana se desarrollen de manera ordenada y en los sitios que presenten menor grado de vulnerabilidad sísmica. De esta manera se puede promover la elaboración de planes de prevención y atención de desastres.
- Los mapas de microzonificación sísmica son base fundamental para las Normas de Diseño Sísmico de Construcciones (Ismael-Hernández, 2014). Esto se debe a que tales normas requieren de la descripción adecuada del nivel de peligro sísmico, el cual depende fuertemente de las condiciones locales de los sitios, es decir, de los tipos de terreno presentes en una zona urbana de interés. Además, se pueden emplear como base para generar los Atlas de Riesgo Municipales.
- Otra aplicación de los mapas de microzonificación sísmica se encuentra en el campo de la evaluación de los riesgos sísmicos para fines de seguros. Los estudios de microzonificación sísmica se convierten en un respaldo para las gestiones de inversión y crédito tanto nacionales como internacionales, ya que permiten determinar la intensidad máxima que puede alcanzar eventualmente un sismo en una región determinada. Es decir, que a partir de estos mapas se pueden establecer escenarios de riesgo sísmicos para eventos futuros y con ellos estimar valores esperados de pérdidas económicas para dichos escenarios.

APÉNDICE

Apéndice A. Bitácora de Campo

BITÁCORA DE CAMPO			
Fecha	13-14 de abril de 2014		
Lugar	Calpulalpan, Tlaxcala		
Estudio	Pruebas de vibración ambiental		
Brigada	Candy, Dr. Ismael, Prof. Victor, Ing. Antonio, Raul, Arnold, Mauricio y Antia		
Equipo	Gural system	# de serie	6710/6689

Punto 1	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Carretera Mexico-Veracruz			Lat.	19.59264 N	unidad deportiva	
		12:48 p.m.	01:08:00 p.m.	Long.	98.57971 W		
				Elevación	2553 m		
						equipo	6710

Punto 2	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Carretera Mexico-Veracruz			Lat.	19.59307 N	Asta bandera (fente a gasolinera)	
		01:21 p.m.	01:41 p.m.	Long.	98.57668 W		
				Elevación	2622 m		
						equipo	6710

Punto 3	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Puente peatonal (carretera Mex-Pue)			Lat.	19.59229 N	camino o carretera al periferico	
		01:28 p.m.	01:50 p.m.	Long.	98.57141 W		
				Elevación	2568 m		
						equipo	6689

Punto 4	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Carretera Mex-Ver. prolongacion Zaragoza			Lat.	19.59235 N	esquina club de leones	
		01:50 p.m.	02:10 p.m.	Long.	98.56714 W		
				Elevación	2585 m		
						equipo	6710

Punto 5	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Carretera Mexico-Veracruz			Lat.	19.59192 N	cruce con via	
		02:17 p.m.	02:37 p.m.	Long.	98.56274 W		
				Elevación	2587 m		
						equipo	6710

Punto 6	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Carretera Mex-Ver.			Lat.	19.59000 N	Goodyear	
		02:05 p.m.	02:32 p.m.	Long.	98.55601 W		
				Elevación	2578 m		
						equipo	6689

Punto 7	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Inicio de la represa			Lat.	19.58754 N	por las casas en peligro de derrumbe	
		12:39 p.m.	01:16 p.m.	Long.	98.58092 W		
				Elevación	2578 m		
						equipo	6689

Punto 8	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Plaza de la Constitución			Lat.	19.58938 N	casa de la mujer Col. Francisco Zarabia	
		12:21 p.m.	12:42 p.m.	Long.	98.57719 W		
				Elevación	2627 m		
						equipo	6710

Punto 9	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Barranca (abajo)			Lat.	19.58942 N		
		12:00 p.m.	12:21 p.m.	Long.	98.57399 W		
				Elevación	2573 m		
						equipo	6689

Punto 10	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Parque-presidencia			Lat.	19.58854 N		
		11:30 p.m.	11:50 p.m.	Long.	98.57059 W		
				Elevación	2696 m		
						equipo	6710

Punto 10a	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	A unas cuadras del parque			Lat.	19.58739 N	Punto extra como referencia al punto 10, hora de la comida	
		04:11 p.m.	04:48 p.m.	Long.	98.56963 W		
				Elevación	m		
						equipo	6689

Punto 11	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Glorieta Blvd. Lic. Emilio Sanchez Piedras			Lat.	19.58536 N		
		03:20 p.m.	03:41 p.m.	Long.	98.56539 W		
				Elevación	2596 m		
						equipo	6710

Punto 12	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Cebadas y Maltas S.A. de C.V			Lat.	19.57929 N	enfrente de la fábrica cebadas y maltas	
		02:45p.m.	03:05 p.m.	Long.	98.55495 W		
				Elevación	2588 m		
						equipo	6710

Punto 13	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	punto 12 original			Lat.	19.58256 N	Blvd. Emilio Sanchez Piedra/Periferico NO SE PUDO VERIFICAR PUNTO	
		02:44 p.m.	03:22 p.m.	Long.	98.56 W		
				Elevación	2607 m		
						equipo	6689

Punto 14	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Calle san francisco (terreno del doc.)			Lat.	19.57944 N	inicio de la lluvia 6:25 pm, se cubrio el equipo con carton y bolsas de plastico	
		06:24 p.m.	06:50 p.m.	Long.	98.57649 W		
				Elevación	2613 m		
						equipo	6689

Punto 15	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Barranca			Lat.	19.58053 N	cerca de la Tec. 30	
		05:08 p.m.	05:38 p.m.	Long.	98.57143 W		
				Elevación	2595 m		
						equipo	6689

Punto 15 a	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Tecnica No. 30			Lat.	19.5814 N	entrada de la tecnica	
		05:44 p.m.	06:16 p.m.	Long.	98.57024 W		
				Elevación	2610 m		
						equipo	6689

Punto 16	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Calle periférico			Lat.	19.57998 N	frente al crucero (casa del tío gil)	
		05:03 p.m.	05:27 p.m.	Long.	98.56828 W		
				Elevación	2603 m		
						equipo	6710

Punto 17	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Frente al tanque de agua			Lat.	19.57472 N	la componente N no se registro	
		05:34 p.m.	05:59 p.m.	Long.	98.56766 W		
				Elevación	2621 m		
						equipo	6710

Punto 18	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Cruce periférico			Lat.	19.57862 N		
		06:06 p.m.	06:26 p.m.	Long.	98.56259 W		
				Elevación	2621 m		
						equipo	6710

Punto 19	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Calle B. de las casas esq. Con Av. Juárez			Lat.	19.58398 N		
		06:35 p.m.	07:01 p.m.	Long.	98.56935 W		
				Elevación	m		
						equipo	6710

Punto 20	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Periferico esq. Justo Sierra			Lat.	19.58587 N	bajada abrupta	
		07:10 p.m.	07:30 p.m.	Long.	98.57262 W		
				Elevación	2594 m		
						equipo	6710

Punto 21	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Calle Riva Palacio			Lat.	19.58843 N	arriba de la barranca	
		07:13 p.m.	07:37 p.m.	Long.	98.57225 W		
				Elevación	2610 m		
						equipo	6689

Punto 22	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Carretera Calpulalpan- Apan			Lat.	19.60031 N	PULMEX	
		07:43 p.m.	08:06 p.m.	Long.	98.56833 W		
				Elevación	m		
						equipo	6710

Punto 23 (14/04/14)	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Col. Espejel			Lat.	19.59655 N	prolongacion Juarez esquina niños heroes (grabando en PC)	
		10:22 a.m.	10:45 a.m.	Long.	98.57803 W		
				Elevación	m		
						equipo	6689

Punto 24	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
	Casa del doctor			Lat.	19.58162 N	grabación continua (11 hrs)	
		08:41 p.m.	09:06 a.m.	Long.	98.57130 W		
		13/04/2014	14/04/2014	Elevación	2578 m		
						equipo	6689

	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
Punto 25	Cuarta cerrada de Lopez Mateo			Lat.	19.59948 N	Col. espejel (punto más bajo)	
		10:56 a.m.	11:17 a.m.	Long.	98.57903 W		
				Elevación	2577 m		
						equipo	6689

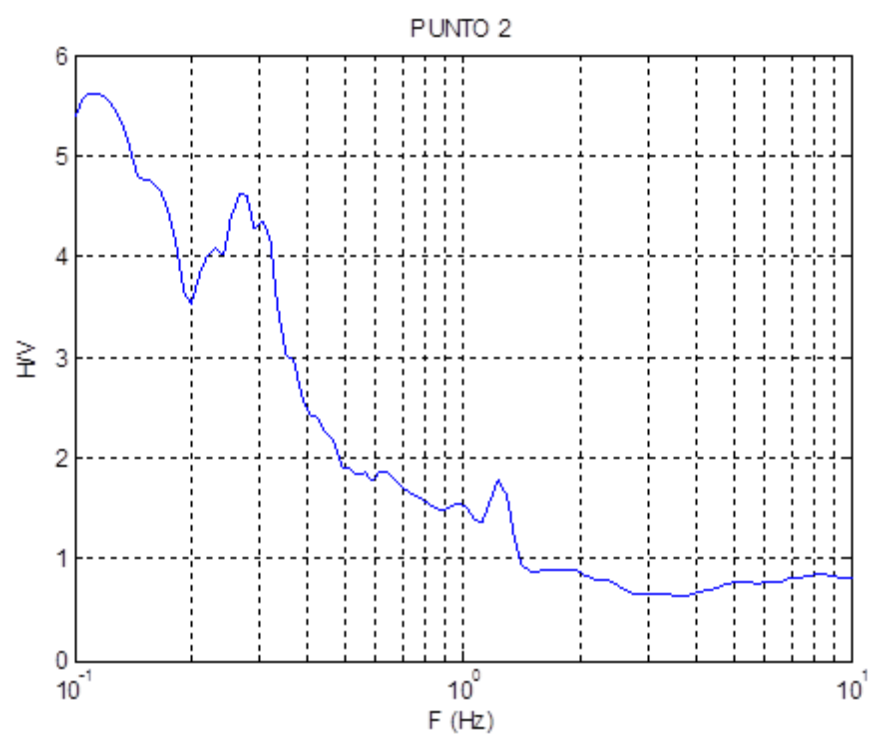
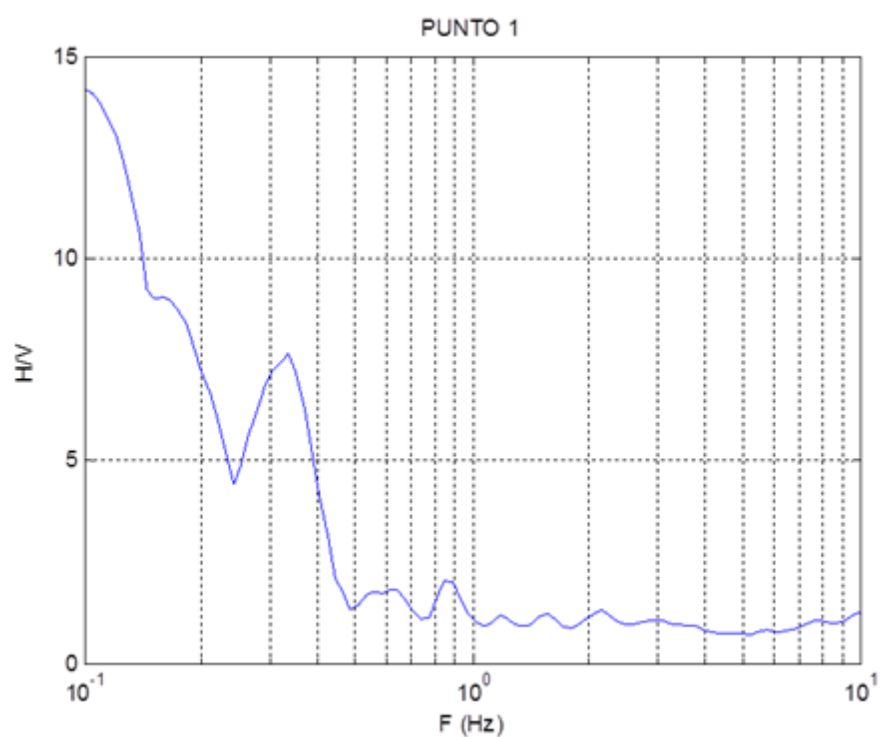
	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
Punto 26	Col. Cañada			Lat.	19.59513 N	detrás de las bodegas de color verde, amarillo y rojo	
		11:33 a.m.	12:00 p.m.	Long.	98.56973 W		
				Elevación	2577 m		
						equipo	6710

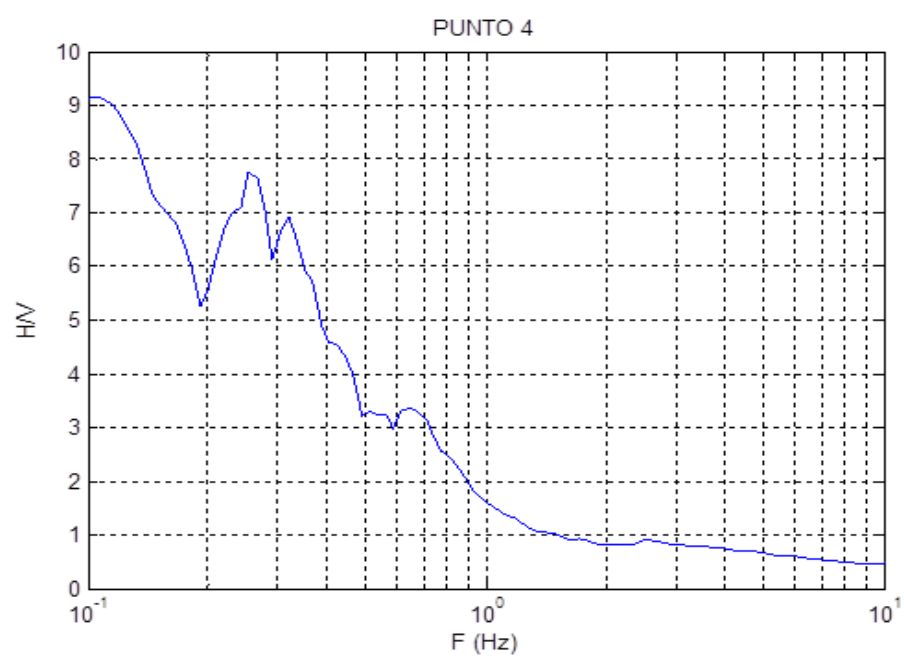
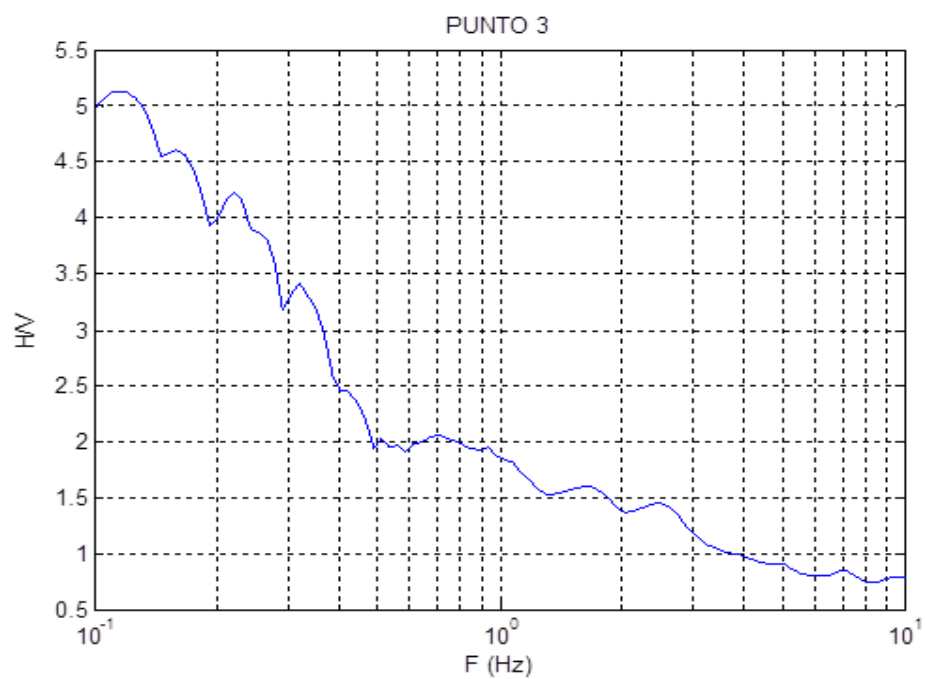
	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
Punto 27	Casa de los suegros del doctor			Lat.	19.58656 N	Calle Nicolás Bravo	
		12:55 p.m.		Long.	98.58051 W		
				Elevación	2577 m		
						equipo	6710

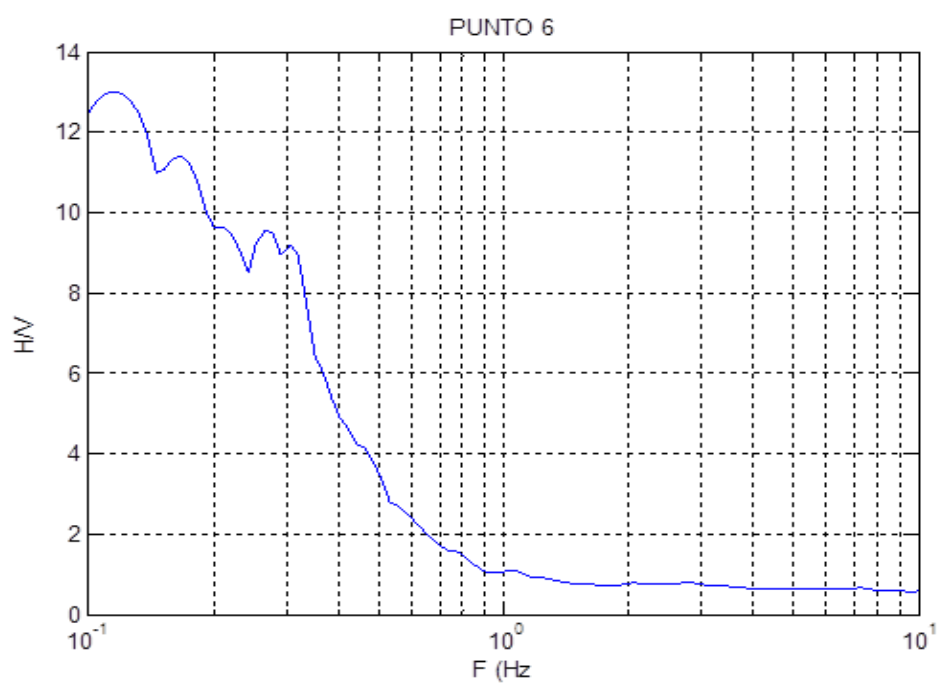
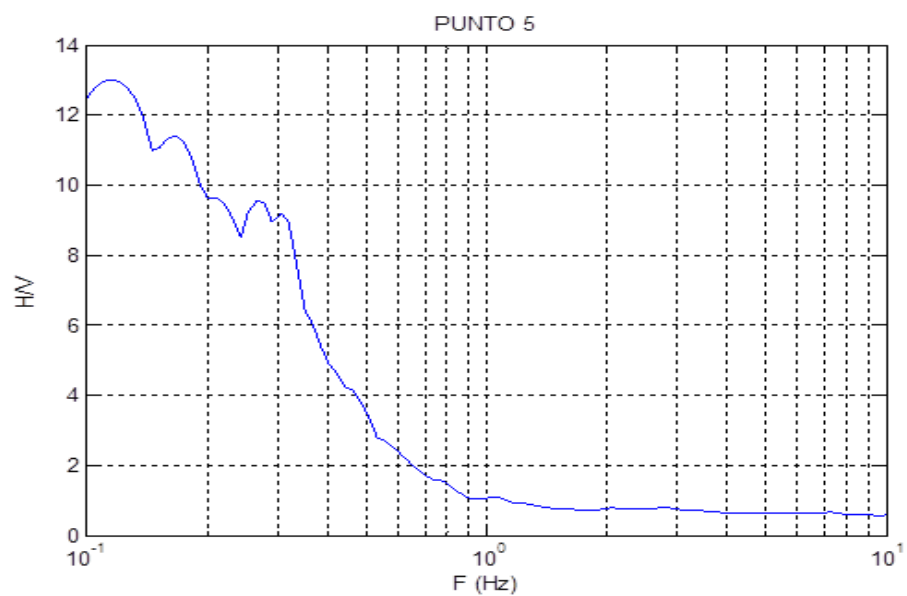
	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
Punto 28	Bachillerato 154			Lat.	19.58590 N	Calle Porfirio Bonilla	
		01:04 p.m.	01:27 p.m.	Long.	98.57623 W		
				Elevación	2578 m		
						equipo	6689

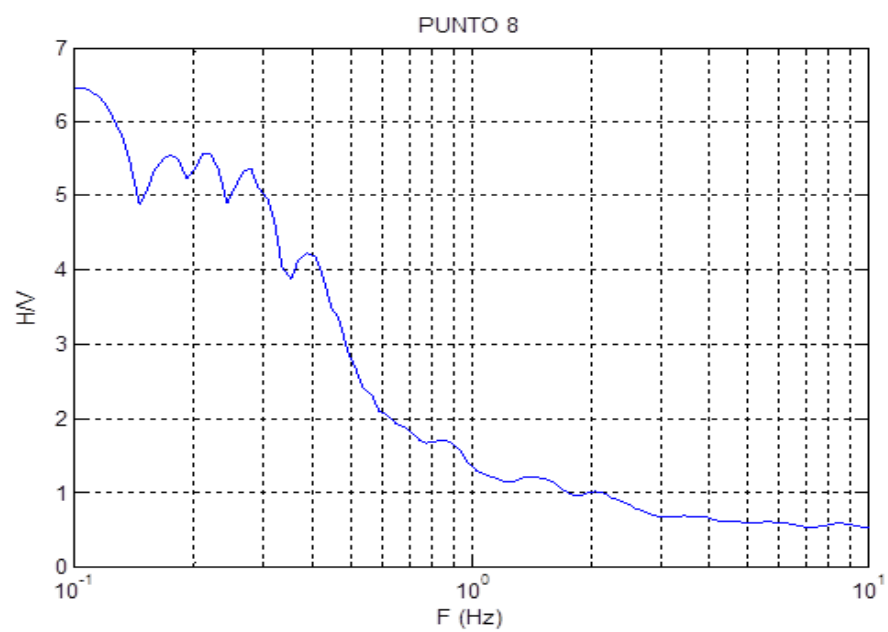
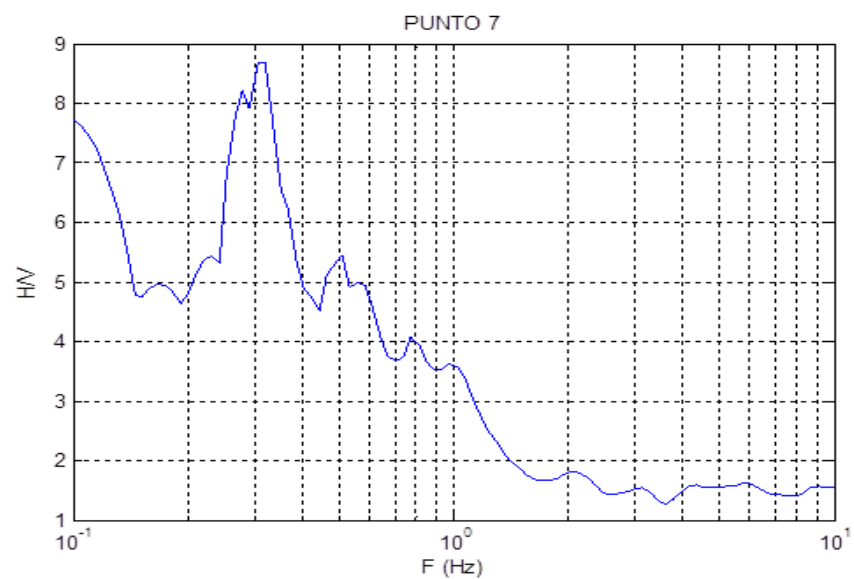
	Localización	Hora de inicio	Hora final	Coordenadas		Observaciones	
Punto 29	Prolongación Zaragoza, Col. San Rafael			Lat.	19.59698 N	frente a un kinder Tomas Cova Flores	
		01:53 p.m.	02:15 p.m.	Long.	98.56499 W		
				Elevación	2579 m		
						equipo	6689

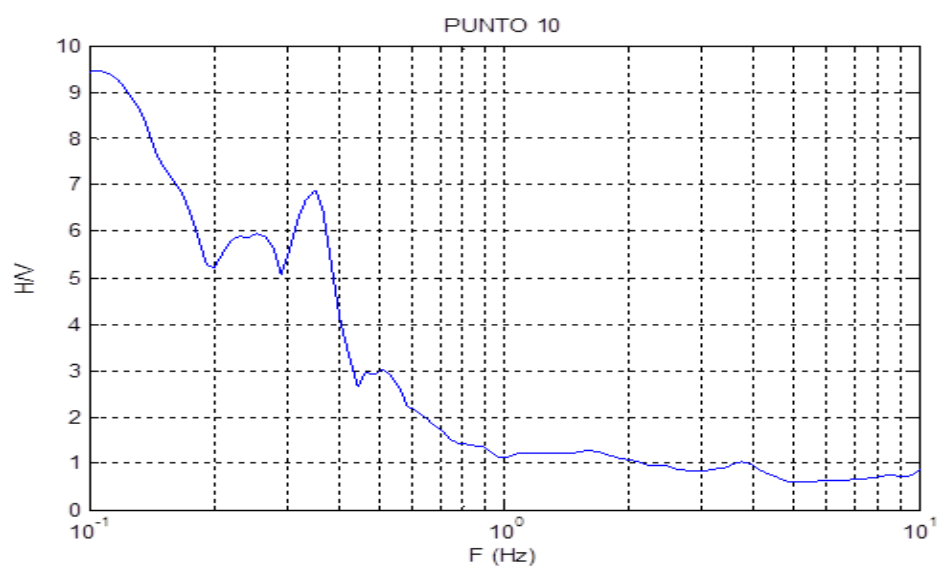
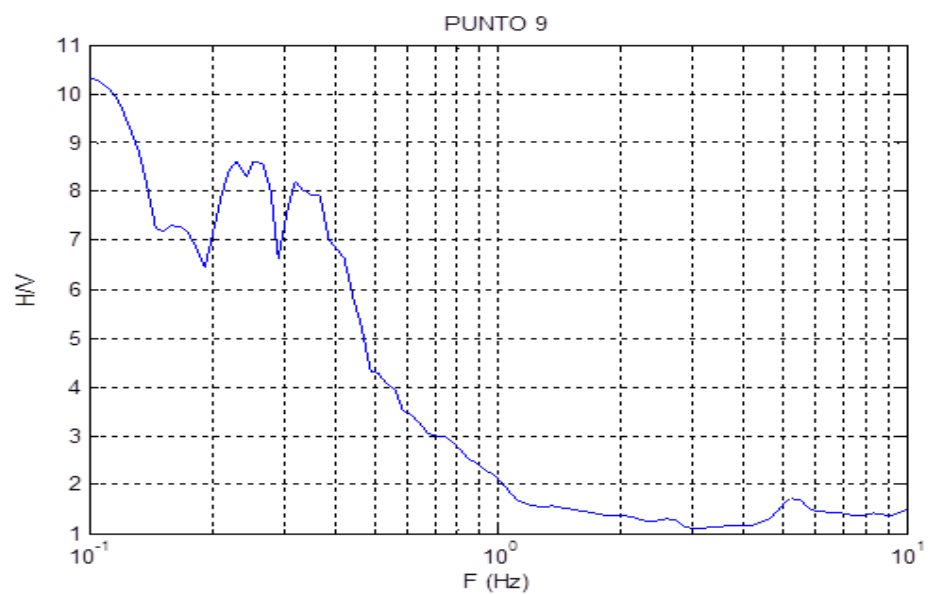
Apéndice B. Cocientes espectrales

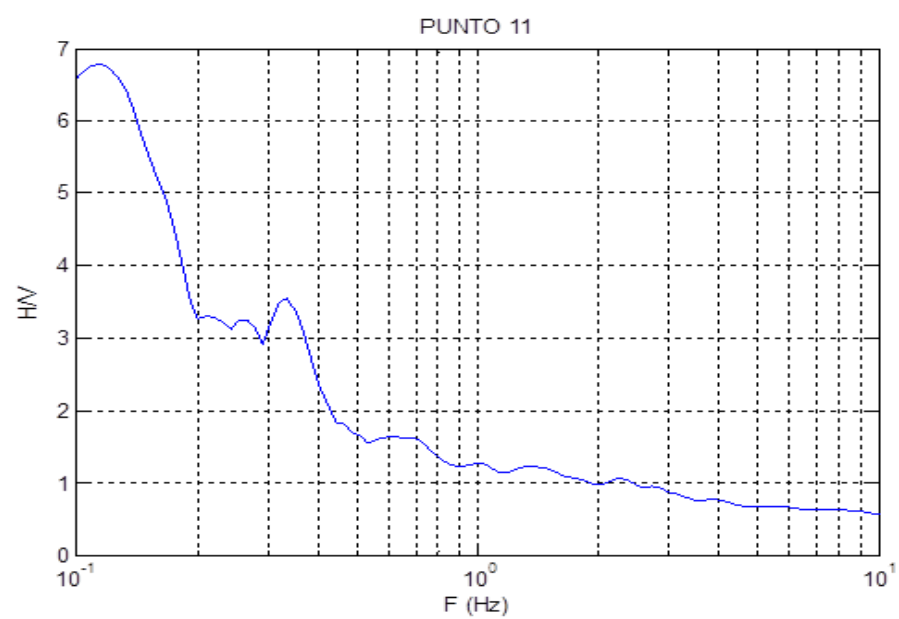
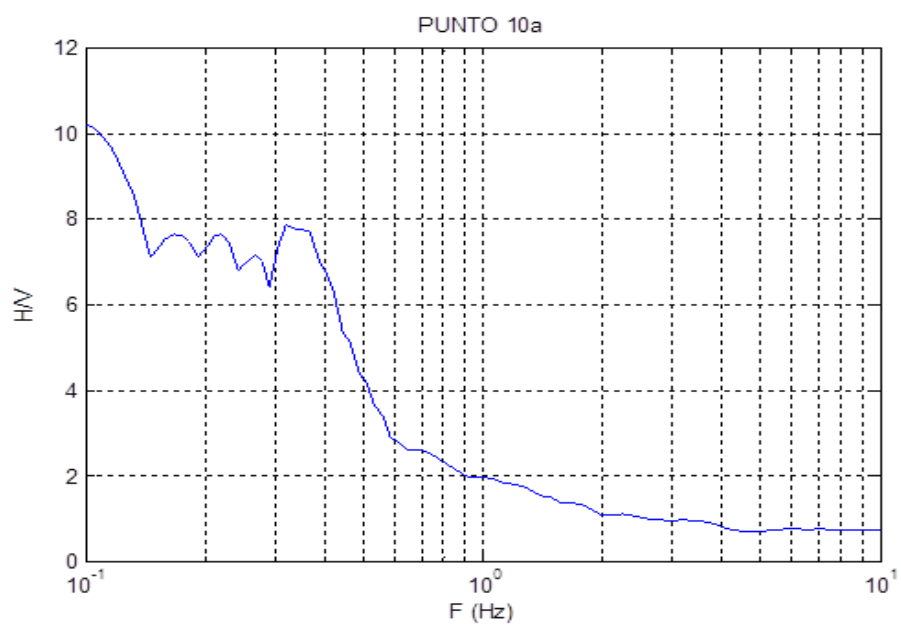


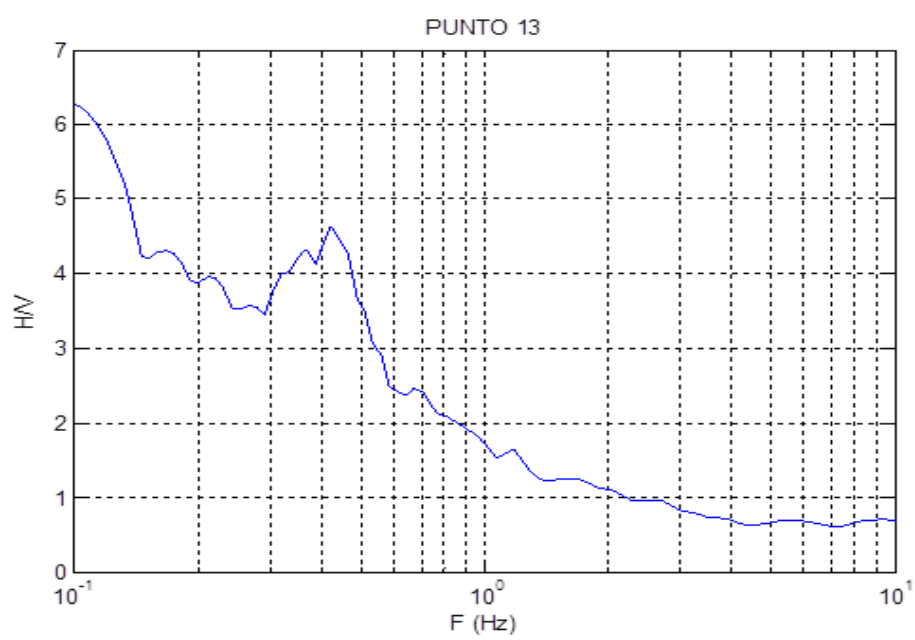
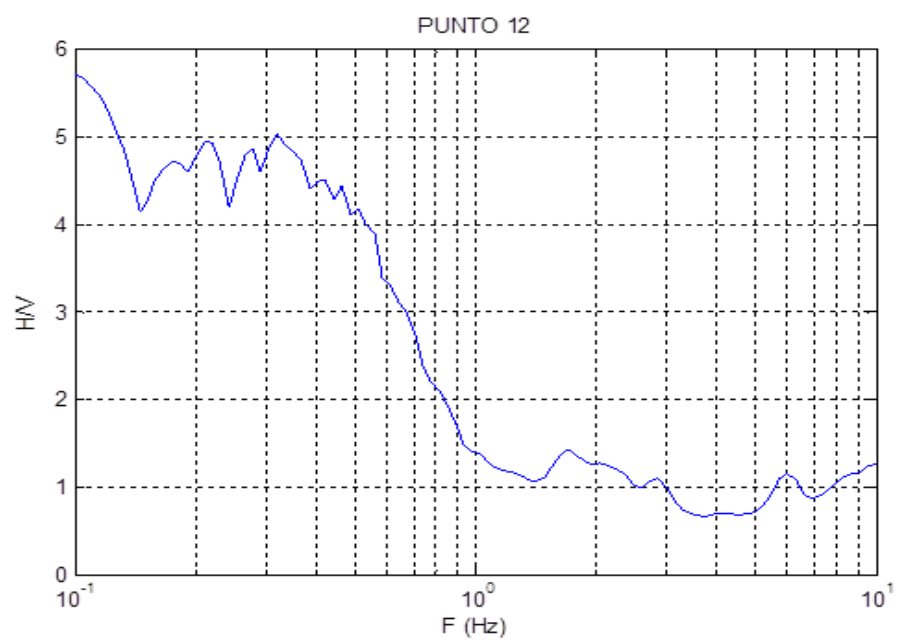


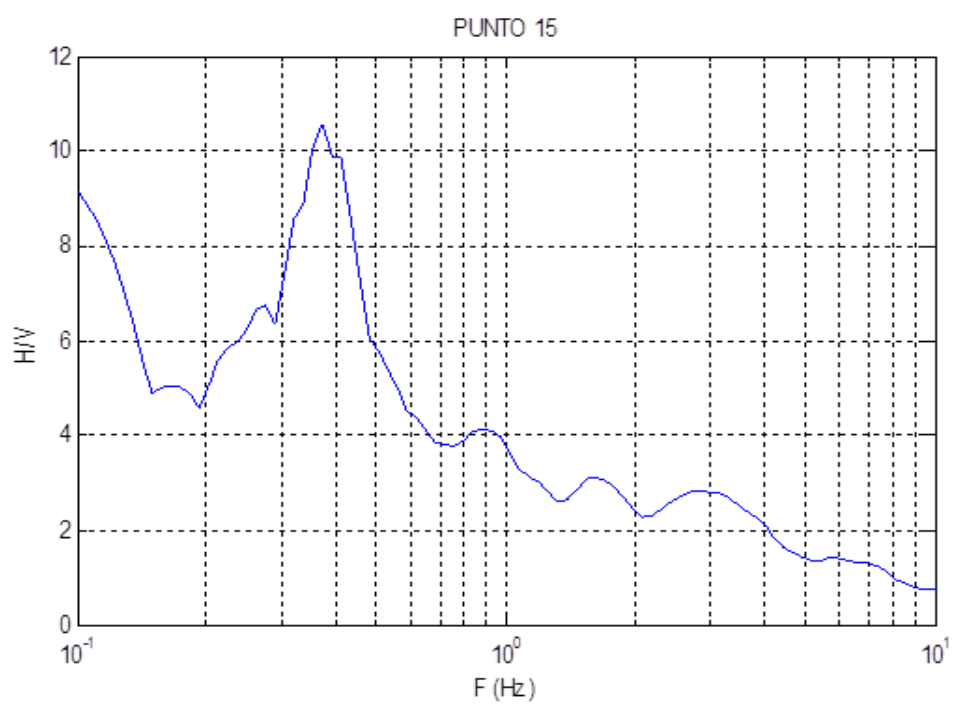
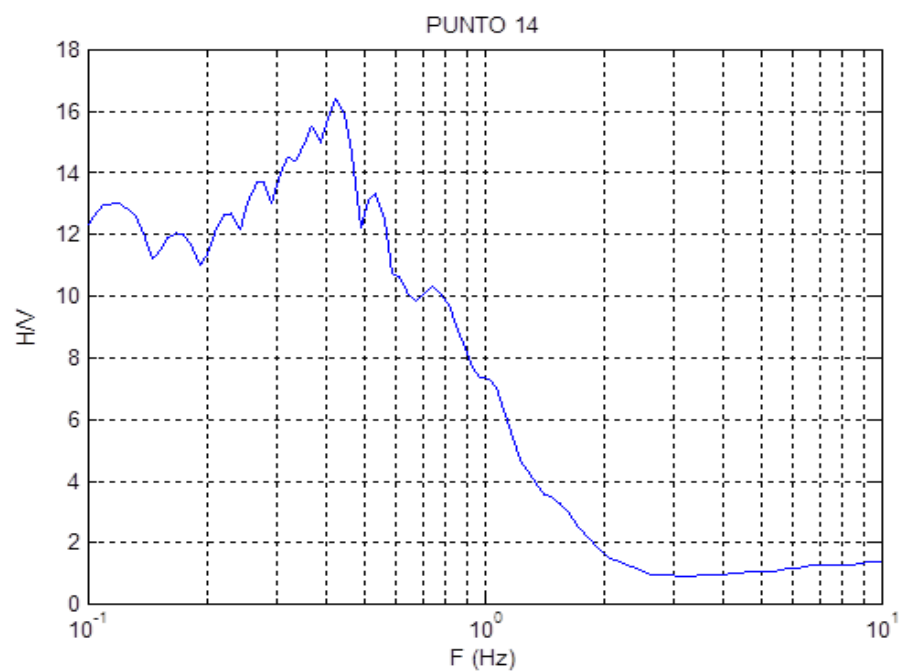


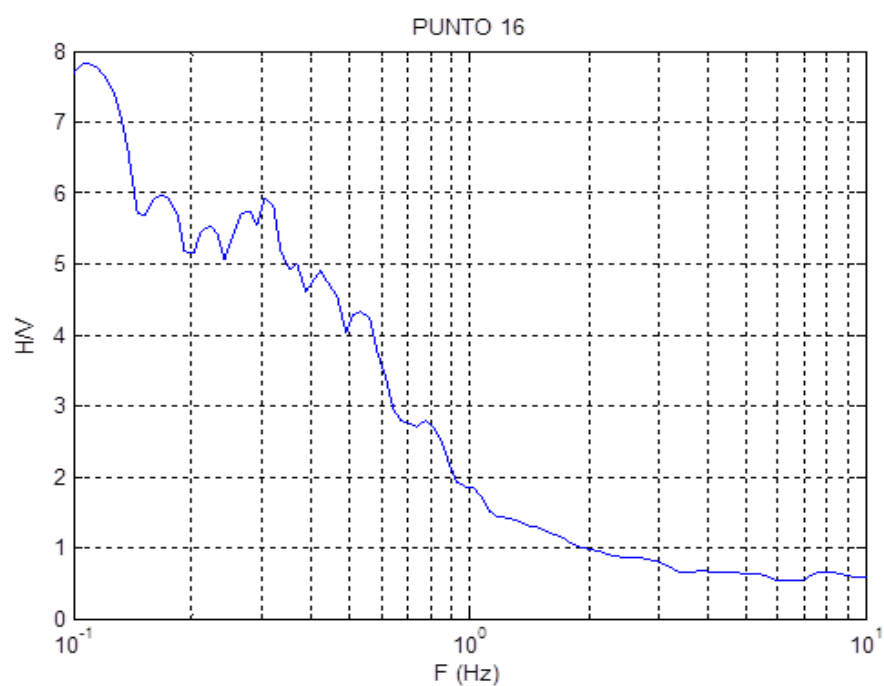
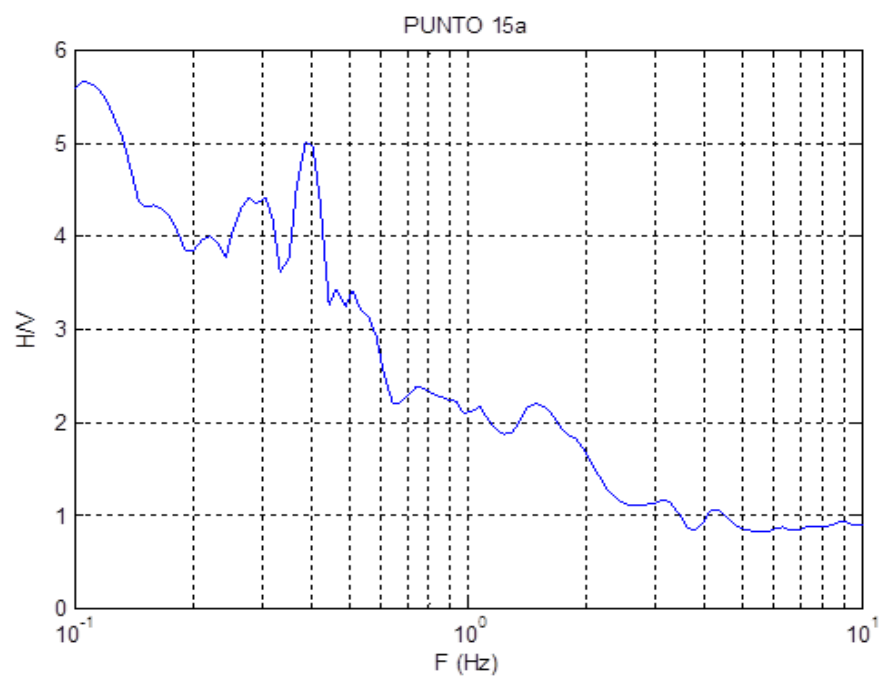


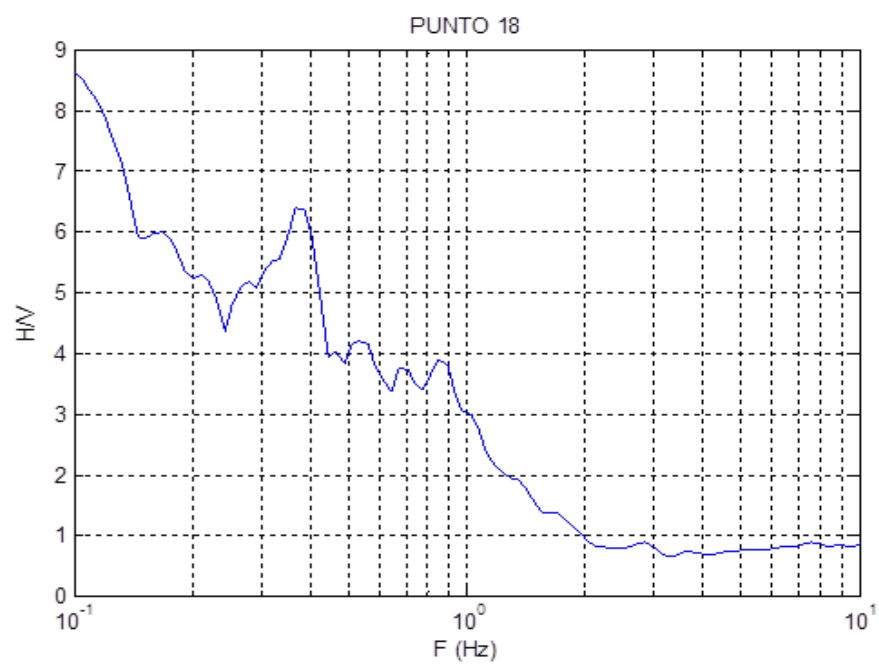
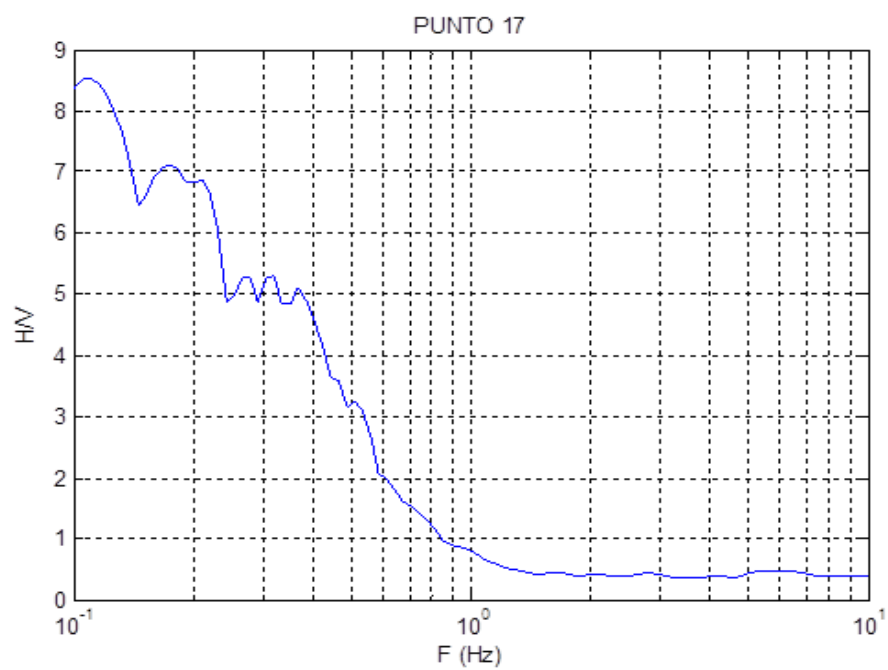


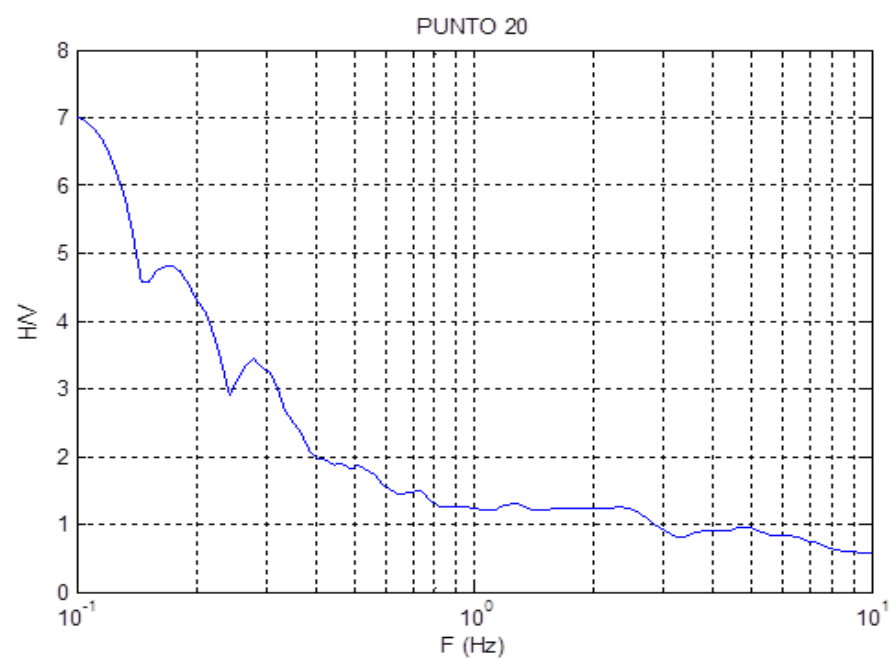
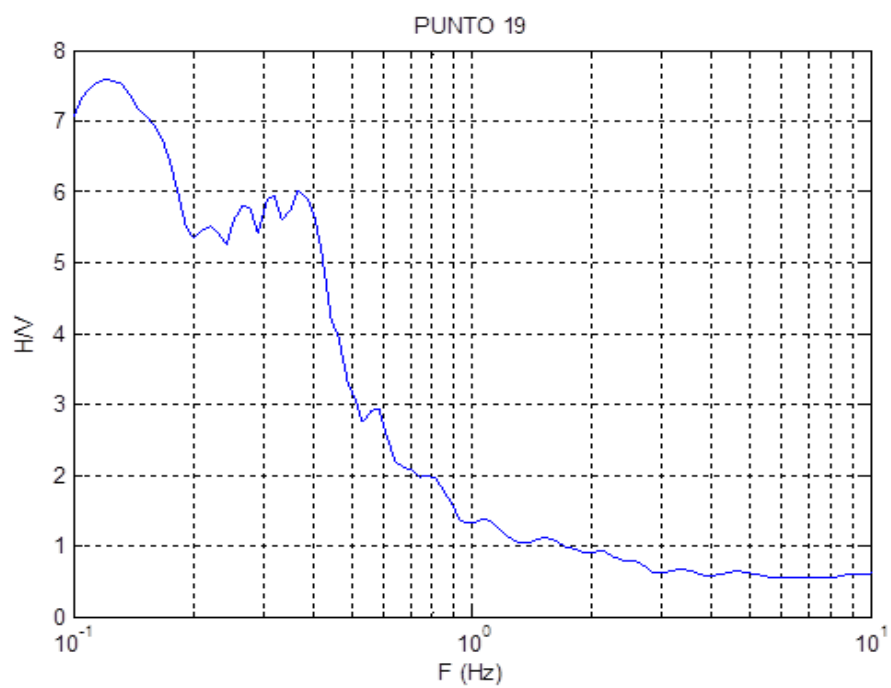


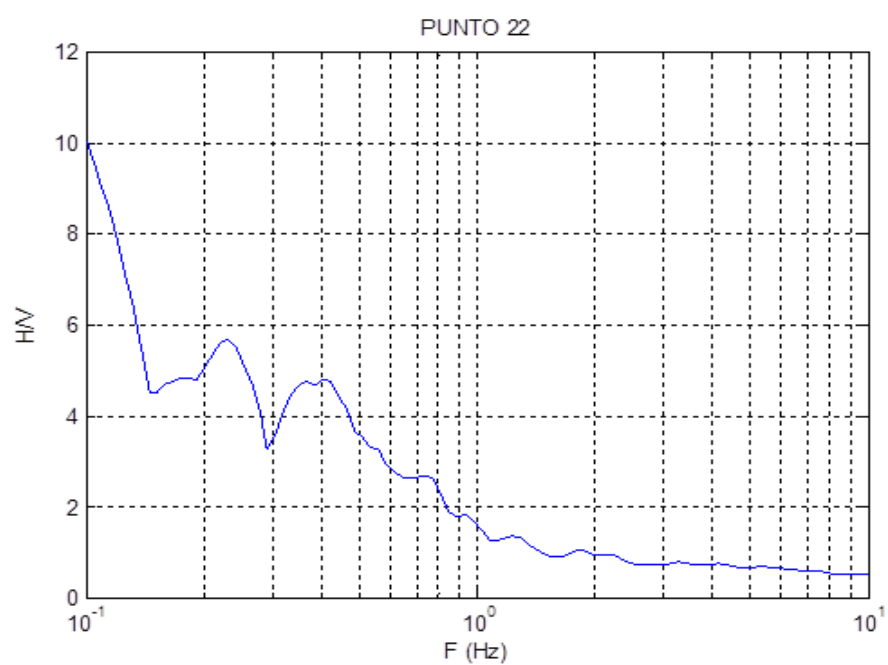
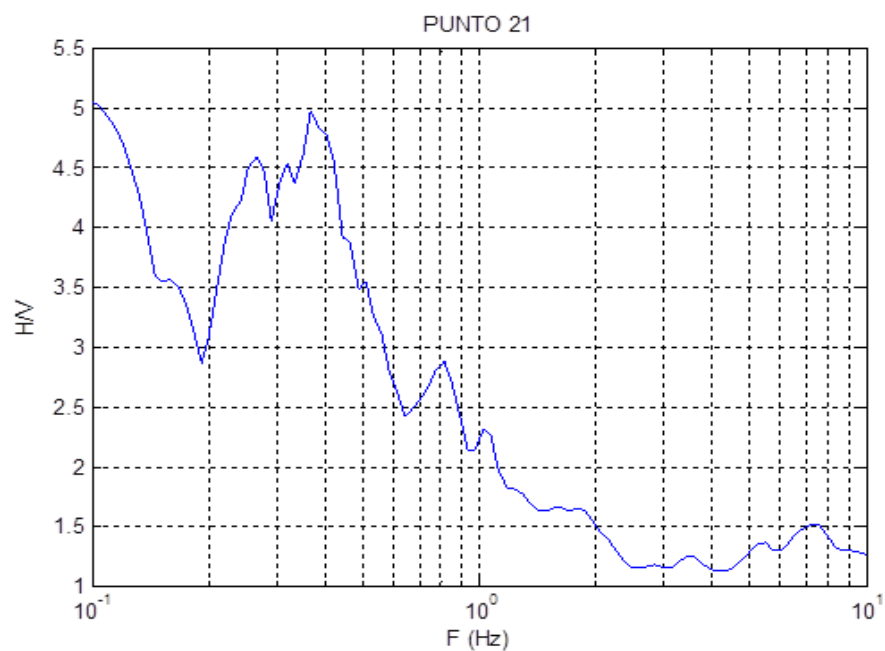


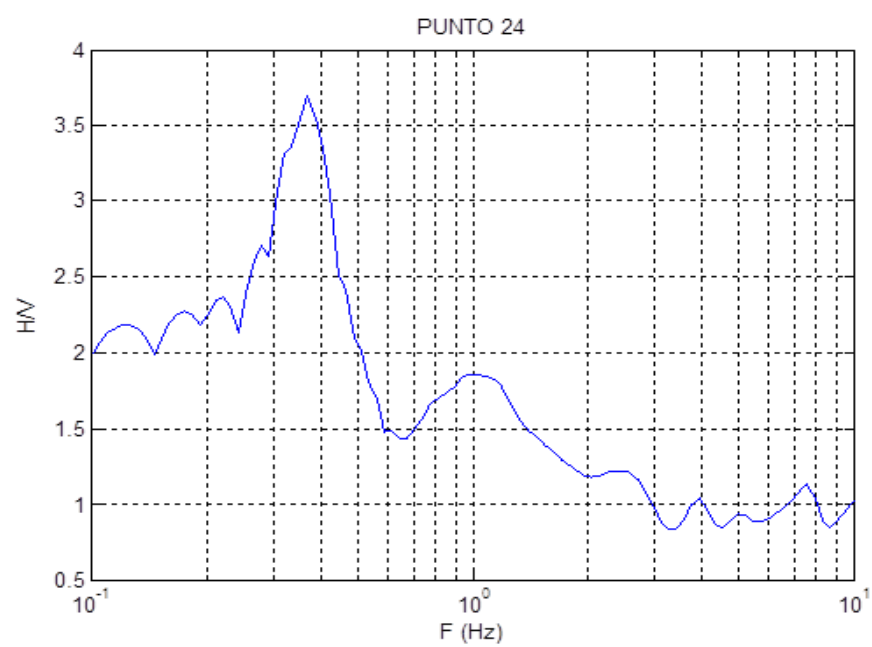
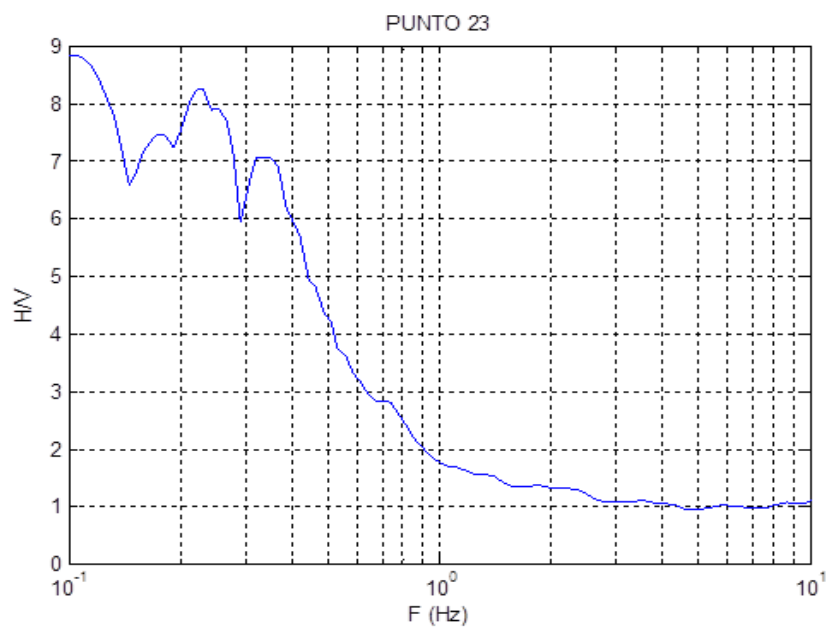


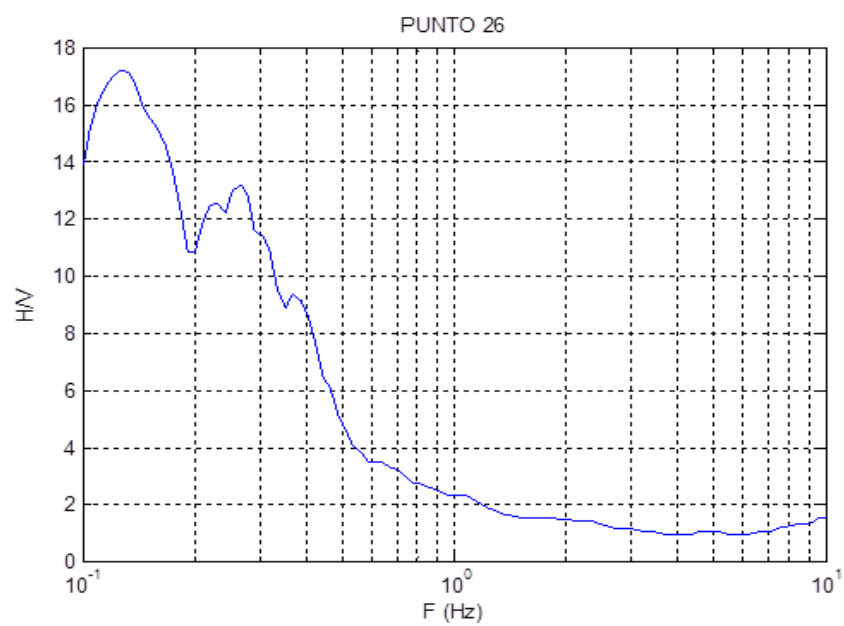
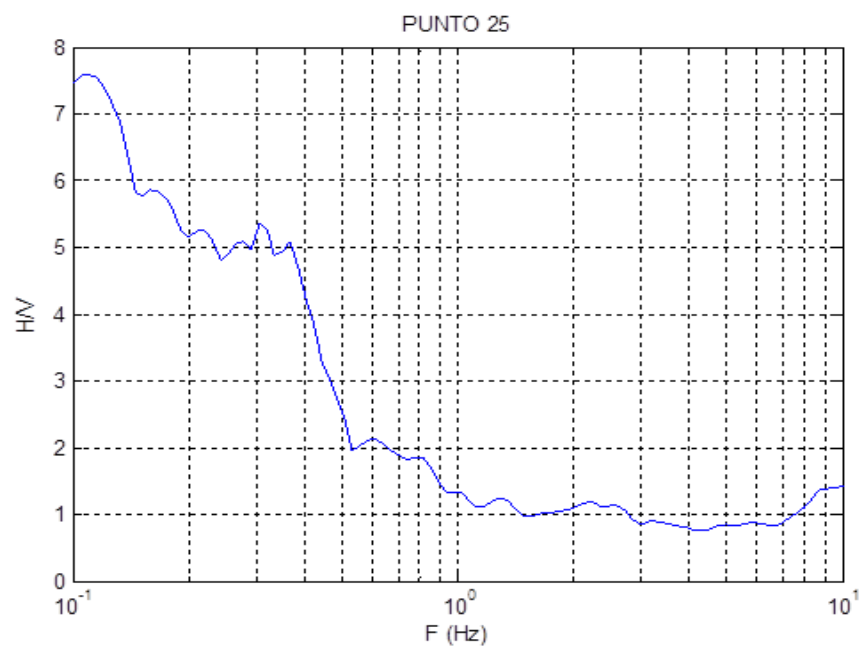


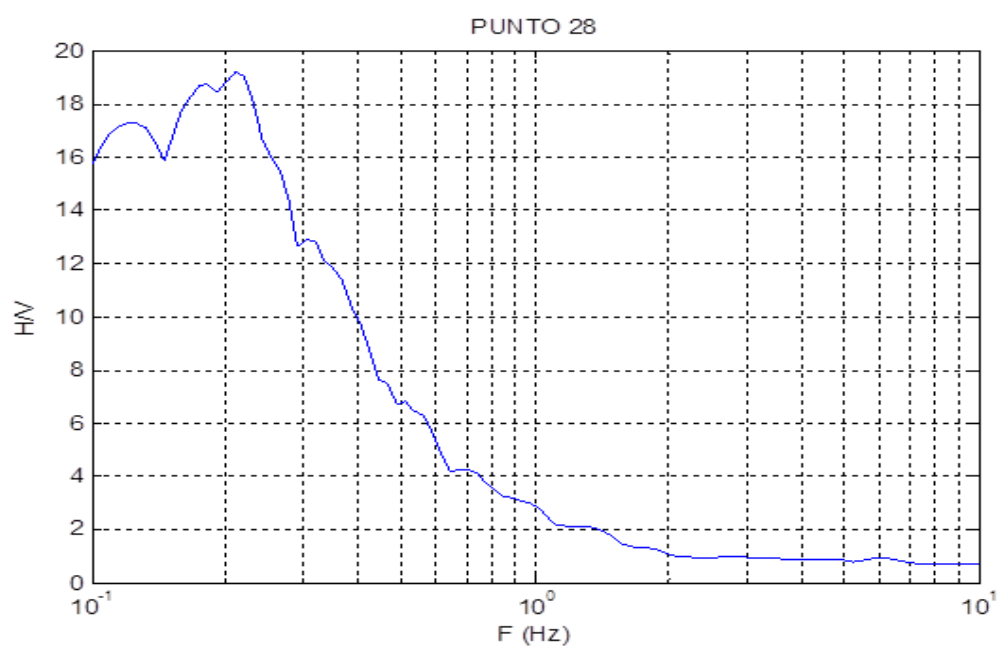
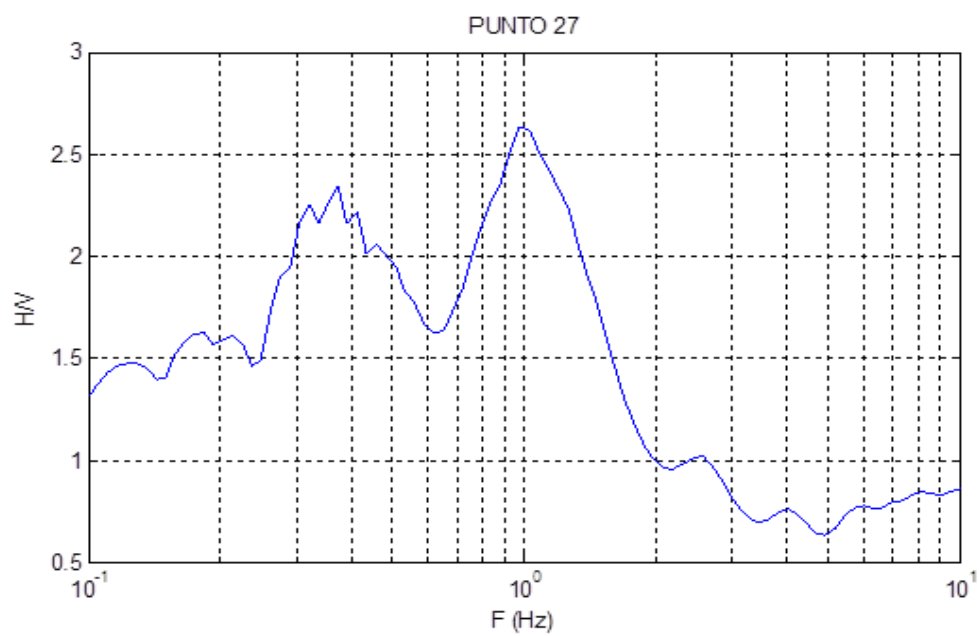


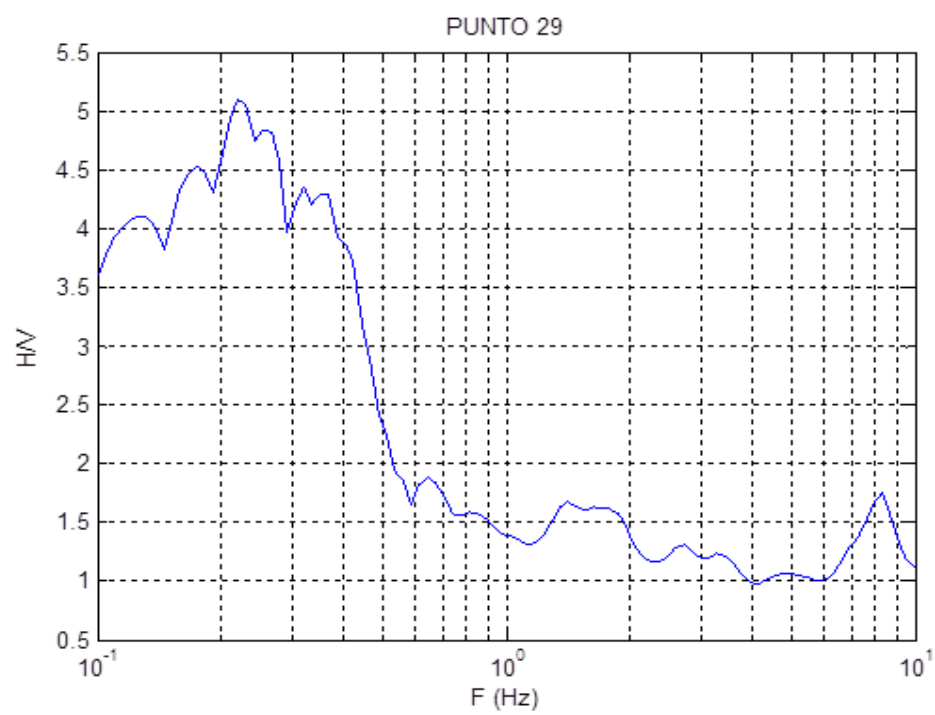












Apéndice C. Conceptos

Basin and Ranges: termino en inglés para mencionar cuencas y sierras.

Graben: Es un valle (o fosa) generado por efecto tectónico, en condiciones extensionales y está limitado por grandes fallas normales.

Horts: Es un bloque tectónico elevado con respecto a otros hundidos por efecto de la acción de grandes fallas normales.

Rifts: Valle o fosa alargada de origen tectónico, producto de una abertura de la corteza terrestre, causada a su vez por la instalación de una celda convectiva divergente a nivel astenosférico.

Semigraben: Es un fallo significativo a lo largo limitado por una falla normal.

REFERENCIAS

- Aguirre-Díaz, G.J., Zúñiga-Dávila Pacheco-Alvarado, F.R., Pacheco-Alvarado F.J., Guzmán-Spedziale M., Nieto-Obregón, J. (2000). *El graben de Querétaro, México. Observaciones de fallamiento activo*. GEOS, Vol. 20, num.1, pp. 2-7.
- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego F.J. (2005). *El sistema de fallas Taxco-San Miguel Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el cenozoico*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Grandes Fronteras Tectónicas de México, Tomo LVII, núm. 1, pp. 65-82.
- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego F.J., Reyes-Zaragoza, M.A., Orozco-Esquivel, M.T., Ojeda-García, A.C., Vassallo, L.F. (2001). *Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel Allende- Querétaro, México*. Revista Mexicana de Ciencia Geológicas, Vol. 18, núm. 2, pp. 1229-148.
- Alfaro, A., Navarro, M., Sánchez, J., Pujades, L.G. (s.f.). *Microzonificación sísmica de Barcelona utilizando el método de Nakamura, Ventajas y Limitaciones*. Memorias del Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Asociación Española de Ingeniería Sísmica. Murcia, España. Abril 12-16 de 1999, pp. 273-278.
- Angulo, J. (2013). *Microzonificación y escenarios sísmicos para la ciudad de Apizaco, Tlaxcala*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autonomía de México, pp. 19-21.
- Ansal, A., ed. (2004). *Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation*. Vol. 1. Boston: Kluwer Academic Publishers, p. 354.
- Bard, P. (2004). *Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral ratio Technique on Ambient Vibrations, measurements, processing and interpretation*. SESAME European research Project. Universidad Joseph Fourier, Grenoble, Francia.
- Bard, P. (1999). *Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? The effects of Surface Geology on seismic motion*, Vol. 3, pp.1251-1279.
- Bernal-Esquía, Y. I. (2006). *Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, México*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 14-19, 41-42.

- Campos-Enríquez, J.O., Alatríste-Vilchis, D.R., Huizar-Álvarez, R., Marines-Campos, R., Alatorre-Zamora, M.A. (2003). *Subsurface structure of the Tecocomulco sub-basin (northeastern Mexico basin), and its relationship to regional tectonics*. Geofísica Internacional, Vol. 42, núm. 1, pp. 3-24.
- Chavacán-Ávila, M.R. (2007). *Catálogo de sismicidad local para la cuenca de México*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 28-53.
- Crisafulli, F., Villafañe, E. (2002). *Guía de estudio: Espectros de respuesta y de diseño*. Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería, pp. 1-2.
- Cuadra-Monreal, P.E. (2007). *Aplicación de técnicas de vibraciones ambientales: Análisis de microtemores y vibraciones naturales, para la caracterización de sitio*. Tesis de licenciatura Simón Bolívar, Perú, pp. 8, 9, 40.
- Dávalos-Álvarez, O.G., Nieto-Samaniego, A.F., Alanís-Álvarez, S.A., Gómez-González, J.M., (2005). *Las fases de deformación cenozoica en la región de Huimalpa, Querétaro, y su relación con la sismicidad local*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 22, núm. 2, pp. 129-147.
- De Cserna, Z., Mota-Palomino, R., (1987). *Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México*. Instituto de Ingeniería, Boletín 104, pp. 1-71.
- Espinoza, F. (1999). *Determinación de las características dinámicas de estructuras*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, pp. 23-28.
- European Commission. (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation*. SESAME European research Project.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Menea, M. (2012). *The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico Subduction zone*. Tectonophysics, Vol. 522-523, pp. 122-149.
- Ferrari, L. (2000). *Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década*. Boletín de la Sociedad Mexicana, Vol. LIII, pp. 84-92.
- García-Palomo, A., Macías, J.L., Tolson, G., Valdez, G., Mora, J.C. (2002). *Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan región, east-central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt*. Geofísica Internacional, Vol. 41, núm. 2, pp. 133-150.

- Gómez-Gutiérrez, E. (2009). *Introducción al filtrado digital*. Departamento de sonología. Escuela superior de música de Cataluña, España, pp. 6-10.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., Ferrari, L. (2005). *Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Temas selectos de la geología mexicana, tomo LVII, núm. 3, pp. 227-283.
- González-Pomposo, G.J., Valdés- González, C. (1995). *Seismicity of the state of Puebla, Mexico, 1986-1989*. Geofísica Internacional, Vol. 34, núm. 2, pp.221-231
- Guerrero-García, J.C., Ortega-Gutiérrez, F. (2011). *Relaciones tectónicas regionales de la estructura geológica de la cuenca de México*. Comisión Federal de Electricidad, pp. 58-67.
- Gutiérrez, C (1999). *Mapa de intensidades sísmicas del evento del 15 de junio de 1999, Mw 7.0, Tehuacán Puebla, Memorias*. XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Morelia, Michoacán, pp. 736-743.
- Gutiérrez-Martínez, C.A. (s.f.). *Guía básica para la elaboración de Atlas estatales y municipales de peligro y riesgo*, pp.58-62.
- Grenville, D., Yanni, G. (1987). *Diccionario de términos geológicos Ingles/Español, Español/Ingles*.
- Huizar-Álvarez, R., Campos-Enríquez, J.O., Lermo-Samaniego, J., Delgado-Rodríguez, O., Huidobro-González, A. (1997). *Geophysical and hydrogeological characterization of the sub-basins of Apan and Tohac (Mexico basin)*. Geofísica Internacional, Vol. 36, núm. 4, pp. 217-233.
- Ismael-Hernández, (2014). Comunicación personal.
- Ismael-Hernández, E., Lermo, J., Sánchez-Sesma, F. (2011). *Estimación de intensidades sísmicas en la zona de Apizaco, Tlaxcala, para temblores profundos de fallamiento normal*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, pp. 1-16.
- Konno, K., Ohmachi, T. (1998). *Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ration between Horizontal and Vertical Components of Microtremor*, Bull. Seism.Soc. Am., 88:1, pp. 228-241.
- Lachet, c., Bard, P.Y. (1993). *Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique*. J. Phys. Earth, 42, pp. 337-397.

- Lermo, J., Martínez-González, J.A., Sánchez-Sesma, F.J. (2013). *Validación del factor de amplificación de los cocientes espectrales a partir de microtemores*. Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, pp. 3-8.
- Lermo-Samaniego, J., Mendoza-López, M.J., Ismael-Hernández, E., Martínez-González, J.A., Angulo-Carrillo, J., Zúñiga A.R., Espitia-Sánchez, G., Valle-Orozco, R.D., Espinosa-Villalpando, L.A. (2012). *Microzonificación sísmica de Apizaco, Tlaxcala. Estudios sismológicos y de peligro sísmico para el desarrollo de las normas tectónicas complementarias para el diseño por sismos del estado de Tlaxcala, Informe final*.
- Lermo-Samaniego, J., Bernal-Esquía, I. (2006). *Zonificación sísmica del Estado de Tlaxcala, México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, número especial de geología urbana tomo LVIII, núm. 2, pp. 215-221.
- Lermo, J., Chavez-Garcia, F.J. (1994). Are microtemors useful in site response evaluation?, Bull. Seism. Soc. Am., 83, pp. 1350-1364.
- Martínez-Reyes, J., Nieto-Samaniego, F.J. (1990). *Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología, Revista, Vol. 9, núm. 1, pp. 33-50.
- Mooser, F., Montiel, A., Zúñiga, A. (1996). *Nuevo mapa geológico de las cuencas de Mexico, Toluca y Puebla*. Subdirección de construcción. Comisión Federal de Electricidad, México, D.F.
- Moreno, A., Bonafonte, A. (2009). *Señales y sistemas I*. Departamento de Teoría de la señal y comunicaciones. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Nakamura, Y. (2008). *On the H/V spectrum*. The 14 th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Nakamura, Y. (2000). *Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications*.
- Nakamura, Y. (1989). *A method for Dynamics Characteristic Estimation of Surface Using microtemor on the ground surface*. Quarterly report of Railway Tech Res. Inst. 30, pp. 25-33.
- Nakamura, Y. (s.f.). *Characteristics of H/V spectrum*. Institute of Technology, Tokio.
- Nogoshi, M., Igarashi, T. (1971). *On the amplitude characteristics of microtemor (Part 2)*. Journal Seism. Soc. Japan, Vol. 24, pp. 26-40.

- Oppenheim, A.V., Schafer, R.W. (2011). *Tratamiento de señales en tiempo discreto*. (3 era. ed.). Editorial Pearson Educacion, S.A. Madrid, España.
- Oyarzún, J. (2009). *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas*. Universidad de La Serena, Chile.
- Quintero-Legorreta, O. (2002). *Análisis estructural de fallas potencialmente activas*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, tomo LV, núm. 1, pp. 1-11.
- Riquer-Trujillo, G., Leyva-Soberanis, R., William-Linera, F., et al. (2013). *Efectos de sitio en la ciudad de Jaltipan, Veracruz*. Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.
- Ritta, R.J., Suarez, L.E., Pando, M. (2012). *Determinación del periodo fundamental del suelo usando vibración ambiental y el cociente espectral horizontal/vertical*. Mecánica computacional, Vol. XXXI, pp.1399-1419. Artículo completo. Salta, Argentina.
- Roca, A. (1996). *Apuntes docentes del curso de instrumentación sísmica*. Doctorado en Ingeniería Sísmica y Dinámica estructural. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.
- Suter, M., Carrillo-Martínez, M., López-Martínez, M., Ferrar, E. (2012). *The Aljibes half-graben-Active extension at the boundary between the Trans-Mexican volcanic belt and the Basin and Ranges Province, Mexico*. Geological Society of America Bulletin, num. 6, pp. 627-641.
- Suter, M., Carrillo-Martínez, M., López-Martínez, M. (1995). *The Acambay graben: Active intraarc extension in the trans-mexican volcanic belt, Mexico*. Tectonics, Vol. 14, num. 5, pp. 1245-1262.
- Tsige, M., García-Flores, I. (2006). *Propuesta de clasificación geotécnica del “Efecto Sitio” (Amplificación Sísmica) de las formaciones geológicas de la región de Murcia*. Geogaceta del Departamento Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid, España.
- Valle-Orozco, R.D., (2013). *Escenarios sísmicos para la zona urbana de Zacatelco, Tlaxcala México*. Tesis de Licenciatura, UNAM, pp. 36-41.
- Vega, D., (2003). *Estimación del efecto de sitio y la vulnerabilidad sísmica en la ciudad de Acatlán, Puebla*, pp. 23-26.
- Wathelet, M. (2005). *Geopsy Project*. European project NERIES.

- Williams-Linera, F., Vargas-Colorado, A., Leyva-Soberanis, R., Trujillo, R., Lermo-Samaniego, J.F., Sanz-Molina, S., Rivera-Baizabal, R. (2013). *Determinación de las propiedades dinámicas de la fortaleza de San Juan de Ulúa*. Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.
- Yauri, C., Shelia, A. (2006). *Microtremores*. Compendio de trabajos de investigación. CNDG-Biblioteca Instituto de Geofísica del Perú, Vol. 7, pp. 43-56.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

Project Geopsy, www.geopsy.org/index.html

Servicio Sismológico Nacional, <http://www.ssn.unam.mx>

RESUMEN EN CONFERENCIAS

Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana (2014), Puerto Vallarta, México

Sesión: SISMOLOGÍA (Cartel)

Estimación de los efectos de sitio en la Ciudad de Calpulalpan, Tlaxcala.

Hernández-Díaz María Candelaria¹, Ismael-Hernández Eduardo², Martínez-González José Antonio³ Ramón-Márquez Víctor Manuel¹.

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

² Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

³Universidad Nacional Autónoma de México

La microzonificación sísmica en ciudades y municipios ha tomado gran fuerza siendo la base fundamental para la formulación de normas sismo-resistentes y/o espectros de diseño. En el Estado de Tlaxcala como en otros estados han dedicado esfuerzos para caracterizar la sismicidad local y regional en algunos municipios, entre estos trabajos se encuentran algunos realizados por Lermo-Samaniego y Bernal-Esquía (2006), cuyos trabajos permitieron la caracterización local y evaluación de los efectos de sitio en el Estado de Tlaxcala. Por otra parte, a principios de febrero de 2010 se iniciaron estudios sismológicos con el objetivo de desarrollar mapas de microzonificación sísmica en ciudades como Apizaco, Huamantla, y la capital del Estado (Ismael-Hernández *et al.* 2013), como parte de estos trabajos, se incluye el estudio para el municipio de Calpulalpan, ya que la existencia de fallas locales y regionales que se ubican dentro de la provincia geológica denominada Faja Volcánica Transmexicana, convierte al municipio en una zona de peligro, además que, con la información adquirida con la microzonificación sísmica se logra obtener el periodo fundamental del suelo y el efectos de sitio, que son útiles para establecer las normas de diseño sísmico de construcción y minimizar los daños producidos por los sismos.

Los estudios de microzonificación sísmica ayudan a determinar el periodo fundamental del suelo al ser sometidos a movimientos sísmicos, las actividades que se contemplan son campañas de vibración ambiental y como parte importante de esta campaña se contempla la elaboración de mapas llamados isoperiodos, que expresan la distribución de periodos dominantes del terreno.

La sismicidad del municipio de Calpulalpan está sometida a 2 fuentes sísmicas, la primera considera a los sismos producidos por el proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la Norteamericana (Bernal-Esquia, 2006). La segunda fuente conocida como local, abarca los sismos provocados por los diversos sistemas de fallas que se ubican dentro de la FVTM (Chavacán-Ávila, 2007). Durante 2014 se realizó una campaña de vibración ambiental cuyo objetivo consistió en desarrollar mapas de microzonificación sísmica para Calpulalpan, la cual radicó en la medición de registros de vibración ambiental en 31 sitios en el área urbana.

El desarrollo de la campaña consintió en la instalación de sismógrafos buscando cubrir el área de estudio del municipio de Calpulalpan y su posible expansión de tal forma que se formara una rejilla. Los puntos seleccionados se escogen en “campo libre”, es decir, ubicados en diferentes zonas del área tomando en cuenta la topografía, y que éstos estén alejados de tubos, tapas de alcantarillado, etc. El equipo utilizado ha sido un Sismógrafo marca Guralp Systems, modelo CMG-6TD con tres sensores triaxiales ortogonales con una respuesta en frecuencia de 1s a 100 Hz, frecuencia de muestreo de 100 muestras por segundo y un digitalizador interno de 3 canales (24bits), y un computador portátil. En cada punto se toma una medición con una duración de alrededor de 20 minutos. Para el análisis de los registros se ha propuesto 2 técnicas: Campos difusos (Sánchez-Sesma *et al.*, 2006) y el cálculo de las relaciones espectrales entre la componente horizontal y vertical conocida como la Técnica de Nakamura (Nakamura, 1989).